# Applicazioni in ambito urbano di interferometria differenziale

B. Crippa[a], M. Crosetto[b], E. Biescas[b], M. Agudo[b]
[a] Dipartimento di Scienze della Terra - Sezione di Geofisica - Università degli Studi di Milano
Via Cicognara 7 - 20129 Milano (Italy) – bruno.crippa@unimi.it
[b] Institute of Geomatics, Avda. del Canal Olímpic, s/n, E-08860 Castelldefels (Barcelona) Spain
michele.crosetto@ideg.es, erlinda.biesca@ideg.es, marta.agudo@ideg.es

**Riassunto**
Questo lavoro descrive due applicazioni del monitoraggio di deformazioni basato sulla tecnica interferometrica differenziale da immagini radar SAR (Synthetic Aperture Radar) riprese da satellite. La prima applicazione riguarda una struttura portuale, il molo principale del porto della città di Barcellona (Spagna), la seconda un gruppo di isolati costituenti abitazioni ad uso civile sempre in una zona della città di Barcellona.
Nella prima applicazione si sono misurati i movimenti del molo principale mediante una tecnica del tipo "Persistent Scatterers" chiamata "Stable Point Network (SPN)" ed implementata da Altamira Information. Questa applicazione evidenzia l'alta qualità dei risultati raggiunti nelle misure di deformazione utilizzando la tecnica SPN. La seconda applicazione utilizza l'approccio classico DInSAR su un numero ristretto (< 10) di interferogrammi differenziali e mostra, in zona urbana, la possibilità di effettuare interessanti analisi di deformazione nonostante l'esiguo numero di interferogrammi disponibili.

***Abstract***
*This paper describes two examples of deformation monitoring based on two complementary differential interferometric SAR (Synthetic Aperture Radar) techniques. The first application concerns a thin and elongated infrastructure, the main dike of the Port of Barcelona, while the second one regards a group of buildings in an urban area. In the first application, the dike was measured by using a Persistent Scatterers technique called Stable Point Network and implemented by Altamira Information. This application illustrates the high quality of the deformation estimated derived by this technique. The second application, which was measured by using a classical DInSAR approach and a small set of interferograms, shows the effectiveness of a simple analysis in an operational context.*

## 1. Introduzione

In questo lavoro sono presentati due esempi di rilievo di deformazioni misurate mediante la tecnica di interferometria differenziale SAR (Synthetic Aperture Radar). Il primo esempio riguarda una importante infrastruttura: il molo principale del porto di Barcellona (Spagna), mentre il secondo riguarda alcuni edifici della stessa città soggetti a fenomeni di subsidenza.
Dalla sua prima applicazione nel 1989 [1], DInSAR è stato utilizzato con successo nelle applicazioni che studiano fenomeni deformativi. Un'analisi delle differenti applicazioni di DInSAR è fornita in bibliografia [2], [3], [4], [5], mentre gli ultimi risultati ottenuti con dati acquisiti dai satelliti ERS e ENVISAT si possono trovare sul sito ESA eopi.esa.int/esa/esa.
Negli ultimi anni differenti compagnie private ad alto contenuto tecnologico hanno sviluppato tecniche finalizzate al rilievo e monitoraggio di deformazioni a partire da immagini satellitari ed in particolare da immagini SAR. Uno degli sforzi più importanti per commercializzare i prodotti DInSAR è rappresentato dal progetto Terrafirma ("A pan-European ground motion information service in support of policies aimed at protecting citizen against natural and anthropogenic ground motion hazards", www.terrafirma.eu.com) [15].

In letteratura scientifica l'uso di DInSAR come strumento di analisi è documentato per alcune discipline come: la geofisica (sismologia, vulcanologia, glaciologia, ecc.), geologia, geotecnica, ingegneria civile, ecc. Ambiti d'applicazione così differenti hanno portato allo sviluppo di più tecniche DInSAR che offrono differenti capacità di monitoraggio. Nel seguito saranno menzionate, senza pretesa di esaustività, le principali tecniche DInSAR.
Ricordiamo che la tecnica interferometrica SAR (InSAR) è utilizzata per la generazione di DEM ovvero come strumento di misura di altezze, mentre DInSAR è una tecnica per misurare deformazioni sull'area ripresa dall'immagine radar [3],[4],[5]. Per più di una decade i risultati DInSAR sono stati ottenuti processando un singolo interferogramma derivato da una coppia di immagini SAR acquisite sulla stessa area in epoche diverse (tipicamente con tempi di separazione da un giorno a molti anni) e da punti di vista diversi (tipicamente con distanze tra satelliti di poche centinaia di metri). Questo tipo di configurazione limita la possibilità di giungere a misure di deformazione di alta qualità. Tuttavia DInSAR si presenta flessibile e facile da implementare, e molti dei risultati pubblicati su riviste prestigiose come Nature e Science sono stati ottenuti con l'utilizzo di sole due immagini SAR (singolo interferogramma).
Al fine di aumentare la qualità delle deformazioni stimate fornite da DInSAR, negli ultimi anni sono stati proposti differenti approcci, che fondamentalmente condividono la stessa filosofia: incrementare il numero di immagini SAR, ossia il passaggio da una singola coppia di immagini a una pila (stack) di immagini della stessa area. Il passaggio da due a più immagini aumenta il numero di dati disponibili, e di conseguenza la ridondanza, portando così ad un aumento della accuratezza ed affidabilità delle stime della deformazione. In questo lavoro le tecniche di elaborazione che fanno uso di molte di immagini SAR (da decine a un centinaio) si indicano con l'acronimo A-DInSAR (Advanced DInSAR).
Nelle tecniche DInSAR si è assistito ad un incremento del livello di automazione delle elaborazioni ed analisi del dato SAR. In dipendenza dalla modalità con cui la singola osservazione DInSAR (ovvero la fase interferometrica differenziale) è selezionata per l'elaborazione, si possono distinguere due grandi classi di tecniche A-DInSAR: quelle che selezionano le osservazioni usando la coerenza, e quelle che si basano calcolando l'indice di dispersione mediante l'ampiezza. A queste ultime appartengono le tecniche chiamate Persistent Scatterers (PS). Esempio di tecniche basate sulla coerenza sono descritte in [6],[7],[8],[9]. Esempi di tecniche basate sui Persistent Scatterers sono la tecnica dei Permanent Scatterers [10],[11], la tecnica Stable Point Network (SPN) [12],[13], e la Point Target Analysis [14]. In questo lavoro saranno descritti due esempi basati sulle tecniche A-DInSAR e SPN:

- il monitoraggio del molo principale del porto di Barcellona (Spagna), una delle più importanti infrastrutture portuali della città. Il monitoraggio è stato realizzato con la tecnica SPN, basata sui Persistent Scatterers.
- la misura di deformazione di un piccolo gruppo di edifici, ricavata mediante l'approccio A-DInSAR basato sull'uso di poche immagini SAR (<10).

## 1. Deformazione del molo principale del porto di Barcellona

La SPN è una tecnica PS sviluppata ed implementata da Altamira Information[1] [12],[13]. I risultati descritti in questo lavoro sono stati ottenuti nell'ambito di un progetto ESA (European Space Agency) chiamato: "Development of algorithms for the exploitation of ERS-Envisat using the Stable Points Network". Un'analisi SPN fornisce come prodotti principali: la mappa della deformazione media (che contiene la velocità di deformazione lineare stimata nel periodo d'osservazione), la serie temporale di deformazione per ogni Persistent Scatterers trovato, ovvero la stima della deformazione in corrispondenza delle date d'acquisizione delle immagini SAR, ed infine il residuo topografico, ovvero la differenza tra il DEM usato nelle elaborazioni dei dati SAR e la quota dello scatterers, che può essere stimata con precisione dell'ordine di pochi metri.

[1] Compagnia specializzata in applicazioni radar e di telerilevamento in generale (www.altamira-information.com).

Il set di dati utilizzato è formato da 49 immagini ERS acquisite sulla città di Barcellona nel periodo compreso tra aprile 1995 e dicembre 2000. L'alta ridondanza nei dati è l'elemento fondamentale per arrivare a stime di deformazione di alta qualità; inoltre nel set di dati non sono state incluse le immagini che presentano valori di frequenza Doppler troppo elevati dovuti a guasti al sistema di controllo del satellite ERS2.
L'analisi si è concentrata su una importante infrastruttura portuale affetta da fenomeni di subsidenza, monitorata nel tempo con livellazioni di alta precisione dall'Ufficio Tecnico del Porto. L'analisi con la tecnica SPN ha identificato quattro Persistent Scatterers sulla infrastruttura in esame, che presentano un elevato valore di coerenza temporale. In figura 1a sono riportate le posizioni dei punti selezionati. I punti selezionati sono prossimi ai caposaldi di livellazione utilizzati come riferimento per la validazione delle misure DInSAR. Sfruttando le informazioni a-priori della deformazione (si tratta di una subsidenza, ossia di deformazioni verticali) le misure A-DInSAR lungo la LOS[2] sono state proiettate lungo la direzione verticale. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori ottenuti dalle livellazioni: in figura 1c sono riportati i comportamenti temporali dei quattro punti rispetto al caposaldo di livellazione utilizzato per la validazione. Nonostante il differente periodo d'osservazione (dall'aprile 1995 al dicembre 2000 per le immagini ERS, e dal febbraio 1995 al luglio 2002 per il caposaldo di livellazione), c'è un buon accordo tra le stime effettuate mediante SPN e i valori del caposaldo di riferimento; a verifica di questo si nota una differenza massima di velocità pari a 1.1 mm/anno. Questi buoni risultati sono dovuti principalmente a due fattori: l'alta ridondanza dei dati disponibili (49 immagini) e l'ottima qualità delle misure di fase nei punti selezionati.

## 2. Deformazioni su edifici in ambito urbano

La seconda applicazione differisce dalla precedente per il comportamento della deformazione, che in questo caso è concentrata nel tempo, e dalla tecnica utilizzata per misurarla. Infatti in questo esempio è stata usata la tecnica classica DInSAR basata su poche coppie di interferogrammi, tale scelta è dovuta al numero limitato di immagini disponibili nell'arco temporale osservato che impedisce l'utilizzo di metodi più avanzati ed affidabili.
Lo studio è stato effettuato su una piccola area urbana, dopo che evidenti segnali di danneggiamento sulle strutture di alcuni edifici (crepe nei muri e nelle strutture portanti) sono stati rilevati a metà del 2004. Da sottolineare che nella zona erano in corso lavori per la costruzione di una linea di trasporto pubblico sotterraneo posta a 55-65 m sotto il livello stradale. Vista la profondità dello scavo i progettisti non prevedevano deformazioni così forti nella zona interessata ai lavori. L'autorità cittadina ha deciso di finanziare uno studio per evidenziare eventuali correlazioni tra i lavori della metropolitana e i danneggiamenti subiti da alcuni edifici urbani. Poiché non era stato previsto un monitoraggio delle deformazioni con tecniche classiche (livellazione di alta precisione) si è deciso di sfruttare la capacità di DInSAR di misurare "nel passato" la deformazione, grazie alle immagini SAR riprese ad intervalli regolari dai satelliti ERS2 ed ENVISAT e disponibili negli archivi ESA.
Per questo studio sono state impiegate 10 immagini ENVISAT acquisite con sensore ASAR, ricoprenti un periodo temporale dal luglio 2003 al gennaio 2005. Inoltre altre 21 immagini ERS sono state impiegate per studiare, sempre sulla stessa area, eventuali processi deformativi presenti nel periodo 1995-2000, periodo antecedente all'inizio dei lavori di scavo. Si noti l'enorme potenzialità del metodo DInSAR per quanto concerne l'aspetto temporale rispetto ad altre tecniche di monitoraggio di deformazioni. L'analisi sulle 21 immagini ERS non ha evidenziato nessun tipo di deformazione sull'area di studio nel periodo 1995-2000.

[2] Line of Sight: linea di vista del satellite; la deformazione rilevata è riferita a questa direzione, che nel caso dei satelliti ERS e ENVISAT si ha un angolo di 23° rispetto alla verticale.

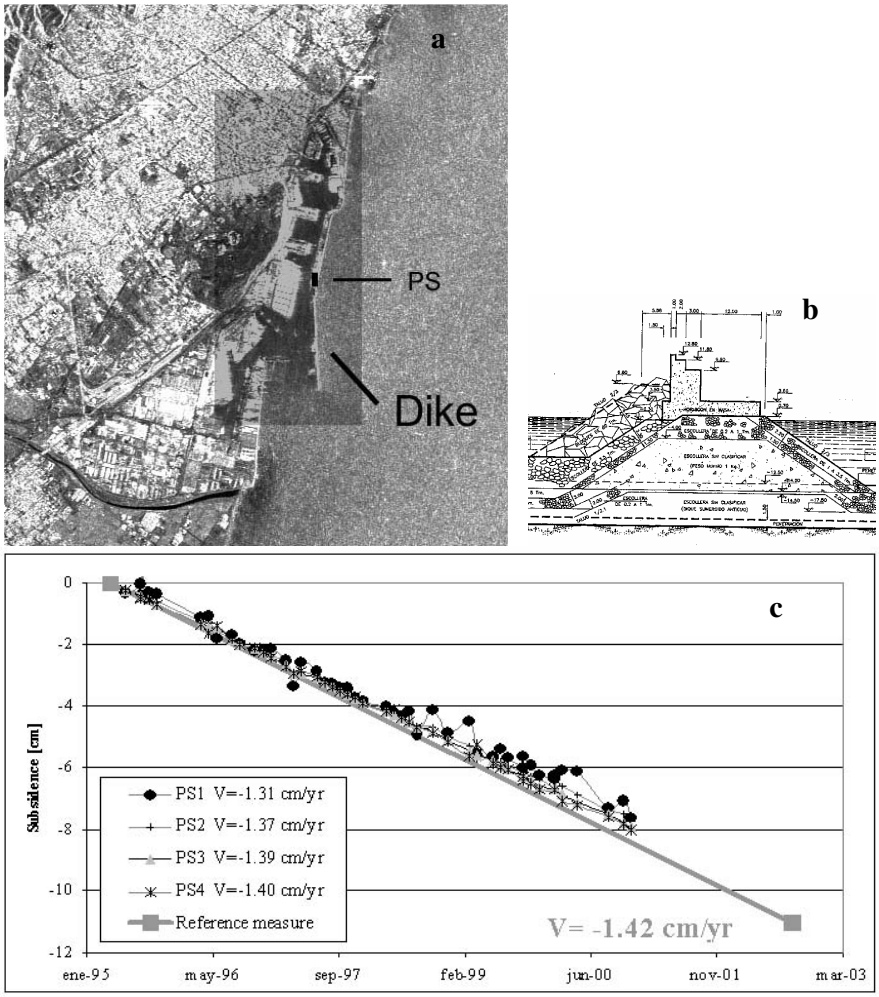


Figura 1: porzione di immagine SAR di ampiezza della città di Barcellona, con la posizione del porto principale e dei Persistent Scatterers trovati (1a); sezione del molo (1b); profili del comportamento temporale dei quattro punti misurati con la tecnica SPN, confrontati con il caposaldo di riferimento rilevato dall'Ufficio Tecnico del Porto di Barcellona (1c).

Le analisi di deformazione per il 2004 si sono basate su un insieme di interferogrammi generati a partire dalla 10 immagini ENVISAT disponibili sulla zona. Una semplice ispezione visiva degli interferogrammi differenziali generati mostra una possibile deformazione nell'area in esame. In figura 2 è riportata una porzione di interferogramma che copre un arco temporale di 105 giorni. Nonostante la presenza evidente di rumore, in questo interferogramma sono ben visibili due aree di circa 60x80 $m^2$ in cui i valori di deformazione sono estremamente elevati. Inoltre vi è da sottolineare che nella fase differenziale oltre al rumore si somma l'effetto del residuo topografico mentre gli effetti atmosferici a questa scala sono trascurabili.

Dopo il rilievo della deformazione, è stata effettuata un'analisi temporale con l'obiettivo di stimare l'inizio temporale dei fenomeni deformativi. Questo tipo di analisi, che chiaramente richiede più di un singolo interferogramma, è di fondamentale importanza per evidenziare correlazioni tra la deformazione (effetto) e la causa che l'ha generata. In questo specifico caso per la committenza è di fondamentale importanza stabilire eventuali correlazioni tra i lavori di scavo e la comparsa di fenomeni deformativi sull'edificato.

L'inizio della deformazione è stato stimato utilizzando sei interferogrammi in cui la copertura temporale e la deformazione media riscontrata sulla zone di studio sono riportate in figura 3a. Si noti che c'è un interferogramma che non presenta deformazioni.

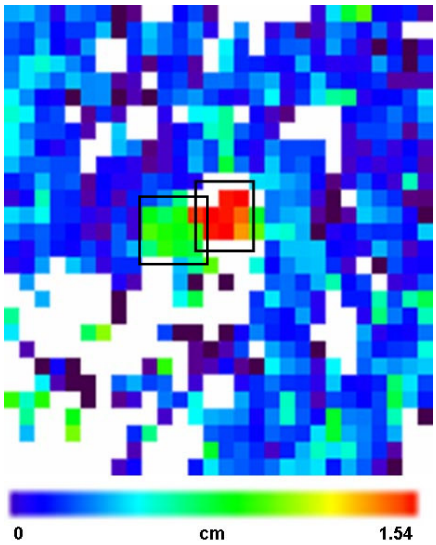


Figura 2: Deformazione su edifici in ambito urbano. Porzione di interferogramma differenziale sopra l'area di studio, ricoprente un intervallo temporale di 105 giorni. Nonostante la presenza di rumore e del residuo topografico sono ben evidenti due aree, evidenziate da rettangoli neri, in cui sono presenti alti valori di deformazione. La deformazione massima misurata è di circa1.5 cm.

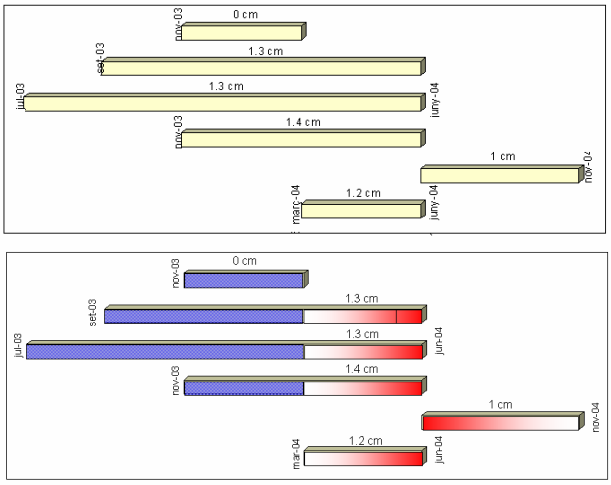


Figura 3: deformazioni su edifici in ambito urbano. Analisi temporale della deformazione con l'utilizzo di sei interferogrammi differenziali: valori medi della deformazione stimata su gli intervalli temporali associate agli interferogrammi (3a); interpretazione dei risultati ottenuti (3b), con presunto periodo di inizio della deformazione (marzo e giugno 2004).

In figura 3b sono mostrati i risultati finali dell'analisi temporale della deformazione ottenuti interpretando i risultati di figura 3a: risultato principale di questa analisi è che la deformazione è iniziata tra marzo e giugno 2004.

Un ulteriore risultato è stato ottenuto estendendo l'area di studio. Effettuata questa operazione si sono notate altre due aree, riportate in figura 4, che presentano comportamenti simili all'area interessata ai lavori di scavo per la metropolitana. In entrambe le aree durante il periodo di osservazione erano in corso lavori per la costruzione della metropolitana. É da sottolineare che la deformazione in queste aree era completamente sconosciuta agli autori. Per la committenza questo ha costituito un importante fattore di validazione della bontà dei risultati dell'analisi effettuata.

.

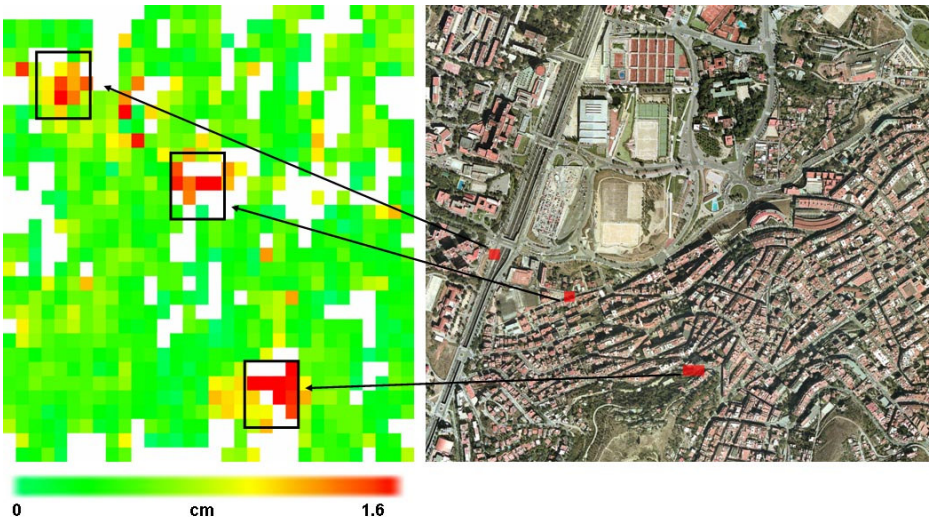


Figura 4: deformazione su edifici in ambito urbano. L'area di studio corrisponde al rettangolo nero nella parte in basso dell'immagine. L'estensione dell'area di studio ha portato alla scoperta di altre due aree con processi deformativi simili all'aera investigata. Le deformazioni evidenziate sono in corrispondenza dei lavori di costruzione di stazioni per la nuova linea metropolitana. Da sottolineare che su tali aree gli autori non avevano nessuna informazione a-priori.

## Conclusioni

Due applicazioni basate su due differenti modalità di elaborazione e analisi di dati DInSAR sono state presentate. La prima é inerente alla deformazione del molo principale del porto di Barcellona, misurata con una tecnica Persistent Scatterers denominata Stable Point Network ed implementata da Altamira Information. La seconda applicazione riguardante un'area ristretta di edificato in ambito urbano, dove lavori di scavo per la realizzazione di una linea di metropolitana ha molto probabilmente innescato fenomeni di subsidenza; in questo caso si è impiegato DInSAR classico su un numero limitato di interferogrammi.

I risultati ottenuti sul molo di Barcellona rappresentano un buon esempio della capacità della tecnica ADInSAR per il monitoraggio, su lunghi periodi temporali, di processi deformativi a bassa e bassissima velocità. Disponendo di un numeroso insieme di immagini (in questo caso 49) si ottengono misure di deformazione con alta affidabilità. In questo caso la struttura investigata é di dimensioni ridotte se comparata con la risoluzione delle immagini SAR. Tuttavia le discrepanze tra i risultati ottenuti con tecniche classiche (livellazione di alta precisione) e tecniche ADInSAR sono al massimo di 1 mm/anno. Di non secondaria importanza è la gestione e l'elaborazione di molte decine di immagini SAR. La tecnica DInSAR classica rappresenta una alternativa quando si hanno a disposizione un numero ristretto di immagini e contemporaneamente la deformazione ha un'alta magnitudo (da uno a qualche centimetro nell'intervallo temporale considerato). Dalle due applicazioni presentate si sottolinea la capacità delle tecniche DInSAR e ADInSAR di descrivere l'evoluzione temporale con una capacità di analisi "retroattiva" della deformazione stessa. Questa proprietà gioca un ruolo fondamentale in molte applicazioni dove l'oggetto dell'indagine è la determinazione di legami correlative tra effetto (deformazione) e causa.

## Bibliografia


[1] Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A.: Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. J Geophys Res, 94 (B7), pp. 9183-9191, 1989.

[2] Massonnet, D., Feigl, K.L.: Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 36 (4), pp. 441-500, 1998..

[3] Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E., Goldstein, R.M.: Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proc. of the IEEE, 88 (3), pp. 333-382, 2000.

[4] Hanssen, R.: Radar interferometry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands), 2001.

[5] Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O., Agudo, M. and Fernández, P.: Land deformation monitoring using SAR interferometry: state-of-the-art, Photogrammetrie Fernerkundung und Geoinformation, 6: 497-510, 2005..

[6] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E.: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (11):2375-2383, 2002.

[7] Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E.: A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. IEEE T Geosci Remote, 42 (7), pp. 1377-1386, 2004.

[8] Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A.: Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 41 (10):2243 –2253, 2003.

[9] Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E.: Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. Eng Geol, 79 (1-2), pp. 81-91, 2005.

[10] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE T Geosci Remote, 38 (5), pp. 2202-2212, 2000.

[11] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE T Geosci Remote, 39 (1), pp. 8-20, 2001.

[12] Arnaud, A., Adam, N., Hanssen, R., Inglada, J., Duro, J., Closa, J. and Eineder, M.: ASAR ERS interferometric phase continuity, Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., 21-25 July 2003, Toulouse (France), CDROM, 2003.

[13] Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N., Arnaud, A.: High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. Fringe 2003, 1-5 December 2003, Frascati (Italy), 2003.

[14] Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., and Wiesmann, A.: Interferometric point target analysis for deformation mapping, *Proceedings of IGARSS 2003*, 7:4362-4364, 2003.

[15] Crosetto M., Biescas E., Duro J., Closa J., Arnaud A.: Quality assessment of advanced interferometric products based on time series of ERS and Envisat SAR data. Phot. Engineering and Remote Sensing, 2006, in press.