

# POSSIBILE UTILIZZO DI DATI RADAR SATELLITARI PER INDIVIDUAZIONE E MONITORAGGIO DI FENOMENI DI SINKHOLES

**FERRETTI ALESSANDRO \***, **BASILICO MARCO \***, **NOVALI FABRIZIO \***, **PRATI CLAUDIO \*\***

\*Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l.

\*\*Dipartimento di Elettronica e Informazione – Politecnico di Milano

## INTRODUZIONE

La Tecnica dei Diffusori Permanenti (Permanent Scatterers Technique) è stata sviluppata e brevettata presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano (brevetto n. MI99A001154 del 25/5/1999) e costituisce un miglioramento sostanziale e ben collaudato delle tecniche classiche di interferometria satellitare SAR. La Società Tele-Rilevamento Europa – TRE S.r.l, primo spin-off del Politecnico di Milano, detiene oggi l'esclusiva dei diritti di applicazione della tecnica.

La tecnologia PS è uno strumento estremamente efficace per il monitoraggio, con precisione millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari (in particolare, dati dei satelliti ERS-1/2 dell'ESA (vedi Fig. 1 A) e del satellite RADARSAT del CSA).

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 (diffusione, scattering). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione (vedi Fig. 1 B e C).

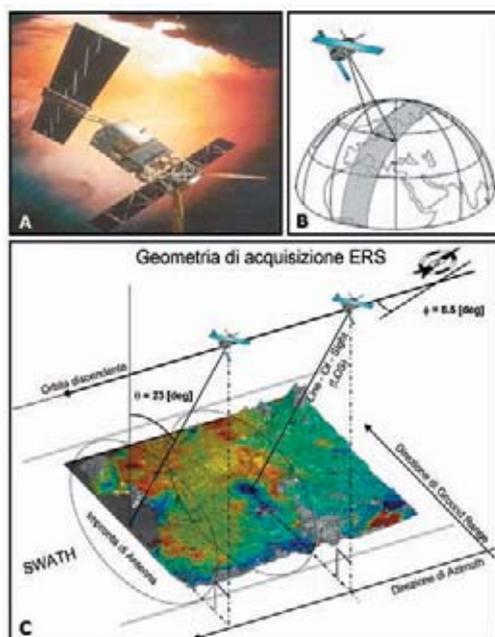


Fig. 1 - Il satellite ERS. Geometria di acquisizione

Quanto più grande è l'antenna, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Un modo per ottenere un'antenna equivalente di grandi dimensioni si realizza attraverso la tecnologia SAR (Synthetic Aperture Radar), nella quale si sfrutta l'eventuale moto del sensore rispetto al bersaglio [R1][R2]. Le tecniche SAR interferometriche sfruttano il legame tra la fase del treno d'onda illuminante e la distanza dal target, per evidenziare eventuali spostamenti tra due riprese successive (vedi Fig. 2). La precisione delle misure è funzione della lunghezza d'onda, che nel caso dei sensori ESA è di pochi centimetri.

Con l'interferometria SAR tradizionale, si possono apprezzare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro solo per particolari geometrie di acquisizione. Inoltre, in genere, non è possibile eliminare gli effetti spuri dovuti all'atmosfera ed effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici. Nonostante le potenzialità teoriche dell'interferometria SAR, messe in evidenza da centinaia di pubblicazioni della comunità scientifica internazionale, la ricostruzione di mappe di deformazione della superficie terrestre con questa tecnologia satellitare non è diventata uno standard. I motivi sono proprio legati alla difficoltà intrinseche nell'approccio convenzionale.

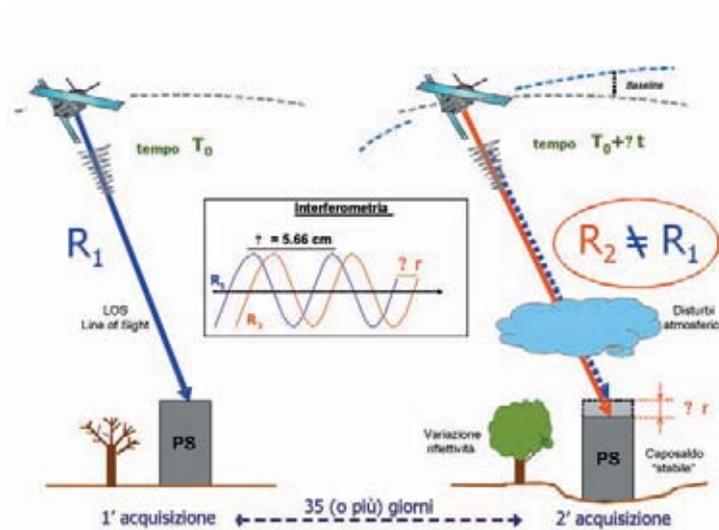


Fig. 2 - Rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un Permanent Scatterers e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR.

Il limite dell'interferometria classica alle misure di spostamento sono essenzialmente legati al problema dell'individuazione dei bersagli radar su cui si possono ottenere misure affidabili e dove risulta possibile compensare gli effetti atmosferici e topografici [R3], che sovente generano effetti difficili da distinguere dalle componenti dovute al movimento del terreno. Queste difficoltà sono state in gran parte risolte tramite la tecnica dei diffusori permanenti (Permanent Scatterers, PS), messa a punto e brevettata dal Politecnico di Milano nell'anno 1999, a seguito di oltre 15 anni di ricerca nel campo dell'interferometria. L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, mostra caratteristiche ideali per misure accurate di spostamento. Questi punti coincidono fisicamente con manufatti presenti nell'area indagata (quali antenne, tralicci, tetti, blocchi di cemento, ecc.) o possono anche corrispondere ad elementi naturali, come ad esempio rocce esposte. Per ricavare un'informazione utile è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km<sup>2</sup>), ed i moti dei bersagli radar siano sufficientemente lenti (velocità inferiori a 5-6 cm/anno) [R5][R6]. L'insieme dei PS costituisce di fatto una rete geodetica naturale utilizzabile sia per conoscere lo spostamento puntuale, sia per ricostruire, tramite tecniche di interpolazione, l'andamento globale dei movimenti superficiali.

La tecnica PS permette di spingersi ai limiti teorici previsti per applicazioni interferometriche satellitari. In corrispondenza di ogni singolo PS si ricava il trend medio di deformazione con una precisione compresa tra 0.1 e 1 mm/anno (la precisione è comunemente funzione del numero di immagini e della "qualità" del bersaglio). È poi possi-

bile ricostruire l'intera serie storica di deformazione del PS, utilizzando tutte le immagini acquisite dai satelliti ESA, e non solo un sottoinsieme di queste; la precisione arriva (per i punti migliori) a 1-2 mm su ogni singola misura.

Le informazioni ottenute da un'analisi PS possono essere utilizzate per diversi fini, in genere legati alla zonazione del territorio. Basti considerare che, in aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale dei PS raggiunge valori estremamente elevati (sino a 500 PS/km<sup>2</sup>). Possibili impieghi di questo tipo di dati sono:

- l'individuazione di aree soggette a subsidenza (sia naturale, sia a causa di prelievi di acqua, gas o idrocarburi dal sottosuolo);
- l'individuazione di aree soggette a fenomeni franosi e di instabilità di versante (in aree non troppo vegetate e per moti sufficientemente lenti);
- il monitoraggio di zone vulcaniche;
- l'analisi dei moti in prossimità di faglie sismiche;
- l'analisi di stabilità dei fabbricati (si pensi al "libretto di fabbricato") e dei beni architettonici;
- l'analisi di stabilità delle zone adiacenti a impianti sensibili (dighe, centrali, ecc.).

A titolo di esempio, nella sezione seguente, si mostrerà come la tecnica PS sia già stata utilizzata con successo sia per il monitoraggio di singoli edifici, sia su larga scala, per lo studio di grandi aree.

I dati di riferimento sono forniti dai sensori SAR montati a bordo dei satelliti ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea. ERS-1 ha acquisito dati dal 1991 al 2000. ERS-2 è operativo dal 1995. Questi satelliti ripercorrono la stessa orbita ogni 35 giorni. A differenza dei sistemi ottici, i sensori ERS-1/2 sono in grado di acquisire dati con qualsiasi condizione meteorologica e di notte.

Le immagini radar dell'area oggetto di studio sono riprese dai satelliti in due diverse condizioni di assetto: una corrispondente all'orbita ascendente e l'altra all'orbita discendente.

Proprio la ricchezza di dati disponibili nell'archivio ERS dell'ESA costituisce un ulteriore vantaggio per la tecnica PS: è possibile avviare un'analisi PS oggi, avendo a disposizione dati a partire dal 1992 e potendo, quindi, ricostruire la storia passata dell'area di interesse .



Fig. 3 - Crollo di alcuni edifici avvenuto nell'Ottobre 1995 a Camaione (PI) in località Le Funi.

I limiti relativi alla tecnica PS consistono nella possibilità di apprezzare solo le deformazione lungo la direzione di LOS (Line Of Sight, ovvero la congiungente sensore - bersaglio a terra), quindi moti quasi verticali, e nel fatto che per portare a termine con successo l'analisi PS sia necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte; aree fortemente vegetate non risultano monitorabili).

Da ultimo, fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (cioè con velocità superiori a 1 cm/mese) possono dar luogo a problemi di ambiguità e complicare notevolmente l'interpretazione. Anche con questi limiti, i dati PS possono contribuire in modo determinante alla conoscenza del territorio. Molti fenomeni geofisici, infatti, risultano compatibili con i vincoli tecnologici della tecnica PS.

## 1. ESEMPI APPLICATIVI

In questo capitolo si riportano come esempi alcuni risultati ottenuti tramite tecnica PS. Si parlerà del crollo di edifici a Camaione, dei cedimenti strutturali di alcuni edifici storici di notevole pregio architettonico, artistico e culturale, nel centro Rovigo (i risultati del processing sono stati utilizzati come prova nel corso del dibattimento giudiziario per l'attribuzione delle responsabilità penali), degli effetti dell'ampliamento di una linea di metropolitana, a Londra, e della subsidenza nella zona di Prato. L'applicazione della tecnica PS ha permesso di ricavare una notevole quantità di informazioni sui fenomeni di sprofondamento che hanno prodotto le deformazioni superficiali, in corrispondenza dei PS.

La disponibilità poi di un archivio di dati ERS ha permesso di evidenziare il legame di causa-effetto tra i fenomeni di deformazione superficiali e quello che è accaduto nel tempo. A differenza che in altre tecniche di misurazione, la presenza di uno storico consente di effettuare investigazioni a ritroso nel tempo. Si tenga anche presente il fatto che la tecnica satellitare (a differenza del leveling ottico come dei GPS) non richiede presenza di strumenti e/o personale all'interno dell'area osservata.

### 1.1 Caso Camaione: Individuazione di moti precursori.

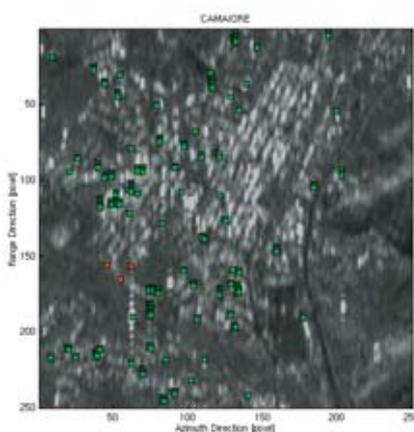


Fig. 4 - Individuazione di PS sull'area di Camaione (LU). In rosso sono evidenziati gli edifici soggetti a movimento, mentre in verde quelli che risultano essere stabili.

Nell'Ottobre del 1995 una voragine interressò l'abitato di **Camaione** (LU) in località le Funi, con conseguente crollo di alcuni edifici (si veda la Fig. 3) e il necessario abbattimento di altri, rimasti danneggiati, e il passaggio dell'area in questione al demanio come zona a rischio.

Sull'area è stato avviato un primo processing di immagini radar relative all'arco temporale 1992 – 2000. I punti in verde in Fig. 4, sono pressoché stabili. L'osservazione delle serie storiche di deformazione mostra chiaramente (si veda l'esempio di Fig.5) come questi punti non siano soggetti a movimenti apprezzabili. Analizzando in modo dettagliato le serie storiche di deformazione degli edifici interessati da

cedimento, si nota come, fino all'inizio del 1995, essi risultino fermi e poi subiscano una brusca accelerazione (moto precursore) ed infine crollino. Ovviamente dopo il crollo l'edificio cambia completamente le sue caratteristiche di riflettività e ciò si può notare nelle serie storiche di deformazione nelle misure di spostamento successive alla data del crollo.

È stato poi svolto un secondo processing, limitato all'arco temporale 1992-1996, con il quale si è cercato di verificare se era possibile prevedere il crollo, evidenziando i moti precursori. In Fig.5 sono visualizzate le serie storiche di deformazione relative a questo secondo arco temporale.

La tecnica PS è stata applicata all'area per individuare eventuali moti precursori del crollo. Sull'area sono stati individuati diversi scatteratori permanenti, alcuni dei quali risultavano essere stabili all'analisi (evidenziati in verde in Fig. 4), mentre altri, proprio sull'area interessata dal fenomeno, presentavano dei moti precursori del crollo (evidenziati in rosso in Fig. 4).

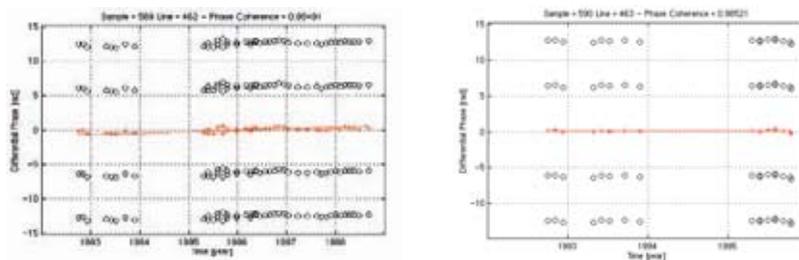


Fig.5 - Serie storiche di deformazione relative ad uno degli edifici stabili, evidenziati in verde in Fig. 4. A sinistra si ha la serie storica di deformazione ricavata utilizzando i dati nel periodo 1992-2000, a destra quella ricavata dal processing che ha considerato solo il periodo 1992-1996.

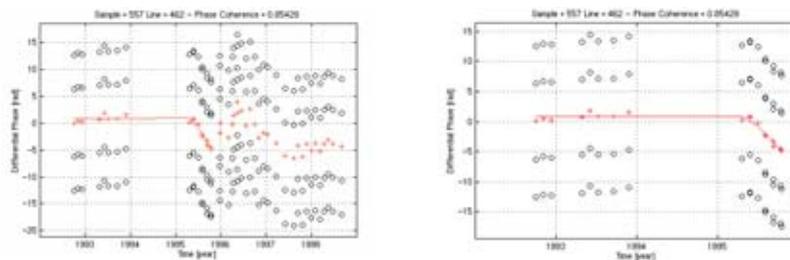


Fig.6 - Serie storiche di deformazione relative ad uno degli edifici soggetti al crollo, evidenziati in rosso in Fig. 4. A sinistra si ha la serie storica di deformazione ricavata utilizzando i dati nel periodo 1992-2000, a destra quella ricavata dal processing che ha considerato solo il periodo 1992-1996.

## 1.2. Caso Rovigo: l'efficacia probante di misure satellitari in ambito giudiziario.

Il Ministero per i Beni Ambientali e Culturali e la Soprintendenza ai Monumenti di Verona, in collaborazione con l'Avvocatura di Stato, nell'ambito del procedimento penale RG 120/00 – RGNR 214/95, ha commissionato alla Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l. un'analisi PS nel centro storico della città di Rovigo.

Nel lasso di tempo di alcuni mesi a cavallo degli anni 1994-95, si verificarono cedimenti strutturali diffusi in alcuni edifici di notevole pregio architettonico, storico e culturale (si veda la Fig. 7) del centro di Rovigo. Furono formulate diverse ipotesi sulla causa dei cedimenti. La più plausibile fu ipotizzata nelle opere di realizzazione di un parcheggio sotterraneo, da parte di impresa privata, nello stesso arco temporale.

L'esigenza di una analisi storica deriva, nel caso specifico, dalla necessità di ricostruire a posteriori una vicenda che ha coinvolto diversi soggetti sia pubblici che privati. L'Avvocatura di Stato tramite il proprio perito di parte, prof. Lorenzo Jurina, ha avallato l'utilizzo della Tecnica PS per il recupero dei dati di deformazione superficiale relativi alle zone interessate, alcuni anni dopo l'accaduto.



Fig. 7- Danni agli edifici.

Il processing è stato condotto su un'area di 42 ha (700 m x 600 m), utilizzando 105 immagini acquisite lungo le orbite ascendenti e discendenti dei satelliti ERS 1 e 2 dell'ESA, con la seguente copertura temporale:

- orbita ascendente: 28 aprile 1993 – 2 settembre 2000.
- orbita discendente: 24 aprile 1992 – 27 novembre 2000.

Sono stati individuati un totale di 145 PS (Fig. 8).

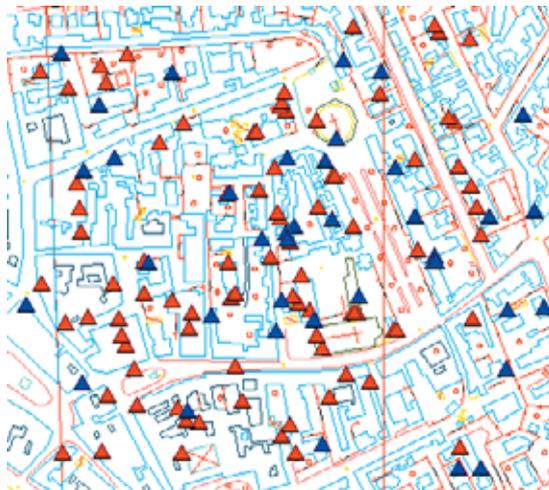


Fig. 8 - PS identificati sull'area d'interesse.

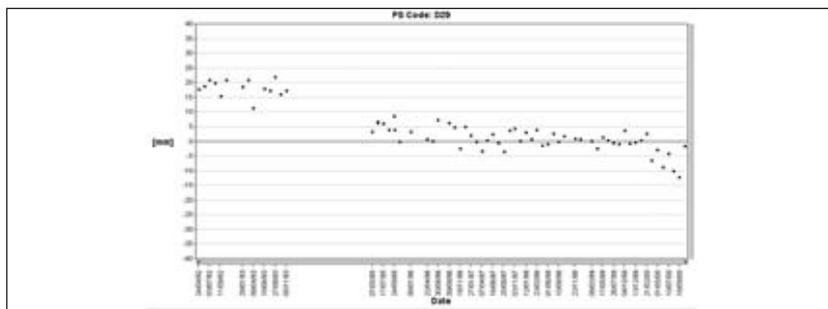


Fig. 9 - Serie storica di deformazione di un PS individuato nell'area d'interesse.

L'impiego della tecnica PS ha fornito elementi decisivi per il riconoscimento delle cause dei danni arrecati ai monumenti di Rovigo. L'accuratezza dei rilievi puntuali e aerei dei cedimenti e la disponibilità di un archivio storico di informazioni hanno avvalorato ed integrato le perizie di tipo meccanico e geotecnico, consentendo l'attribuzione dei danni osservati alle opere di scavo del parcheggio sotterraneo, a distanza di diversi anni dagli accadimenti.

Le misure di spostamento fornite dalla tecnica PS sono state interpretate grazie all'integrazione con altre informazioni, quali ad esempio l'assetto geomorfologico e idrogeologico del territorio, consentendo il passaggio dalla semplice misura alla descrizione del fenomeno fisico in atto. Enel.Hydro – Div. ISMES ha svolto questo compito di integrazione e interpretazione delle informazioni.

### 1.3. Caso Jubilee Line (Londra) – Monitoraggio di scavi sotterranei

La tecnica PS può essere impiegata anche nello studio di fenomeni di subsidenza indotti da scavi sotterranei. Il processing illustrato in questo paragrafo è stato condotto sull'area di Londra, utilizzando 32 acquisizioni ESA-ERS, dall'aprile 1995 all'agosto del 2000.

Nell'arco temporale considerato, in corrispondenza dell'area analizzata, sono stati svolti dei lavori per l'ampliamento della Jubilee Line, una delle tante linee della metropolitana londinese. I lavori in questione hanno interessato il tratto compreso tra la stazione di London Bridge e quella di Green Park

La tecnica dei diffusori permanenti, sfruttando l'archivio storico dell'ESA, ha permesso di individuare un'evidente serie di fenomeni di subsidenza proprio in corrispondenza del tracciato della metropolitana in costruzione, con rate annue superiori a 5 mm/anno. Confrontando la Fig. 10 e la Fig. 11, si può evidenziare un'ottima correlazione tra le zone in subsidenza e quelle in cui passa il tracciato della nuova linea.



Fig. 10 - Tracciato della linea Jubilee della rete metropolitana londinese.

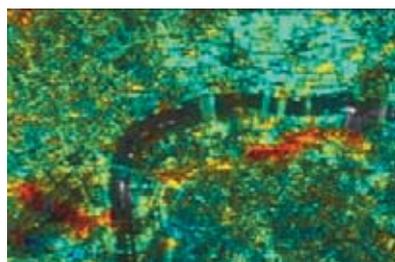


Fig. 11 - Campo di velocità. Il rosso corrisponde a velocità di compattazione superiori a 5 mm/anno.

#### 1.4 Caso Prato – Monitoraggio di aree estese

Il caso proposto in questo paragrafo dimostra come la tecnica PS risulta vincente per il monitoraggio di aree molto estese al fine di ricavare informazioni su fenomeni che interagiscono con grandi porzioni di territorio. L'area monitorata è quella della piana dell'Arno, in prossimità della città di Prato. Sono state utilizzate per l'elaborazione 87 acquisizioni ERS 1/2 dal 1992 al 2003.

La mappa di velocità (espressa in mm/anno) è visualizzata in Fig. 12. Le deformazioni stimate sono relative al punto di riferimento evidenziato con un rettangolo bianco in Fig. 12, che si suppone essere stabile. Sono state evidenziate nelle periferie della città due zone soggette a fenomeni di subsidenza rilevanti, con velocità che, in alcuni casi, risultano essere maggiori di 20 mm/anno in valore assoluto.

I fenomeni di subsidenza evidenziati sono principalmente dovuti all'abbondante prelievo idrico effettuato dalle attività industriali presenti nella zona [R7].

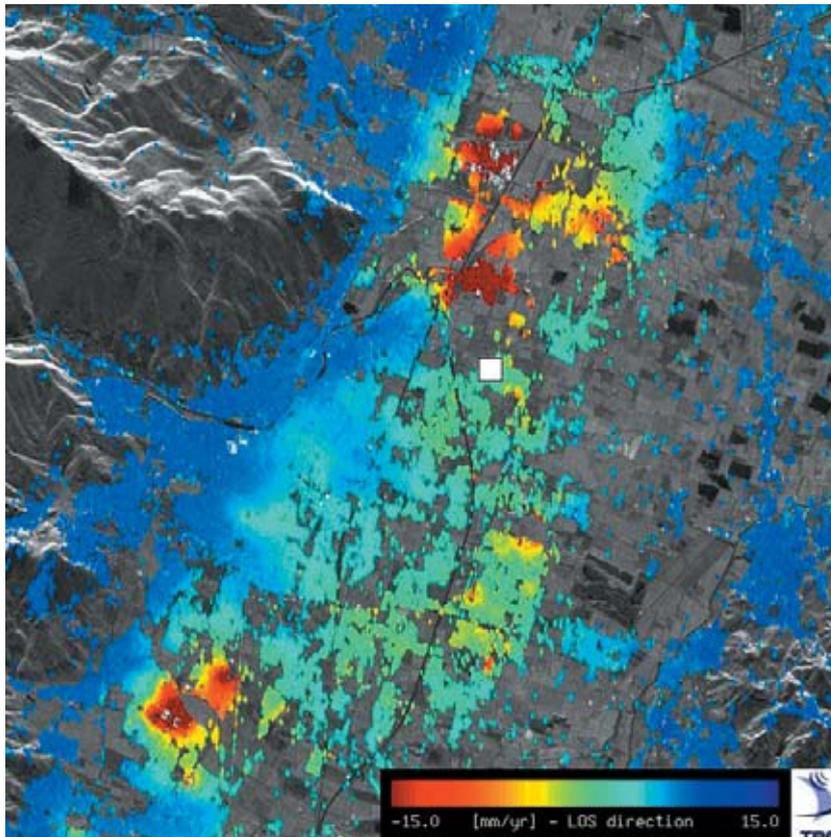


Fig. 12 - Mappa di velocità (espressa in mm/anno) della Piana di Prato.

#### CONCLUSIONI

Riportiamo qui di seguito alcune conclusioni ottenute a valle dei lavori descritti nelle sezioni precedenti:

- le misure radar satellitari, laddove è presente un archivio storico di dati (come l'Italia), costituiscono una sorgente di informazione unica per evidenziare deformazioni superficiali anche di soli pochi millimetri all'anno.

- L'analisi satellitare bene si presta a mettere in evidenza soprattutto spostamenti verticali delle aree di interesse, proprio la direzione dove l'analisi GPS ha accuratezze meno elevate.
- La densità di punti di misura (nel nostro Paese i PS dovrebbero essere circa 60 milioni) è ordini di grandezza superiore a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali (GPS e livellazione geometrica).
- L'informazione satellitare è facilmente integrabile in ambiente GIS con misure GPS e di livellazione.
- Per sua natura, non richiedendo alcun intervento a terra, i costi di analisi su aree estese (migliaia di kmq) sono enormemente inferiori rispetto alle analisi convenzionali.
- In area urbana si riesce – ad oggi - ad ottenere informazione utile relativamente al 75% circa degli edifici (3 su 4 risultano monitorabili).
- Laddove le aree sono fortemente vegetate e l'orografia è particolarmente aspra la densità di punti di misura "naturali" può essere estremamente bassa o addirittura insufficiente a comprendere la dinamica dell'area d'interesse. In questi casi, volendo comunque ricorrere alla tecnica radar, occorre materializzare dei capisaldi ponendo sul posto delle strutture metalliche ad hoc.
- L'Italia è oggi ai primi posti nel mondo per esperienza maturata sul monitoraggio da satellite delle deformazioni.

Dalle osservazioni di cui sopra si nota come l'utilizzo dei risultati della tecnica PS come nuovo layer di un più ampio strumento GIS costituisca un passo avanti significativo nell'intento di mettere a punto uno strumento integrato di monitoraggio, che possa, al tempo stesso, individuare e quantificare i movimenti in atto e fornire supporto in sede di pianificazione territoriale anche per la realizzazione di eventuali interventi.

Le misure di deformazione PS costituiscono dati vettoriali puntuali (coordinate e quota del punto di misura, trend medio di deformazione, serie temporale completa) che possono essere agevolmente sovrapposti a cartografia tecnica regionale o ortofoto consentendo di mappare i punti di misura radar sulle corrispondenti strutture.

Affiancando le misure PS a dati cartografici geologici e geomorfologici e, laddove siano disponibili, a dati acquisiti nel corso di rilievi in sito (documentazione fotografica, livellazione ottica con misure topografiche, GPS), così come dimostrato negli esempi sopra citati, sarà possibile comprendere e conoscere più approfonditamente le dinamiche dei fenomeni in atto e la loro evoluzione nel tempo nonché utilizzare tali informazioni per la calibrazione e verifica di modelli numerici dei fenomeni stessi.

#### **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.**

- [R1] WICHMANN V. (1993) - SAR Geocoding: Data and Systems. GUNTER SCHREIER (Eds.)
- [R2] CURLANDER J.C., McDONOUGH R. - Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. Wiley Series in Remote Sensing.
- [R3] HANSEN R. - Radar Interferometry. KLUWER ACADEMIC PUBLISHER.
- [R4] FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2000) - Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique. Proceeding - Sixth International Symposium on Land Subsidence - Vol. II, SISOLS2000, 67-79. Ravenna.
- [R5] FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2001) - Permanent Scatterers in SAR Interferometry. Proceeding - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing - Vol. 39, no 1.
- [R6] FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2000) - Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. Proceeding - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, no. 5.
- [R7] Colombo D., Farina P., Moretti S., Nico G., Prati C. (2003) - Land subsidence in

the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborn SAR interferometry. Proceeding - IGARSS 2003. Toulouse.

- [R8] ALLIEVI J., COLESANTI C., FERRETTI A. (2003) - Monitoraggio di deformazioni superficiali a partire da dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanent. In: "La Conservazione del paesaggio", 41-44, a cura di Simona Carnevale.
- [R9] ALLIEVI J., COLESANTI C., FERRETTI A. (2003) - Monitorare fenomeni franosi a partire da dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti. MondoGIS, Marzo/Aprile 2003, 26-30
- [R10] FERRETTI A., FRANCHIONI G., JURINA L. (2003) - Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR. Atti del Convegno - Crolli e affidabilità delle Strutture. Napoli.

### **RINGRAZIAMENTI**

Gli autori sono grati all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che ha sempre favorito lo sviluppo di questa nuova tecnologia satellitare. Si ringrazia inoltre il Prof. Fabrizio Ferrucci (Università della Calabria) per aver fornito utili indicazioni nello studio dei dati di Camaiole. Si desidera poi ringraziare il Prof. Fabio Rocca del Politecnico di Milano, tra gli inventori della Tecnica PS e capo-scuola del gruppo SAR, e tutto il personale T.R.E. il cui lavoro ha trasformato l'approccio PS in uno strumento pienamente operativo.