

Utilizzo di dati telerilevati nella mappatura e nel monitoraggio dei fenomeni franosi e nell'analisi della suscettibilità da frana

Filippo Catani¹, Davide Colombo², Paolo Farina¹, Alfio Fumagalli², Minja Kukavacic¹, Florian Marks¹, Giovanni Menduni³, Sandro Moretti¹

¹Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, via La Pira 4, 50121 Firenze, Italia. E-mail: filippo.catani@geo.unifi.it, paolo.farina@geo.unifi.it, minja.kukavacic@geo.unifi.it, florian.marks@geo.unifi.it, sandro.moretti@geo.unifi.it

²TeleRilevamento Europa, TRE, via Vittoria Colonna 7, 20149 Milano, Italia. E-mail: davide.colombo@treuropa.com, alfio.fumagalli@treuropa.com

³Autorità di Bacino del Fiume Arno, via dei Servi, 15, 50121, Firenze, Italia. E-mail: giovanni.menduni@arno.autoritadibacino.it

Remote sensing as a tool for landslide mapping, monitoring and hazard assessment

ABSTRACT: The recent advances in the optical satellites capabilities (e.g. high spatial resolution, stereoscopy), the development of new robust techniques based on the interferometric analysis of radar images, such as the Permanent Scatterers (PS) and the possibility of integrating these data within a Geographical Information System (GIS) have dramatically increased the potential of remote sensing for landslide investigations. The Arno river basin (Italy), with a spatial extension of about 9131 km², has been chosen as a test area for the presence of a relevant number of mass movements (27270 landslides have been mapped by the institutional authorities by the end of 2004) and for its significance concerning the Italian Apennine territory. The aim of the research was to integrate the inventory maps produced through traditional methods with the information derived from the Permanent Scatterers standard interferometric analysis. The spatial significance of the PS point measures (about 600000 PS for the whole Arno river basin), also in terms of geological and geomorphological interpretation, was inferred with the help of optical satellite images and aerial-photos. This approach allowed the mapping of new unstable areas or the modification of boundaries and state of activity of existing landslides. The standard PS analysis was also employed for the validation of a statistically-based susceptibility map of the Arno river basin, through the analysis of predicted susceptibility over the areas identified as new landslides by the PS analysis. An advanced PS analysis, capable of detecting the time evolution of single important mass movements, was also applied over 4 test sites. The results for the Chianciano landslide are in particular presented. The integration of the advanced analysis with on site geotechnical monitoring confirmed the inactivity of the principal landslide body but it revealed the presence of two possible minor movements.

Key terms: Landslides, Permanent Scatterers, landslide inventory map, Arno river

Termini chiave: Frane, Permanent Scatterers, carta inventario, fiume Arno

Riassunto

I recenti miglioramenti delle performance dei satelliti ottici in termini di risoluzione spaziale affiancati allo sviluppo di nuove tecniche di analisi interferometrica delle immagini radar, come i Permanent Scatterers (PS), hanno considerevolmente aumentato le potenzialità del telerilevamento nell'analisi dei fenomeni franosi.

L'utilizzo di questo di approccio ha consentito di realizzare all'interno del bacino del Fiume Arno (9.131 km²) l'aggiornamento della carta inventario delle frane a cinematismo lento già esistente (costituita da 27.270 fenomeni), attraverso l'integrazione delle misure di deformazione dei PS.

L'uso di immagini da satellite ad alta risoluzione, affiancate da foto aeree, ha permesso inoltre di dare un

significato spaziale all'informazione dei PS (dataset di circa 600.000 punti) ed ha reso possibile individuare 223 nuove aree instabili e modificare sia i limiti (350 casi) che lo stato di attività (circa un centinaio di casi) di quelle già mappate. I dati interferometrici dell'intero bacino sono stati sovrapposti alle mappe di suscettibilità, realizzate all'interno di un progetto parallelo mediante metodi statistici, e utilizzati come strumento di controllo e validazione delle stesse. Infine, a scala locale è stato condotto, attraverso l'analisi dei PS Advanced integrata con indagini in situ, il monitoraggio di quattro test site soggetti a problemi di instabilità.

1. Introduzione

Le tecniche convenzionalmente utilizzate per la mappatura

ed il monitoraggio dei fenomeni franosi possono beneficiare dei dati telerilevati, grazie alla possibilità di rapide e facilmente aggiornabili acquisizioni su vaste aree, riducendo i rilievi di campagna e, di conseguenza, i costi. Inoltre i recenti miglioramenti delle performance dei satelliti ottici, come ad esempio la risoluzione spaziale o la capacità di acquisizione stereoscopica, assieme allo sviluppo parallelo di nuove tecniche di analisi interferometrica delle immagini radar, come i Permanent Scatterers (PS), hanno considerevolmente aumentato le potenzialità del telerilevamento nell'analisi dei fenomeni franosi.

Questo tipo di approccio è alla base del progetto SLAM (Service for Landslides Monitoring) finanziato da ESA e finalizzato all'integrazione delle tecniche di telerilevamento in quelle che sono le procedure di analisi attualmente utilizzate dalle istituzioni demandate alla gestione del rischio idrogeologico.

La metodologia proposta si avvale della possibilità di fornire un significato spaziale alle misure puntuali di deformazione del terreno derivate dalla tecnica PS, attraverso l'interpretazione delle immagini ottiche (sia da piattaforma aerea che satellitare), mappe topografiche e dati ancillari; inoltre la capacità di acquisire dati su grandi estensioni di territorio unita all'alta precisione delle misure radar, permette l'applicabilità di questo metodo a scale differenti. Questo comporta, a larga scala, il vantaggio di integrare le informazioni telerilevate con i dati provenienti da tecniche tradizionali nella mappatura dei fenomeni franosi, mentre a scala locale offre l'opportunità di monitorare lo spostamento superficiale di specifiche aree in frana.

Questo lavoro presenta alcuni dei risultati ottenuti nell'applicazione di questa metodologia per l'intero bacino del fiume Arno, territorio che, con un'estensione di 9.131 km² e caratterizzato dalla presenza di più di 27.000 fenomeni franosi, costituisce un ottimo test site per la rappresentatività in termini di tipologie di frane, condizioni climatiche e assetto geologico rispetto al restante territorio appenninico.

Una parte del progetto ha riguardato l'aggiornamento della preesistente carta inventario delle frane, mentre una seconda parte ha avuto come obiettivo il monitoraggio di elevato dettaglio su alcuni fenomeni franosi conosciuti con lo scopo di valutare le variazioni nel tempo dei tassi di deformazione e l'estensione effettiva di queste aree instabili.

2. Area di studio

L'area di studio, costituita da un'estensione di 9.131 km², con un'altitudine media di 353 m s.l.m., è situata in Italia centrale, lungo l'Appennino Settentrionale (Fig. 1). I terreni affioranti appartengono principalmente alle sequenze turbiditiche calcaree ed arenacee ed alle unità argillitiche ad assetto caotico sia di origine sedimentaria che tettonica

facenti parte dell'orogene appenninico.

L'assetto geologico in combinazione con l'alta energia del rilievo dell'area e le condizioni meteorologiche, caratterizzate da intensi periodi di precipitazione concentrati durante la stagione invernale e quella primaverile, rendono l'Appennino particolarmente predisposto allo sviluppo di fenomeni franosi. In un progetto congiunto dell'Autorità di Bacino dell'Arno e del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per l'aggiornamento del P.A.I. (Piano di Assetto Idrogeologico) conclusosi all'inizio del 2005, sono state individuate e mappate sull'intero territorio 27.270 frane (Fig. 1), che coinvolgono direttamente più di migliaia di aree edificate e centinaia di chilometri di strade e ferrovie. Questi dati indicano che i movimenti di massa più frequenti, 74,5% del totale, sono rappresentati dagli scivolamenti rotazionali e planari, mentre il 19% è costituito da soliflussi e franosità diffusa, il 4,5% da colate ed il restante 2% dalle altre tipologie di frana (Catani et al., 2005). La maggior parte dei movimenti di versante, in modo particolare gli scivolamenti, sono riattivazioni di fenomeni preesistenti verificatisi in periodi climatici diversi dall'attuale. Le precipitazioni prolungate e quelle brevi ed intense, così come l'attività antropica, risultano tra i principali fattori di innesco nella riattivazione delle frane quiescenti e nello sviluppo dei fenomeni di neoformazione (Canuti et al., 1979).

Questa alta densità di movimenti di massa, unita all'alta densità di popolazione nel territorio del bacino dell'Arno, portano a condizioni di alto rischio. Più di 300 aree abitate, infatti, sono state classificate ad alto rischio di frana nelle mappe del P.A.I., in conseguenza dalla concomitante presenza di alti valori di pericolosità da frana, elevati valori degli elementi e rischio e di vulnerabilità degli stessi.

3. Dati e metodi

La metodologia adottata in questo lavoro sfrutta, per individuare i movimenti del terreno, la combinazione delle misurazioni interferometriche SAR con le osservazioni condotte su foto aeree ed immagini telerilevate ottiche. Il dato interferometrico è stato ricavato sulla base delle immagini SAR delle missioni ERS1 ed ERS2 provenienti dagli archivi ESA sia su orbite ascendenti che discendenti. In totale più di 350 scene sono state acquisite ed elaborate in modo da coprire tutto il territorio del bacino dell'Arno per il periodo che va dal 1992 al 2002.

L'impiego della tecnica Permanent Scatterers (PS) permette di superare i limiti legati agli approcci più convenzionali dell'interferometria SAR, utilizzati per l'identificazione delle deformazioni superficiali (Ferretti et al., 2000, 2001), secondo due possibili approcci. Il primo, chiamato "standard", permette il riconoscimento di capisaldi radar e la stima della media delle velocità durante il periodo di monitoraggio attraverso una procedura automatica che assume linearità negli spostamenti. Questa tecnica viene utilizzata per elaborare un numero elevato di

scene con una grande copertura territoriale in un periodo limitato di tempo. Il secondo tipo di analisi viene definita "advanced", non assume nessuna linearità nel trend di spostamento e permette di osservare la serie temporale di ogni singolo PS. Si tratta di una tecnica molto più sofisticata

che richiede dei tempi di elaborazione più lunghi e la sua applicabilità è particolarmente indicata per aree ristrette, come singole frane, dove i fenomeni devono essere investigati con estremo dettaglio.

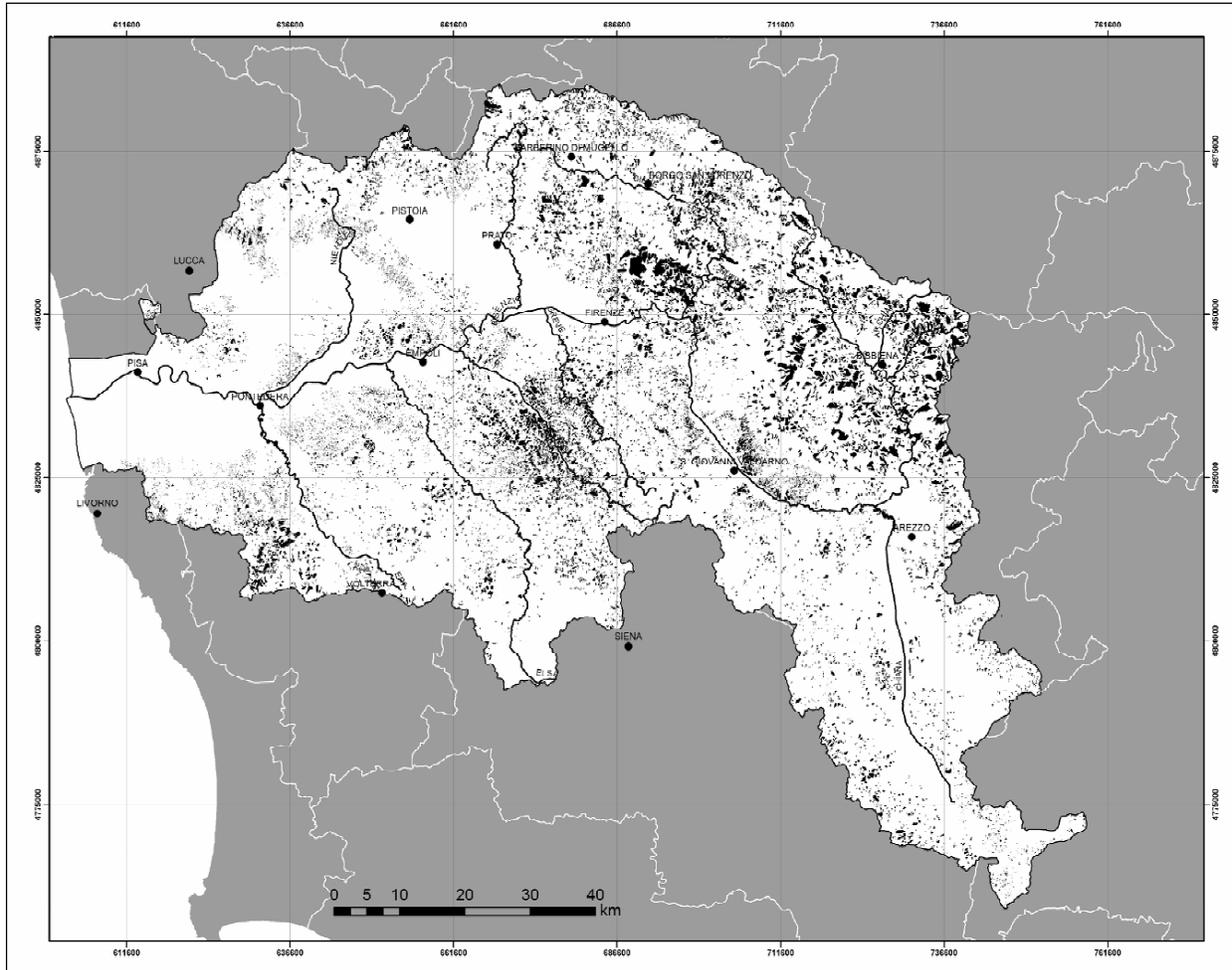


Fig. 1 – Rappresentazione schematica dell'area di studio. All'interno del bacino, in nero sono visualizzate le 27.272 frane censite
Sketch map of the Arno river basin. Inventoried landslides are depicted in black

La tecnica dei PS è stata più volte impiegata con successo nel campo del monitoraggio delle deformazioni del suolo indotte da fenomeni di tipo tettonico, vulcanico, di subsidenza (Ferretti et al., 2000; Musson et al., 2004; Salvi et al., 2004) e di frana (Colesanti et al., 2003; Colesanti e Wasowski, 2004; Hilley et al., 2004).

In supporto all'analisi dei PS, sono state anche acquisite ed elaborate immagini ottiche riprese sia da piattaforma aerea che satellitare.

Per migliorare l'analisi multitemporale volta all'identificazione di frane sulla base di caratteristiche topografiche e vegetazionali, si è usufruito di due serie di ortofoto in scala 1:10.000, rispettivamente del 1996 e del 1999. A queste sono state affiancate anche una serie di foto stereoscopiche in scala 1:33.000, mentre con una copertura

nettamente maggiore (3.500 km²) ci si è avvalsi di un'immagine del satellite SPOT 5. Sebbene la risoluzione del dato pancromatico, con i suoi 5 m del pixel a terra, non sia confrontabile con quella offerta dalle foto aeree, il range dello spettro elettromagnetico coperto e la ripresa a 11-bit, invece che a 8-bit, consentono di incrementare le potenzialità offerte e conseguire dei buoni risultati nel riconoscimento di frane di grande estensione.

Un'altra tipologia di dati disponibile, con copertura dell'intero bacino, è rappresentata dal Modello Digitale del Terreno (DTM) ad alta risoluzione (10 m) che, assieme a carte topografiche di base (1:10.000), ha fornito un ulteriore supporto per l'interpretazione delle evidenze morfologiche dei fenomeni.

4. Risultati

4.1 Aggiornamento della carta inventario

La metodologia proposta integra le misure dei movimenti di spostamento del terreno forniti attraverso una rete di PS con carte inventario già esistenti prodotte per mezzo di metodi e strumenti convenzionali. Al fine di migliorare questa integrazione, si sono resi necessari sia dati ottici che cartografici, in modo da identificare possibili morfologie o caratteristiche del terreno connesse ai movimenti di versante e da estendere spazialmente l'informazione puntuale dei PS. Questo può condurre da un lato alla migliore definizione dei limiti di corpi di frana già identificati o del loro stato di attività e dall'altro alla identificazione di nuove aree instabili. Nonostante che questo metodo rappresenti uno strumento promettente nell'investigazione delle frane, sono molte le limitazioni alla sua applicabilità, legate principalmente alla capacità di apprezzare deformazioni solamente lungo la direzione di linea di vista del satellite (cioè approssimativamente lungo la verticale) oppure al fatto che, per portare a termine con successo un'analisi PS, è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione, oppure presenza di rocce esposte). Inoltre, per l'analisi dei fenomeni di deformazione ad evoluzione particolarmente rapida, il problema legato all'ambiguità della fase interferometrica, conosciuta solo come modulo- 2π , può limitare notevolmente la presenza dei PS.

Il lavoro si è sviluppato secondo le fasi di: visualizzazione e classificazione dei PS, omogeneizzazione e scalatura dei PS, sovrapposizione dei PS con i dati ancillari ed infine interpretazione delle aree in movimento.

La visualizzazione dei PS viene effettuata classificando i punti in funzione della velocità con colori differenti e i valori di velocità raggruppati in un numero finito di classi. A causa delle differenti geometrie di vista delle due orbite ascendenti e discendenti è necessario visualizzare PS ascendenti con una simbologia diversa rispetto a PS discendenti per evitare di confondere le due informazioni, poiché possono presentare delle notevoli differenze nel tasso di deformazione misurato lungo una diversa linea di vista. Inoltre poiché le velocità fornite dai PS non sono assolute, ma sono velocità differenziali calcolate rispetto ad un punto di riferimento (reference point), è necessario omogeneizzare e quindi rendere confrontabili i dati PS sia provenienti da diverse orbite che da track parzialmente sovrapposte. Esiste anche la possibilità che alcune aree (come in effetti alcune porzioni dell'Appennino) possano essere affette da deformazioni regionali (dell'ordine di mm/anno) di origine tettonica, deformazioni che si riflettono sulla velocità dell'intera popolazione di PS considerata come piccoli offset e che devono essere rimossi.

All'interno del presente lavoro il dato di partenza è costituito dalla già citata carta inventario dei fenomeni franosi realizzata dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze e dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno.

Tab.1 – Sintesi dell'analisi dei PS sull'intero territorio del bacino dell'Arno e sulle aree collinari e montane (aree con pendenza maggiore del 3%)

Summary of the PS analysis on the whole Arno basin territory and on the mountainous and hilly areas of the basin (above slope values of 3%)

| | |
|---|-----------|
| Bacino del Fiume Arno(km ²) | 9.131,133 |
| Aree collinari e montane (km ²) | 7.190,097 |
| | |
| PS all'interno dell'intero Bacino | |
| No. PS | 591.263 |
| No. PS ascendenti | 263.321 |
| No. PS discendenti | 327.942 |
| Densità totale dei PS (PS/km ²) | 64,75 |
| Densità PS ascendenti(PS/km ²) | 28,84 |
| Densità PS discendenti(PS/km ²) | 35,91 |
| | |
| PS in aree collinari e montane | |
| No. PS | 265.177 |
| % sul totale dei PS | 44,8% |
| No. PS ascendenti | 82.607 |
| No. PS discendenti | 182.570 |
| Densità totale dei PS (PS/km ²) | 36,88 |
| Densità PS ascendenti(PS/km ²) | 11,49 |
| Densità PS discendenti(PS/km ²) | 25,39 |

L'aggiornamento di questo inventario, realizzato all'interno del progetto SLAM, si è avvalso dei circa 600.000 PS derivati dal processamento (standard) di 350 immagini ERS1 ed ERS2. In Tab. 1 si può notare che è stato possibile individuare due principali subset di dati: il primo, con copertura dell'intero bacino, vede una densità di PS pari a 65 PS/km², mentre il secondo, legato soltanto ai territori collinari e montani, è caratterizzato da un notevole decremento di tale valore, ossia 37 PS/km²; nonostante la variazione significativa, questa densità di PS sembra comunque essere abbastanza alta per essere confrontabile con la densità di frana (3,8 frane/km²). La procedura seguita per l'aggiornamento della carta inventario è stata condotta su ogni singolo comune del bacino dell'Arno, attraverso la sovrapposizione in ambiente GIS dei dati InSAR con il preesistente inventario delle frane e con tutti i dati ancillari a disposizione sopra descritti. Nella fase interpretativa la presenza di Permanent Scatterers all'interno di aree già mappate in frana, ha portato, nel caso di accordo tra stato di attività (attiva, quiescente, inattiva stabilizzata) e velocità media dei PS (presenza o meno di movimento negli intervalli temporali 1999-2002 e 1992-2002), ad un aggiornamento degli attributi del poligono in questione con l'aggiunta delle velocità di movimento riscontrata, oppure, nel caso di disaccordo, è stata valutata la possibilità di modificare lo stato di attività della frana. Nel caso di Permanent Scatterers in movimento vicino ad aree mappate in frana, l'accordo tra stato di attività e la velocità media dei

PS ha permesso l'ampliamento dei limiti del poligono di frana per comprendere l'area interessata dai PS, mentre il disaccordo ha dato la possibilità di creare un nuovo poligono di frana indipendente. Infine il caso di Permanent

Scatterers in movimento, ma lontani da aree in frana, ha portato alla generazione di un nuovo poligono di frana (Fig. 2), supportato da evidenze morfologiche e vegetazionali.



Fig. 2 – Località Costozze, Comune di Vernio. Due nuove frane mappate (attive) per la presenza di PS in movimento (*Permanent Scatterers*, visualizzati in bianco, tutti discendenti con range di spostamento compreso tra $-2,99$ mm/anno e $1,25$ mm/anno), confermate da controlli eseguiti in campagna che hanno evidenziato fratture sulle strade e sugli edifici
Costozze, Municipality of Vernio. New active landslides with PS (all descending PS with a velocity from $2,99$ mm/year to $1,25$ mm/year), confirmed in fields surveys that underlined the presence of cracks along the roads and on the houses

L'applicazione di questo metodo a scala regionale come supporto per la produzione di una carta inventario della frane rappresenta la prima applicazione dell'analisi PS su area vasta mirata alla mappatura di fenomeni franosi. I risultati che riguardano i 9.131 km² del bacino dell'Arno fanno vedere un impatto in termini di informazione derivata del 6,8% sul totale delle frane (Tab. 2). La percentuale delle frane già censite che contengono informazione PS risulta essere 6,1% (ossia 1.664 frane), mentre l'individuazione di nuove aree instabili è del 0,8% del totale (equivalenti a 223 nuove frane). Il dato interessante che emerge è che, delle 1.887 frane con informazione PS, ben 223, cioè il 12% circa, sono nuove e non erano state individuate con le tecniche tradizionali. Questo risultato può essere associato a differenti fattori. Primo fra tutti, la bassa densità dei capisaldi radar, che in aree collinari e montane raggiunge il valore di 37 PS/km². La densità dei PS è inoltre

strettamente legata all'uso del territorio, in particolare alla presenza di zone urbanizzate, di edifici e strutture artificiali. In aggiunta, un altro fattore da prendere in considerazione è la tipologia di movimento studiato e il tipo di cinematisimo: la tecnica PS infatti applicata a dati in banda C (immagini ERS1/ERS2), può misurare tassi di deformazione fino a pochi cm all'anno. In ogni caso la tecnica PS è risultata complementare rispetto alle tradizionali tecniche fotointerpretative, in quanto ha fornito informazioni aggiuntive in corrispondenza di aree urbanizzate laddove le forme del territorio hanno un elevato controllo antropico che rende difficoltosa una adeguata fotointerpretazione.

I dati di aggiornamento dell'inventario ottenuti con la tecnica PS standard sono stati anche utilizzati per la validazione della carta di suscettibilità da frana ottenuta in un progetto parallelo attraverso l'applicazione di tecniche di

statistica multivariata (Catani et al., 2005). La previsione di suscettibilità ottenuta ha fornito risultati soddisfacenti, con una media del 90% di fenomeni franosi correttamente classificati, ma un elevato numero di aree con falsi positivi. Date le caratteristiche di queste ultime aree, con elevati valori di suscettibilità ma prive di frane mappate, si è

ipotizzato che esse potessero essere occupate, almeno in parte, da fenomeni franosi sfuggiti alle tecniche tradizionali di inventario. Il confronto con l'analisi PS, ed in particolar modo con le 223 nuove aree in frana, ha permesso di verificare questa ipotesi, che è risultata vera nell'85% di presunto falso allarme.

Tab. 2 – Dati statistici sui risultati della metodologia PS applicata alla carta inventario delle frane del bacino dell'Arno (AdBA)
Statistical data about the results of PS-methodology applied on the Arno basin landslide inventory map (AdBA is the acronym of Autorità di Bacino del F. Arno)

| Fenomeni franosi nel bacino dell'Arno | |
|---|---------|
| N° di frane mappate da AdBA | 27.270 |
| N° di frane mappate da AdBA contenenti informazioni PS | 1.664 |
| % del n° di frane mappate con informazioni PS | 6,1% |
| Area in frana mappata AdBA (km ²) | 802.986 |
| Area in frana mappata con informazioni PS (km ²) | 151.366 |
| % di area in frana mappata AdBA contenenti informazioni PS | 18,9% |
| Densità di area in frana (km ² / km ² come percentuale sull'intero bacino) | 8,8% |
| Fenomeni franosi in aree collinari e montane | |
| N° di frane mappate da AdBA | 27.232 |
| N° di frane mappate da AdBA contenenti informazioni PS | 1.660 |
| % di frane mappate da AdBA contenenti informazioni PS | 6,1% |
| Area in frana mappata AdBA in area collinare e montana (km ²) | 685.778 |
| Area in frana mappata da AdBA contenenti informazioni PS (km ²) | 151.337 |
| % di area in frana mappata da AdBA contenenti informazioni PS | 22,1% |
| Densità di area in frana ((km ² / km ² come percentuale sulle aree collinari e montane) | 9,5% |
| N° di nuove frane mappate attraverso la metodologia PS | 223 |
| %del n° frane in aree collinari e montane | 0,8% |
| N° totale di frane aggiornate tramite la metodologia PS | 1.883 |
| % del n° totale di frane nella carta inventario finale | 6,8% |

4.2 Monitoraggio singoli fenomeni franosi

Le informazioni provenienti dall'analisi interferometrica possono essere utilizzate anche come strumento di controllo per le frane a cinematisimo lento (velocità fino a pochi cm/anno) ad integrazione dei dati provenienti dal monitoraggio in situ. In questo caso viene utilizzata l'analisi PS "advanced", che permette di ottenere oltre alla velocità media anche le serie temporali di ogni PS, ovvero grafici spostamento-tempo di ogni caposaldo radar.

La metodologia adottata si basa anche in questa fase sull'integrazione delle misure di deformazione dei PS con dati cartografici di base e foto aeree, al fine di dare un significato geologico ai movimenti puntuali misurati da satellite. In particolare, questa tipologia di analisi è volta alla definizione di aree omogenee dal punto di vista geomorfologico, affette da simili tassi di deformazione, al fine di zonare l'area in frana in settori con cinematismi diversi e definire i limiti della frana stessa. Il risultato ottenibile è la definizione di un modello geologico in grado di descrivere la tipologia dell'evento, la distribuzione

dell'attività e un possibile scenario futuro.

Sono state selezionate, all'interno del bacino, quattro singole aree in frana come test sites localizzate nelle zone di Carbonile, Casalino, Chianciano Terme e San Gennaro-Matraia.

Il prodotto finale di questo tipo di monitoraggio è stata la stesura di un rapporto monografico per ciascun sito. I risultati ottenuti sono stati piuttosto soddisfacenti per le prime tre aree, mentre il test site di San Gennaro-Matraia non ha portato buoni esiti, principalmente a causa della scarsa copertura di PS (14 PS/km²), a differenza dei restanti tre che invece sono stati caratterizzati da una densità pari a 975 PS/km² per Casalino, 476 per Chianciano ed infine 114 per Carbonile e da tassi di spostamento superiori a 15 mm/anno lungo la linea di vista del satellite.

In particolare l'analisi PS effettuata sull'area di Chianciano Terme (SI) ha evidenziato come la frana che interessa la parte settentrionale del paese, chiamata "Castagnolo-Le Case", sia ancora stabile nel suo insieme ma sia affetta da movimenti di versante significativi in

alcune porzioni interne. In quest'area grazie ad ulteriori investigazioni di dettaglio unite alle informazioni relative alle deformazioni superficiali provenienti dai dati interferometrici, è stato possibile identificare porzioni del versante caratterizzate da differenti comportamenti. Mentre le velocità registrate dai PS dal 1992 al 2002 hanno confermato la stabilità della maggior parte del corpo di frana, è stato possibile individuare due aree più ristrette, interne al corpo di frana, caratterizzate da spostamenti con

una velocità media simile (la prima 2,4 mm/anno, la seconda 1,8 mm/anno). L'intera area è stata monitorata in situ a partire dagli anni '90 con una serie di strumenti convenzionali (15 inclinometri e 14 piezometri) che confermano le possibili evidenze di movimento localizzato. La Fig. 3a mostra le due aree interne al corpo di frana interessate da spostamenti, mentre in Fig. 3b viene indicata la posizione del tubo inclinometrico n°6 e il PS AA738 usato per il confronto (Fig. 4ab).

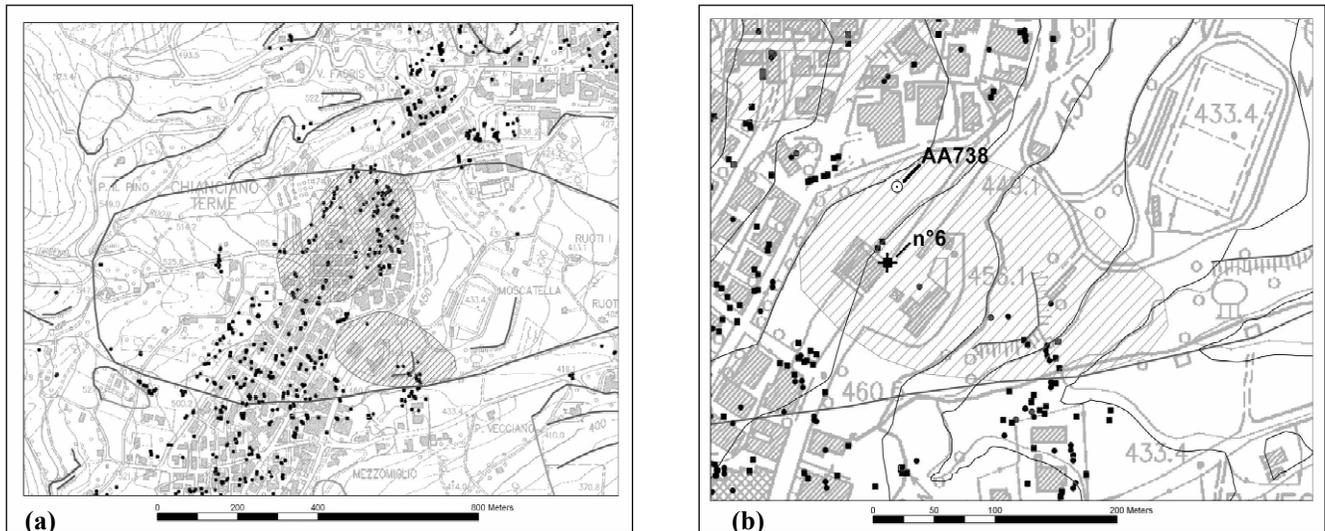


Fig. 3 – (a) Area di Chianciano con evidenziate le due porzioni di versante interessate da movimenti interni al corpo di frana principale. I PS sia ascendenti che discendenti sono visualizzati in nero. A destra (b) un ingrandimento di una delle zone con la localizzazione del PS Advanced (AA738) e dell'inclinometro n°6.

(a) Chianciano area. It shows the “Castagnolo – Le Case” landslide with two areas affected by millimetric movements. Both ascending and descending PS are represented in black. On the right (b) is shown an enlargement of the area with the position of the Advanced PS (AA738) and the inclinometric tube n°6.

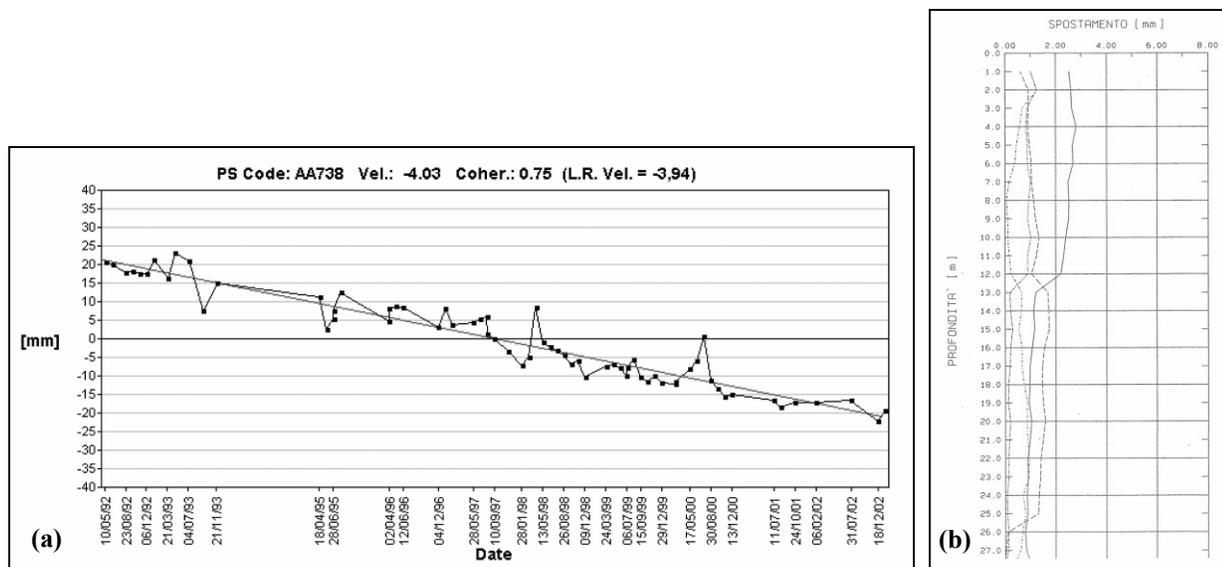


Fig.4 – (a) Grafico della serie temporale del PS AA738 e (b) misure effettuate dall'inclinometro n°6 negli anni 90/91 relative a Chianciano Terme

(a) Time series of Permanent Scatterer AA738 and (b) measurements from inclinometric tube 6 relative to the Chianciano area

5. Ringraziamenti

Si ringrazia l'Agencia Spaziale Europea per il supporto

finanziario della ricerca, nel quadro del progetto SLAM, e l'Autorità di Bacino dell'Arno per l'attività di validazione.

Bibliografia

- Canuti, P., Garzonio, C.A., Rodolfi, G., 1979. The influence of agricultural activity on slope stability: an example from Montespertoli (Tuscany, Italy) representative area. Proc. of the Symposium of the IAEG, Warsaw, 195-203.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., Menduni, G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River Basin. *Landslides* 2, 329-342.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology* 68, 3-14.
- Colesanti, C., Wasowski, J., 2004. Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. Proceedings 9th Intern. Symposium on Landslides, June 28-July 2, 2004, Rio de Janeiro, 795-802.
- 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.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry. *Trans. of Geoscience and Remote Sensing* 39 (1), 8-20.
- Hilley, G.E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., 2004. Dynamics of slow-moving landslides from Permanent Scatterer analysis. *Science* 304 (5679), 1952-1955.
- Musson, R.M.W., Haynes, M., Ferretti, A., 2004. Space-based tectoning modelling in subduction areas using PSInSAR. *Seismological Research Letters* 75 (5), 598-606.
- Salvi, S., Atzori, S., Tolomei, C., Allievi, J., Ferretti, A., Rocca, F., Prati, C., Stramondo, S., Feuillet, N., 2004. Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique. *Geophysical Research Letters* 31, 1-4.
- Wasowski, J., Refice, A., Bovenga, F., Nutricato, R., Gostelow, P., 2002. On the Applicability of SAR Interferometry Techniques to the Detection of Slope Deformations. Proceedings of 9th IAEG Congress, Durban, South Africa, 16-20 September 2002.