

Il contributo dell'interferometria radar satellitare per l'identificazione e caratterizzazione dei fenomeni franosi a differenti scale d'indagine

Anna De Agostini (*), Alessio Cantone (**), Marco Defilippi (**), Mario Floris (*), Rinaldo Genevois (*), Paolo Pasquali (**), Paolo Riccardi (**), Giovanni Stevan (***), Giulia Tessari (*)

(*) Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Geoscienze, Via Gradenigo 6, 35100 Padova,
Tel. +39 049 8279121, anna.deagostini@studenti.unipd.it

(**) Sarmap SA, via Cascine di Barico10, 6989 Purasca, Svizzera, Tel. +41 91 600 9365, sarmap@sarmap.ch

(***) Provincia di Vicenza, U.C. Difesa del Suolo, Contrà S. Marco 30, 36100 Vicenza,
Tel. +39 0444 908461, stevan.giovanni@provincia.vicenza.it

Riassunto

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di uno studio di fattibilità sulle potenzialità di applicazione e sull'interpretazione dei dati interferometrici, ottenuti attraverso tecniche DInSAR (*Differential Synthetic Aperture RADAR Interferometry*), nell'analisi della franosità nel bacino del Torrente Agno (provincia di Vicenza) a differenti scale di indagine. Alla scala del bacino sono stati esaminati i fattori che limitano la possibilità di ottenere informazioni dal trattamento dei dati SAR. Le aree affette da distorsioni geometriche (*layover*, *shadowing*) a causa delle modalità di acquisizione dei dati RADAR, sono state combinate con i fattori morfometrici e con le carte di uso del suolo, per capire quali fattori limitano l'applicazione delle tecniche interferometriche. I risultati mostrano che le aree del bacino in cui non è possibile ottenere informazioni sono molto limitate e l'acquisizione di dati SAR è ostacolata principalmente da elevate variazioni di pendenza. Alla scala del versante sono state analizzate le serie degli spostamenti ottenuti dall'analisi interferometrica per valutare l'evoluzione temporale (stato di attività) dei fenomeni franosi nell'area di Rovegliana-Cappellazzi, a sud-est di Recoaro Terme (VI). Le serie di spostamenti sono state confrontate, inoltre, con il regime pluviometrico dell'area in studio al fine di indagare le cause di innesco dei fenomeni di instabilità. L'interpretazione dei dati interferometrici, congiuntamente con l'analisi geomorfologica, ha contribuito in maniera determinante all'identificazione e caratterizzazione dei fenomeni franosi, la cui attività è risultata connessa con il regime pluviometrico.

Abstract

This paper reports the results of a feasibility study on potentialities and limits of using DInSAR (*Differential Synthetic Aperture RADAR Interferometry*) techniques in landslide phenomena analysis at different scales (basin and slope scale). The study area is the Agno Valley, located in the NE sector of Italian Alps (Vicenza Province, Veneto Region, Italy).

At the basin scale, factors that limit the applicability of interferometric techniques, have been investigated. Portions of RADAR images affected by geometric distortion (*layover* and *shadowing*) are compared with morphometric factors (aspect and slope) and with land use data. The results show that areas affected by distortions are very limited and the presence of steep slope is the main factor limiting the applicability of SAR interferometric techniques. At slope scale, time-series displacement data derived from Persistent Scatterers processing are analysed to evaluate the state of activity of landslide phenomena that occur in Rovegliana-Cappellazzi area (North sector of Agno Valley). Furthermore, displacement data have been compared with rainfall data to investigate landslide triggering factors. In conclusion, interferometric data interpretation jointly with geomorphologic analysis resulted a helpful tools in landslide identification and characterization.

Introduzione

I fenomeni di instabilità sono dei processi complessi, dovuti a molti fattori interconnessi, che necessitano di diversi approcci per essere investigati a fondo. Un aiuto può essere fornito dall'utilizzo delle tecniche avanzate di interferometria differenziale DInSAR (*Differential Synthetic Aperture RADAR Interferometry*), *Persistent scatters* (PS) e *Small Baseline Subset* (SBAS), le quali permettono di valutare l'andamento temporale delle deformazioni su alcuni punti, o zone, della superficie terrestre. Analizzando le serie di immagini SAR (*images stack*), è possibile stimare le velocità di spostamento e ricostruire una serie temporale continua di alcune componenti del campo di deformazione a terra, a partire dal 1992 fino al 2010, grazie all'utilizzo dei dati acquisiti dai satelliti ERS 1, ERS 2 ed ENVISAT.

L'importanza delle immagini satellitari nello studio dei movimenti di versante consiste proprio nella possibilità di osservare con elevata frequenza i fenomeni franosi, laddove non esistono monitoraggi e, di conseguenza, stimare la loro evoluzione spaziale e temporale (distribuzione e stato di attività). Inoltre è possibile identificare nuovi movimenti franosi di difficile individuazione tramite i classici metodi di rilevamento di campagna e di analisi e interpretazione delle foto aeree.

L'utilizzo delle tecniche interferometriche per lo studio dei fenomeni franosi, presenta alcuni limiti legati principalmente alla geometria di acquisizione dei dati, alla morfologia del territorio, alla copertura boschiva e alle velocità di spostamento. In generale, tali limiti dipendono dalla scala di indagine; infatti all'aumentare della scala, aumenta il grado di informazione richiesto e, di conseguenza, aumenta il peso delle limitazioni imposte dalla tecnica interferometrica. Conoscendo le caratteristiche dei sensori satellitari, è possibile una valutazione approssimativa dei fattori che condizionano l'applicabilità delle tecniche, ma nella pratica si eseguono studi preliminari di fattibilità, che richiedono l'acquisizione e il processamento dei dati RADAR. Non esistono chiare indicazioni sulla possibilità di effettuare studi preliminari basati, ad esempio, sull'analisi dei fattori morfometrici derivati da DEM e sull'osservazione dell'uso del suolo, informazioni spesso disponibili e a basso costo.

L'obiettivo principale del presente studio è verificare se i dati SAR acquisiti dai satelliti ERS 1, ERS 2 (1992-2000) ed ENVISAT (2003-2010), sono in grado di fornire informazioni utili per l'identificazione e caratterizzazione dei fenomeni franosi. La prima fase dello studio concerne l'analisi a piccola scala del bacino del fiume Agno (settore NO della provincia di Vicenza) (Fig.1).

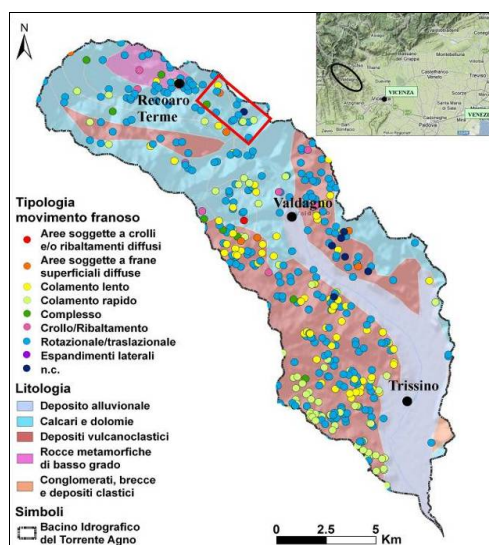


Figura 1. Carta litologica della Valle dell'Agno e ubicazione dei fenomeni franosi censiti nel progetto IFFI (AA.VV., 2007). Il riquadro rosso indica l'ubicazione dell'area di Rovegliana-Cappellazzi, oggetto dello studio a grande scala.

Attraverso la combinazione dei fattori morfometrici e le mappe di visibilità dai satelliti sono stati individuati gli elementi che maggiormente limitano l'utilizzo delle tecniche DInSAR nello studio dei fenomeni franosi, in modo da fornire uno strumento preliminare di indagine. La seconda fase considera un aumento della scala d'indagine e riguarda la caratterizzazione dei fenomeni franosi dell'area di Rovegliana-Cappellazzi (circa 4 km²), situata a sud-est di Recoaro Terme. In questa seconda fase le serie multi-temporali dei dati di spostamento negli ultimi vent'anni sono state utilizzate per identificare i fenomeni di instabilità e valutarne la frequenza di attivazione, espressa in termini di tempo di ritorno. In ultima analisi si è valutata la correlazione tra tali spostamenti e il regime delle precipitazioni al fine di identificare le cause innescanti dei fenomeni franosi.

Geologia e geomorfologia dell'area

Il bacino idrografico del torrente Agno (circa 200 km²), è caratterizzato da pendenze comprese tra i 10° ed i 30° e da un'altitudine tra i 600 ed i 700 m (solo l'area nord-ovest, Gruppo del Pasubio, presenta quote maggiori di 1500 m e pendenze maggiori di 40°). L'esposizione dei versanti è prevalentemente rivolta verso est. Le litologie più diffuse sono costituite da calcari, dolomie e vulcanoclastiti, mentre le tipologie di fenomeni franosi che maggiormente interessano l'area sono gli scivolamenti e i colamenti lenti.

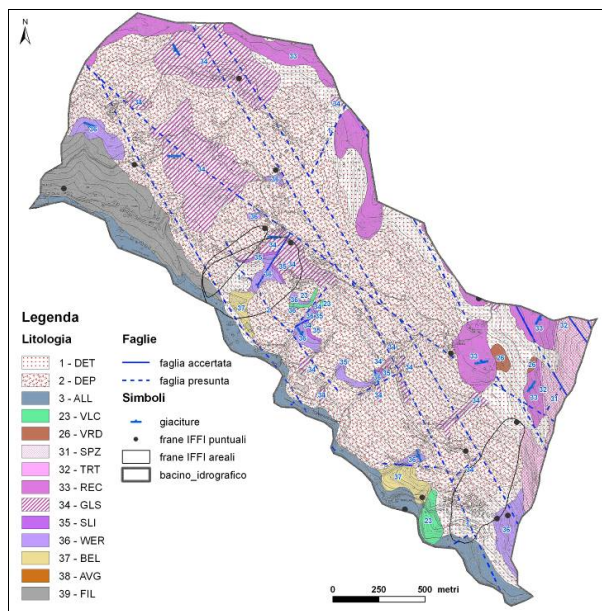


Figura 2. Carta geologica dell'area di Rovegliana-Capellazzi (modificata da Barbieri et al. ,1980) e ubicazione delle frane censite nel progetto IFFI. Detrito di versante (DET), deposito di versante (DEP), deposito alluvionale (ALL), Latiti e latiandesiti (VLC), Rioliti e daciti (VRD), Calcare del Monte Spitz (SPZ), Conglomerato del Tretto (TRT), Calcare di Recoaro (REC), Fmz. a Gracilis (GLS), Dolomia del Serla Inferiore (SLI), Fmz. di Werfen (WER), Fmz. a Bellerophon (BEL), Basamento cristallino sudalpino (FIL).

Nella zona di Rovegliana-Cappellazzi affiora il basamento cristallino sudalpino, costituito da filladi quarzifere pre-permiane e la successiva potente sequenza sedimentaria Permo-Triassica, formata da una successione litologicamente molto eterogenea (fig. 2). Sono presenti, con spessori assai variabili, arenarie, siltiti, marne, vulcaniti, dolomie, calcari, in parte stratificati e fratturati, spesso sovrastati da coperture detritiche eluvio-colluviali e di frana. La grande varietà di spessori e di litologie deriva dal susseguirsi di numerosi ambienti deposizionali (marini, costieri, continentali), mentre l'alta fratturazione degli ammassi rocciosi deriva dalla presenza nell'area di importanti

lineazioni tettoniche a carattere regionale, la Linea Schio-Vicenza a nord e il thrust Bassano-Marana a sud, connesse con le estensioni mesozoiche e paleogeniche e il raccorciamento Neo-alpino. Queste fasi tettoniche hanno dislocato la successione sedimentaria locale, danneggiando le coperture detritiche e la parte più superficiale del substrato roccioso, riducendo le proprietà meccaniche di tali materiali e creando così una delle cause predisponenti alla franosità dell'area, insieme alla presenza di numerosi intervalli siltitici-argillosi, che a causa delle loro condizioni giaciture (a franapoggio) costituiscono i principali piani di scivolamento dei movimenti franosi.

Dal punto di vista geomorfologico, in particolar modo riguardo a quei fattori connessi con i fenomeni di instabilità, la zona di studio è interessata da numerosi solchi di erosione e da aree affette da movimenti superficiali lenti. Le aree franose delimitate nel catalogo IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia) sono solo tre, mentre i fenomeni di instabilità segnalati, ma non esattamente delimitati, sono nove (fig. 2). La maggior parte dei movimenti franosi coinvolge la coltre detritica, con superfici di scivolamento localizzate al contatto tra la coltre e il substrato fortemente fratturato o livelli argillosi/siltitici della sottostanti formazioni sedimentarie.

Per quanto riguarda gli aspetti idrogeologici, la circolazione idrica sotterranea risulta complessa; nel versante si trovano varie emergenze idriche naturali dovute al contrasto di permeabilità tra i diversi litotipi e all'esposizione di limiti a flusso nullo (aquiclude).

Metodologia

La principale metodologia di telerilevamento satellitare, impiegata per la misura degli spostamenti della superficie terrestre è l'InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture RADAR*) (Hanssen, Usai, 1997; Strozzi et al., 1999, Ferretti et al., 1999) che si basa sul confronto di 2 immagini RADAR acquisite in tempi successivi. Il concetto di combinare le informazioni InSAR, provenienti da un grande numero di immagini, permettendo la ricostruzione di una serie temporale di deformazione, è stato introdotto da Ferretti et al. (2000), Berardino et al. (2002), Lanari et al. (2004) e Lauknes (2004). L'utilizzo di una tecnica "multi temporale", detta DInSAR (interferometria differenziale SAR), permette non solo la stima di un certo evento di deformazione, ma anche la stima dell'evoluzione dello spostamento. La tecnica PS (*Persistent Scatters*) (Ferretti et al., 2001) e la tecnica SBAS (*Small Baseline Susbet*) (Berardino et al., 2002) rappresentano le principali metodologie di calcolo usate fino ad oggi. La prima lavora su oggetti a riflettività costante (rocce, edifici, infrastrutture), detti *Persistent Scatters* (PS), generando interferogrammi differenziali riferiti tutti a un'unica immagine (*master*), calcolando così la velocità di spostamento dei PS. La seconda si basa sulla combinazione di interferogrammi differenziali, creati da coppie di immagini SAR aventi limitate distanze orbitali (*baseline*), riducendo così il fenomeno della decorrelazione spaziale.

La prima fase di questo lavoro consiste in un'analisi alla scala del bacino della Valle dell'Agno. Vengono messi in relazione i dati SAR ERS ed ENVISAT, elaborati con il software *SARscape*[®], i fattori morfologici del territorio estratti da DEM ed i dati dell'archivio IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi d'Italia) per individuare i fattori che limitano l'applicazione delle tecniche interferometriche.

Si è proceduto innanzitutto alla creazione della mappa di *layover* e *shadowing* (Fig.2). Questa mappa permette di individuare le aree prive di informazioni a causa di distorsioni geometriche dovute alle modalità di acquisizione dei dati RADAR, e, quindi, non utilizzabili per lo studio delle aree instabili. Il fenomeno di *layover* si verifica quando il versante ha una pendenza maggiore dell'angolo di vista del satellite (circa 23°), mentre le aree in *shadowing* (in ombra) corrispondono ad aree non viste dal satellite, probabilmente perché nascoste da altri rilievi, dove il segnale RADAR non arriva, e quindi sono anch'esse prive di informazioni. Per creare questa mappa sono state utilizzate immagini ERS, una della *track* ascendente (n°165) e una di quella discendente (n°172). Successivamente, la mappa di *layover* e *shadowing* è stata confrontata con l'esposizione e la pendenza dei versanti della valle dell'Agno (), al fine di capire le relazioni tra caratteristiche ambientali e le aree/frane "visibili" al satellite e per delineare uno schema di analisi preliminare sul possibile uso delle tecniche DInSAR nello studio dei fenomeni franosi.

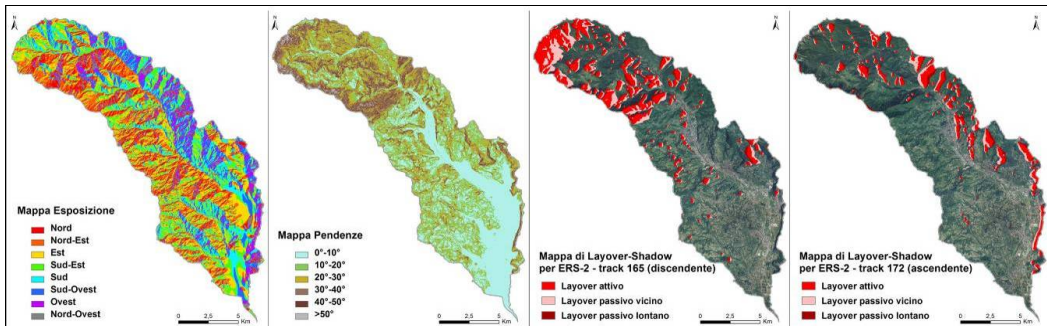


Figura 3. Mappa dell'esposizione dei versanti, delle pendenze e mappe di layover e shadowing della Valle dell'Agno.

La seconda fase del lavoro è consistita nel processamento dei dati RADAR attraverso la tecnica PS nella zona di Rovigliana-Cappellazzi e nell'interpretazione dei dati interferometrici, al fine di valutare l'andamento temporale dei fenomeni franosi presenti e di valutare il contributo delle tecniche *DInSAR* in analisi a grande scala.

In primo luogo, si è proceduto all'identificazione e delimitazione delle aree in frana attraverso rilievi geologici e geomorfologici di campagna, all'analisi delle foto aeree e ortofoto e ai dati delle relazioni tecniche esistenti. In questa fase il contributo dei dati interferometrici è stato quello di evidenziare le aree potenzialmente instabili laddove erano assenti chiari evidenze geomorfologiche di instabilità. Tali aree sono state classificate in base alla tipologia di movimento e, sulla base dei dati di spostamento dei PS, allo stato di attività, espresso in termini di frequenza, ovvero di tempi di ritorno. Ai fenomeni che nei 17 anni di dati, dal 1992 al 2010, non hanno subito spostamenti considerevoli è stato assegnato un tempo di ritorno maggiore di 20 anni, ai fenomeni che presentano solo un periodo di spostamento sostanziale è stato attribuito un periodo di ritorno compreso tra i 10 ed i 20 anni, i movimenti franosi con due o tre periodi di spostamenti considerevoli rientrano in un tempo di ritorno tra i 5 ed i 10 anni ed infine alle instabilità che hanno subito 4 o più spostamenti vengono sono stati assegnati tempi di ritorno inferiori ai 5 anni. Infine, le serie di spostamento sono state relate con i dati delle precipitazioni piovose degli ultimi vent'anni forniti dall'ARPAV (Agenzia Regionale Per l'Ambiente del Veneto) per comprendere se esiste una relazione tra i momenti di maggior piovosità e l'attività delle frane.

Risultati

Lo studio preliminare, alla scala del bacino, tramite strumenti a basso costo (derivati da DEM), che mette in relazione i limiti delle immagini RADAR satellitari con i fattori morfologici del territorio, ha prodotto risultati incoraggianti.

Se si analizzano le aree soggette a effetti di distorsione geometrica per ogni orbita si ottiene che per quella discendente le aree in layover e shadowing sono il 17,8%, mentre per l'orbita ascendente sono l'11% della area totale del bacino idrografico dell'Agno.

Incrociando i risultati delle mappe di *layover* e *shadowing* delle due *track* satellitari, si ottiene che le aree completamente non utilizzabili per l'individuazione di movimenti franosi sono l'1,3%. La relazione tra i fattori morfologici (esposizione e pendenza dei versanti) e le aree visibili dai satelliti è stata indagata calcolando gli indici di pendenza ed esposizione per entrambe le orbite (rapporto tra le aree "invisibili" normalizzate e le aree "visibili" normalizzate, per ogni classe di pendenza ed esposizione) (RATIO_TOT_165 e 172 in Fig. 4). I risultati mostrano che, nell'area in studio, la presenza di versanti con pendenza maggiore dei 30° (aventi un RATIO_TOT >1,5), rappresenta il fattore che limita maggiormente l'applicazione delle tecniche interferometriche. L'esposizione dei versanti che più ostacola l'utilizzo delle tecniche InSAR è verso est ed ovest, rispettivamente per la *track* 165 e 172.

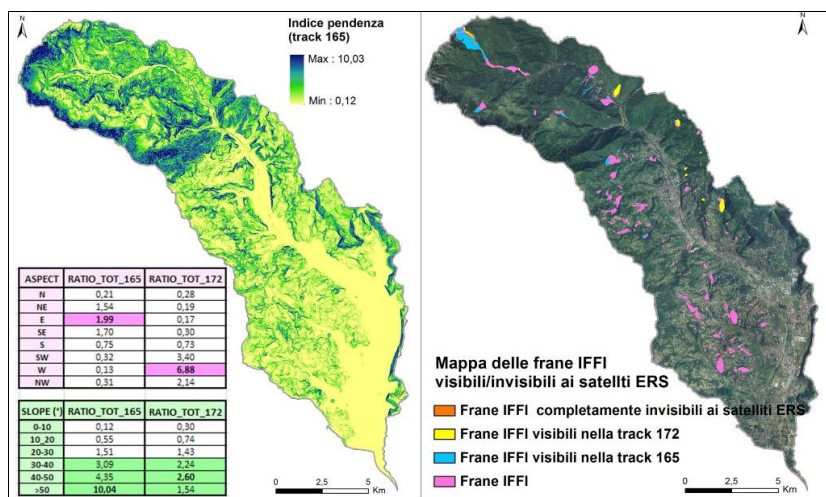


Figura 4. A sinistra, tabella degli indici di esposizione e pendenza e mappa dell'indice di pendenza per la track 165, la quale presenta una maggiore percentuale di aree con pendenze che creano limitazioni alla vista del satellite. A destra, frane IFFI "visibili" ed "invisibili" ai satelliti.

Per quanto concerne le frane IFFI non visibili al satellite e quindi non utilizzabili per creare un archivio temporale delle velocità di spostamento, sono l'1,4% di quelle ricadenti all'interno del bacino del torrente Agno.

Nelle aree visibili al satellite il 44% ricade in zone boscate e quindi prive di dati utili per l'interferometria.

Alla scala del versante (area di Rovigliana-Cappellazzi), sono state esattamente individuate e classificate 11 aree instabili. Sono state individuate, inoltre, aree affette da deformazioni superficiali lente della copertura detritica. Secondo la metodologia esposta nel paragrafo precedente, le aree franose sono state classificate oltre che in base al tipo di movimento, anche in base allo stato di attività (Fig. 5). A tal fine sono state utilizzate le serie di spostamenti dei PS con maggiore coerenza all'interno dei fenomeni franosi. In dettaglio, sono state individuate due aree soggette a frane diffuse superficiali con tempi di ritorno (TR) inferiori ai 5 anni che coinvolgono l'abitato di Rovigliana, due aree con frane diffuse superficiali con TR compresi tra i 5 e i 10 anni, un'area soggetta a frane diffuse superficiali con TR maggiori di 20 anni, una zona abbastanza estesa, sopra l'abitato di Cappellazzi, soggetta a fenomeni di tipo scivolamento traslazionale con TR inferiori ai 5 anni, tre aree coinvolte in un scivolamento traslazionale con TR compresi tra i 5 e i 10 anni, un movimento rotazionale con TR tra i 5 ed i 10 anni ed infine due scivolamenti rotazionali con TR tra 10 e 20 anni ai lati del movimento franoso che coinvolge Cappellazzi ed infine due fenomeni rotazionali. Il confronto tra la serie temporale di spostamento e i dati di pioggia mensile, ha evidenziato una buona corrispondenza tra i periodi di forte piovosità ed i maggiori spostamenti delle aree instabili (Fig. 6). Come deducibile dalla Fig. 6, l'esatta valutazione degli spostamenti dei PS è piuttosto difficile a causa di limitazioni imposte dalla tecnica di calcolo; in questo studio si è fatto riferimento ad una valutazione qualitativa basata sull'andamento di una funzione di interpolazione (media mobile) dei dati di spostamento.

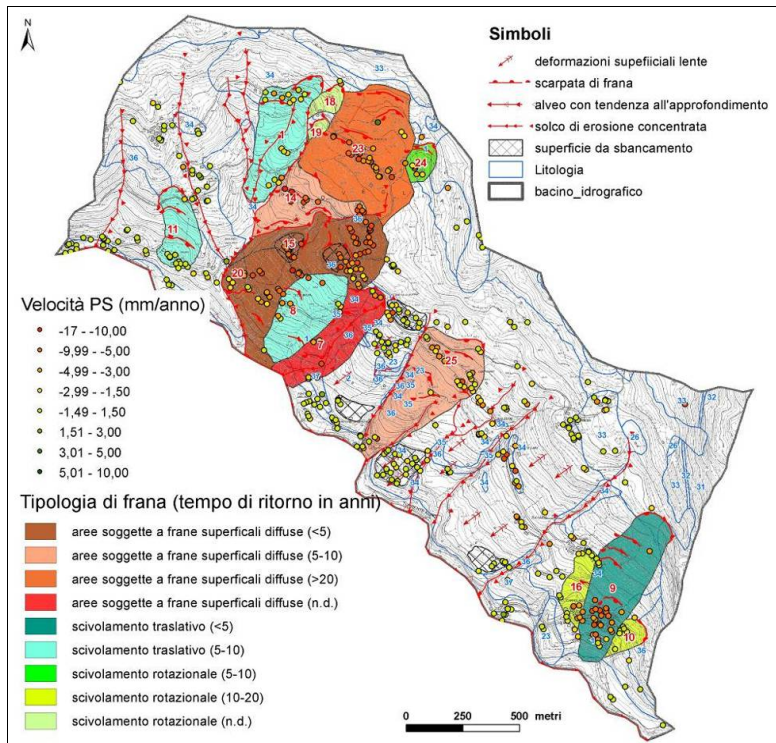


Figura 5. Movimenti franosi e loro tempi di ritorno, individuati e valutati grazie all'integrazione tra i dati di campagna e i dati interferometrici. I poligoni in azzurro indicano le litologie (vedi Fig. 2).

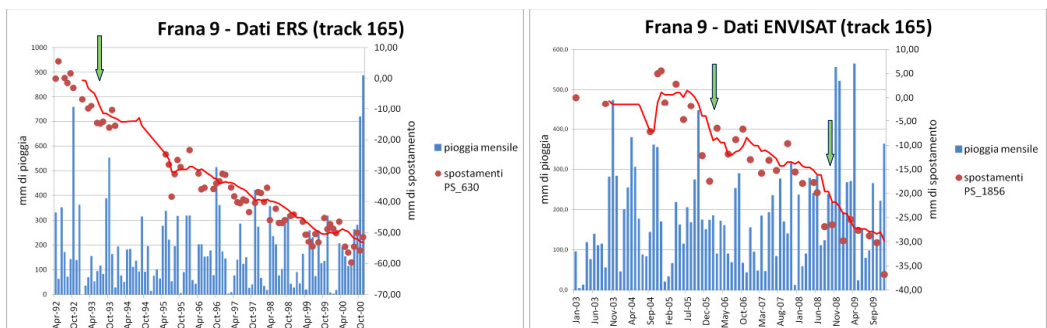


Figura 6. Confronto tra i dati di spostamento PS e i valori di precipitazione mensile per la frana numero 9. Si noti la corrispondenza tra le fasi di maggior movimento del fenomeno (indicate dalle frecce) con periodi caratterizzati da elevata piovosità. La linea rossa indica l'interpolazione dei dati di spostamento attraverso l'utilizzo di una media mobile.

Conclusioni

Il presente lavoro ha evidenziato le potenzialità dell'utilizzo dei dati interferometrici nello studio della franosità di una data area. La creazione con dati a basso costo, di un archivio ventennale di dati di spostamento, impensabile con i metodi classici di monitoraggio, è una delle maggiori potenzialità dei dati interferometrici.

I limiti dell'applicabilità delle tecniche nello studio dei fenomeni d'instabilità sono dovuti principalmente alla risoluzione delle immagini ERS ed ENVISAT utilizzate (25x25 metri), in molti

casi troppo bassa per l'individuazione dei PS; e alla copertura boschiva spesso presente in aree montuose e collinari, che associata all'alta densità abitativa nel fondo valle causa perdite di coerenza e difficoltà durante la fase di *unwrapping* (srotolamento) dell'interferogramma nel processamento PS. Un ulteriore limite è dovuto al limitato numero di PS al di fuori delle aree urbane. In questo caso nell'area di Rovegliana-Cappellazzi si sono avuti risultati positivi poiché sono presenti diversi centri abitati sparsi su tutto il versante, anche se è presente una forte copertura vegetativa. Infine, la possibilità del satellite di misurare solo spostamenti lungo la linea di vista (LOS: Line Of Sight) e l'impossibilità di monitorare rapidi movimenti di versante a causa dell'estrema variazione di riflettività della scena (forte perdita di coerenza), condiziona l'applicabilità dell'interferometria a studi del territorio.

In conclusione, nello studio della franosità in aree montane e collinari, l'approccio interferometrico è abbastanza problematico a causa dei limiti imposti dalla tecnica interferometrica stessa, in relazione alla morfologia del territorio (pendenza ed esposizione dei versanti e copertura boschiva) ed a causa della risoluzione delle immagini satellitari, quindi il possibile utilizzo di tali tecniche deve essere preliminarmente indagato. Al tal fine è possibile, sulla base dei risultati di questo studio, l'utilizzo di DEM e carte di uso del suolo.

Occorre sottolineare che i risultati ottenuti si limitano al processamento dei dati ERS e ENVISAT (risoluzione 25x25m), che rappresentano la serie di dati SAR più lunga e a basso costo disponibile. Una più ampia disponibilità dei dati COSMO SkyMED (3x3m in modalità di acquisizione *stripmap*) e Sentinel (5x20m con una modalità di acquisizione dedicata all'interferometria), viste le caratteristiche di acquisizione dei sensori, potrebbero ridurre le limitazioni osservate in questo lavoro.

Bibliografia

- AA.VV. (2007), *Rapporto sulle frane in Italia. Il progetto IFFI: metodologia, risultati e rapporti regionali*, APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici), Roma
- Barbieri G., De Zanche V., Di Lallo E., Mietto P. e Sedea R. (1980), "Profili e note illustrative della Carta geologica dell'area di Recoaro", *Memorie di Scienze Geologiche*, 34: 23-5
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R. e Sansosti E. (2002), "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
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (1999), "Monitoring terrain deformation using multi-temporal SAR images", *Proc. CEOS SAR Workshop, ESA-CNES*, Toulouse, France
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000), "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20
- Hanssen R., Usai S. (1997), "Interferometric phase analysis for monitoring slow deformation processes" *Proc. 3th ERS Symposium Space at the Service of our Environment*, Florence, Italy
- Lanari R., Mora O., Manuta M., Mallorqui J.J., Berardino P. e Sansosti E. (2004), "A smallbaseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7): 1377-1386
- Lauknes T.R. (2004), "Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms", Thesis for the Degree of Candidatus Scientiarum, University of Tromsø, Norway
- Strozzi, T., Tosi L., Carbognin L., Wegmuller U. e Galgaro A. (1999), "Monitoring land subsidence in the Euganean Geothermal Basin with differential SAR interferometry", *Proc. 2nd International Workshop on ERS SAR Interferometry, Fringe '99*, Liege, Belgium