

Studio di fenomeni franosi in Ticino : fotointerpretazione e analisi delle deformazioni con interferometria radar da satellite

Autor(en): **Ambrosi, Christian / Strozzi, Tazio**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bollettino della Società ticinese di scienze naturali**

Band (Jahr): **96 (2008)**

PDF erstellt am: **23.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-1003100>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Studio di fenomeni franosi in Ticino: fotointerpretazione e analisi delle deformazioni con interferometria radar da satellite

Christian Ambrosi¹ e Tazio Strozzi²

¹ SUPSI, Istituto Scienze della Terra CP 72, CH-6952 Canobbio (christian.ambrosi@supsi.ch)

² GAMMA Remote Sensing, Worbstrasse 225, CH-3073 Gümligen (strozzi@gamma-rs.ch)

Riassunto: Il presente lavoro riguarda il confronto fra le misure di spostamento derivate dall'applicazione dell'interferometria radar da satellite e le carte dei fenomeni di dissesto del Cantone Ticino compilate mediante fotointerpretazione di immagini aeree tradizionali. Attraverso questo tipo di analisi è possibile stabilire lo stato di attività dei fenomeni franosi precedentemente individuati offrendo informazioni aggiuntive circa la cinematica del dissesto, l'ubicazione e l'area coinvolta. Tali risultati estesi su vasta scala portano un prezioso contributo all'analisi del pericolo da frana in aree dove non sono disponibili dati di spostamento ricavati mediante l'applicazione delle tradizionali tecniche di monitoraggio.

SAR Interferometric Point Target Analysis and interpretation of aerial photographs for landslides investigations in Ticino, Southern Switzerland

Abstract: In our analysis we combined information on landslide displacement from SAR Interferometric Point Target Analysis (IPTA) and sketch maps from aerial photography interpretation for the study of landslides in Ticino, Southern Switzerland. The results achieved with IPTA are attractive to complement aerial photographs interpretation for the estimation of the degree of activity of landslides over villages and in sparsely vegetated areas with numerous exposed rocks. On the other hand, over vegetated areas (forests and meadows) IPTA failed to retrieve displacement information.

Keywords: monitoring, SAR interferometry, landslides, aerial photointerpretation, Southern Switzerland

INTRODUZIONE

Il 6% circa del territorio svizzero è soggetto a pericoli naturali (RAETZO *et al.* 2002, LATELTIN *et al.* 2005). Per la protezione contro tali pericoli la Confederazione impegna ogni anno 2.9 miliardi di franchi, cioè lo 0.6 per cento del prodotto interno lordo (PLANAT 2007). Il costo per abitante è pari a circa 400 franchi per anno. Dal 1991 nuove misure sono state adottate per prevenire e mitigare i pericoli naturali. Una delle misure più efficaci nella gestione dei problemi di sicurezza riconosciuti è la predisposizione di opportune carte del grado di pericolosità intesa come la probabilità di occorrenza di un fenomeno naturale potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo (VARNES 1978, VARNES *et al.* 1989). Tale definizione contiene tre concetti fondamentali:

- pericolosità iniziale (fattori preparatori, spazialità)
- probabilità di accadimento (in termini di tempo di ritorno)
- intensità o magnitudo (in termini di volumi e velocità).

Per la stima del pericolo devono quindi essere considerati due parametri di primaria importanza: l'intensità e la probabilità. In base alle direttive federali tre livelli di intensità e probabilità vengono considerati e il grado di pericolo così definito viene individuato mediante tre colori: rosso, blu e giallo in accordo con la matrice riportata in figura 1. La stima del grado di pericolo ha una ripercussione diretta sulla gestione e sull'utilizzo del territorio, indicando il livello di pericolosità atteso per persone, animali ed edifici (RAETZO *et al.* 2002).

La determinazione dell'intensità dei fenomeni franosi è basata sullo stato di attività e, in particolare, sulla velocità degli spostamenti, partendo dal presupposto che le frane siano tanto più pericolose quanto più sono veloci. La stima della velocità di un movimento franoso non è affatto semplice e comporta un ampio margine di incertezza. Non sempre, infatti, le frane sono caratterizzate da movimenti continui nel tempo bensì, più frequentemente, passano attraverso periodi di riattivazione seguiti da fasi di

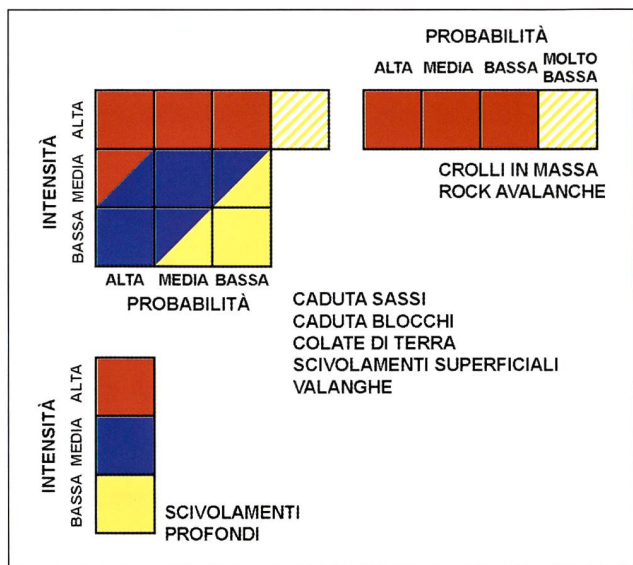


Fig. 1 – Diagramma intensità-probabilità per la definizione del grado di pericolo (OFAT, 1997).

quiescenza. Risulta quindi di estrema importanza determinare la frequenza delle misure e la finestra di tempo su cui estenderle. In base alle direttive federali, un valore di intensità basso può essere assegnato ai movimenti franosi caratterizzati da velocità minori di 2 cm/anno. Un valore di intensità medio caratterizza invece quelle frane con valori di velocità dell'ordine di alcuni centimetri all'anno (per comodità si assume in genere il valore limite di 10 cm/anno). Valori di intensità alti possono essere assegnati ai fenomeni franosi che, in caso di riattivazione, mostrano uno spostamento orizzontale maggiore di 1 m in un unico evento. Una intensità elevata può inoltre essere assegnata a scivolamenti (superficiali) con spostamenti maggiori di 10 cm/giorno e, in ogni caso, a tutte quelle aree caratterizzate da elevate deformazioni di taglio capaci di compromettere seriamente la stabilità degli edifici.

Le carte del grado di pericolo vengono solitamente redatte tenendo conto dei seguenti elaborati di base:

- carte inventario dei fenomeni di dissesto
- catasto degli eventi
- documenti ad hoc aggiuntivi.

La definizione dello stato di attività di un dissesto è basata su dati derivati da campagne di monitoraggio volte a determinare l'entità degli spostamenti sia in superficie (misure topografiche, GPS, estensimetri, distometri), sia in profondità (misure inclinometriche in fori di sondaggio). Qualora questi dati non siano disponibili, l'attività può essere definita attraverso osservazioni in situ basate su evidenze geomorfologiche superficiali. Il riconoscimento di fenomeni di instabilità di versante con velocità di spostamento annuo medio bassa (da millimetrica a decimetrica) è molto difficile in quanto i segni di attività possono essere facilmente mascherati dallo sviluppo di coperture detritiche e suoli. In questo caso lo stato di attività è praticamente impossibile da determinare in situ, se

non attraverso l'analisi dei danni strutturali su edifici o infrastrutture. Spesso le evidenze superficiali dei movimenti di un dissesto si hanno solo dopo che la deformazione ha superato una certa soglia; fino a quel momento in genere non si hanno ancora a disposizione dati di monitoraggio utili per l'analisi della cinematica della frana e, quindi, per la previsione degli spostamenti futuri. In questi casi un aiuto non trascurabile può derivare dall'analisi degli spostamenti mediante l'utilizzo di radar ad apertura sintetica (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) da satellite attraverso l'applicazione dell'analisi interferometrica su diffusori puntuali (IPTA, *Interferometric Point Target Analysis*) che permette una quantificazione delle deformazioni estesa su vaste aree (BAMLER E HARTL 1998, ROSEN *et al.* 2000, WEGMÜLLER *et al.* 2003, WERNER *et al.* 2003, FARINA *et al.* 2003, CASAGLI *et al.* 2004, STROZZI *et al.* 2006).

Nel presente lavoro, dopo una breve descrizione della metodologia utilizzata, verranno presentati cinque esempi relativi all'applicazione dell'interferometria radar da satellite nella definizione dell'attività di fenomeni franosi delimitati cartograficamente mediante la fotointerpretazione. Si tratta quindi di un confronto di dati elaborati in separate sedi e che in lavoro sono stati sovrapposti col vantaggio di ottenere informazioni aggiuntive circa lo stato di attività dei fenomeni di dissesto. In alcuni casi è stato possibile effettuare un confronto tra i dati di spostamento derivati dalla tecnica IPTA con quelli ricavati mediante l'applicazione delle tecniche di monitoraggio tradizionali.

DATI E METODI

Analisi interferometrica radar su diffusori puntuali (IPTA)

La tecnica dell'interferometria radar da satellite trova ampie applicazioni per la determinazione delle deformazioni della superficie terrestre a partire da impulsi radar emessi da piattaforme satellitari e riflessi a terra (BAMLER E HARTL 1998, ROSEN *et al.* 2000, STROZZI E VALENTI 2006). In particolare gli spostamenti vengono determinati a partire dalla differenza di fase tra due impulsi che colpiscono la stessa zona nel corso di successive acquisizioni. Nel suo percorso lungo orbite polari, infatti, il satellite è in grado di soprastare sulla stessa area mediamente ogni 35 giorni. Il vantaggio di questa tecnica è rappresentato da un'elevata copertura spaziale del segnale emesso, dall'elevata accuratezza dei valori di spostamento ottenuti e dalla disponibilità di un record storico dei dati a partire dal 1991. L'applicazione della tecnica interferometrica classica è tuttavia limitata dal fatto che un buon retrodiffusore deve necessariamente mantenere caratteristiche di riflettività ad elevata stabilità lungo tutte le acquisizioni del sistema.

Uno sviluppo della tecnica interferometrica è rappresentata dall'analisi su diffusori puntuali (*Interferometric Point Target Analysis*, IPTA). In questo caso l'interferometria radar viene applicata solo su alcuni punti selezionati in

base alla stabilità particolarmente elevata del segnale riflesso lungo le successive riprese da satellite (WEGMÜLLER *et al.* 2003, WERNER *et al.* 2003). Attraverso l'utilizzo di numerose immagini gli errori dovuti agli effetti atmosferici possono essere fortemente ridotti con un grande miglioramento dell'accuratezza dei risultati ottenuti. L'approccio IPTA permette pertanto di ricostruire con accuratezza millimetrica fenomeni di deformazione in corrispondenza dei diffusori puntuali in genere corrispondenti a strutture antropiche quali edifici, tralicci, condotte, ferrovie, ecc.. o a rocce esposte. In aree montuose, tuttavia, il numero di bersagli radar stabili nel tempo è ridotto a causa della scarsa urbanizzazione, della copertura nevosa che per parecchi mesi all'anno varia in modo sensibile la riflettività del segnale e della presenza di zone in ombra rispetto al segnale radar.

Nel presente lavoro la tecnica IPTA è stata applicata utilizzando immagini radar acquisite dalle piattaforme satellitari ERS-1 e ERS-2 dal 1991 al 2000 su orbite sia ascendenti che discendenti escludendo i dati invernali a causa della copertura nevosa. Per ciascun diffusore puntuale presente all'interno dell'area di studio è stato quindi possibile ricostruire una storia degli spostamenti nella direzione bersaglio-satellite (che corrisponde alla verticale a meno di un angolo di 23°) estesa su un intervallo temporale di circa 10 anni. Nelle immagini gli spostamenti IPTA sono indicati in mm/anno attraverso una scala di colori. I valori negativi indicano un aumento della distanza bersaglio-satellite ovvero un abbassamento del terreno.

Interpretazione di foto aeree e mappatura dei dissesti

La tecnica dell'interpretazione di foto aeree è normalmente utilizzata per la redazione delle carte dei fenomeni franosi. L'analisi stereoscopica si basa sull'accoppiamento di immagini aeree che riprendono la stessa zona da punti di vista leggermente differenti permettendo in tal modo

una visione tridimensionale del territorio (detta stereoscopica) con una enfattizzazione delle quote. Ciò permette di ben riconoscere i fenomeni di dissesto e, se la qualità dell'immagine è sufficientemente elevata, di riconoscere tutte quelle caratteristiche geomorfologiche ad essi correlati (scarpate, controscarpate, trincee e fratture). Tutti i fenomeni riconosciuti, distinti in base alla loro tipologia (crolli, scivolamenti, flussi di detrito, deformazioni profonde di versante), (fig. 2) sono stati mappati e georeferenziati in ambiente GIS col vantaggio di associare a ciascun poligono una banca dati con tutte le informazioni aggiuntive (area, volume, tipo di materiale coinvolto ecc.). L'analisi di serie storiche di foto aeree permette di quantificare l'eventuale attività in base ai cambiamenti più o meno rapidi della superficie topografica. Il vantaggio, infine, di osservare un'ampia porzione di territorio permette di cartografare fenomeni franosi di grandi dimensioni difficilmente riconoscibili attraverso rilievi in sito. D'altro canto questi ultimi sono indispensabili nell'individuare dissesti di piccole dimensioni difficilmente riconoscibili da foto aerea.

Dal punto di vista della tipologia dei dissesti riconosciuti, seguendo la classificazione introdotta da Varnes (VARNES 1978, VARNES *et al.* 1989), si parla di crollo quando una massa di dimensione qualsiasi si stacca da una parete procedendo per caduta libera, rimbalzi, rotolamento e talora scivolamento. Gli scivolamenti implicano il movimento a blocchi multipli o a blocco singolo integro per scorrimento lungo uno o più piani o eventualmente lungo una zona di ridotto spessore. In genere viene introdotta la distinzione fra scivolamenti rotazionali e traslazionali in dipendenza della geometria della superficie di scivolamento. Le deformazioni profonde di versante (DGPV o *Sackungen*) includono deformazioni lente e molto profonde distribuite lungo varie fratture, o addirittura microfratture senza la presenza di una singola superficie di scollamento. Solitamente la dimensione di

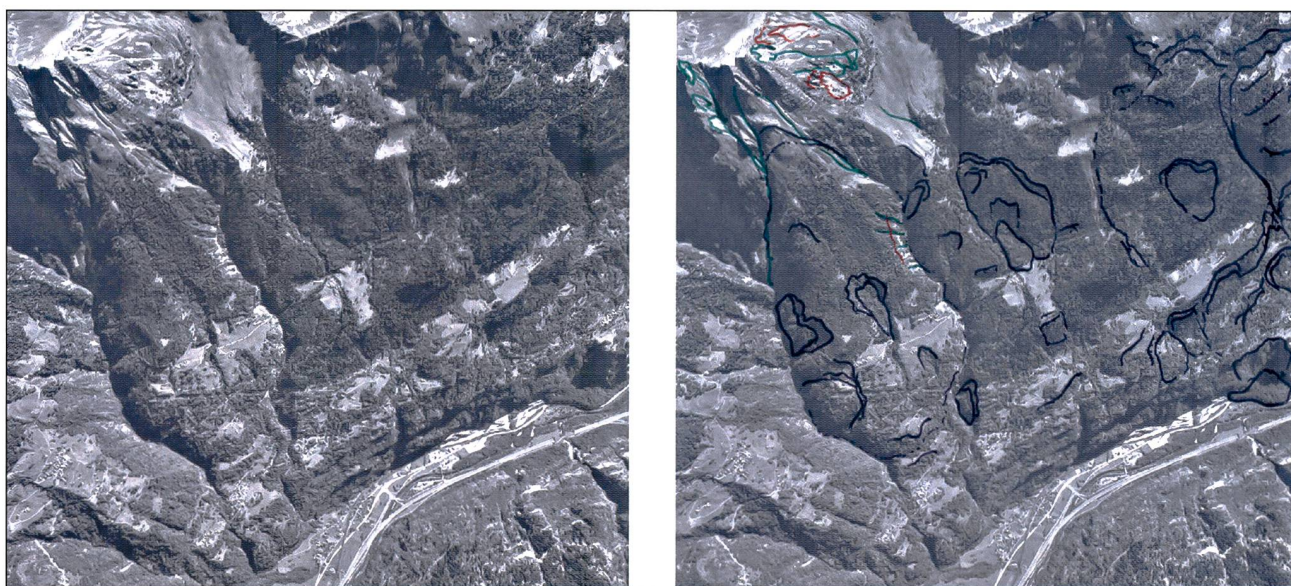


Fig. 2 - Esempio di fotointerpretazione del versante sinistro della media Leventina.

tali fenomeni è confrontabile con quella del versante. Tra i dissesti superficiali le colate di detrito o *debris flow* riguardano la mobilitazione in massa di materiali grossolani lungo aste torrentizie con produzione di depositi laterali (argini) e solchi con profilo a V. Tali colate possono percorrere grandi distanze per il contributo delle acque che fluiscono lungo i torrenti e grazie alle caratteristiche fisico meccaniche dei materiali coinvolti.

In Ticino le mappe dei fenomeni di dissesto sono state compilate per numerose zone analizzando foto aeree con copertura stereoscopica a scala 1:20'000 riprese per lo più nel 2001.

RISULTATI

Nel presente studio i punti IPTA con i relativi valori di spostamento sono stati sovrapposti alle carte dei fenomeni di dissesto realizzate attraverso l'analisi fotointerpretativa con lo scopo di verificare la coincidenza delle informazioni ed eventualmente di caratterizzare lo stato di attività dei fenomeni di dissesto negli ultimi 10 anni. Di seguito vengono riportati i risultati di tale analisi su alcuni dissesti scelti in base alla loro rappresentatività.

Cimadera (Val Colla)

Lo scivolamento rotazionale di Cimadera ubicato in Val Colla a circa 20 km a nord di Lugano copre un'area complessiva pari a 0,5 km² interessando il versante destro della Valle delle Spine.

Tale scivolamento presenta una scarpata particolarmente evidente con andamento in pianta fortemente concavo che disloca la cresta del Roccolo. La zona in movimento presenta una superficie particolarmente disarticolata per la presenza di numerose scarpate dirette per lo più nord-sud. Il settore di cresta mostra numerose scarpate e controscarpate che formano strutture tipo *graben* e *semi-graben*. Tutte queste evidenze concorrono a suggerire che la frana sia attiva, come confermato anche dall'analisi IPTA e dalle misurazioni geodetiche effettuate dal Comune.

La distribuzione dei punti IPTA, infatti (fig. 3), oltre a confermare il movimento franoso riconosciuto da foto aerea, mostra uno spostamento medio dell'ordine di 5 mm/anno nel settore nord dello stesso. In tale settore, infatti, numerosi sono gli edifici che si prestano come riflettori. La mancanza di punti IPTA negli altri settori della frana sono dovuti sia alla presenza del bosco ma anche dall'assenza di manufatti di origine antropica o di rocce esposte che potrebbero fungere da riflettori stabili nel tempo. Un unico punto ubicato nella parte meridionale dell'area in dissesto indica spostamenti dell'ordine di 2 mm/anno.

Pregassona - Cureggia

Il versante idrografico sinistro della bassa Valle del Cassarate (fig. 4) è interessato da numerosi fenomeni di dissesto la cui origine è probabilmente da mettere in relazione all'assetto tettonico dell'area. La struttura principa-

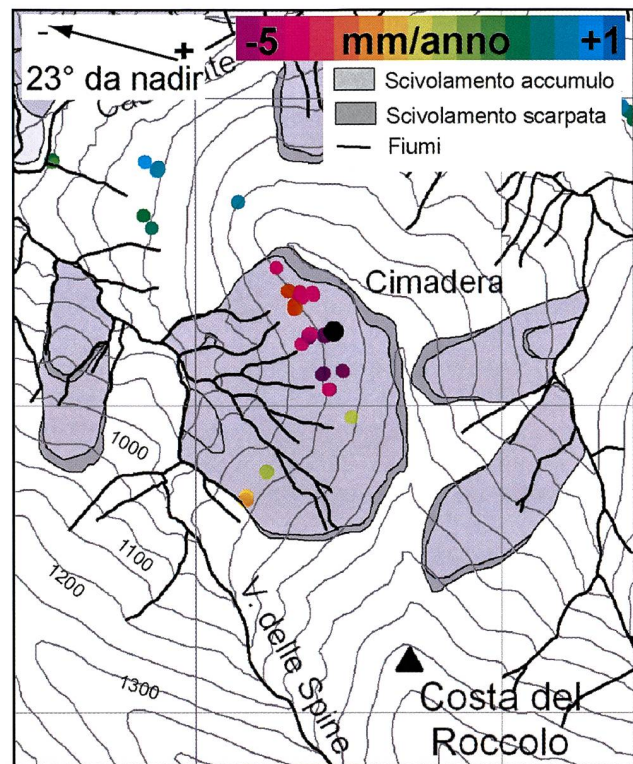


Fig. 3 – Lo scivolamento profondo di Cimadera (Val Colla).

le è rappresentata dalla Linea di Lugano: faglia ad andamento nordest-sudovest marcata sul terreno da una scarpata rocciosa molto evidente che localmente supera i 50 m e che segna il contatto tettonico tra i litotipi metamorfici del basamento e la copertura sedimentaria mesozoica. I dissesti che interessano il fianco ovest del Monte Boglia sono noti da parecchio tempo. Già a partire dagli anni '70 con la redazione del foglio geologico 1353 Lugano gli autori avevano notato che in questo settore la Linea di Lugano mostrava una posizione anomala rispetto alle aree adiacenti essendo spostata verso nord di oltre un centinaio di metri. D'altro canto, al piede del versante erano stati individuati e cartografati al di sotto della copertura morenica blocchi di calcari che risultavano essere in posizione anomala essendo distanti oltre mezzo chilometro dalla loro zona di normale affioramento. Gli autori del foglio spiegarono tali evidenze con la presenza di scivolamenti profondi che interessano tutto il versante ovest del Monte Boglia la cui superficie di scollamento poteva coincidere con la Linea di Lugano. I blocchi presenti al piede del versante trovavano invece origine in antichi collassi probabilmente di età interglaciale data la loro posizione stratigrafica rispetto ai depositi morenici tardo-glaciali.

La recente analisi fotointerpretativa (IST, 2006) ha confermato la presenza di una deformazione profonda che interessa tutto il versante sinistro della bassa Valle del Cassarate. A monte della Linea di Lugano è ben visibile l'espressione superficiale della scarpata principale della DGPV. La deformazione complessivamente copre un'area di 4,6 km² e lateralmente è confinata a Sud dalla Valle

del Cassone. Numerose sono le morfostrutture associate alla DGPV: scarpate e controscarpate dirette NE-SW caratterizzano tutta l'area a nord e a est di Cureggia. L'orientazione delle morfostrutture, parallela all'andamento della Linea di Lugano, suggerisce un controllo di questa, almeno passivo, sull'evoluzione della deformazione profonda.

Il basso versante (al di sotto degli 800 m slm) è caratterizzato da numerosi scivolamenti rotazionali. Con ogni probabilità tali scivolamenti sono evoluti a partire dal ritiro delle ultime masse glaciali in quanto le scarpate a essi associate tagliano anche i depositi morenici che ricoprono diffusamente il piede dei versanti. La presenza di numerosi fenomeni superficiali quali crolli, flussi di detrito e frane superficiali suggerisce una certa attività di questo settore di versante.

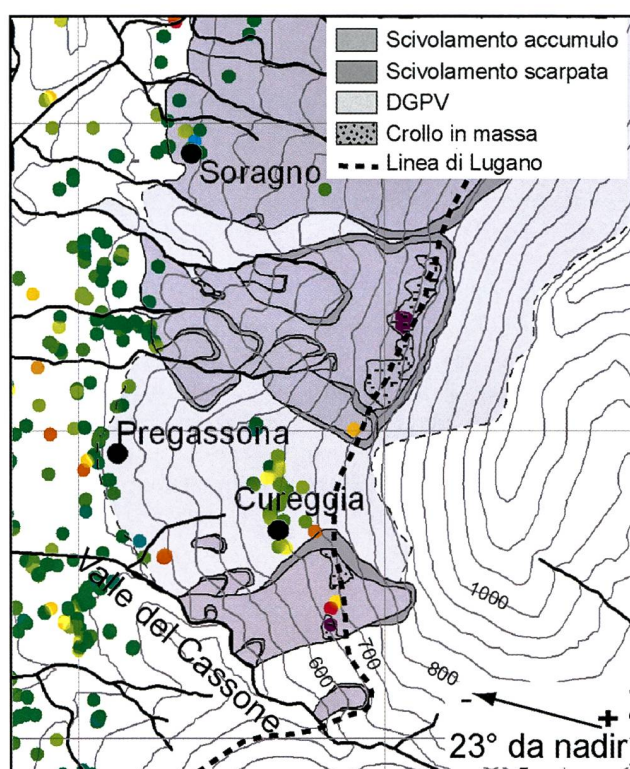


Fig. 4 - La deformazione profonda del fianco sinistro del Cassarate.

L'analisi IPTA ha permesso di confermare l'attività di alcuni scivolamenti i cui spostamenti erano noti da tempo. Come mostrato in figura 4 lo scivolamento posto a sud di Cureggia nell'estrema parte meridionale della DGPV presenta alcuni punti IPTA che mostrano spostamenti medi compresi fra 2 e 8 mm/anno. L'abitato di Cureggia, al contrario, non presenta deformazioni apprezzabili. Anche lo scivolamento presente a nord di Pregassona presenta alcuni punti IPTA con velocità superiori a 5 mm/anno presenti nella zona di scarpata. In questo caso i punti IPTA sono materializzati da alcune rocce esposte. L'elevata forestazione del basso versante rende

impossibile l'identificazione di punti *target* utili al fine dell'analisi IPTA.

Mezzovico - Sigirino (Valle del Vedeggio)

Nella Valle del Vedeggio, a nord di Lugano, il versante a est di Mezzovico è interessato da alcuni scivolamenti profondi (fig. 5). Tra questi merita attenzione per la sua marcata evoluzione lo scivolamento che interessa i Monti di Sigirino lungo la Valle di Cusella, esteso su una superficie di 0.3 km². La scarpata principale, morfologicamente molto evidente, è ubicata nella parte alta del versante al di sopra di 1200 m slm mentre il piede dello scivolamento corrisponde all'alveo del Rio di Cusella. La presenza di questo scivolamento è marcata anche dalla morfologia del versante che mostra una forte convessità sia longitudinale che trasversale rispetto alla linea di massima pendenza. Nel basso versante sono presenti numerose scarpate. Lo spostamento verso nordest lungo queste strutture è testimoniato dall'andamento del fondovalle che in prossimità del piede dello scivolamento risulta fortemente dislocato. Ciò indica una certa attività testimoniata anche dall'analisi IPTA (fig. 5) che ha evidenziato gli spostamenti nella parte medio-alta dello scivolamento. In questo settore i riflettori IPTA corrispondono sia a edifici che a rocce esposte. L'analisi IPTA ha messo anche in evidenza fenomeni di caduta sassi che hanno modificato la geometria di alcuni accumuli di detrito precedentemente mappati mediante fotointerpretazione. Altri fenomeni di dissesto di ordine inferiore e presenti nella stessa area non mostrano segni di attività recente.

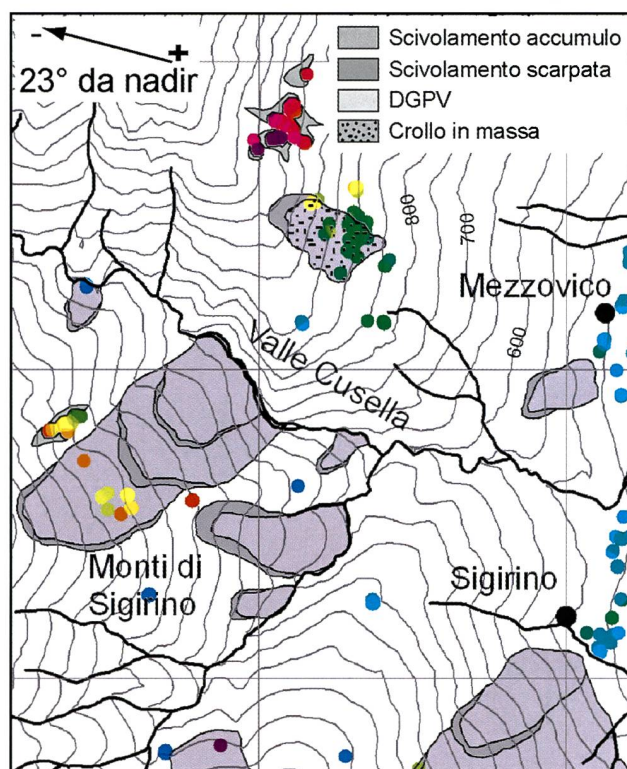


Fig. 5 - Scivolamenti profondi della Valle Cusella (destra idrografica del Vedeggio).

Lavertezzo (Val Verzasca)

Ubicata a sud del monte Föpia in sinistra idrografica della media Val Verzasca, la deformazione profonda di Lavertezzo copre una superficie complessiva di 3.2 km². Una serie di scarpate e controscarpate dirette nordovest-sudest hanno dislocato il medio-alto versante mentre il basso versante, al di sotto dei 1200 m di quota, è caratterizzato dalla presenza di scivolamenti rotazionali e accumuli di crolli in massa. L'attività della deformazione profonda è evidenziata dagli spostamenti di alcuni punti

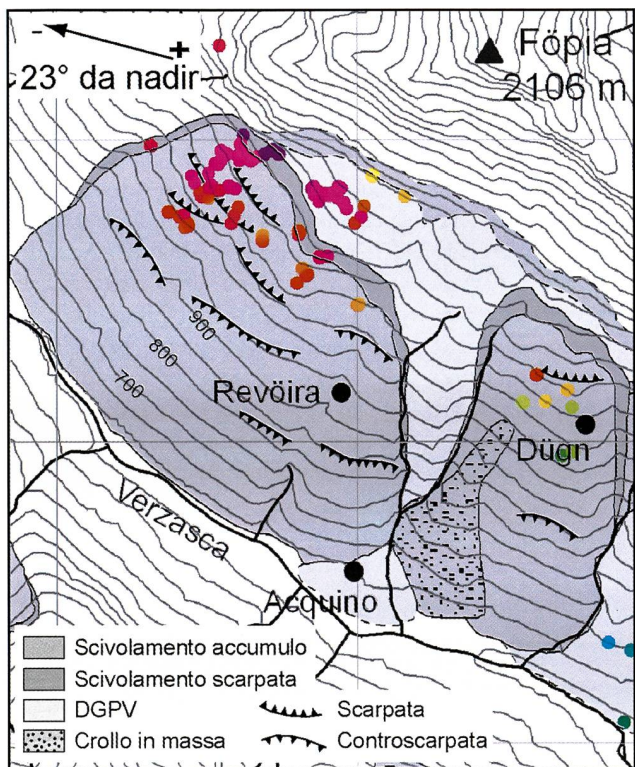


Fig. 6 - La DGPV di Lavertezzo (Val Verzasca).

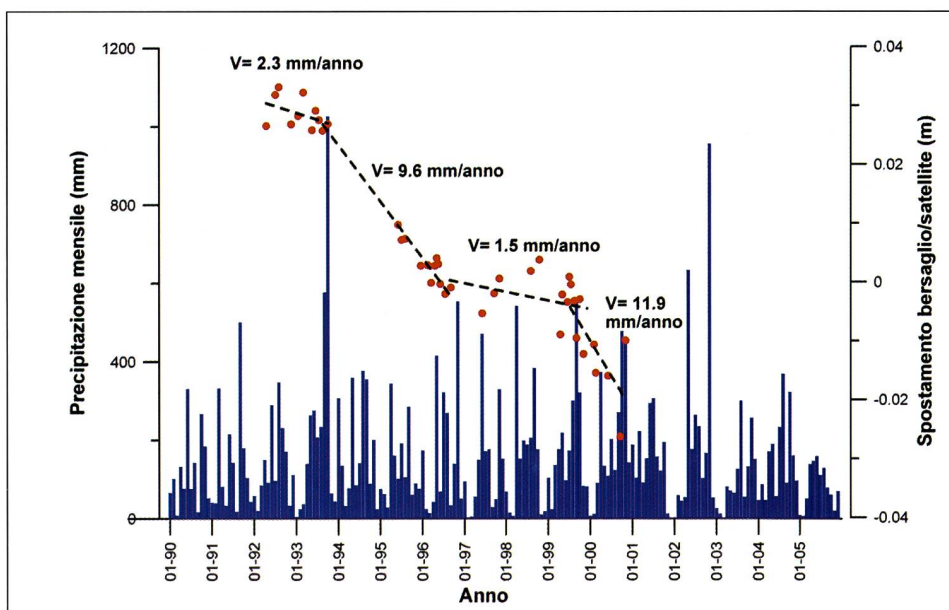
IPTA presenti nel settore settentrionale della deformazione, appena a valle della scarpata principale, che indicano movimenti variabili tra 2 e 6 mm/anno (fig. 6).

Nel medio basso versante sono presenti due grandi scivolamenti rotazionali: il primo in prossimità dell'Alpe di Revöira, il secondo presso l'Alpe di Dügn. Il piede di entrambi i fenomeni coincide con il fondovalle della Verzasca, dove punti IPTA sono assenti perché l'area risulta mascherata dalla topografia nella speciale geometria di osservazione del sistema SAR.

Lo scivolamento rotazionale di Revöira con un'area pari a circa 1 km² è il dissesto di maggiori dimensioni evoluto all'interno della deformazione profonda di versante. Esso è ubicato nella parte più settentrionale della deformazione, dove il versante presenta un profilo trasversale profondamente convesso. L'analisi IPTA evidenzia movimenti in atto più marcati nella parte alta dello scivolamento nei pressi della scarpata, tendenti a diminuire verso le quote inferiori. In questo caso diffusori puntuali sono rappresentati sia da edifici che da rocce esposte. Lo spostamento medio nella direzione bersaglio-satellite (corrispondente alla verticale a meno di un angolo pari a circa 23°) è compreso fra 3 e 6 mm/anno. Per ciascun bersaglio è possibile ricostruire la storia degli spostamenti a partire dal 1991 anno in cui sono iniziate le riprese dalle piattaforme ERS. Una sovrapposizione fra i dati di spostamento e quelli relativi alle precipitazioni mensili riferiti alla stazione pluviometrica di Frasco mostra chiaramente la cinematica del movimento franoso sensibile alle oscillazioni del livello piezometrico e quindi del tasso di precipitazione. In particolare (fig. 7) si nota un aumento della velocità media degli spostamenti a seguito dell'evento pluviometrico particolarmente intenso dell'autunno 1993. Tale effetto si è protratto per un intervallo di tempo particolarmente lungo pari a circa 4 anni dopo a seguito del quale si è registrato un assestamento.

Anche per lo scivolamento dell'Alpe di Dügn esistono

Fig. 7 - Spostamento riferiti alla frana di Lavertezzo (punti rossi) a confronto con le precipitazioni mensili registrate dalla stazione di Frasco (in blu). La linea tratteggiata indica la velocità di spostamento media, espressa in mm/anno. Immagine di riferimento (valore di spostamento nullo) del 15 agosto 1997.



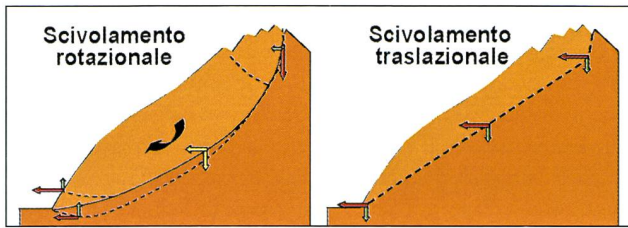


Fig. 8 – Distribuzione degli spostamenti per scivolamenti rotazionali (a sinistra) e traslazionali (a destra).

punti IPTA che mostrano movimenti fino a 5 mm/anno. Per entrambi gli scivolamenti è possibile notare un incremento del tasso di spostamento muovendosi lungo il versante e passando rispettivamente dal piede alla zona di cresta. Tale osservazione è in accordo con l'ipotesi di una superficie che tende a essere subverticale nel settore di cresta e che tende invece a decrescere di inclinazione nel settore di piede del pendio (fig. 8) suggerendo una cinematica di tipo rotazionale.

Di conseguenza, gli spostamenti nel basso versante avrebbero una componente essenzialmente orizzontale e una componente molto ridotta nella direzione bersaglio-satellite.

Osco e Faido (Val Leventina)

Il fianco nord della Leventina a monte di Faido è interessato da una delle più estese deformazioni profonde presenti in Ticino e probabilmente in tutta la Svizzera. Essa, infatti, interessa un'area di oltre 35 km² ed è caratterizzata dalla presenza nell'alto versante di uno sciame di controscarpate dirette nordest con rigetto anche pluri-decamentrico e lunghezza fino a 150 m. Il basso versante è interessato da numerose frane di scivolamento, tra cui quella di Osco, la cui attività è nota già da parecchio tempo. Nel settore orientale della deformazione, tra i nuclei di Campello e Rossura, gli spostamenti del terreno, relativi a fenomeni di dissesto riconosciuti da foto aeree, sono evidenziati da una serie di scarpate con rigetto fino a 50 m che interessano una spessa coltre di depositi di origine glaciale.

Gli spostamenti IPTA (fig. 9) bene si raccordano con le strutture associate ai dissesti e riconosciute da foto aerea. In particolare, nell'alto versante ben evidente, anche in termini di spostamenti dei punti IPTA, è il limite est della deformazione che confina un'area caratterizzata da numerose scarpate e da movimenti dell'ordine dei 2-5 mm/anno. In questo settore i punti riflettori sono rappresentati dalle numerose rocce esposte.

Anche nel basso versante il campo delle deformazioni ricavato con analisi da satellite ben si raccorda con i limi-

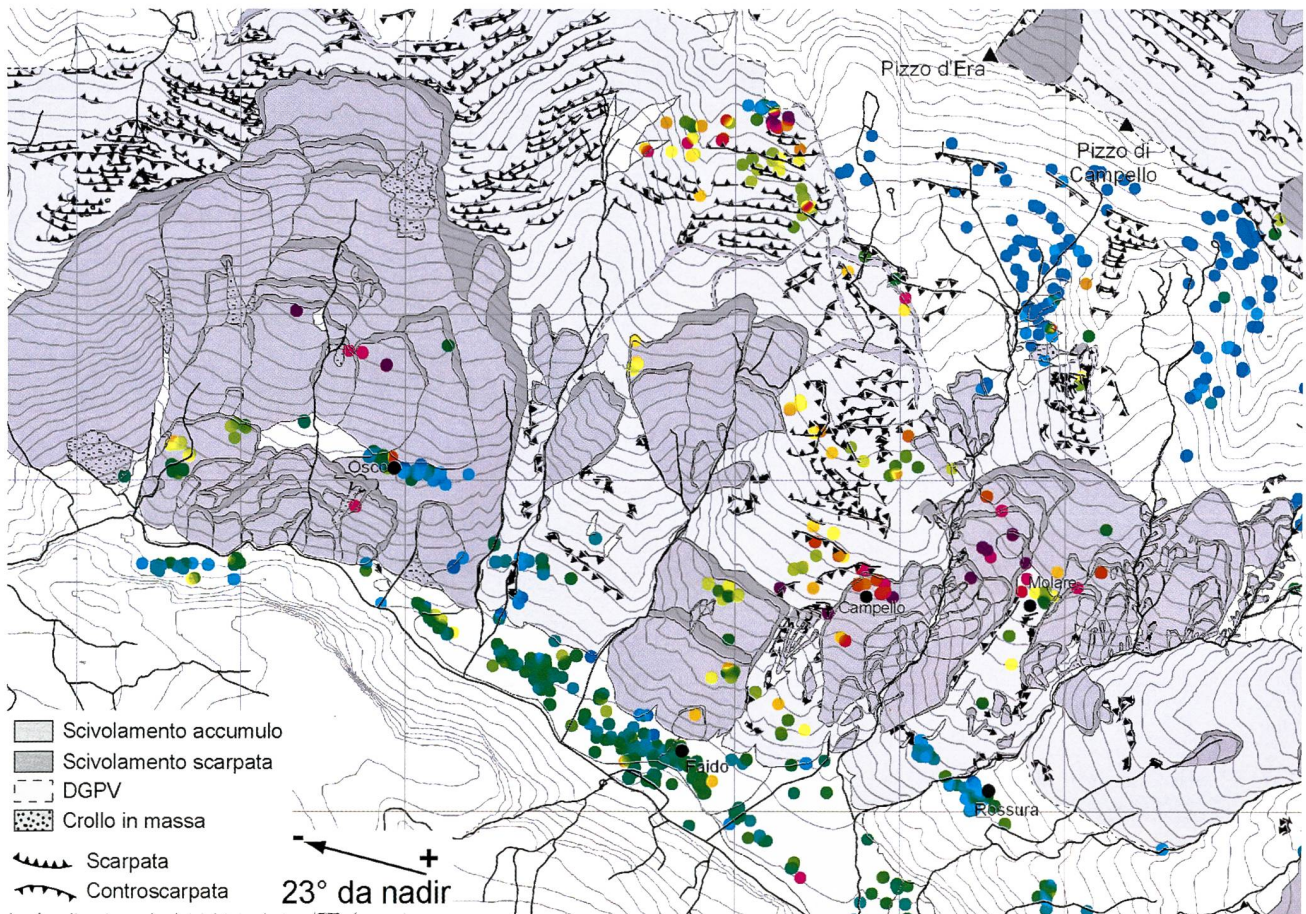


Fig. 9 – La deformazione profonda di Osco e Faido.

ti dei dissesti riconosciuti mediante fotointerpretazione. In particolare, spostamenti relativamente elevati, da 4 a 6 mm/anno, sono stati osservati in corrispondenza del nucleo edificato di Campello e a ovest di Molare, entrambi all'interno di scivolamenti profondi particolarmente attivi. Il nucleo di Molare presenta spostamenti relativamente più bassi e compresi tra 1 e 3 mm/anno. Più a est l'entità degli spostamenti aumenta fino a 5 mm/anno in corrispondenza di altri fenomeni di scivolamento caratterizzati da importanti evidenze morfologiche superficiali. Con ogni probabilità la velocità degli spostamenti è ben maggiore ai valori IPTA che rappresentano solo la componente quasi-verticale del vettore spostamento. Sul fondovalle i punti IPTA non evidenziano spostamenti particolarmente significativi. In questo settore, in accordo con una cinematica rotazionale degli scivolamenti profondi, gli spostamenti risulterebbero essere per lo più orizzontali col risultato di avere componente praticamente nulla nella direzione satellite-bersaglio.

CONCLUSIONI

L'individuazione degli spostamenti del terreno mediante analisi IPTA basata sulla metodologia dell'interferome-

tria radar da satellite ben completa il quadro delle informazioni geomorfologiche raccolte mediante fotointerpretazione. Se da un lato l'analisi di foto aeree permette di ben individuare molti fenomeni di dissesto e di definirne i limiti, l'analisi IPTA permette di caratterizzare per gli stessi lo stato di attività con una storia deformativa estesa su oltre 10 anni. Tale analisi è possibile laddove esistono edifici di natura antropica o aree con scarsa vegetazione e presenza di rocce esposte. In aree caratterizzate da forte copertura boschiva la tecnica IPTA risulta poco applicabile per l'assenza di punti riflettori stabili durante le successive acquisizioni SAR.

Pur avendo realizzato l'analisi IPTA e la fotointerpretazione in modo completamente indipendente la zonazione in settori a diversa velocità di spostamento ha permesso di verificare la coincidenza delle informazioni e la validità del metodo di monitoraggio nonché la possibilità di utilizzare le informazioni per una interpretazione cinematica dei processi in atto. Gli scivolamenti rotazionali, infatti, mostrano spostamenti pressoché verticali nella parte superiore e quasi orizzontali al piede.

La disponibilità di alcuni dati di monitoraggio geodetico ha permesso il confronto fra i dati IPTA con le velocità di spostamento verticali relative ad alcuni punti misurati con tecniche trigonometriche classiche per il periodo

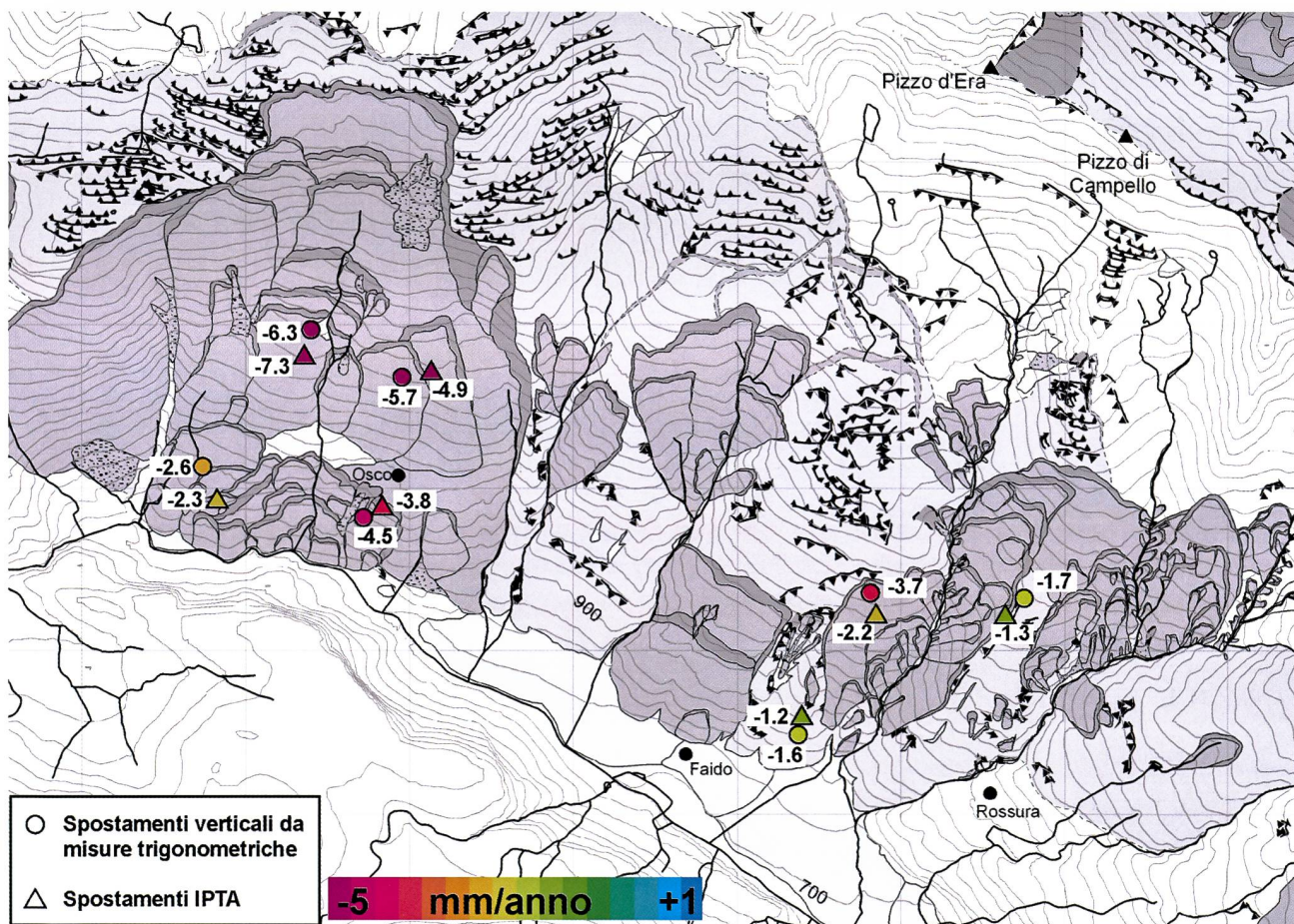


Fig. 10 – Zona di Osco e Faido confronto fra gli spostamenti IPTA e gli spostamenti verticali di alcuni punti misurati con tecniche trigonometriche classiche.

1958–1994 (fig. 10). Tale approccio mostra un ottimo accordo fra i valori di velocità di spostamento consentendo in tal modo di verificare la qualità delle misure IPTA o comunque la continuità del trend riconosciuto nel periodo coperto dal presente studio (1992–2001). La componente verticale delle velocità di spostamento è risultata essere ben corrispondente in diversi punti con conferme anche del verso di spostamento.

In prospettiva la continuità delle misure IPTA sul territorio svizzero sarà garantita dalle nuove acquisizioni della piattaforma satellitare europea ENVISAT e di quella canadese RADARSAT. Le applicazioni dell'interferometria radar da satellite in ambiente alpino trovano vantaggio anche nella determinazione dell'attività di tutti i fenomeni periglaciali come *rock glacier* o movimenti del terreno a causa dello scioglimento del permafrost (STROZZI *et al.* 2004).

I limiti della tecnica, dovuti essenzialmente alla presenza della vegetazione o alla presenza di spostamenti del terreno troppo rapidi, possono essere in parte superati attraverso l'uso di segnali radar a lunghezza d'onda maggiore, acquisite dalle piattaforme satellitari giapponesi JERS-1 e ALOS (STROZZI *et al.* 2005).

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato possibile grazie al sostegno dell'Agenzia Spaziale Europea ESA per i dati ERS SAR e del Dipartimento del Territorio del Cantone Ticino per i dati di monitoraggio.

BIBLIOGRAFIA

- BAMLER R. & HARTL P., 1998. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Inverse Problems*, 14: R1–R54.
- CASAGLI N., BRUGIONI M., CANUTI P., MENDUNI G., MONTINI G., SPINA D. & SULLI L., 2004. SLAM: Integration of remote sensing techniques within landslide risk analysis. *Proceedings of ENVISAT Symposium*, Salzburg, Austria, 6 to 10 September.
- COMMISSIONE GEOLOGICA SVIZZERA, 1976. *Atlante geologico della Svizzera 1:25000*, Foglio 1353 Lugano.
- FARINA P., COLOMBO D., FUMAGALLI A., GONTIER E. & MORETTI S., 2003. Integration of Permanent Scatterers Analysis and High Resolution Optical Images Within Landslide Risk Analysis. *Proceedings of FRINGE 2003*, ESRIN, Frascati, 1–5 December.
- ISTITUTO SCIENZE DELLA TERRA – SUPSI, 2006. *Analisi fotointerpretativa dei movimenti franosi del versante idrografico sinistro delle Valle del Cassarate tra i Comuni di Lugano–Pregassona e Cadro*.
- LATELTIN O., HAEMMIG C., RAETZO H. & BONNARD C., 2005. Landslide risk management in Switzerland, *Landslides*, 2(4): 313–320.
- NOVERRAZ F., BONNARD C., DUPRAZ H. & HUGUENIN L., 1998. Grands glissements de versants et climat. Nationales Forschungsprogramm «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» (NFP 31), Schlussbericht, 316 pp.
- PLANAT, 2007. *Pericoli naturali: Quanto costa la sicurezza?* Pubblicazioni PLANAT, Internet www.cenat.ch.
- Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D. and Tripet J.P., 2002. Hazard assessment in Switzerland – Codes of Practice for mass movements. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 61 (3), 263–268.
- ROSEN P., HENSLEY S., JOUGHIN I., LI F., MADSEN S., RODRIGUEZ E. & GOLDSTEIN R., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333–382, 2000.
- STROZZI T., FARINA P., CORSINI A., AMBROSI C., THÜRING M., ZILGER J., WIESMANN A., WEGMÜLLER U. & WERNER C., 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, Vol. 2, No. 3, pp. 193–201.
- STROZZI T., KÄÄB A. & FRAUENFELDER R., 2004. Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 25, No. 15, pp. 2919–2931.
- STROZZI T., WEGMULLER U., KEUSEN H.R., GRAF K. & WIESMANN A., 2006. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 3, Issue 1, pp. 15–18.
- STROZZI T. & VALENTI G., 2007. Misura del movimento superficiale dei ghiacciai ticinesi con interferometria radar da satellite, *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, No. 95, pp. 85–88, ISSN 079-1254.
- VARNES D.J., 1978. Slope movements. Types and processes. Schuster and Krizker (eds) «Landslides: analysis and control». *Spec. Rep. 176*, Transp. Res. Board, Nat.Ac. Sc., Washington.
- VARNES D.J., RADBRUCH-HALL D. & SAVAGE W.Z., 1989. Topographic and structural conditions in areas of gravitational spreading of ridges in the western United States. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1496*, Washington, p. 1–28.
- WEGMÜLLER U., WERNER C., STROZZI T. & WIESMANN A., 2003. Multi-temporal interferometric point target analysis. *Proceedings of the Multi-Temp 2003 conference*, Ispra, Italy, 16–18 July.
- WERNER C., WEGMÜLLER U., STROZZI T. & WIESMANN A., 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proceedings of IGARSS 2003*, Toulouse, France, 21–25 July.

