

## PIATTAFORMA RADAR PER IL MONITORAGGIO IN CONTINUO DI UNA FRANA CHE INTERAGISCE CON UNA GRANDE INFRASTRUTTURA IN COSTRUZIONE

### A RADAR PLATFORM FOR CONTINUOUS MONITORING OF A LANDSLIDE INTERACTING WITH AN UNDER-CONSTRUCTION INFRASTRUCTURE

FRANCESCA BOZZANO(\*), PAOLO MAZZANTI(\*\*) & ALBERTO PRESTININZI(\*)

(\*) University of Rome "Sapienza", Research Center CERI "Prediction, Prevention and Mitigation of Geological Risks" - Piazza U. Pilozzi, 9 - Valmontone, Italy  
(\*\*) University of Rome "Sapienza", Department of Earth Sciences - P.le Aldo Moro, 5 - 00185 Roma, Italy

#### RIASSUNTO

Nel presente lavoro viene descritta una piattaforma integrata per il monitoraggio in continuo di un versante instabile mediante interferometria SAR (Radar ad Apertura Sintetica) terrestre. La frana oggetto di studio interagisce con un'importante via di comunicazione interessata da lavori di ammodernamento. Al fine di monitorare il versante nella fase ante-operam, durante la realizzazione dell'opera stessa e nella fase post-operam, è stata progettata una piattaforma di monitoraggio capace di operare in continuo ed in qualsiasi condizione meteo-climatica e di illuminazione. La piattaforma è costituita dai seguenti sensori: un SAR interferometrico terrestre, una stazione meteorologica ed una fotocamera con acquisizione automatica. Tale sistema permette di tenere sotto controllo l'evoluzione del versante in termini di spostamenti e di correlare gli stessi con le varie fasi di lavoro e le diverse condizioni meteorologiche. Un aggiornamento molto frequente dei dati (ogni 5-6 minuti) garantisce un controllo continuo, in quasi-tempo reale ed in modalità remota.

**PAROLE CHIAVE:** frana, monitoraggio, interferometria SAR.

#### INTRODUZIONE

Il costante aumento della popolazione, accompagnato dalla sempre maggiore richiesta di mobilità, causa una crescente urbanizzazione del territorio con conseguente modificazione del paesaggio. Tali attività, in diversi siti, si scontrano con problematiche connesse alla fragilità del territorio, quali ad esempio le frane.

I fenomeni franosi rappresentano eventi ordinari che si inquadrano nella naturale evoluzione geomorfologica dei pendii e che assumono però una rilevanza di gran lunga maggiore allorché essi vengono ad interagire con l'uomo e le sue attività. Inoltre, tali eventi sono frequentemente innescati o accelerati rispetto alla loro naturale evoluzione, o direttamente causati, dalle modifiche che l'uomo apporta sul territorio, come accaduto per esempio in Italia nei casi del Vajont (MULLER, 1964; 1968) e di Stava (BERTI *et alii*, 1988; SAMMARCO, 2004).

La salvaguardia della comunità dai rischi connessi all'innescio di frane è affidata alle seguenti attività: 1) pianificazione del territorio; 2) progettazione delle opere compatibile con le caratteristiche fisiche del territorio; 3) analisi dei rischi connessi con le attività in progetto;

#### ABSTRACT

In this paper, a platform for the continuous monitoring of an unstable slope, based on ground based SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometry, is described. The landslide interacts closely with an important road where modernisation works have to be realised. A radar platform was designed to monitor all the stages of construction (before, during and after). The platform, which can operate continuously under any weather and lighting conditions, consists of the following sensors: i) ground-based interferometric SAR; ii) weather station; and iii) automatic image acquisition camera. The system continuously monitors slope displacements, correlating them with the various stages of construction and with weather conditions. The system updates the data every 5-6 minutes, thus permitting a quasi-real time control from a remote location.

**KEY WORDS:** landslide, monitoring, SAR interferometry

#### INTRODUCTION

Constant growth of population and mobility increases land use and alters the landscape. In some areas, geo-hazards, such as landslides, complicate the urbanisation process.

Landslides are part of the natural geomorphological evolution of slopes. However, when they interact with human activities, they take on much greater importance. Landslides are often caused or accelerated (with respect to their natural evolution) by anthropogenic changes of land cover as it happened in the case of the Vajont (MULLER, 1964; 1968) and Stava (BERTI *et alii*, 1988; SAMMARCO, 2004) disasters in Italy.

Protection of communities from the landslide risks is based on: i) land planning; ii) design of structures compatible with the physical characteristics of land; iii) analysis of risks connected with planned works; iv) continuous monitoring to prevent emergencies and minimise the socio-economic impact.

This paper deals with the latter point, showing a real example of design and development of a system for monitoring an unstable slope

4) monitoraggio in continuo per prevedere eventuali condizioni di criticità e ridurre al minimo il loro impatto socio-economico.

Il presente lavoro tratta in merito all'ultimo di questi punti mostrando un esempio reale di progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio di un versante instabile sul quale insiste un'opera di notevole rilevanza.

### APPROCCIO STRUMENTALE AL MONITORAGGIO

Il monitoraggio strumentale rappresenta ormai da molto tempo un'attività prioritaria nello studio e nella gestione di frane (ANGELI *et alii*, 2000) e si ritrovano, anche a livello internazionale, numerosi casi di versanti strumentati in relazione sia a fenomeni ad elevatissimo impatto sull'uomo (VARNES *et alii*, 1996; WIECZOREK *et alii*, 1990; COE *et alii*, 2003; JABOYEDOFF *et alii*, 2004), sia a fenomeni aventi dimensioni ed impatto limitati.

Il monitoraggio di una frana può avere scopi di tipo conoscitivo, di controllo e di emergenza. Questi tre tipi sono strettamente correlati e consequenziali ed in grado di fornire molteplici informazioni utili per:

- approfondire le conoscenze relative alla cinematica del fenomeno, garantendo così una più accurata diagnosi dello stesso;
- controllare per lungo tempo l'evoluzione del fenomeno, per stabilire la tollerabilità o meno della sua evoluzione per la comunità civile e le opere sulle quali insiste;
- gestire condizioni di emergenza nel caso in cui l'evoluzione repentina del fenomeno stesso possa determinare una condizione di rischio per la popolazione.

A questo riguardo, negli ultimi anni la comunità scientifica sta concentrando i suoi sforzi per passare dal concetto di forecasting a quello di nowcasting, ovvero di previsione a brevissima scadenza. Inoltre, in ottica di protezione civile, lo sviluppo tecnologico mira a soddisfare il concetto di real-time early-warning. Si stanno sempre più evolvendo sistemi in grado di misurare grandezze fisiche che possano essere direttamente correlate con l'accadimento di un fenomeno franoso, la cui lettura sia semplice, immediata ed automatizzabile e la cui interpretazione il più possibile sceriva da errori. A tal proposito il parametro di gran lunga più utilizzato è quello dello "spostamento" che, seguito nella sua evoluzione temporale, può fornire anche informazioni sul momento di collasso (SAITO, 1965; VOIGHT, 1989; FUKUZONO, 1990) e sulla base del quale può essere impostato un sistema di allerta (CROSTA & AGLIARDI, 2003). Per altro, esistono già alcuni casi di frane ad elevato rischio per la popolazione sottoposte ad un monitoraggio continuo con avanzati sistemi di allerta in tempo reale quali ad esempio la frana di Aknes (BLIKRA & ANDA, 2006) e la frana della Sciara del Fuoco di Stromboli (PUGLIESI *et alii*, 2004).

### REQUISITI SITO-SPECIFICI DI MONITORAGGIO

Il caso oggetto del presente testo risulta particolarmente complesso sia per la criticità strategica che riveste, sia per le problematiche sito-specifiche che pone. Esso si inquadra nell'ambito dei lavori di ammodernamento di un'importante via di comunicazione che, nel

where a major structure was planned.

### INSTRUMENTAL MONITORING APPROACH

Instrumental monitoring has long been a priority in the study and management of landslides (ANGELI *et alii*, 2000). Many are the examples, also at international level, of instrumented slopes, whose evolution is monitored because of their high (VARNES *et alii*, 1996; WIECZOREK *et alii*, 1990; COE *et alii*, 2003; JABOYEDOFF *et alii*, 2004) or moderate impact on local communities.

Landslide monitoring may have three goals: gaining greater insights into a given landslide; controlling its evolution; or managing emergency conditions. These goals are often closely related with one another and pursued sequentially.

Landslide monitoring may yield multiple data, which may be used:

- to make a more careful assessment of the phenomenon, by improving the understanding of its kinematics;
- to determine the tolerability of the phenomenon with the local population or structures, by checking its long-term evolution;
- to manage emergency conditions, when sudden evolution of the phenomenon may cause a risk to the population.

In the past few years, efforts of the scientific community have been focused on the transition from forecasting to nowcasting, i.e. to near-term forecasting. Moreover, in view of civil protection, technological development is being geared to respond to real-time early-warning requirements. An increasing number of systems are being developed to measure physical parameters and directly correlate them with the occurrence of a landslide. These systems are expected to provide straightforward data that can be read immediately and automatically and whose interpretation is as error-free as possible. The most commonly used parameter is "displacement". Monitoring displacement vs. time may suggest the time of failure (SAITO, 1965; VOIGHT, 1989; FUKUZONO, 1990) and make it possible to activate an alert system (CROSTA & AGLIARDI, 2003).

Advanced real-time alert systems continuously monitoring landslides with a potentially high risk to the population already exist, such as the ones of Aknes (BLIKRA & ANDA, 2006) and Sciara del Fuoco, Stromboli (PUGLIESI *et alii*, 2004).

### SITE-SPECIFIC MONITORING NEEDS

The case study described in this paper is particularly complex, in terms of both strategic importance of the project and site-specific issues. It concerns a project of modernisation of a major road, a section of which was planned on a highly unstable slope characterized

tratto in questione, si imposta in un territorio estremamente impervio dal punto di vista geomorfologico e molto complesso e fragile per quanto riguarda la sua natura geologica.

Il versante in oggetto è interessato dalla presenza di una paleo-frana di medie dimensioni che si è recentemente palesata tramite movimenti superficiali traslativi in corrispondenza di un settore cruciale interessato da alcune opere di ammodernamento. Tale versante è stato oggetto di dettagliate indagini geologico-tecniche di sito che hanno consentito di definire un modello geologico del versante esplicativo del fenomeno. L'ossatura del rilievo è costituita da roccia lapidea fratturata e fortemente alterata nella porzione superficiale, al di sopra della quale poggia, nella parte più rilevata, un deposito marino sabbioso; sono presenti inoltre depositi colluviali anch'essi a granulometria sabbiosa. Il versante è stato coinvolto in passato da una frana profonda per scorrimento rotazionale (il cui volume stimato è pari a  $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) con presenza di una superficie di scivolamento principale e di alcune secondarie. Gli eventi più recenti prodottisi all'interno di essa, con ben più modeste dimensioni, sono invece degli scorrimenti traslazionali delle porzioni più superficiali.

Obiettivo del monitoraggio è l'eventuale rimobilizzazione dell'intera frana o di una parte di essa.

La necessità strategica che l'opera in questione riveste e l'impossibilità di modificarne il tracciato, richiedono la presenza di un sistema di monitoraggio in grado di controllare l'evoluzione del versante sia in condizioni non perturbate che durante le diverse fasi di lavorazione permettendo in questo modo di prevedere eventuali fasi di crisi. In aggiunta, questo sistema garantisce da un lato l'ottimizzazione delle attività di cantiere e progettuali e dall'altro la sicurezza delle persone impegnate nei cantieri.

### SELEZIONE DELLA PIATTAFORMA DI MONITORAGGIO E DELLE STRUMENTAZIONI

La complessità dell'opera e del contesto nel quale si imposta ha richiesto un'attenta valutazione delle varie tecniche di monitoraggio esistenti per selezionare quella, o quelle, più idonee a rispondere alle specifiche esigenze che vengono di seguito riportate.

In primo luogo è stato considerato che, poiché il versante sarebbe stato oggetto di notevoli modifiche in corso di lavorazione, sarebbe stata estremamente difficoltosa l'installazione permanente di sistemi di monitoraggio che prevedessero l'ubicazione di sensori o capisaldi sul versante stesso. Questo ha suggerito di contemplare tecniche di sito quali inclinometri, estensimetri, fessurimetri solo in ausilio ad altri sistemi, in quanto la loro operatività, in una larga parte del versante, sarebbe stata compromessa durante le fasi di lavorazione. Sono state escluse invece tecniche di monitoraggio geodetico quali i sistemi laser (teodoliti, distometri, stazioni totali) che, per quanto tecniche di monitoraggio remoto, prevedono l'installazione di capisaldi e riflettori direttamente sul sito oggetto del monitoraggio. I sistemi D-GPS prevedono invece l'installazione dei sensori direttamente nei punti di interesse sul versante e quindi non sono applicabili per il caso descritto.

by very complex geological and geomorphological features.

The slope is characterized by an average-size palaeo-landslide. In a sector of the slope, involved by some of the modernisation works, shallow translational movements had recently occurred. Detailed geological-engineering in-situ investigations were conducted to build a geological model of the slope, capable of explaining the phenomenon. The relief consists of fractured and weathered rocks. A sandy marine deposit overlies the most elevated portion of these rocks, while sandy colluvial deposits also outcrop in the slope. The same slope experienced, in the past, a deep rotational slide (estimated volume:  $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ). A main sliding surface and some secondary surfaces have been reconstructed. Recently, minor translational movements, in its shallowest portions, have been recorded.

The aim of the survey was to assess reactivation of all or part of the landslide.

The modernisation project had a strategic value and its route could not be changed. Therefore, a system was needed to: i) monitor the evolution of the slope under both undisturbed conditions and during the works; ii) predict the occurrence of critical conditions, if any. This system would also optimise planning, design and construction activities and protect the construction site personnel.

### SELECTION OF THE MONITORING PLATFORM AND INSTRUMENTATIONS

The complexity of the project made it necessary to carefully review available monitoring techniques and select the most suitable one/s to meet the following specific requirements.

First of all, as the slope would be significantly altered during construction, the installation of permanent monitoring systems with sensors or benchmarks was ruled out. As result, inclinometers, strain gauges and crack meters were planned as a complement to other systems, since their operation on a large part of the slope would be hindered by construction works. Geodetic monitoring techniques, e.g. laser systems (teodolites, distance meters, total stations) were excluded as they require the installation of benchmarks and reflectors directly on the monitored site. D-GPS systems, which involve the installation of sensors in the points of interest on the slope, were considered to be inapplicable to the present case.

Among geodetic techniques, only ground-based LiDAR (Light Detection and Ranging) and RADAR (Radio Detection and Ranging) systems do not need on-site installation of benchmarks and can operate in full remote mode. The effectiveness of ground-based laser

Tra le tecniche geodetiche, solamente i sistemi LiDAR (Light Detection and Ranging) e RADAR (Radio Detection and Ranging) terrestri non necessitano dell'installazione di capisaldi in sito e sono quindi in grado di operare completamente in remoto. L'efficacia dei sistemi laser scanner terrestri per il monitoraggio superficiale dei fenomeni franosi è stata ormai dimostrata ed è ampiamente testimoniata nella letteratura scientifica (MIKOS *et alii*, 2005; TEZA *et alii*, 2007) ma presenta ad oggi alcune limitazioni che risultano rilevanti per il caso trattato, quali: insufficiente accuratezza nel calcolo degli spostamenti, difficoltà di automazione e non operatività in condizioni meteo avverse (utilizzando frequenze nel campo dell'ottico o dell'infrarosso vicino).

È infatti necessario, nel presente caso di studio, un sistema in grado di fornire risposte ed informazioni in tempi rapidi (pochi minuti) e che sia operativo in qualsiasi condizione atmosferica e di illuminazione, dato che: 1) il versante è fortemente disturbato durante il giorno dalle attività in corso e quindi i dati di maggior interesse sono quelli notturni; 2) le condizioni meteorologicamente avverse sono quelle di maggiore criticità e quindi non devono rappresentare un limite di operatività per il sistema di monitoraggio. Inoltre, nell'ottica di fornire anche un sistema di allerta in tempo reale, è necessaria l'automazione sia dell'acquisizione che della restituzione dei dati.

Questi requisiti sono soddisfatti dalle tecniche RADAR terrestri, con particolare riferimento all'interferometria radar, in quanto utilizzano frequenze del segnale nel campo delle microonde, che trasmettono anche con nebbia e pioggia ed hanno configurazioni strumentali con ripetizione temporale del dato molto rapida.

## L'INTERFEROMETRIA SAR TERRESTRE

Le applicazioni ambientali dell'interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) si sviluppano a cavallo tra gli anni '80 e '90 da piattaforma satellitare e vedono come maggiore utilizzo la generazione di modelli digitali del terreno (ZEBKER & GOLDSTEIN, 1986; PRATI & ROCCA, 1990; LIN *et alii*, 1994; LANARI *et alii*, 1996; FERRETTI *et alii*, 1997) e lo studio delle deformazioni terrestri (GABRIEL *et alii*, 1989; GOLDSTEIN *et alii*, 1993; MASSONNET *et alii*, 1994, 1995, 1996; MASSONNET & FIEGL, 1998).

Tale tecnica satellitare, ormai affermata ed ampiamente validata per studi a scala regionale (FARINA *et alii*, 2006) e per l'investigazione di fenomeni franosi con evoluzione lenta (HILLEY *et alii*, 2004), è però difficilmente applicabile per lo studio di singoli fenomeni in contesti di limitata estensione areale sia per la bassa risoluzione spaziale che per le attuali basse frequenze temporali del dato (circa 30 giorni con i satelliti attualmente in orbita).

A partire dalla fine degli anni '90 il principio dell'interferometria SAR è stato trasposto a strumentazioni terrestri (TARCHI *et alii*, 1999) ed ha dimostrato negli anni seguenti notevoli potenzialità per il monitoraggio delle deformazioni vulcaniche (LEVA, 2004; CASAGLI *et alii*, 2004), delle coperture nevose (MARTINEZ-VAZQUEZ & FORTUNY-GUASH, 2005; 2006) e, soprattutto, dei fenomeni franosi (PIERACCINI *et alii*, 2002; LEVA *et alii*, 2003; TARCHI *et alii*, 2003; ANTONELLO *et alii*, 2004; NOFERINI *et alii*, 2005; CASAGLI *et alii*,

scanner systems for surface monitoring of landslides has been largely demonstrated and reported in the scientific literature (MIKOS *et alii*, 2005; TEZA *et alii*, 2007). Nevertheless, this technique has some limitations, which were regarded as significant in the present case, e.g. poorly accurate in calculating displacements, hardly automatable and inoperable under adverse weather conditions (using optical or near-infrared signal frequencies).

The system to be selected should be capable of yielding data and answers within a short time (few minutes) and operating under any weather and lighting conditions. Indeed, i) as the slope would be highly disturbed by construction work during the day, the most interesting data would be those collected at night; ii) particularly adverse weather conditions are considered the most unsafe for the slope stability, thus they should not prevent the system from operating correctly. Furthermore, in order to provide real-time alert capabilities, the monitoring system should collect, process and report the data in automatic mode.

These requirements are satisfied by ground-based RADAR techniques (especially radar interferometry). Indeed, these techniques use microwave signal frequencies and transmit data even under conditions of fog and during rainfalls. Moreover, their configurations have a very fast repetition time of the data.

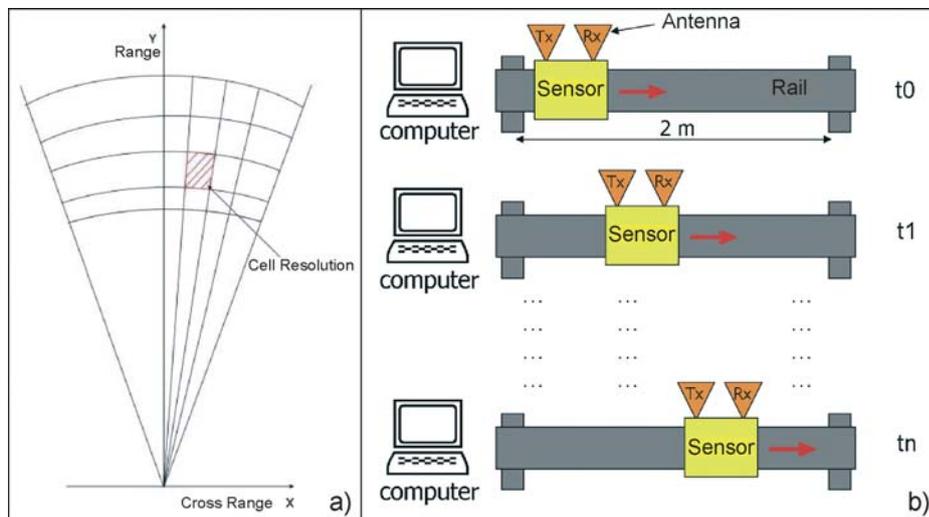
## GROUND-BASED SAR INTERFEROMETRY

Environmental applications of satellite-based SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometry were developed in the 1980s-1990s. Since then, they have been mostly employed to generate digital terrain models (ZEBKER & GOLDSTEIN, 1986; PRATI & ROCCA, 1990; LIN *et alii*, 1994; LANARI *et alii*, 1996; FERRETTI *et alii*, 1997) and study ground deformations (GABRIEL *et alii*, 1989; GOLDSTEIN *et alii*, 1993; MASSONNET *et alii*, 1994, 1995, 1996; MASSONNET & FIEGL, 1998).

This satellite technique has become widespread and largely validated for regional-scale studies (FARINA *et alii*, 2006) and for investigating slow-moving landslides (HILLEY *et alii*, 2004). However, it is more hardly applicable to the study of individual phenomena taking place in small areas, owing to its low spatial resolution and, at present, low frequency of data output (about 30 days with present satellites).

In the late 1990s, SAR interferometry moved to ground-based systems (TARCHI *et alii*, 1999). In subsequent years, it demonstrated its high potential for monitoring volcanic deformations (LEVA, 2004; CASAGLI *et alii*, 2004), snow covers (MARTINEZ-VAZQUEZ & FORTUNY-GUASH, 2005; 2006) and, above all, landslides (PIERACCINI *et alii*, 2002; LEVA *et alii*, 2003; TARCHI *et alii*, 2003; ANTONELLO *et alii*, 2004; NOFERINI *et alii*, 2005; CASAGLI *et alii*,

Fig. 1 - a) Griglia di acquisizione dell'immagine SAR; b) Schema di funzionamento dell'interferometro SAR terrestre  
 - SAR image acquisition grid; b) Schematic diagram of ground-based SAR interferometer



alii, 2004; NOFERINI *et alii*, 2005; CASAGLI *et alii*, 2006).

L'interferometria SAR terrestre, pur applicando la stessa tecnica di quella satellitare, presenta notevoli differenze pratiche rispetto a questa, dalle quali ne derivano limiti e vantaggi.

L'interferometria SAR terrestre garantisce una ripetitività temporale del dato molto elevata (un dato ogni pochi minuti) rispetto all'interferometria satellitare. D'altro canto, però, uno strumento terrestre, pur con portate di qualche km, ha un raggio di osservazione assai limitato rispetto ad uno strumento montato su piattaforma satellitare.

Dalle differenze sopra descritte si evince come l'interferometria terrestre sia una tecnica che presenta notevoli potenzialità nello studio di singoli fenomeni che si estendono su porzioni di territorio arealmente poco estese e che presentano un'evoluzione rapida.

**PRINCIPI BASE DELL'INTERFEROMETRIA SAR TERRESTRE**

Uno dei principi base della tecnica è rappresentato dal SAR, che permette di ottenere immagini radar bidimensionali dello scenario irradato con elevate risoluzioni sia in range (direzione congiungente strumento/scenario) che in cross range (direzione ortogonale a quella di range nel piano orizzontale) (CURLANDER & McDONOUGH, 1991) (Fig. 1a). Nell'interferometria terrestre l'apertura sintetica (CURLANDER & McDONOUGH, 1991) viene riprodotta attraverso un sensore radar che si sposta lungo un binario emettendo e ricevendo un segnale, con frequenza nel campo delle microonde, attraverso apposite antenne (Fig. 1b).

La differenza di fase dei singoli pixel che costituiscono due immagini radar acquisite ad intervalli temporali diversi, una volta rimosso il contributo atmosferico, permette di calcolare gli spostamenti subiti dal singolo pixel come:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi$$

dove  $d$  è lo spostamento,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale radar e

2006).

Ground-based SAR interferometry has considerable differences with respect to its space- or air-borne counterparts, on which it is based. These differences imply pros and cons.

Ground-based SAR interferometry offers a very short measurement time interval (i.e. every few minutes) vs. satellite-based interferometry. However, a ground-based system, though with a range of some km, has a very limited observation radius as compared to a satellite-mounted one.

These differences suggest that ground-based interferometry has a high potential for the study of individual phenomena which occur in a small area and are characterized by a fast evolution.

**PRINCIPLES OF GROUND BASED SAR INTERFEROMETRY**

SAR principle, which can be considered at the core of the technique, allows to obtain 2D images of the scanned scenario with a high range (instrument-scenario joining direction) and cross-range resolution (direction orthogonal to the range direction in the horizontal plane) (CURLANDER & McDONOUGH, 1991) (Fig. 1a). In ground-based interferometry, synthetic aperture (CURLANDER & McDONOUGH, 1991) is synthesized via a radar sensor moving along a rail and emitting/receiving microwave signals via two suitable antennas (Fig. 1b).

The displacements map is computed by the phase difference in all the pixels, between two radar images acquired at different times (after removing the atmospheric contribution), using the following expression:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi$$

where  $d$  is the displacement,  $\lambda$  is the wavelength of the radar signal

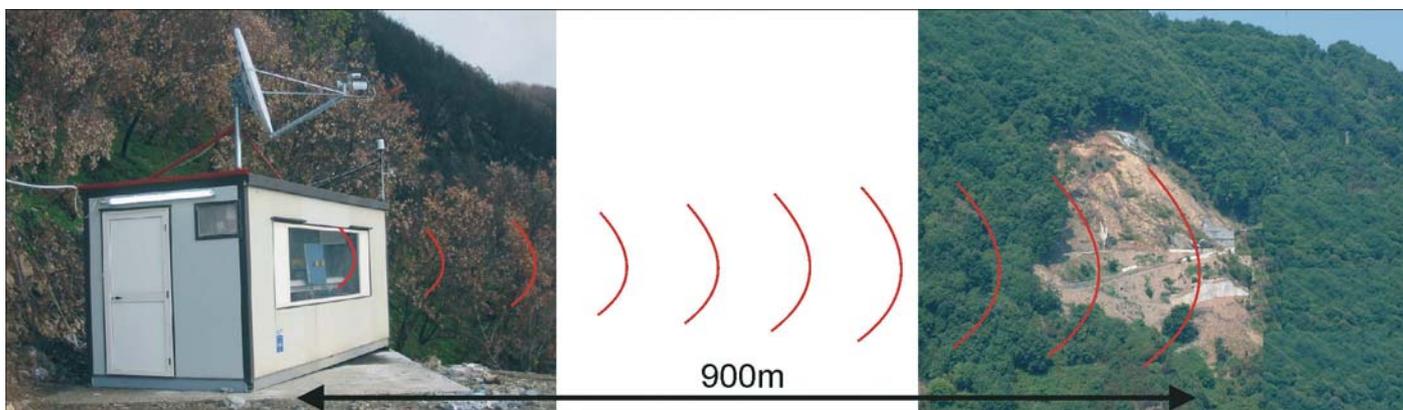


Fig. 2 - Schema operativo della piattaforma di monitoraggio del versante affetto da condizioni di instabilità  
 - Schematic diagram of the system with photo of the monitoring platform of the unstable slope



Fig. 3 - Dettaglio della struttura ospitante le strumentazioni di monitoraggio. Nella foto è visibile il basamento in cemento ed il box di protezione della struttura  
 - Detail of the structure housing the monitoring instruments. The supporting concrete base and the box are also visible in the photo

$\Delta\varphi$  è la differenza di fase tra le due acquisizioni.

Il contributo atmosferico alla differenza di fase, che si somma a quello degli spostamenti dello scenario, può essere rimosso con diverse tecniche di post-processing. La più semplice è quella del GCP (*Ground Control Point*), che utilizza un punto assunto fermo all'interno dello scenario come riferimento per la rimozione degli spostamenti fittizi dovuti a variazioni atmosferiche.

Sulla base dei disturbi atmosferici e della distanza operativa, l'accuratezza nel calcolo degli spostamenti può variare da millimetrica a submillimetrica.

### LA PIATTAFORMA DI MONITORAGGIO INTEGRATA

La piattaforma di monitoraggio integrata qui descritta è stata progettata per rispondere alle esigenze riportate nei paragrafi precedenti e considerando un tempo di impiego di almeno un anno in continuo.

Il sistema di monitoraggio è stato ubicato, all'interno di un box appositamente realizzato sul versante opposto rispetto a quello interessato dai lavori, ad una distanza compresa tra 700 e 900 m (Fig. 2).

Il box è stato appoggiato e reso solidale con una fondazione in

and  $\Delta\varphi$  is the phase difference between the two acquisitions.

The atmospheric contribution to the phase difference (which adds to the real slope displacements) may be removed by using different post-processing techniques. The simplest one is based on a GCP (*Ground Control Point*); in this technique atmospheric displacements are removed by considering a reference point within the scenario assumed to be stable.

Depending on the atmospheric conditions and the distance between the instrument and the scenario, a millimeter or submillimeter accuracy can be achieved.

### THE INTEGRATED MONITORING PLATFORM

The integrated monitoring platform was designed to meet the requirements described in the previous paragraphs, considering at least one year of continuous operation.

The system was housed in a specially-designed box and installed on the slope opposite to the one involved by the project, at a distance of 700-900 m (Fig. 2).

The box was anchored to an about 50 cm-thick concrete founda-

Fig. 4 - Vista dell'interno del box e dei vari apparecchi che costituiscono il sistema di monitoraggio  
 - View of the interior of the box and of the various components of the monitoring system

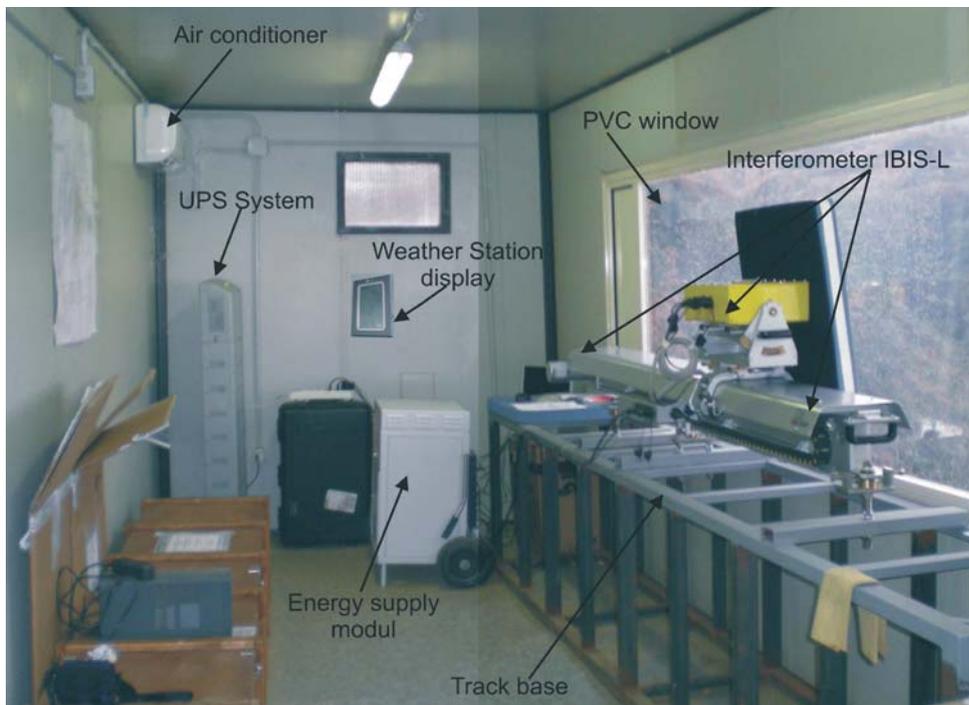


Fig. 5 - Vista frontale dell'interferometro SAR terrestre modello IBIS-L  
 - Front view of ground-based SAR interferometer model IBIS-L



cemento dello spessore di circa 50 cm, realizzata direttamente sul substrato roccioso in modo tale da garantire la stabilità dell'intera struttura (Fig. 3).

Sul box è stata praticata una finestra frontale con dimensioni di circa 3 metri in larghezza ed 1 metro in altezza e coperta con una lastra di Plexiglass tale da garantire l'inviolabilità della struttura, ma al tempo stesso la trasmissione delle onde radar emesse dallo strumento. Il box è stato inoltre forato nella parte inferiore per garantire l'ancoraggio diretto del basamento di appoggio della strumentazione alla fondazione sottostante.

Tutta la struttura è stata attrezzata tramite un collegamento diretto alla linea elettrica, appositamente stabilizzata sia tramite salvavita a riarmo automatico che per mezzo di un UPS e stabilizzatore di corrente in grado di garantire l'alimentazione elettrica per circa 12 ore

tion, located directly on the bedrock in order to guarantee the overall stability of the structure (Fig. 3).

A 3 m-long and 1 m-high front window was opened into the box and covered with a Plexiglas sheet. In this way, the structure was shielded while allowing the radar waves emitted by the instrument to pass through it. Moreover, the lower part of the box was perforated to directly anchor the instrument-supporting base to the underlying foundation.

The structure was directly connected to a power line. The line, stabilised with automatic disconnect/reconnect switch, UPS and current stabiliser, ensures power supply for about 12 hours (in case power failure on the direct line) to the overall structure, thus avoiding loss of data.

Inside the box, an air conditioning system kept constant temper-

|   |   |
|---|---|
| Lunghezza binario / <i>Rail length</i>  | 2 m   |
| Frequenza centrale / <i>Central frequency</i>   | 16.75 GHz   |
| Larghezza di banda / <i>Bandwidth</i>   | 300 MHz   |
| Polarizzazione / <i>Polarisation</i>  | VV  |
| Guadagno antenna / <i>Antenna gain</i>  | 20dB  |
| Numero di scansioni che costituiscono l'immagine SAR<br><i>Number of scans making up the SAR image</i>  | 401   |
| Risoluzione in Range / <i>Range resolution</i>  | 0.50 m  |
| Risoluzione in Cross range / <i>Cross-range resolution</i>  | 4.5 mrad (3.6 m a 800 m di distanza)<br>4.5 mrad (3.6 m at a distance of 800 m) |
| Distanza max / <i>Max distance</i>  | 1200 m  |
| Tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva<br><i>Inter-scan delay (waiting time between end of one scan and start of next scan)</i> | 6 s   |
| Ripetibilità temporale / <i>Measurement time interval</i>   | ~ 6 minuti/minutes  |

Tab. 1 - Configurazione strumentale utilizzata  
- *Instrumental configuration*

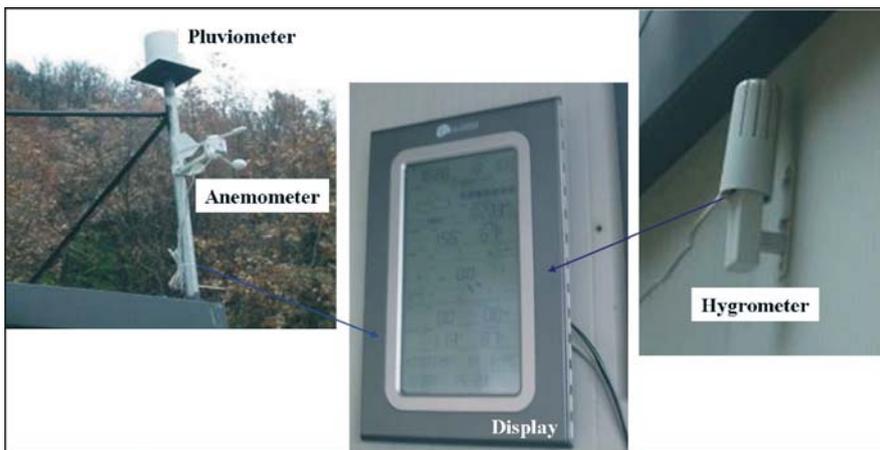


Fig. 6 - Sensori che costituiscono la stazione meteo ed il display di controllo  
- *Sensors of the weather station and console*

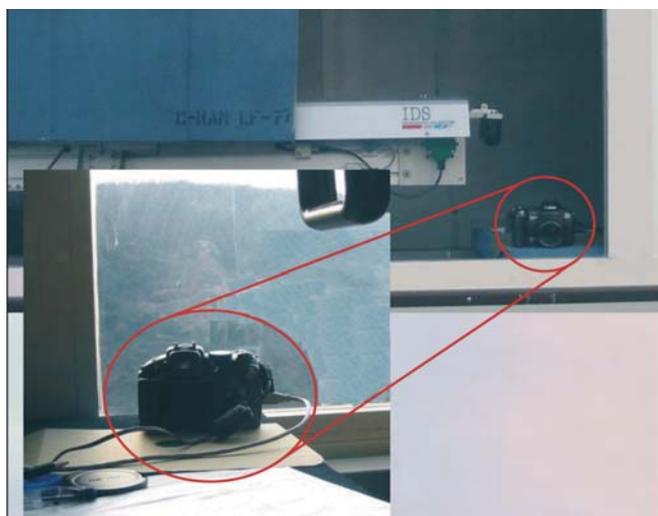


Fig. 7 - Fotocamera con acquisizione automatica  
- *Automatic photo camera*

(in caso di interruzione della linea elettrica diretta) a tutta la struttura ed impedire eventuali perdite di dati.

All'interno del box è stato predisposto anche un condizionatore in grado di mantenere costanti le condizioni di temperatura ed umidità (Fig. 4).

La piattaforma di monitoraggio consta di tre sistemi principali di seguito elencati:

- interferometro SAR terrestre modello IBIS-L (Fig. 5), prodotto dalla società IDS S.p.A, le cui caratteristiche operative, per il presente caso di studio, sono riportate in Tab. 1;
- fotocamera digitale modello CANON S5 IS con zoom ottico 12x, dotata di alimentatore AC\DC ed interfacciata al PC server tramite porta USB (Fig. 6);
- stazione meteorologica wireless modello LA CROSSE WS 3650 costituita da sensori pluviometrici, idrometrici, barometrici, termometrici ed eolici (Fig. 7).

La fotocamera digitale e la stazione meteorologica, entrambe gestite con acquisizione automatica e trasferimento dei dati al PC di controllo, rappresentano un importante ausilio per la gestione del monitoraggio e l'elaborazione ed interpretazione dei dati radar acquisiti. Infatti, tramite le immagini acquisite in continuo dalla fotocamera, è possibile avere un controllo costante delle attività in corso sul versante monitorato, garantendo così un'ottimizzazione delle modalità di acquisizione ed elaborazione del dato ed un ausilio all'interpretazione dei risultati ottenuti.

La stazione meteorologica, invece, garantisce, tramite un aggiornamento dei dati contemporaneo a quello dell'interferometro, un più accurato filtraggio dei dati radar ed un'interpretazione e correlazione a breve termine delle dinamiche di versante indotte da eventi meteorologici.

L'intera piattaforma di monitoraggio è supportata da un sistema di collegamento di rete satellitare che garantisce la gestione remota del sistema ed il trasferimento dei dati.

## GESTIONE, CONTROLLO REMOTO E TRASMISSIONE DATI DEL SISTEMA

L'intero sistema è gestito tramite una piattaforma informatica costituita da due PC, ubicati all'interno del box, dei quali uno adibito alla gestione del sistema radar e l'altro alla gestione della fotocamera, della stazione meteo, dell'UPS e della connessione di rete satellitare. I due sistemi sono connessi tramite collegamento diretto di rete locale e possono essere controllati in remoto direttamente dal centro operativo del CERI tramite la funzionalità di Desktop Remoto. Il collegamento di rete satellitare garantisce infatti una completa gestione dell'intera piattaforma di monitoraggio, oltre al trasferimento in tempo reale dei dati archiviati temporaneamente nel PC Server locale. In Fig. 8 è mostrato il diagramma di flusso completo dei dati dalla loro acquisizione sino al trasferimento presso il Cento di Calcolo del CERI (sito in Roma) dove questi vengono elaborati ed interpretati.

Il trasferimento dei dati dal PC di acquisizione al PC server di

ature and humidity conditions (Fig. 4).

The monitoring platform consists of the following three main systems:

- ground-based SAR interferometer model IBIS-L (Fig. 5), manufactured by IDS S.p.A (specifications for the present case study are listed in Table 1);
- digital camera model CANON S5 IS with 12x optical zoom, AC\DC power supply and USB interface with the PC server (Fig. 6);
- wireless weather station model LA CROSSE WS 3650, including anemometer, wind vane, thermometer, hygrometer, barometer, and rain gauge (Fig. 7).

The digital camera and the weather station, both with automatic data acquisition and transfer to the controlling PC, play a key role in the monitoring activity. The images, constantly supplied by the camera, make it possible to continuously monitor the construction works carried out on the investigated slope, optimising data collection and processing and facilitating the interpretation of results.

The weather station updates the data at the same time as the interferometer. As a result, the filtering of the radar data is more accurate and the weather-induced displacements on the slope may be interpreted and correlated.

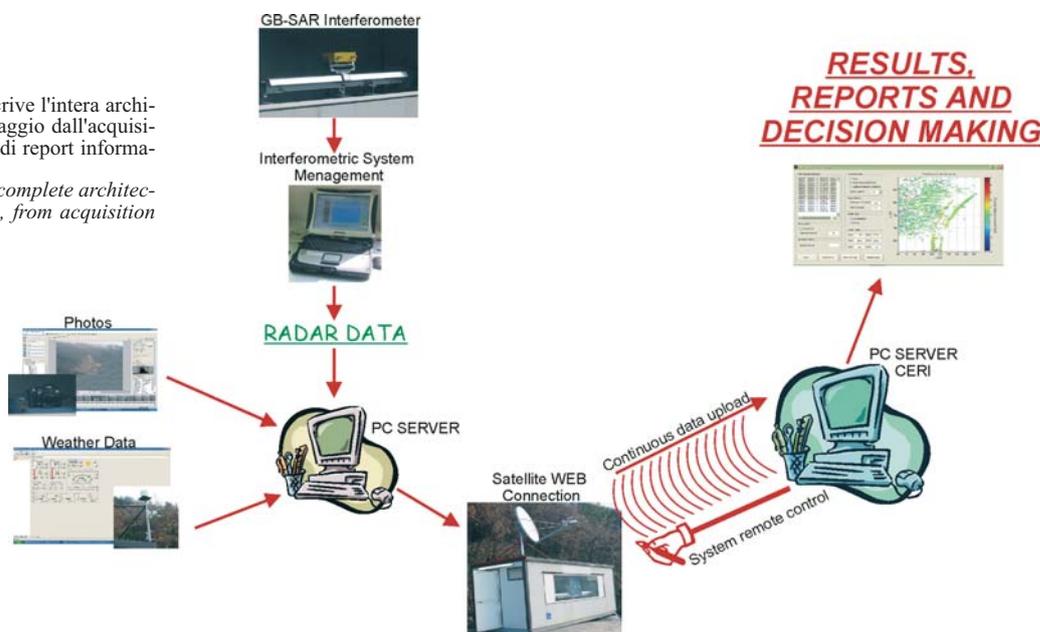
The monitoring platform is supported by a satellite link through which the system and data transfer are remotely controlled.

## SYSTEM MANAGEMENT, REMOTE CONTROL AND DATA TRANSMISSION

The system is managed via a computer platform with two PCs placed inside the box: one for operating the radar system and the other for the weather station, the UPS and the network connections. The two PCs are directly linked via LAN and may be remote-controlled from CERI's control centre in remote desktop mode. The satellite link allows the remote management of the overall monitoring platform and the real-time transfer of the data, provisionally stored in the local PC server. Fig. 8 shows the complete flow diagram, from collection to transfer of the data to CERI's control centre in Rome, where they are processed and interpreted.

A software programme (IBISKP, suitably developed by IDS S.p.A. for the case study) handles the transmission of the data from the acquisition PC to the storage PC and their transfer to CERI's control centre. The programme also monitors the operation of the

Fig. 8 - Diagramma di flusso che descrive l'intera architettura del sistema di monitoraggio dall'acquisizione dati sino alla creazione di report informativi  
 - Flow diagram describing the complete architecture of the monitoring system, from acquisition to reporting of the data



archiviazione ed il successivo trasferimento remoto al centro di calcolo del CERI viene gestito dal software IBISKP, appositamente realizzato da IDS S.p.A. per il presente caso di studio. Lo stesso software permette anche di monitorare l'operatività della rete di flusso dei dati tramite l'invio di e-mail ed SMS di corretto funzionamento ed avvisi di mancata acquisizione agli indirizzi e numeri telefonici prescelti.

data flow network and sends reports of good operation via e-mail and SMS, as well as alerts of failure in the delivering of data, to the selected addresses and telephone numbers.

### ATTIVITÀ PRELIMINARI

I dati ricevuti dal centro di calcolo del CERI, in formato grezzo, vengono poi processati in modalità manuale o semi-automatica per estrarre l'informazione di spostamento dello scenario irradiato, e poter così valutare l'evoluzione del versante in un determinato intervallo di tempo.

La fase di processing del dato prevede l'elaborazione di alcuni prodotti e mappe intermedie che vengono di seguito descritte e che presentano numerose analogie con quelle prodotte con dati satellitari.

- Mappa in Potenza: mappa bidimensionale dello scenario osservato con rappresentazione in scala cromatica del valore di backscatter del segnale di ogni singolo pixel. Tale prodotto permette di identificare le porzioni di versante irradiate che presentano alti valori di riflettività del segnale radar e che quindi possono essere efficacemente investigate (Fig. 9). Il dato è fortemente dipendente dal tipo di terreno che costituisce il versante e, nel presente caso, è soggetto a forti modifiche in conseguenza delle intense lavorazioni in corso.
- Mappa di Coerenza: mappa bidimensionale dello scenario osservato con rappresentazione in scala cromatica del valore di coerenza del segnale interferometrico (HANSEN, 2001) di ogni pixel. Tale valore è la misura della correlazione dell'informazione di fase di due o più segnali successivi e si esprime come un numero puro compreso tra 0 e 1 (1 corrisponde a due segnali perfettamente in fase).

### PREPARATORY ACTIVITIES

The raw data received by CERI's control centre are processed in manual or semi-automatic mode, so as to derive the displacement of the investigated slope and assess its evolution at a given time.

During this stage, the following data products and intermediate maps (very similar to satellite-based ones) are generated.

- Power map: 2D map of the investigated scenario, with the backscatter value of the signal of each pixel plotted on a colour scale. The map identifies the scanned portions of the slope which have high radar reflectivity and can thus be effectively investigated (Fig. 9). The backscatter is highly dependent on the type of soil which characterizes the slope and, in this case study, are subject to strong changes owing to the intense works carried out on the slope.
- Coherence map: 2D map of the observed scenario with the coherence value of the interferometric signal (HANSEN, 2001) of each pixel plotted on a colour scale. This value measures the correlation of the phase of two or more successive signals and it is expressed as a pure number from 0 to 1 (number 1 corresponds to perfectly in phase signals). In this map, the sectors with high coherence values correspond to portions of the slope which remain stable over time and do not undergo decorrelation effects (HANSEN, 2001) (Fig. 10). For instance, vegetated areas may have high backscatter (i.e. high value in the power map)

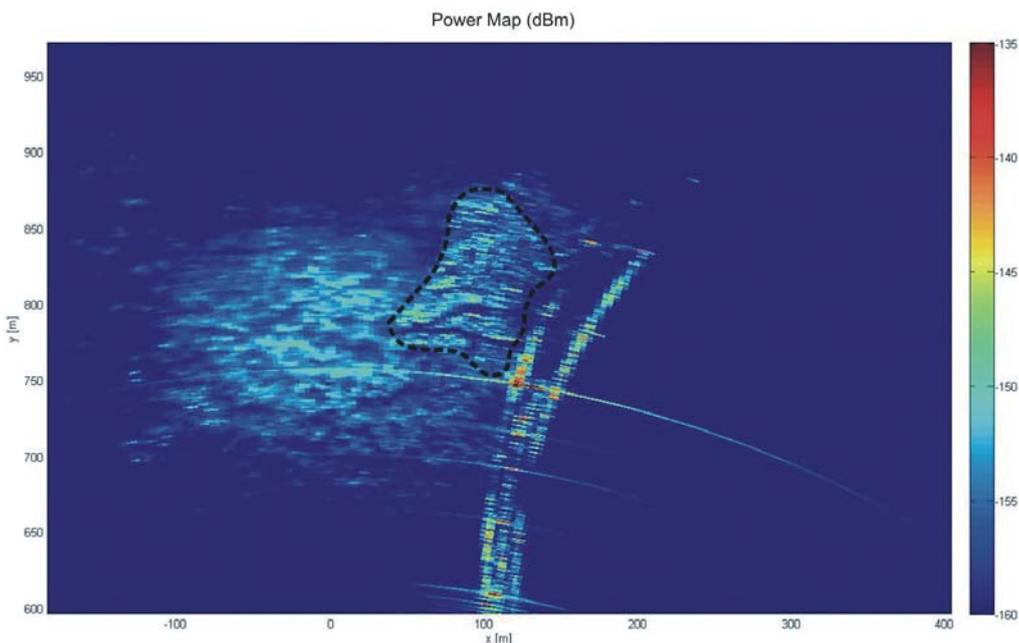


Fig. 9 - Mappa in potenza dello scenario irradiato. La linea nera tratteggiata identifica il settore di versante privo di vegetazione mostrato in Fig. 2

- Power map of the scanned scenario. The dashed black line identifies the unvegetated slope sector of Fig. 2

Coherence Map

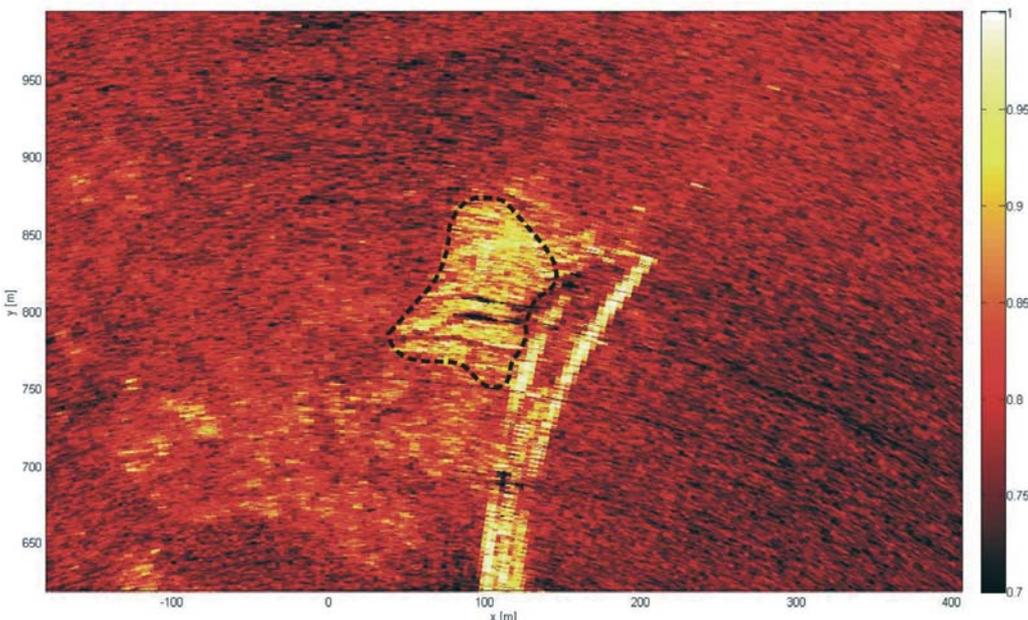


Fig. 10 - Mappa di coerenza dello scenario irradiato. La linea nera tratteggiata identifica il settore di versante privo di vegetazione mostrato in Fig. 2

- Coherence map of the scanned scenario. The dashed black line identifies the unvegetated slope sector of Fig. 2

Grazie a questa mappa si individuano i settori con valore elevato di coerenza che rappresentano le porzioni di terreno che rimangono stabili nel tempo e non subiscono effetti di decorrelazione (HANSEN, 2001) (Fig. 10). Ad esempio, aree vegetate possono presentare un alto valore di backscatter ma una coerenza molto limitata e non sono quindi investigabili con la presente tecnica. Questi prodotti intermedi rappresentano anche gli strumenti attra-

but very low coherence; therefore, they cannot be investigated with this technique.

These intermediate products also help to select high-quality points, i.e. permanent scatterers, whose displacement and behaviour are considered to be representative of the investigated sectors of the slope. Thus, these permanent scatterers are continuously monitored and used for quantitative analysis of displacement,

Fig. 11 - Corner reflector utilizzato per la georeferenziazione della mappa radar  
 - Corner reflector used for georeferencing the radar map

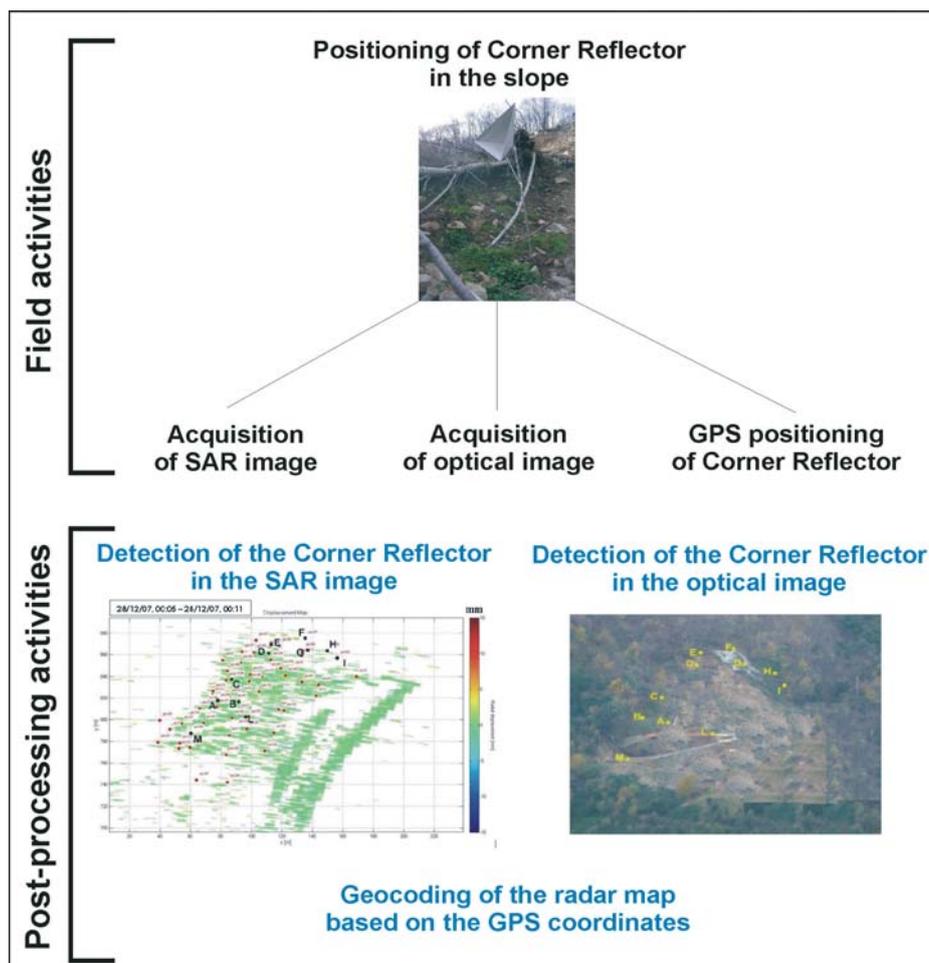


Fig. 12 - Schema di flusso per la georeferenziazione della mappa radar sulla foto ottica e sul sistema di riferimento geografico assoluto  
 - Flow diagram for georeferencing the radar map on the optical photo and on the absolute geographic reference system

verso i quali vengono scelti i punti di elevata qualità, denominati "permanent scatterers", dei quali viene seguita l'evoluzione continua nel tempo ed il cui comportamento, considerato rappresentativo di determinati settori monitorati, è utilizzato per l'analisi quantitativa degli spostamenti, della velocità e dell'accelerazione.

Le mappe sopra descritte, così come le mappe di spostamento che verranno trattate nei paragrafi successivi, sono inquadrare in un sistema di riferimento relativo con il punto di origine in corrispondenza dello strumento e con le due dimensioni corrispondenti alla direzione di range e cross-range (Fig. 1a).

Una georeferenziazione è quindi necessaria per convertire il sistema di riferimento relativo in un sistema assoluto. Questa attività è stata condotta attraverso una campagna di misure con un riflettore passivo (Fig. 11), alternativamente ubicato in diversi punti del versante, e del quale sono state identificate le coordinate radar ed acquisite immagini ottiche. Tramite questi punti, dei quali sono state poi rilevate anche le coordinate topografiche assolute, mediante sistema GPS differenziale, è stata operata la georeferenziazione delle mappe radar in un sistema di riferimento geografico assoluto (Fig. 12).

## PRODOTTO FINALE

Il prodotto finale è rappresentato da mappe bidimensionali degli spostamenti del versante nel tempo (interferogrammi) (Fig. 13) e serie temporali di spostamento di alcuni singoli pixel preventivamente identificati come settori di elevata qualità e significativi per analizzare l'evoluzione del versante (Fig. 14).

Le mappe areali di spostamento permettono la delimitazione di settori con comportamento omogeneo all'interno dello scenario osservato mentre le serie storiche di spostamento dei singoli pixel permettono di seguire in continuo l'evoluzione dei vari settori e di eseguire una trattazione numerica e quantitativa del dato.

Contemporaneamente vengono prodotti grafici delle variazioni nel tempo delle principali grandezze fisiche misurate dalla stazione meteorologica ed immagini ottiche del versante, tutti sincronizzati con i dati radar.

L'analisi simultanea di questi prodotti costituisce lo strumento principale per la fase interpretativa del fenomeno e per quella decisionale, sia in condizioni ordinarie che in condizioni di crisi.

## GESTIONE DEL SISTEMA E GESTIONE DATI

La gestione del sistema consta di un'attività di manutenzione strumentale ordinaria dell'intera piattaforma, operata con cadenza mensile, e di un trasferimento in continuo dei dati presso il centro di calcolo del CERI attraverso una connessione con protocollo FTP. I dati così ricevuti in tempo quasi-reale vengono elaborati, inseriti all'interno di protocolli informativi per l'utente finale, e trasmessi con cadenza temporale definita (giornaliera, settimanale, mensile) a seconda delle varie fasi di attività. Sono inoltre previste trasmissioni dirette e tempestive di report speciali allorché si verificano condizioni ritenute di particolare criticità.

velocity and acceleration.

The above maps, just as the displacement maps described in the following paragraphs, are characterized by a relative reference system. The system has the instrument as its point of origin and its two dimensions correspond to the range direction and to the cross-range direction (Fig. 1a).

Georeferencing is thus needed to convert the relative reference system into an absolute system. This activity was based on a survey using a passive reflector (Fig. 11). The reflector was alternatively positioned in different points of the slope of which radar coordinates and optical images were acquired. Georeferencing of the radar maps on an absolute geographic system (Fig. 12) was made through these points, of which the topographic co-ordinates were obtained via a differential GPS.

## FINAL OUTPUT

The final products are 2D maps of displacements vs. time of the investigated scenario (interferograms) (Fig. 13) and time series of displacement of individual pixels (Fig. 14), which were previously identified as high-quality key points for analysing slope evolution under the above-described criteria.

The areal maps of displacement permit to demarcate sectors having homogeneous behaviour in the investigated scenario. Conversely, the time series of displacement of the individual pixels permit to continuously track the evolution of the various sectors and to handle the resulting data numerically and quantitatively.

Plots of variations vs. time of the main physical parameters measured by the weather station and optical images of the slope (all synchronised with the radar data) are concurrently generated.

Combined analysis of these products is the main tool to interpret the phenomenon and make the related decisions in both normal and critical conditions.

## DATA AND SYSTEM MANAGEMENT

The overall platform undergoes routine instrumental maintenance on a monthly basis. Data are continuously transferred to CERI's control centre via FTP. The data, received in quasi-real time, are processed via end-user protocols and transmitted with a predetermined time frequency (daily, weekly, monthly), depending on the activities being conducted. When particularly critical conditions arise, special reports are timely generated.

Fig. 13 - Esempio di mappa cromatica degli spostamenti lungo la linea di vista misurati dell'interferometro. Dati registrati tra le 00:01 del 20 settembre e le 11:31 del 2 ottobre. Tali valori corrispondono a spostamenti in avvicinamento al radar  
 - Example of colour map of displacements along the line of sight measured by the interferometer. Data recorded from 00:01 of 20 September to 11:31 of 2 October. These values correspond to displacements approaching the radar

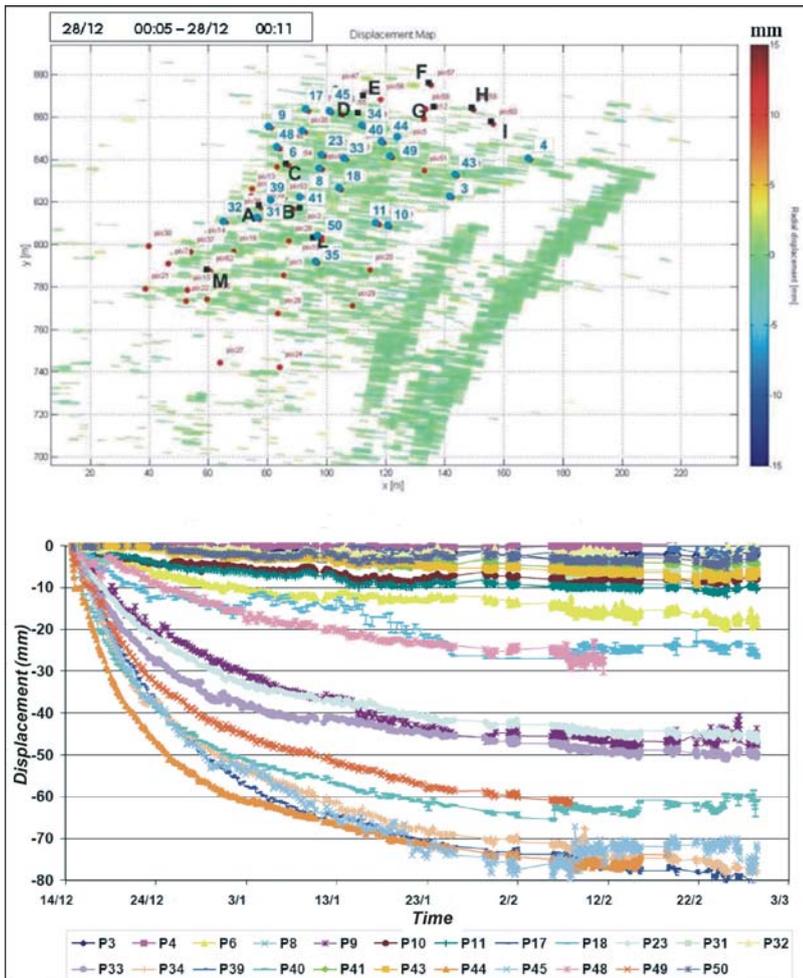
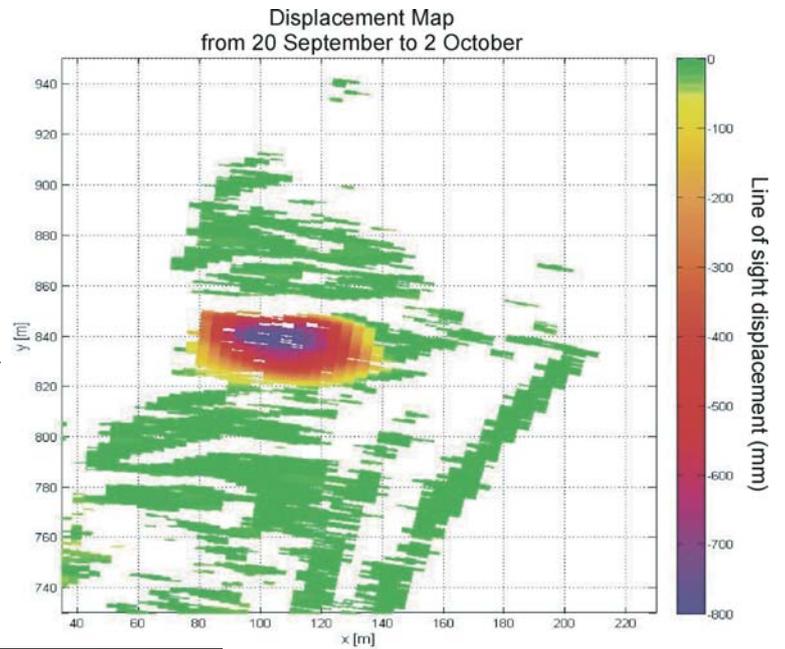


Fig. 14 - Serie temporali degli spostamenti di alcuni pixel registrati tra il 14 dicembre ed il 29 febbraio. L'ubicazione dei punti è riportata nella figura in alto  
 - Time series of displacements of some pixels recorded from 14 December to 29 February. The location of the points is shown in the top figure

## CONCLUSIONI

La piattaforma di monitoraggio descritta rappresenta un esempio reale ed efficiente di sistema di controllo delle deformazioni di un versante instabile oggetto di massicce attività antropiche. Grazie alla sua operatività in continuo di notte e di giorno, in qualsiasi condizione meteorologica e completamente in automatico, tale piattaforma rappresenta un esempio di sistema di controllo e monitoraggio remoto in tempo reale di versanti interessati da rilevanti opere antropiche. L'integrazione con stazione meteorologica e fotocamera digitale, anch'esse con acquisizione in continuo, permette l'ottimizzazione del sistema di monitoraggio radar oltre a garantire una continua supervisione delle attività in corso e delle condizioni atmosferiche che, con particolare riferimento ai dati pluviometrici, rivestono un ruolo significativo sull'evoluzione del versante.

Il controllo completo del sistema in modalità remota garantisce inoltre una notevole efficienza operativa, oltre alla possibilità di gestire la fase di elaborazione del dato e quella decisionale direttamente presso il centro operativo di controllo.

L'elevata accuratezza nella misura degli spostamenti, nell'ordine del mm, ha mostrato inoltre come la strumentazione possa essere efficace anche in contesti nei quali si prevedano deformazioni di entità limitata ma comunque in grado di determinare problemi strutturali alle opere realizzate o in corso di realizzazione.

Tale piattaforma di monitoraggio può essere considerata quindi un prototipo di sistema di controllo, applicabile in completa sicurezza ed in aree anche poco agevoli, per frane interessate da attività antropiche (grazie alla sua operatività completamente in remoto ed alla portata fino a 4 km).

Ulteriori sviluppi riguarderanno principalmente la parte software, tramite la realizzazione di apparati in grado di operare in modalità completamente automatica con la possibilità di definizione di soglie di allerta. Inoltre, un'unica piattaforma software in grado di gestire ed integrare contemporaneamente i dati radar, meteo e fotografici potrebbe apportare una notevole semplificazione delle attività di elaborazione ed interpretazione del dato oltre ad uno snellimento e conseguente velocizzazione delle attività. Di particolare rilievo ai fini del controllo di un versante è l'integrazione di questa tecnica di monitoraggio degli spostamenti superficiali con tecniche di monitoraggio in profondità quali sistemi inclinometrici.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano G. Mungo per la costante e preziosa collaborazione e M. Floris, A. Montagna ed I. Cipriani per il supporto. Si ringrazia infine IDS S.p.A. per il supporto tecnico.

## OPERE CITATE/REFERENCES

- ANGELI M.G., PASUTO A. & SILVANO S. (2000) - *A critical review of landslide monitoring experiences*. Engineering Geology, **55** (3): 133-147.
- ANTONELLO G., CASAGLI N., FARINA P., LEVA D., NICO G., SIEBAR A.J. & TARCHI D. (2004) - *Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements*. *Landslides*, **1**: 21-28.
- BERTI G., VILLA F., DOVERA D., GENEVOIS R. & BRAUNS J. (1988) - *The disaster of Stava, northern Italy*. In: Hydraulic Fill Structures, Proc, Am Soc Civil Engre,

## CONCLUSIONS

The above-described monitoring platform is a real and efficient example of system for monitoring deformations on an unstable slope subject to massive anthropogenic activities. Thanks to its around-the-clock, all-weather and fully automatic operation, the platform is one of the few examples of remote real-time systems for monitoring slopes where major construction works are planned or already ongoing. The weather station and the digital camera (with continuous data acquisition) optimise the radar monitoring system and ensure non-stop tracking of ongoing construction work and weather conditions (especially rainfall), which have a crucial impact on the evolution of the slope.

Full remote control of the system guarantees high performance and enables CERI's control centre to directly handle the data and the decision-making process.

Furthermore, high accuracy in measuring mm-scale displacements shows that the platform may perform well even in settings where the expected deformations are of limited extent but large enough to cause problems to the structures that have been or are being built.

Hence, the monitoring platform may be regarded as a prototype of a system to monitor landslides on slopes involved by human activities which can operate under safety conditions also in hardly accessible places (thanks to its fully remote mode and its operative range distance up to 4 km).

Further developments are mainly expected on the software side, i.e. development of fully automatic systems capable of determining alert thresholds. Additionally, a single software platform managing and integrating radar, weather and photo data might significantly streamline the processing and interpretation of data on slope evolution and speed up the time of response. Slope monitoring and landslide mitigation activities might benefit from integration of this surface displacement investigation technique with instruments monitoring displacement in depth such as inclinometers.

## ACKNOWLEDGMENTS

The Authors wish to thank G. Mungo for his constant and precious collaboration and M. Floris, A. Montagna e I. Cipriani for their support. The Authors are also grateful to IDS S.p.A for the technical support.

- Geotech Engng Div, Speciality Conf, Fort Collins, CO, USA, 492-510.
- BLIKRA L.H. & ANDA E. (2006) - Åknes/Tafjord prosjektet - *Geofagleg samanstilling og oppsummering av undersøkingar og overvaking*. NGU Rapport (in norwegian)
- CASAGLI N., FARINA P., GUERRI L., TARCHI D., FORTUNY J., LEVA D. & NICO G. (2004) - *Preliminary results of SAR monitoring of the Sciara del Fuoco on the Stromboli volcano*. In: PICARELLI L. (eds.) - Proceedings IW-Flows2003 International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills. Sorrento (Italy) 14-16 May, 2003.
- CASAGLI N., FARINA P., LEVA D. & TARCHI D. (2006) - *Application of ground based radar interferometry to monitor an active rockslide and implication for emergency management*. In: S.G. EVANS ET ALII (eds.) - *Landslide from Massive Rock Slope Failure*, 157-173.
- COE J.A., ELLIS W.L., GODT J.W., SAVAGE W.Z., SAVAGE J.E., MICHAEL J.A., KIBLER J.D., POWERS P.S., LIDKE D.J. & DEBRAY S. (2003) - *Seasonal movement of the Slungullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation*, July 1998-March 2002. *Engineering Geology* **68** (1-2): 67-101.
- CROSTA G.B. & AGLIARDI F. (2003) - *Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements*. *Can. Geotech. J.*, **40**: 176-191.
- CURLANDER J.C. & MCDONOUGH R.N. (1991) - *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*. New York: Wiley-Interscience, 1991.
- FARINA P., COLOMBO D., FUMAGALLI A., MARKS F. & MORETTI S. (2006) - *Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project*. *Engineering Geology*, **88**: 200-217.
- FERRETTI A., MONTI GUARNIERI A., PRATI C. & ROCCA F. (1997) - *Multi-baseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction*. Proceedings of the Third ERS Symposium, Florence, Italy.
- FUKUZONO T., 1990. *Recent studies on time prediction of slope failure*. *Landslide News*, **4**: 9-12.
- GABRIEL A.K., GOLDSTEIN R.M. & ZEBKER H.A. (1989) - *Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry*. *Journal of Geophysical Research*, **94** (B7):9183-9191.
- GOLDSTEIN R.M., ENGELHARDT H., KAMB B. & FROLICH R.M. (1993) - *Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream*. *Science*, **262**: 1525-1530.
- HANSEN, R. (2001) - *Radar interferometry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands).
- HILLEY G.E., BURGMANN R., FERRETTI A., NOVALI F. & ROCCA F. (2004) - *Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis*. *Science*, **304**: 1952-1955.
- JABOYEDOFF M., ORNSTEIN P. & ROULLER J.D. (2004) - *Design of a geodetic database and associated tools for monitoring rock-slope movements: the example of the top of Randa rockfall scar*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**: 187-196.
- LANARI R., FORNARO G., RICCIO D., MIGLIACCIO M., PAPANASSIOU K.P., MOREIRA J.R., SCHWABISCH M., DUTRA L., PUGLISI G., FRANCESCHETTI G. & COLTELLI M. (1996) - *Generation of digital elevation models by using SIRC/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: The Etna case study*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34** (5): 1097-1115.
- LEVA D. (2004) - *Landslides and Volcanoes monitoring by LiSA*. Proceedings of the URSI Comm. F Workshop., Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Ocean, Ice and Atmosphere, 20-21 April, Ispra - Italy.
- LEVA D., NICO G., TARCHI D., FORTUNY J. & SIEBAR A.J. (2003) - *Temporal Analysis of a Landslide by Means of a Ground-Based SAR Interferometer*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **41** (4): 745-752.
- LIN Q., VESECKY J.F. & ZEBKER H.A. (1994) - *Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain*. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 1775-1790.
- MARTINEZ-VAZQUEZ A. & FORTUNY-GUASH J. (2006) - *Snow cover monitoring in the swiss alps with a GB-SAR*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*. March 2006
- MARTINEZ-VAZQUEZ A. & FORTUNY-GUASH J. (2005) - *Monitoring Structural Changes and Stability of the Snow Cover with a Ground-Based Synthetic Aperture Radar*. URSI Commission F Symposium. Ispra (Italy), 2005.
- MASSONNET D. & FEIGL K.L. (1998) - *Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface*. *Reviews of Geophysics*, **36**: 4.
- MASSONNET D., BRIOLE P. & ARNAUD A. (1995) - *Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry*. *Nature*, **375**: 567-570.
- MASSONNET D., FEIGL K., ROSSI M. & ADRAGNA F. (1994) - *Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake*. *Nature*, **369**: 227-230.
- MASSONNET D., FEIGL K.L. & ROSSI M. (1996) - *Coseismic deformation field of the M=6.7 Northridge, California earthquake of January 17, 1994 recorded by two radar satellites using interferometry*. *Geophysical Research Letters*, **23** (9): 969-972.
- MIKOS M., VIDMAR A. & BRILLY M. (2005) - *Using a laser measurement system for monitoring morphological changes on the Strug rock fall, Slovenia*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **5**: 143-153.
- MULLER L. (1964) - *The rock-slide in the Vajont Valley*. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, **2**: 148-212.
- MULLER L. (1968) - *New considerations on the Vajont slide*. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, **6**: 1-91.

- NOFERINI L., PIERACCINI M., MECATTI D., MACALUSO G. & ATZENI C. (2005) - *Long term landslide monitoring by Ground Based SAR Interferometer*. International Journal of Remote Sensing, **27**: 1893-1905.
- PIERACCINI M., CASAGLI N., LUZI G., TARCHI D., MECATTI D., NOFERINI L. & ATZENI C (2002) - *Landslide monitoring by ground-based radar interferometry: a field test in Valdarno (Italy)*. International Journal of Remote Sensing, **24** (6): 1385-1391.
- PRATI C. & ROCCA F. (1990) - *Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images*. International Journal of Remote Sensing, **11**: 2215-223.
- PUGLIESI G., ALOISI M., BONACCORSO A, BONFORTE A., CANTARERO M., CAMPISI O., FALZONE G. & MATTIA M. (2004) - *The early-warning integrated geodetic system to monitor the Sciara del Fuoco (Stromboli) volcanic landslide*. Geophysical Research Abstracts, **6**: 04276.
- SAITO M. (1965) - *Forecasting the time of occurrence of a slope failure*. In Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montréal, Que. Pergamon Press, Oxford, 537-541.
- SAMMARCO O. (2004) - *A tragic Disaster Caused by the failure of tailing dams leads to the formation of the Stava 1985*. Foundation. Mine Water and Environment, **23**: 91-95.
- TARCHI D., CASAGLI N., FANTI R., LEVA D., LUZI G. PASUTO A., PIERACCINI M. & SILVANO S. (2003) - *Landslide Monitoring by Using Ground-Based SAR Interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy*. Engineering Geology, **68**: 15-30
- TARCHI D., RUDOLF H., LUZI G., CHIARANTINI L., COPPO P & SIEBER A.J. (1999) - *SAR interferometry for structural changes detection: A demonstration test on a dam*. In: Proc. IGARSS **1999**: 1522-1524.
- TEZA G., GALGARO A., ZALTRON N. & GENEVOIS R. (2007) - *Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach*. International Journal of Remote Sensing, **28** (16): 3425 - 3446.
- VARNES D.J., SMITH W.K., SAVAGE W.Z. & POWERS, P.S. (1996) - *Deformation and control surveys, Slumgullion landslide*. In VARNES, D.J. & SAVAGE, W.Z. (eds.) - *The Slumgullion earth flow: a large-scale natural laboratory*. U.S. Geological Survey Bulletin **2130**: 43-49.
- VOIGHT B. (1989) - *A relation to describe rate-dependent material failure*. Science, **243**: 200-203.
- WIECZOREK G. F., WILSON R. C., MARK, R. K., KIEFER D. K., HARP E. L., ELLEN S. D., DROWN W. M., & PRICE P. (1990) - *Landslide warning system in the San Francisco Bay region, California*. Landslide News, **4**: 5-8,.
- ZEBKER H.A. & GOLDSTEIN R.M. (1986) - *Topographic mapping from interferometry synthetic aperture radar observations*. Journal of Geophysical Research, **91** (B5): 4993-4999.

*Received October 2008 - Accepted December 2008*