

INTERFEROMETRIA SAR DA TERRA PER IL MONITORAGGIO DI UN FENOMENO DI SPROFONDAMENTO (SINKHOLE) IN TOSCANA

BUCHIGNANI VINCENZO*, **LEVA DAVIDE****,
NICO GIOVANNI**, **RIVOLTA CARLO****

*Geologo, libero professionista, Lucca (LU),

**LiSALab srl, Tecnocity Alto Milanese, Legnano (MI)

INTRODUZIONE

La piana sulla quale si ubica il centro abitato di Camaiore, in provincia di Lucca, è soggetta al rischio di fenomeni tipo "sinkhole", che si manifestano, nelle varie zone conosciute nel mondo, con la comparsa di voragini localizzate, causate da crolli con sprofondamento, formazione di morfologie tipiche pseudo-circolari e possibile coinvolgimento di abitazioni. Il 15 ottobre 1995 una voragine di circa 40 m di diametro si aprì improvvisamente in un'area residenziale del Comune, in località "Le Funi". A seguito di tale evento una palazzina di tre piani fu completamente inghiottita, mentre altri cinque edifici furono danneggiati irrimediabilmente e demoliti nei giorni successivi. L'attività parossistica durò circa 18 ore, ma le deformazioni del suolo erano iniziate, secondo quanto rilevato dalle informazioni dei cittadini coinvolti, almeno dieci giorni prima, successivamente ad un sisma di discreta intensità con epicentro in Lunigiana. Successivamente a questo fenomeno di crollo, sulla zona più urbanizzata della conca camaioiese sono stati eseguiti studi, in base ai quali si sono rilevate aree con evidenti carenze di massa nel sottosuolo, tali da farle ritenere strutturalmente fragili e a rischio "sinkhole".

La fragilità della zona è stata evidenziata dal gruppo di studio coordinato da V. Buchignani nei vari rapporti presentati all'Amministrazione Comunale basati su prospezioni dirette (geognostiche), prospezioni geofisiche (sismiche, geoelettriche e gravimetriche), geochemiche, su indagini idrogeologiche e su rilievi topografici. Dalle osservazioni su capisaldi di riferimento monitorati con GPS, si osserva che i punti di controllo hanno registrato movimenti verticali concentrati nel centro della conca di Camaiore dell'ordine di circa 4-5 centimetri, con un chiaro "respiro" del materasso alluvionale nei diversi periodi dell'anno, anche in funzione delle pressioni idrauliche interne. In particolare, la notevole entità dell'escursione misurata tra giugno e dicembre 2000 ha fatto registrare dei micro-lesionamenti alle strutture murarie rigide, denunciati da proprietari di abitazioni che hanno rilevato piccole crepe, disassamenti dei cancelli, lesioni ai marciapiedi ed ai muretti di recinzione particolarmente evidenti e manifestatisi soprattutto dopo gli eventi alluvionali del dicembre 2000.

Nelle aree ritenute più fragili si temono cedimenti delle strutture e degli edifici esistenti, con deformazioni iniziali del suolo comprese tra qualche millimetro ed il centimetro. È infatti fondamentale sottolineare che l'eventuale deformazione del suolo, con evoluzione dei cedimenti progressiva, rappresenta il precursore principale dell'innescio di un fenomeno di crollo profondo.

Il Comune, nell'ottica di porre sotto controllo in particolare i precursori del fenomeno "sinkhole", intende avvalersi di un sistema di monitoraggio integrato in grado di analizzare, con cadenza periodica, le deformazioni del suolo e, in caso di anomalie significative, di garantire un'allertamento preventivo.

Le procedure di analisi del rischio per gli sprofondamenti catastrofici presentano molte analogie con quelle utilizzate con i fenomeni franosi. Infatti, come le frane, gli sprofondamenti rappresentano "movimenti di massa" che tuttavia non si sviluppano necessa-

riamente lungo un versante ma di solito in aree pianeggianti. Per questo motivo, nello studio dello sprofondamento di Camaiole verrà applicata la tecnologia LiSA[®] progettata e sviluppata dal Centro Comune di Ricerca (CCR) della Commissione Europea e validata in collaborazione con diversi dipartimenti universitari, sia in Italia sia all'estero, su frane ad alto rischio e di diversa topologia e su strutture differenti come ponti, dighe e monumenti artistici. In seguito alla positiva conclusione di queste ricerche, il CCR ha assegnato alla LiSALab srl la licenza esclusiva per l'utilizzo e la commercializzazione dei servizi offerti per mezzo della tecnologia LiSA[®].

Il sistema LiSA[®] è un interferometro SAR (radar ad apertura sintetica) mobile, che opera generalmente nelle bande di frequenza C, X e Ku. Esso restituisce mappe bidimensionali del campo di deformazione dell'oggetto o della scena osservata, che possono estendersi fino a qualche chilometro quadro, con una precisione nella misura della deformazione nell'ordine della frazione di millimetro. La distribuzione continua dell'informazione interferometrica, essendo di carattere spaziale, migliora e semplifica l'interpretazione dell'evoluzione del fenomeno osservato, fornendo una visione globale della deformazione in atto facilmente utilizzabile per ulteriori indagini tecniche o simulazioni. Nel caso specifico del Comune di Camaiole, il sistema LiSA[®] implementerà il monitoraggio progettato attraverso il controllo delle microdeformazioni del suolo.

Un sistema per il controllo di queste tipologie di pericoli naturali deve rispondere ad alcuni requisiti che ne garantiscano l'efficienza quali:

- l'affidabilità, in quanto il sistema deve produrre informazioni significative in modo da ridurre al minimo le incertezze nell'interpretazione dei dati e nell'elaborazione degli scenari a rischio associati all'evoluzione del fenomeno;
- la robustezza e utilizzabilità in ogni condizione meteorologica, climatica ed ambientale, in modo da ridurre al minimo le operazioni di manutenzione e da evitare l'interruzione del funzionamento proprio nei momenti critici in cui i dati sono più necessari;
- la flessibilità e maneggevolezza, in modo da poter essere predisposto rapidamente all'approssimarsi di condizioni potenzialmente rischiose o per controllarne l'evoluzione nel caso l'evento sia già accaduto;
- la prontezza nel produrre informazioni in tempo reale immediatamente utilizzabili per l'interpretazione del fenomeno.

L'articolo ha la seguente struttura. Nel paragrafo 2 viene riportata una breve sintesi degli studi eseguiti sul sinkhole che ha colpito nell'Ottobre 1995 il Comune di Camaiole. Il paragrafo 3 riassume il principio di funzionamento del sistema LiSA[®] e introduce la tecnica dell'interferometria SAR da terra. I primi dati acquisiti dal sistema LiSA[®] e relativi a una zona urbanizzata al margine nord-orientale del centro storico di Camaiole interessata dal fenomeno di sprofondamento catastrofico del 1995 sono descritti nel paragrafo 4. L'articolo si conclude al paragrafo 5 dove sono riassunti i vantaggi della tecnologia LiSA[®].

1. SINK-HOLE DI CAMAIOLE

Il fenomeno tipo sinkhole è riconosciuto in diverse parti del mondo ed è identificato come una calamità scarsamente prevedibile e dalla quale non è facile difendersi. In Italia i principali dissesti sono individuabili lungo la fascia tirrenica, dall'area versiliese alla Campania. Già dalle cartografie del 1800 si può intuire l'esistenza di sinkhole, dovuti a crolli con sprofondamento e formazione di morfologie tipiche, pseudo-circolari. Il dissesto verificatosi a Camaiole nell'ottobre 1995 è assimilabile a quelli già noti del-

l'alto Lazio, della Pianura Pontina e a quello di Grosseto del 1999. La particolarità della maggior parte di questi fenomeni è di avere alcune caratteristiche comuni, nonché di essere caratterizzati dal fatto che il bed-rock carbonatico si trova a profondità notevoli (100 m ed oltre).

L'evento di cui trattasi è avvenuto nella notte tra il 14 ed il 15 ottobre 1995 con sprofondamento di un'area in Via F.lli Cervi ed apertura di una "voragine" del diametro di circa 30-40 metri. Il disastroso sprofondamento avvenne all'alba del 15 ottobre: un fabbricato quadrifamiliare fu parzialmente inghiottito, mentre altri 5 fabbricati circostanti, mostrati in Figura 1, vennero gravemente lesionati, tanto da essere successivamente demoliti.

Le indagini ed i controlli di campagna, eseguiti in varie fasi, sono state di tipo geognostico, geoelettrico, sismico, geochimico, gravimetrico e microgravimetrico, e topografico. Contestualmente sono state eseguite indagini geologiche, idrogeologiche ed aerofotogrammetriche per delineare il quadro geologico e strutturale della conca camaioiese. Le strumentazioni di controllo installate intorno all'area del dissesto e più in generale nella conca camaioiese consistono attualmente in: inclinometro, assestometro, centraline di tipo sismico, trasduttori di pressione, estensimetri, capisaldi per misure topografiche e controlli con GPS.



Fig. 1 - Foto dell'area in via F.lli Cervi del Comune di Camaioie interessata il 15 ottobre 1995 dal fenomeno di sinkhole. Un fabbricato quadrifamiliare fu parzialmente inghiottito nella voragine di 30-40 m creatisi in seguito al fenomeno di sprofondamento. Altri cinque fabbricati, indicati in figura con delle frecce, furono gravemente danneggiati.

Le indagini sono servite ad elaborare una prima cartografia di screening nella quale si evidenziano zone con anomalie gravimetriche (zone di rapido ribassamento del substrato), e zone con tenori anomali di gas endogeni. Sono poi stati effettuati profili tomografici geoelettrici che hanno messo in luce anomalie elettriche nel sottosuolo. Da tutta questa serie di indagini è emerso il quadro strutturale del substrato profondo della conca camaioiese, con un "basso" allungato NW-SE nella zona del crollo e interessante parte dell'abitato del capoluogo, e con alcune aree nelle quali si presumono probabili cavità ipogee (o comunque substrato molto fratturato) a profondità dell'ordine di 100-130 metri dal piano campagna. Una indagine sismica è stata mirata a caratterizzare dal

punto di vista geotecnico (con definizione dei parametri elastici) i depositi alluvionali che hanno progressivamente colmato la piana di Camaioire. Tali depositi, costituiti da materiali eterogranulari, presentano situazioni stratigrafiche caratterizzate da scarsa omogeneità laterale. Nei dintorni dell'area della "voragine" si rilevano orizzonti prevalentemente argillosi, a profondità da 40 a 50 metri, che determinano un certo confinamento delle falde acquifere sottostanti. Dalle prospezioni sismiche sopra citate, risulta che i terreni alluvionali tendono a peggiorare le loro caratteristiche geotecniche con la profondità; in particolare da 60 a 100 m dal piano campagna si rilevano depositi poco addensati, con valori bassi, o quantomeno anomali, dei parametri elastici del terreno. Dalla sintesi dei dati raccolti nel corso delle varie fasi e delle varie tipologie d'indagine condotte nel sottosuolo della "conca" di Camaioire, si delinea uno scenario nel quale si evidenzia la presenza di zone con anomalie elettriche evidenti, probabilmente connesse a cavità, e di zone nelle quali le anomalie gravimetriche (equivalenti a zone di basso o bassissimo addensamento) sembrano localizzate anche nell'ambito della copertura alluvionale. C'è peraltro una notevole corrispondenza areale tra le anomalie elettriche individuate e le anomalie gravimetriche misurate; addirittura si osserva la sovrapposizione quasi perfetta delle anomalie rilevate distintamente con i due metodi geofisici, sia per quanto concerne quelle profonde che quelle superficiali. La conferma della fragilità della zona indicata, proviene inoltre dalla lettura del dicembre 2000 ai punti di controllo con GPS, effettuata successivamente al prolungato periodo di intensa piovosità tra ottobre e dicembre 2000. Le letture hanno fatto rilevare degli abbassamenti dell'ordine di circa 3 cm concentrati nel centro della conca di Camaioire come mostrato in Figura 2. Al contorno tali abbassamenti vanno a diminuire, fino ad azzerarsi. Contestualmente i vettori di spostamento orizzontale hanno fatto osservare una convergenza verso il centro della conca camaioirese.



Fig. 2 - Misura GPS dello sprofondamento di alcuni punti di controllo posti al centro della conca di Camaioire. Le letture GPS, effettuate nel dicembre 2000 successivamente a un prolungato periodo di lunga pioggia, mostrano un abbassamento tra 2 e 3 cm con picchi di sprofondamento maggiore di 3 cm concentrati in due aree separate.

Lo strumento utilizzato ed il sistema di lettura adottato comportano un errore che può essere stimato in circa 1 centimetro. Ciò che è estremamente interessante è la coincidenza dei punti di massimo abbassamento rilevato con GPS, con quelli indicati a rischio, caratterizzati dalla convergenza di anomalie geoelettriche e gravimetriche. Nelle letture successive, con il variare delle condizioni piezometriche, si è riscontrato un andamento "a respiro" del suolo della conca camaiorese, a dimostrazione della diretta influenza delle pressioni idrauliche sulle oscillazioni micro-morfologiche del suolo e, probabilmente, del sottosuolo.

Le zone che hanno fatto rilevare la maggiore entità di scostamenti nelle letture GPS si trovano in corrispondenza delle aree nelle quali le anomalie sembrano meno profonde. La maggiore classe di rischio attribuita a tali aree deriva dalla diversa risposta temporale che potrebbe manifestarsi nello sviluppo di un nuovo sinkhole, dato che un eventuale crollo che si genera a profondità modesta ha un'evoluzione assai rapida e, conseguentemente, concede un tempo minore per le operazioni di messa in sicurezza della popolazione.

Gli obiettivi che devono essere raggiunti, quindi, sono quelli finalizzati alla preventiva tutela della pubblica incolumità nelle zone a rischio sinkhole conosciute o riconoscibili. Nel caso in oggetto, il monitoraggio è la sola risorsa che possa consentire la prevenzione, e la conseguente attuazione di piani di sicurezza, nei confronti del ripetersi di un evento simile, dato che, alla luce dei dati esistenti e delle conoscenze di altri casi analoghi, appare difficile, dal punto di vista operativo-tecnico-economico, realizzare interventi strutturali di messa in sicurezza dei suoli e delle aree edificate coinvolte.

Il monitoraggio dei precursori appare quindi la risorsa più immediata ed efficace per la prevenzione del rischio. Nel caso specifico, dato che le micro-deformazioni del suolo, qualora non dovessero manifestare un normale "respiro", ma dovessero invece presentare una tendenza al progressivo abbassamento, costituiscono un elemento precursore fondamentale, si è progettato un sistema di controllo ad hoc che dovrà fornire un quadro continuo della situazione del suolo di gran parte della conca camaiorese a rischio.

Già nel 2000 era stata presa in considerazione la possibilità di realizzare un sistema di controllo basato su interferometria radar da satellite, con letture da mezzo orbitante ogni 35 giorni. Il sistema LiSA[®], il cui principio di funzionamento si fonda sull'interferometria radar da terra, è apparso più appropriato potendo esso monitorare fenomeni geologici con una rapida dinamica temporale e una piccola estensione spaziale.

2. TECNOLOGIA LiSA[®]

Il sistema LiSA[®] (Linear Synthetic Aperture radar) è un radar ad apertura sintetica con sensore posizionato a terra. Esso è costituito da due antenne radar, una trasmittente ed una ricevente, fissate su una slitta che si muove su di un binario rettilineo, realizzando così l'apertura sintetica. La lunghezza del binario varia da 1 a 4 m in base alla risoluzione spaziale richiesta. La componente a microonde del sistema, che può utilizzare frequenze sino a 18 GHz, è costituita da uno scatterometro ad onda continua a scansione di frequenza. Lo schema in Figura 3 mostra la configurazione di misura. La posizione di ciascun punto P dell'oggetto osservato è data nell'immagine SAR in termini delle coordinate di azimut e range. La direzione di azimut x è individuata dal binario mentre quella di ground-range y dalla direzione ortogonale ad x contenuta nel piano $z=0$ (si veda la Figura 3). La direzione di range r è invece data dalla congiungente il punto P osservato con il centro del binario.

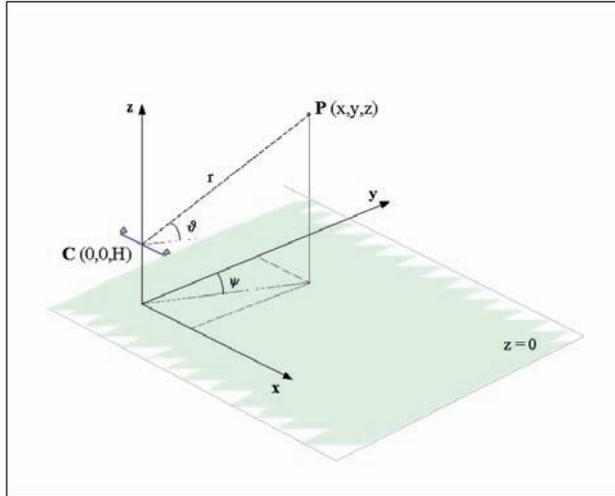


Fig. 3 - Configurazione di misura del sistema LiSA© . Le antenne TX/RX vengono spostate lungo il binario la cui lunghezza fornisce l'apertura sintetica del radar. La direzione di azimut (x) coincide con quella del binario mentre quella di range (y) è perpendicolare ad esso.

La qualità dell'informazione contenuta nelle immagini SAR è data dalla risoluzione spaziale, ossia dalle dimensioni spaziali della più piccola porzione di area distinguibile nell'immagine. Minori sono queste dimensioni, maggiore è la risoluzione del sistema LiSA®. La risoluzione spaziale delle immagini nelle direzioni di "range", Δr e azimut Δx (direzione detta anche di "cross-range") è data da:

$$\Delta r = \frac{c}{2B_f}$$

$$\Delta x = \frac{\lambda r}{2L}$$

dove c è la velocità della luce, B_f la larghezza di banda utilizzata dal sistema, L l'apertura sintetica, λ la lunghezza d'onda del radar e r la distanza di P dal centro del binario. La risoluzione in range è la stessa sull'intera immagine mentre quella in azimut dipende dalla distanza dell'area in esame. Tipicamente sono ottenibili risoluzioni di circa 4 metri ad un chilometro di distanza, risoluzioni che migliorano notevolmente arrivando nell'ordine dei centimetri nel monitoraggio a breve distanza (nell'ordine delle decine di metri). Quest'ultima caratteristica è particolarmente gradita nel campo del monitoraggio degli spostamenti o cedimenti di grandi strutture quali dighe, ponti o monumenti artistici. Se la porzione di area monitorata subisce uno spostamento, è possibile valutarne l'entità con precisioni inferiori al millimetro, sfruttando l'informazione connessa alla fase. Questa estrema sensibilità è dovuta al fatto che gli spostamenti sono direttamente correlati con la fase ricevuta ed è possibile valutarne quantitativamente, mediante le tecniche interferometriche, anche minime variazioni.

La configurazione interferometrica LiSA® prevede la ripresa di immagini radar a tempi differenti, ma esattamente dalla stessa posizione. Ciò consente di misurare con una accuratezza inferiore al millimetro lo spostamento d del terreno nell'intervallo di tempo intercorso fra le due acquisizioni e dato da

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

a partire dalla conoscenza della lunghezza d'onda λ e della differenza di fase φ misurata dal radar. Ogni frangia dell'immagine di fase φ corrisponde a uno spostamento d del terreno misurato lungo la direzione di osservazione del radar e pari a mezza lunghezza d'onda del radar (LEVA et al., 2003a, LEVA et al., 2003b). Questa proprietà consente una facile e rapida interpretazione delle mappe di deformazione fornite dal sistema.

Il sistema LiSA[®] è concepito per il controllo a distanza e in continuo. La cadenza ravvicinata delle misure (10-15min) permette a questo sistema di fornire utili indicazioni in merito a importanti parametri quali velocità e accelerazione dei movimenti franosi o delle deformazioni strutturali. La possibilità di intervenire direttamente sulla frequenza temporale dei cicli di misura, inoltre, consente di adeguare costantemente il sistema all'evoluzione del fenomeno monitorato.

La tecnologia LiSA[®] è stata usata in numerose campagne di misure, come nel monitoraggio della riproduzione della facciata del palazzo Geraci, nel collaudo statico di una passerella pedonale in cemento armato, nel monitoraggio della diga di Ridracoli in Romagna e nel monitoraggio delle frane del Passo Gottardo in Svizzera, del Ruinon in Lombardia, del monte Tessina in Veneto, di Schwaz in Austria, di Ceriana in Liguria, di Fiorenzuola in Toscana, di Salice d'Ulzio in Piemonte, di Rocca Pitigliana in Emilia, di Cortenova in Lombardia, sull'isola di Stromboli e sul vulcano Etna in Sicilia. Nei casi delle frane di Fiorenzuola, Cortenova e di Stromboli, le applicazioni hanno avuto un carattere di servizio operativo a supporto delle attività di Protezione Civile dei servizi Nazionale e/o Regionale.

L'utilizzo del sistema LiSA[®] è inoltre particolarmente indicato per il monitoraggio della stabilità delle pareti di cave (LEVA et al., 2004). Tutte le applicazioni descritte in precedenza si basano su una configurazione interferometrica detta zero-baseline. Questo vuol dire che l'informazione sulla deformazione superficiale dell'oggetto osservato è ottenuta elaborando due immagini SAR acquisite dalla stessa antenna ricevente mentre questa si muove lungo il binario. Tuttavia, è anche possibile impiegare una versione avanzata del sistema LiSA[®] con due antenne riceventi che solidalmente si muovono lungo il binario. La distanza tra le due antenne riceventi è detta baseline. Questa configurazione interferometrica, caratterizzata da una "visione stereoscopica", è particolarmente adatta per l'ottenimento di Modelli Digitali del Terreno di elevata precisione (Nico et al., 2004). Queste due configurazioni interferometriche possono essere impiegate contemporaneamente per misurare le deformazioni di pendenza causate da frane molto veloci su una scala temporale di poche ore o giorni usando la configurazione interferometrica zero-baseline ed individuare le aree nelle quali, a causa della frana, si sono verificate delle importanti variazioni per mezzo della configurazione interferometrica stereoscopica morfologiche (ANTONELLO et al., 2004).

3. RISULTATI

In questo paragrafo vengono mostrati i primi risultati di una campagna di misura effettuata sul sito di Camaiole. Il sistema LiSA[®] è stato installato su una collina che domina l'abitato di Camaiole a un'altezza di circa 285 m slm lungo la strada comunale per Greppolungo (Figura 4). Le due immagini SAR, mostrate in Figura 5, sono state acquisite dal sistema LiSA[®] ad un intervallo temporale di circa 22 minuti e con una apertura sintetica di 280 cm. Le due immagini SAR, ottenute alla frequenza di 16.75 GHz e usando una banda di 100 MHz, sono mostrate con un range dinamico di 30 dB. Esse sono state acquisite usando una configurazione interferometrica zero-baseline. L'esten-

sione dell'area monitorata è di 1400 m sia nella direzione di azimut sia in quella di range. La risoluzione spaziale delle immagini SAR è di 1.5 m nella direzione di range mentre la risoluzione nella direzione di azimut varia da 1.2 m al near-range a 5.7 m al far-range.



Fig. 4 - Immagine fotografica della zona da monitorare.

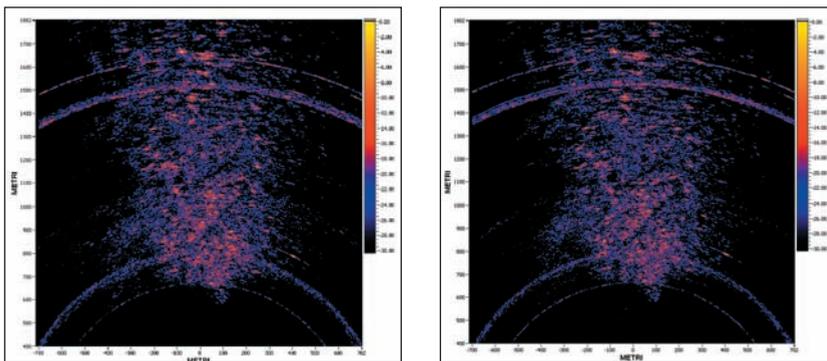


Fig. 5 - Immagini SAR della piana del comune di Camaiore, rappresentata nell'immagine fotografica di Figura 4, interessata nel passato da fenomeni di sprofondamento catastrofici. Le due immagini sono state acquisite dal sistema LiSA© ad un intervallo di circa 22 minuti usando una apertura sintetica di 280 cm.

L'elaborazione interferometrica delle due immagini SAR consente di ottenere la mappa delle deformazioni del terreno mostrata nell'immagine a sinistra in Figura 6 e relativa alla piana del comune di Camaiore. Questa mappa fornisce la componente lungo la direzione di vista del radar della reale deformazione del terreno. Tuttavia, essendo il tipo di deformazione della superficie del terreno attesa causata dallo sprofondamento catastrofico puramente verticale, l'informazione contenuta nella mappa di deformazione di Figura 6 consente di ricostruire la reale deformazione del terreno usando argomenti geometrici. La risoluzione spaziale della mappa di deformazione è la stessa delle immagini SAR. La precisione della misura interferometrica della deformazione è submillime-

trica e dipende dal coerenza del segnale interferometrico mostrata nella mappa a destra di Figura 6.

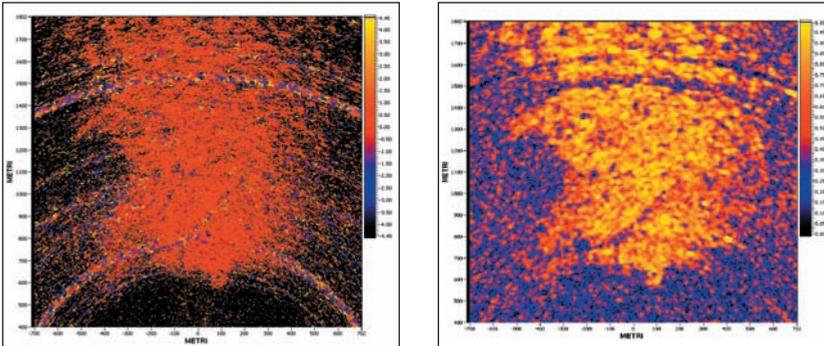


Fig. 6 - Mappa degli spostamenti (a sinistra) e coerenza interferometrica (a destra) ottenute elaborando interferometricamente le due immagini SAR mostrate in Figura 5. Il colore rosso della mappa di spostamento indica, secondo la scala dei colori posta a destra, che non è stata misurata alcuna deformazione del terreno nell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni SAR.

CONCLUSIONI

I primi risultati ottenuti dall'elaborazione di dati SAR interferometrici acquisiti dal sistema LiSA[®] sulla piana del comune di Camaiole colpita da un fenomeno di sprofondamento catastrofico nell'Ottobre 1995 hanno mostrato la fattibilità tecnica di un sistema di monitoraggio di questo fenomeno per mezzo della tecnologia LiSA[®]. Questa tecnologia, basata sulla tecnica della interferometria SAR da terra presenta i seguenti vantaggi:

- è in grado di generare mappe di deformazione del terreno georeferenziate che riescono a coprire qualche chilometro quadrato di superficie e può essere utilizzata sia per il monitoraggio "stand alone" sia per testare, progettare o implementare reti di sensori tradizionali;
- è possibile eseguire le misure interferometriche anche in totale assenza di luce o in presenza di nebbia ed in condizioni climatiche avverse;
- fornisce risultati preliminari sul campo, pochi minuti dopo aver effettuato le misure;
- presenta una velocità d'approntamento limitata a poche ore;
- offre una estrema precisione nelle misurazioni effettuate, nell'ordine della frazione del millimetro, ed il confronto con sensoristica tradizionale, ha mostrato un perfetto accordo tra i risultati;
- è un valido supporto alle reti di monitoraggio con strumenti tradizionali, sia già installate ed operanti sia in fase di installazione;
- è in grado di individuare e riconoscere le aree di deformazione significativa.

BIBLIOGRAFIA

- LEVA D., NICO G., TARCHI D., FORTUNY-GUASCH J. & SIEBER A.J. (2003a) - Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41(4)**, 745-752.
- LEVA D., NICO G. & RIVOLTA C. (2003b) - Interferometria SAR da terra per il monitoraggio di frane e deformazioni strutturali. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA*, 1319-1324, 28-31 ottobre 2003, Palazzo della Gran Guardia, Verona.

LEVA D., NARDIN G., NICO G., RIVOLTA C., VALLE C. & ZAMPEDRI G. (2004) - On the use of LiSA SAR interferometer for the monitoring and modelling of terrain deformation in a porphyry mine. 1st General Assembly of the European Geosciences Union, 25-30 Aprile 2004, Nizza.

ANTONELLO G., FORTUNY J., LEVA D., NICO G., TARCHI D. (2004) - Ground-based SAR interferometry for updating DTMs in landslide areas and evaluating morphological changes. 1st General Assembly of the European Geosciences Union, 25-30 Aprile 2004, Nizza.

NICO G., LEVA D., ANTONELLO G. & TARCHI D. (2004) - Ground-based SAR interferometry for terrain mapping: theory and sensitivity analysis. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (in stampa), 2004.