

## Trattamento dei data base ottenuti da rilevamento geomorfologico e da interferometria DIF-SAR: il caso di Acri e S. Luca (Calabria)

### *Data base processing from geomorphological survey and DIF-SAR interferometry: the case of Acri and S. Luca (Calabria)*

---

PELLEGRINO A. (\*), LA PIETRA T. (\*), CARACCIOLO T. (\*\*)

**RIASSUNTO** - Il presente lavoro focalizza i metodi di studio, di elaborazione cartografica e di standardizzazione dei criteri di analisi e di raccolta dati sulle frane censite nei centri abitati di Acri (CS) e San Luca (RC). Tali centri sono stati scelti per la significatività dei processi morfoevolutivi e per i livelli di pericolosità e di rischio ad essi associati, rappresentativi di contesti geologici tipici dell'Arco Calabro.

Definito lo scenario morfoevolutivo attraverso un'articolata metodologia di analisi, la sintesi sulle diverse problematiche affrontate è stata sviluppata, principalmente, tramite la costruzione di database alfanumerici e cartografici, presupposto necessario a qualunque tipo di previsione e di pianificazione.

Questo documento propone la messa a punto e l'elaborazione della banca dati ottenuta attraverso metodi geomorfologici, integrati dall'applicazione dell'Interferometria DIF-SAR sui movimenti in massa individuati. La metodologia applicata ha condotto, innanzitutto, alla realizzazione della "Carta Inventario dei Fenomeni Franosì". Definito lo scenario morfoevolutivo dei versanti in studio, l'uso di tecniche di interferometria differenziale DIFSAR (dati di satelliti radar ad apertura sintetica SAR) ha permesso successivamente di misurare, attraverso un'analisi areale su larga scala e multitemporale, movimenti del terreno con accuratezze centimetriche e sub-centimetriche. Tramite tale tecnica, supportata anche dai dati storico-bibliografici, è stato possibile effettuare

un'analisi storica dell'evoluzione di fenomeni franosi lenti mediante monitoraggio periodico.

La metodologia di analisi e gestione dati adottata nel presente studio costituisce un valido contributo per la valutazione della pericolosità da frana e del rischio associato e per la costruzione di modelli geologico-evolutivi di versante.

**PAROLE CHIAVE:** frane, analisi geomorfologia, interferometria DIF-SAR, database, Calabria.

**ABSTRACT** - This paper reviews the methodology, the cartographic techniques and work standards of the collection and analysis criteria of landslide data, which are located in the urban areas of Acri (CS) and San Luca (RC). These two different sites were chosen for the morpho-evolutionary mechanisms and associated hazardous and risk levels, which are representative of typical geological contexts of the Calabrian Arc.

Therefore, the study firstly was focused on the morpho-evolutionary setting by means of a complex methodology. Subsequently, the synthesis of the different considered thematic was built through alphanumeric and cartographic database, which are necessary to every type of "prediction and planning measures".

This paper reconsiders the development and the processing of the data base obtained through geomorpho-

---

(\*) Autorità di Bacino Regionale, Regione Calabria-Catanzaro

(\*\*) Centro Cartografico Regionale- Regione Calabria-Lametia Terme (Catanzaro)

logical methods integrated with DIF-SAR Interferometry.

Firstly, the adopted methodology made it possible to build the "Landslide Inventory Map". After defining the morpho-evolutionary scenario, the application of Differential Interferometry technique (DIF-SAR, Radar imagery due to remote sensing) has provided, successively, the measurement of terrain deformations with high resolution on the order of several centimetres to a few millimetres, by means a spatial analysis and long temporal coverage.

The use of this technique, which was supported by historical and reference data, made it possible to improve an chronological analysis of the landslide evolution, with a slow rate, through a periodic monitoring.

The methodology, which was applied for analysing and controlling data, represents a well-founded put in to hazardous evaluation connected to landslide and associated risk; however, it is fundamental to build a geological-evolutionary model of the slope.

KEYWORDS: landslides, geomorphological analysis, DIF-SAR interferometry, database. Calabria.

## 1. - INTRODUZIONE

Lo studio di seguito proposto si riferisce ai siti di Acri e San Luca, rappresentativi di due diversi contesti geologici tipici dell'Arco Calabro. L'abitato di Acri si trova in prossimità del margine occidentale del Massiccio della Sila, dove affiorano le rocce cristallino-metamorfiche paleozoiche. L'abitato di S. Luca è localizzato, invece, sul versante Ionico del Massiccio dell'Aspromonte. Questi due centri rappresentano diversi contesti geologici tipici dell'Arco Calabro caratterizzati dalla presenza di numerosi processi morfoevolutivi ad elevata pericolosità (Varnes, 1984) e differenti evidenze geomorfologiche. Tale assetto ha condotto a ricerche multidisciplinari e alla messa a punto di un sistema di monitoraggio progettato sulla base del modello geologico-tecnico di riferimento (AMARO *et alii*, 2004a; 2004b; CARACCIOLO *et alii*, 2006; LA PIETRA *et alii*, 2004).

In particolare, nel presente lavoro viene illustrata una metodologia per l'elaborazione cartografica e la standardizzazione dei criteri di analisi e di raccolta dei dati territoriali, derivanti da un puntuale rilevamento geomorfologico e dall'applicazione dell'Interferometria DIF-SAR sui versanti esaminati.

Relativamente ai dati geologico-geomorfologici lo studio trova punto di partenza dalle attività condotte in occasione della redazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Calabria (PAI; ABR 2001a; 2001b), successivamente integrate da ulteriori e puntuali osservazioni *in situ*, fotointerpretazione di strisciate ae-

ree risalenti ad epoche differenti, consultazione di nuove fonti storiche e di letteratura scientifica.

I dati interferometrici, invece, sono stati ottenuti a seguito del finanziamento Progetto Operativo Difesa Suolo PON ATAS 2000-2006, finalizzato a fornire supporto alle Regioni nell'attuazione delle misure previste dai POR in tema di Difesa del Suolo in coerenza alla L.183/89 (AMARO *et alii*, 2004a). La tecnica dell'interferometria differenziale (DIF SAR) "classica" consiste nella realizzazione di un interferogramma (mappa della differenza di fase), a partire da una coppia di acquisizioni SAR, e nella sua successiva traduzione in una "mappa" completa degli spostamenti. La tecnica si basa sul seguente principio di base: la differenza di fase tra due immagini SAR della scena in esame, acquisite dalla stessa posizione in tempi differenti, contiene due termini legati, rispettivamente, alla topografia e allo spostamento del suolo. Al fine di isolare il contributo relativo allo spostamento avvenuto tra i due istanti di acquisizione, la componente topografica viene stimata per mezzo di un DEM (mappa numerica di elevazione), o di una coppia interferometrica *tandem* (intervallo temporale fra le due acquisizioni tale da poter assumere spostamento nullo). L'accuratezza del risultato dipende dalla qualità del DEM e dalla precisione dei dati orbitali. Il requisito sul DEM può risultare meno vincolante se si utilizzano coppie interferometriche con *baseline* ridotte (differenza fra le posizioni dei sensori durante le due acquisizioni). Infatti, tanto è minore la *baseline* tanto più il contributo topografico è ridotto, al limite per *baseline* nulla si osserva il solo spostamento (TELESPAZIO, 2004).

Attraverso una catena completa di processamento per l'interferometria differenziale, messa a punto da Telespazio, sono state ottenute una serie di dati ERS SAR, con alta risoluzione ed una estesa copertura multi-temporale, per analizzare e monitorare i movimenti di massa dei versanti investigati, permettendo di avere al tempo stesso mappe di spostamento e di velocità.

La metodologia adottata nel presente lavoro si è basata, innanzitutto, su una fase conoscitiva e di raccolta di dettagliati elementi geologici e geomorfologici, nonché di diagnosi e verifica dei dati DIF-SAR. La totalità dei dati territoriali ottenuti è stata, successivamente, organizzata in *database alfanumerici e cartografici* attraverso una complessa procedura di informatizzazione, per giungere, infine, alla fase di analisi e sintesi dei dati di output.

## 2. - LINEAMENTI GEOLOGICI DELLE AREE INVESTIGATE

I siti studiati fanno parte dell'Arco Calabro, costituito da una serie di falde sovrapposte pre-mesozoiche (avente marcate analogie con la struttura austro-sudalpina) ricoperte da una fascia meso-cenozoica (TORTORICI, 1982; VAI, 1992).

Acri (600-700 m s.l.m.) è collocato in prossimità del margine occidentale della Sila Grande, altopiano che degrada rapidamente verso il graben della calle del Crati, solcato da torrenti che a seguito dell'intenso sollevamento tettonico hanno prodotto profonde incisioni all'interno di versanti molto acclivi. In questo settore le faglie normali ad andamento N-S, che sollevano l'horst della Sila, formano nel complesso un sistema a gradinata ribassante verso occidente. Tutto ciò culmina in una importante direttrice tettonica regionale in cui i litotipi cristallino-metamorfici vengono sollevati e giustapposti ai depositi plio-pleistocenici che colmano la depressione tettonica della valle del Crati (TANSI & GRECO, 2001).

Il territorio in esame è caratterizzato dalla diffusa presenza del basamento Paleozoico costituito da rocce gneissiche e granitiche, variamente fratturate e degradate, appartenenti alle due Unità sovrapposte di Polia-Copanello e Monte Gariglione (fig 1). L'unità tettonostratigrafica di Polia-Copanello, geometricamente più bassa, è costituita principalmente da gneiss e scisti biotitici a granato e sillimanite intrusi da masse granitiche, granodioritiche, tonalitiche e localmente da filoni pegmatitici. L'unità superiore di Monte Gariglione (considerata da alcuni autori come facente parte dell'Unità di Polia-Copanello) è costituita da gneiss biotitici e muscovitici, gneiss a biotite, granato e sillimanite, con intercalazioni di marmi ed anfiboliti, intrusi da masse granodioritiche passanti a graniti e tonaliti.

Conglomerati fluviali antichi e conglomerati sabbiosi con sottili intercalazioni argillose di età olocenica poggiano, in trasgressione, sulle due suddette unità. Questi depositi sedimentari, poco consolidati e facilmente disgregabili, affiorano prevalentemente nella depressione occupata dall'insediamento urbano di Acri (fig. 1).

L'abitato di San Luca sorge nel medio-basso bacino della Fiumara Buonamico, lungo le propaggini orientali della struttura dell'Aspromonte. L'antico Centro Storico è situato sulle pendici sud-orientali dell'alto-morfologico del Colle Pietra Saraceno, mentre il nuovo centro abitato si sviluppa a valle del precedente, su un

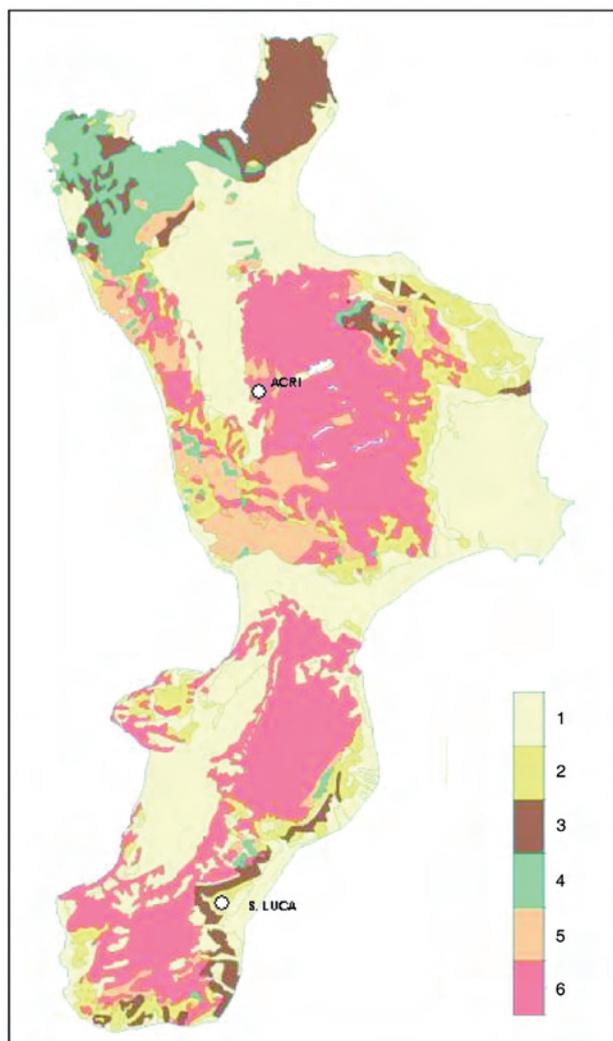


Fig. 1 - Distribuzione delle principali unità litologiche in Calabria. Legenda: 1) sedimenti detritici sciolti; 2) rocce sedimentarie detritiche coerenti; 3) flysch e rocce flyschioidi; 4) rocce carbonatiche; 5) rocce metamorfiche di grado medio-basso; 6) rocce intrusive e metamorfiche di grado alto.

- Engineering-geological sketch map of Calabria. Legend: 1) loose clastic sediments; 2) clastic sedimentary rocks; 3) flysch-like rocks; 4) carbonatic rocks; 5) low-medium grade metamorphic rocks; 6) intrusive rocks and high grade metamorphic rocks.

sistema collinare.

L'assetto geologico dell'area (fig. 1) è determinato da un importante contatto tettonico che individua due zone con caratteristiche litologiche ben distinte. A nord-ovest del contatto, in corrispondenza del centro storico, affiora il Flysch di Capo d'Orlando (Miocene inferiore); a sud-est, dove si sviluppa l'area in espansione, prevale la coltre alloctona delle Argille Varicolori (Miocene Superiore) sovrascorsa sul Flysch.

I depositi silico-clastici del Flysch di Capo d'Orlando sono costituiti da alternanze conglomeratico-arenacee e pelitiche, da mediamente a notevolmente cementate e fratturate, con debole immersione verso sud-est. Tale alternanza è

controllata da un sistema di faglie che ne abbassa il settore sud-orientale (Plio-Pleistocene)

Le Argille Varicolori appaiono come un *mé-lange* estremamente caoticizzato ed alterato nel quale sono collocate olistoliti, costituiti da inclusi arenaceo-siltosi e serie di sedimenti caotici clastici. Sulle argille poggiano sottili lembi residui di un conglomerato terrazzato quaternario continentale.

Al contatto tra le Argille Varicolori ed il Flysch miocenico si individua un esteso accumulo di materiale detritico su cui sorge parte del vecchio abitato, formatosi a seguito di movimenti franosi che interessano il Flysch.

### 3. - QUADRO GEOMORFOLOGICO

Lo scenario morfoevolutivo dei siti in studio è stato dedotto da un'articolata metodologia di analisi che ha trovato punto di partenza dalle informazioni di tipo diretto ed indiretto. Le informazioni dirette contemplano dati reperiti presso gli Enti Locali, l'analisi di foto aeree a diversa scala e riferite a più anni (1954, 1978, 1990-1995, 2001), sopralluoghi di verifica e rilevamento geomorfologico di dettaglio eseguito a scala 1.10.000. Le informazioni indirette hanno incluso prevalentemente notizie reperite da varie fonti storiche, giornalistiche, archivi nazionali e locali, bibliografie storiche, programmazioni di Enti regionali, provinciali e locali, ricognizioni fotografiche storiche e non, dati ISTAT, dati reperiti presso i Comuni tramite schede informative. I dati inerenti il censimento dei fenomeni franosi sono stati riportati su una scheda Inventario dei fenomeni franosi italiani (Progetto IFFI, AMANTI *et alii*, 1996a; 1996b), modificata dai tecnici dell'Autorità di Bacino Regionale per adeguamento a scala regionale e successivamente rappresentati su un ortofotopiano al 10.000. Tale ortofotopiano deriva dalla sovrapposizione della Carta Topografica a scala 1:10.000, edita dalla Casmez nel 1956, su ortoimmagini digitali a colori di tutto il territorio regionale, realizzate con un volo del 1998.

I rilevamenti *in situ*, a scala 1.10.000, hanno, in ultima analisi, integrato e completato l'analisi aerofotografica, supportata dalla compilazione della summenzionata scheda di fotointerpretazione. La validazione dei dati di campagna conclude un processo iterativo di individuazione e perimetrazione (cartografazione) delle aree vulnerate e di analisi della pericolosità (ABR 2001a; 2001b).

Sulla base delle indagini esperite è emerso

che il territorio di Acri costituisce, in relazione alle caratteristiche geologico-strutturali e sismiche, un ambiente in cui il modellamento del rilievo avviene mediante processi gravitativi di ampie proporzioni (fig. 2a). Ciò a causa dell'elevata energia di rilievo correlabile al fenomeno del rapido e notevole sollevamento tettonico subito dall'intera area a partire dal Pleistocene e da una topografia estremamente accidentata, con pendenze che superano largamente i 30°. La maggior parte dei fenomeni franosi può essere ricondotta principalmente alle pessime caratteristiche meccaniche delle rocce affioranti e alle elevate pendenze generate dalle profonde incisioni dei corsi d'acqua che operano un continuo scalzamento al piede dei versanti che tendono, nella maggior parte, a riattivarsi in concomitanza di eventi meteorici particolarmente intensi e/o prolungati o in caso di sollecitazioni sismiche.

Tali fenomeni non coinvolgono direttamente la zona di espansione del centro abitato, che posizionato in una conca risulta piuttosto stabile, bensì le aree ad esso adiacenti, lungo versanti dalle forme decisamente aspre e dalle pendenze molto elevate. Alcuni di essi interessano tre zone denominate in base ai toponimi locali: Padia - San Cataldo, Calvario-Serra di Buda, Vallone San Leonardo. Si tratta di fenomeni antichi, avvenuti a più riprese nel tempo, le cui notizie risalgono al 1708 per le località di Padia-San Cataldo e Calvario-Serra di Buda, ed al 1870 nel caso del Vallone San Leonardo; in quest'ultimo caso non è da escludere che si tratti di un fenomeno ben più antico. Questi fenomeni, piuttosto profondi e in continua evoluzione, sono da ricondurre a tipologie per scorrimento con componenti sia rotazionali che traslative e localmente crolli.

Altri fenomeni franosi si individuano, invece, ad una certa distanza dall'abitato nelle varie contrade e frazioni (Fratte, Chimento, Guglielmo, Croce di Baffa, Serricella, ecc.) del vasto territorio di Acri, dove operano una rapida trasformazione dei versanti.

L'assetto orografico dell'abitato di S. Luca è caratterizzato da due grandi settori con differenti lineamenti morfologici, separati da una zona di raccordo costituita dai depositi di frana (fig. 2b). Si individua, infatti, a nord del centro storico di S. Luca, un settore collinare a morfologia aspra (230-400 m s.l.m.), caratterizzato da un'elevata energia di rilievo, da versanti acclivi solcati da valli strette e profonde ed un settore collinare, a sud-est, con morfologia blanda.

Il primo settore è interessato da fenomeni franosi in roccia, quiescenti ed attivi di cui le prime notizie risalgono alla seconda alluvione

del 1939. Le tipologie di movimento sono da ricondurre essenzialmente a crolli e/o scorrimenti roto-traslativi nei depositi sedimentari miocenici e a scorrimenti più o meno superficiali, che interessano la coltre detritica della zona di raccordo (fig. 2b). Il secondo settore è caratterizzato, invece, da un dissesto diffuso in relazione alla natura caotica della coltre alloctona.

Da un'analisi d'insieme è emerso che prevalgono fenomeni di creep e, in prevalenza, di scorrimento rotazionale e/o traslazionale evolventi a luoghi in colate. Questi sono in gran parte attivi e in alcuni tratti la distinzione dei singoli corpi di frana è difficile per il ripetersi ed il sovrapporsi di fenomeni di dissesto ed interventi antropici (fig. 2b). I numerosi danni provocati dalle riattivazioni di tali dissesti sono noti sin dal 1973 a seguito dei disastrosi eventi alluvionali del 1972-1973 (RIZZO, 1990; CARACCILO *et alii*, 2006).

#### 4. - COSTRUZIONE DI UNA BANCA DATI PER LA GESTIONE DEL TERRITORIO

Un corretto processo di acquisizione, georeferenziazione, secondo il sistema di riferimento gauss boaga, e successiva codificazione delle informazioni di tipo diretto e indiretto hanno contribuito alla costruzione di diversi *layers* informativi. Lo sviluppo delle attività sopra elencate ha condotto alla costruzione di una vera e propria banca dati, in cui i dati territoriali, vettoriali e raster, sono stati sistematizzati ed organizzati in *database* alfanumerici e cartografici in formato interscambiabile (fig. 3). La complessità di tali dati ha trovato culmine nella costruzione della "Carta Inventario dei fenomeni franosi" censiti nei siti in studio.

La carta, che rappresenta anche il livello di prima analisi della pericolosità da frana sulla base della distribuzione di frequenza di alcuni parametri adottati e rilevati (ABR, 2001a; 2001b; 2002), è costituita da un livello informativo cartografico che contiene la rappresentazione sull'ortofotocarta a scala 1:10.000 e la georeferenziazione degli elementi morfologici censiti (fig. 2). La rappresentazione comprende elementi areali definiti da poligoni chiusi (frane, deformazioni gravitative profonde di versante e zone franose), lineari (scarpata di frana, *trench*, frattura di trazione, scarpate con caduta di detrito, alveo con tendenza all'approfondimento, ecc..) e puntuali (frane non cartografabili) gerarchizzati sotto il profilo delle corrispondenti tipologie e dello stato di attività (WP/WLI, 1993; AMANTI *et alii*, 1996b; CRUDEN & VARNES, 1996).

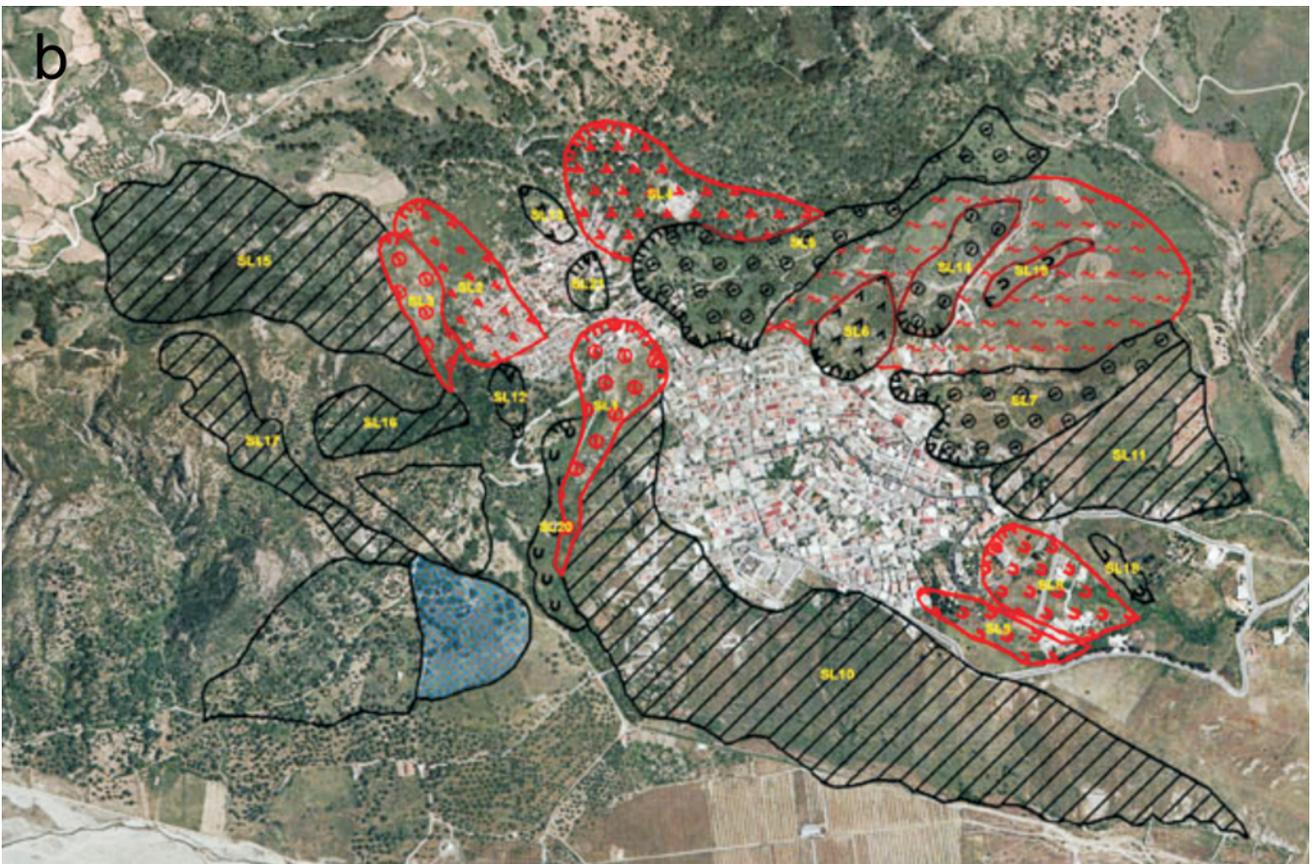
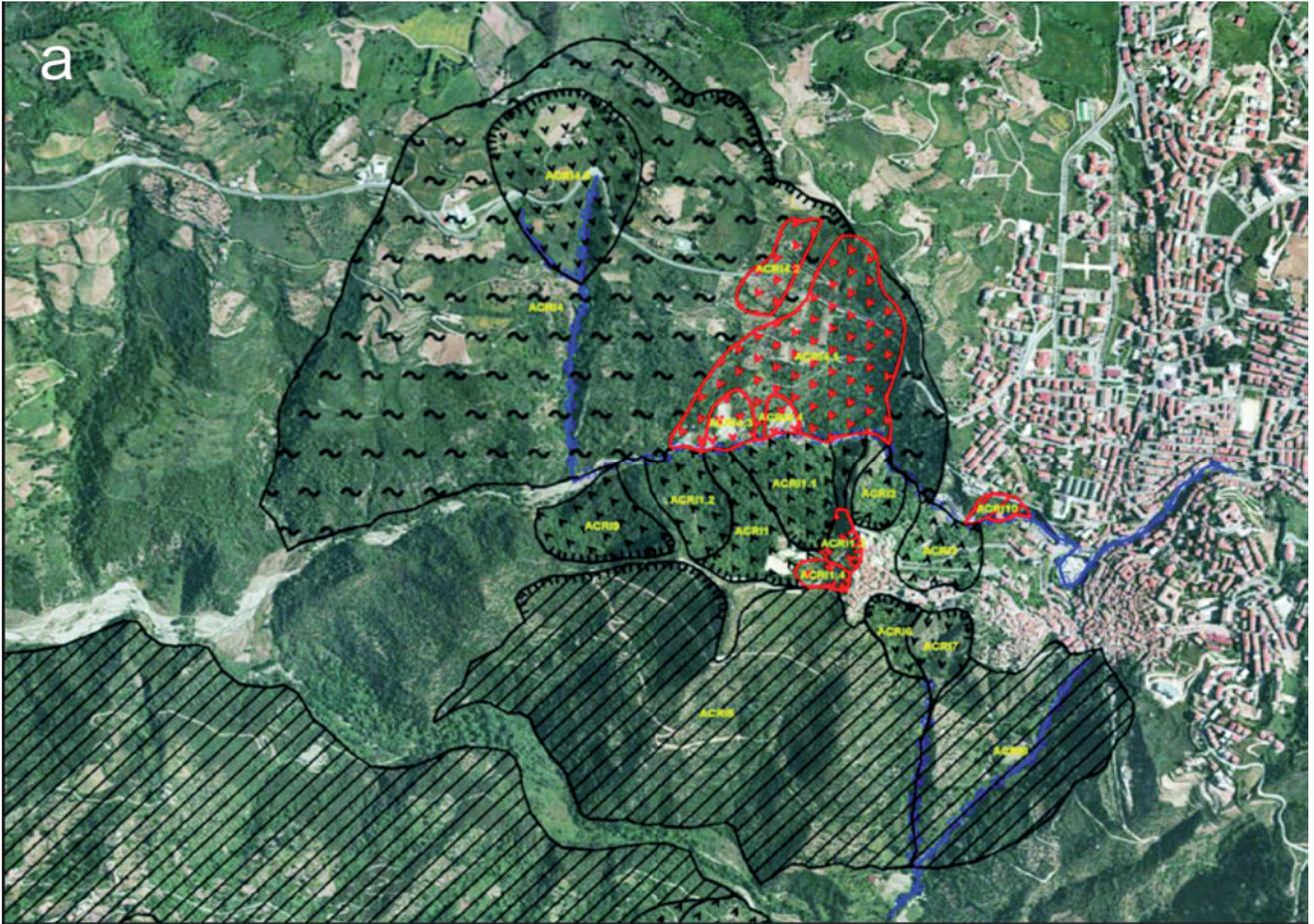
L'informatizzazione degli elementi morfologici è avvenuta innanzitutto attraverso la creazione di diverse *feature class* per la nomenclatura, ognuna rappresentativa di una tipologia di dissesto e/o elemento lineare o puntuale e dei diversi stati di attività, e successivo inserimento dei dati all'interno di un *database alfanumerico*, con verifica e riesame degli stessi. I dati della scheda censimento IFFI modificata, sono stati, in parte archiviati mediante l'applicativo Microsoft Access (fig. 5), realizzando una corrispondenza biunivoca tra ciascuna frana e la relativa scheda. L'attribuzione del codice frana ha consentito di distinguere la presenza di una o più frane figlie o di frane sovrapposte totalmente od in parte. I *layers* informativi contengono, inoltre, una mappatura delle aree a rischio del PAI, ottenuta tramite la messa a punto di una procedura digitale e un sistema di *overlap* tra le aree in frana con le relative *Classi di Pericolosità* e *Classi di Vulnerabilità* (rappresentate dagli elementi esposti) nei pressi dei centri abitati e lungo le strade di accesso agli stessi o di importanza strategica, con l'istituzione di una "buffer zone".

#### 5. - INTERFEROMETRIA DIF-SAR E TRATTAMENTO DATI TRAMITE GIS

La scelta delle scene, acquisite dalla coppia di satelliti ERS1-2, si è basata sui seguenti criteri adottati da TELESPAZIO (2004): adeguata geometria di osservazione per lo studio dei fenomeni in analisi; continuità della copertura temporale; distanza spaziale tra le orbite delle scene temporalmente vicine (*baseline*) sufficientemente piccola per eseguire l'analisi interferometrica differenziale e quindi limitare il livello di distorsione introdotto dalla topografia.

Per quanto riguarda il primo punto, sono stati utilizzati i dati relativi al passaggio dei satelliti secondo orbite discendenti, visto il maggior numero di immagini acquisite. In base ai criteri sopra elencati sono state scelte le immagini utili per il processamento DIFSAR nel periodo 1992-2003. Relativamente al criterio temporale, non si è andato oltre il 2001 per problemi d'acquisizione del satellite ERS-2 che ha reso inadatte al trattamento tutte le acquisizioni successive a tale data. Le scene totali acquisite ed elaborate sono 77, rispettivamente 38 per San Luca e 39 per Acri.

Per poter effettuare il processamento interferometrico tutte le immagini sono state coregistrate rispetto ad un'unica immagine *master*, acquisita il 09/08/1996 per entrambe le aree di



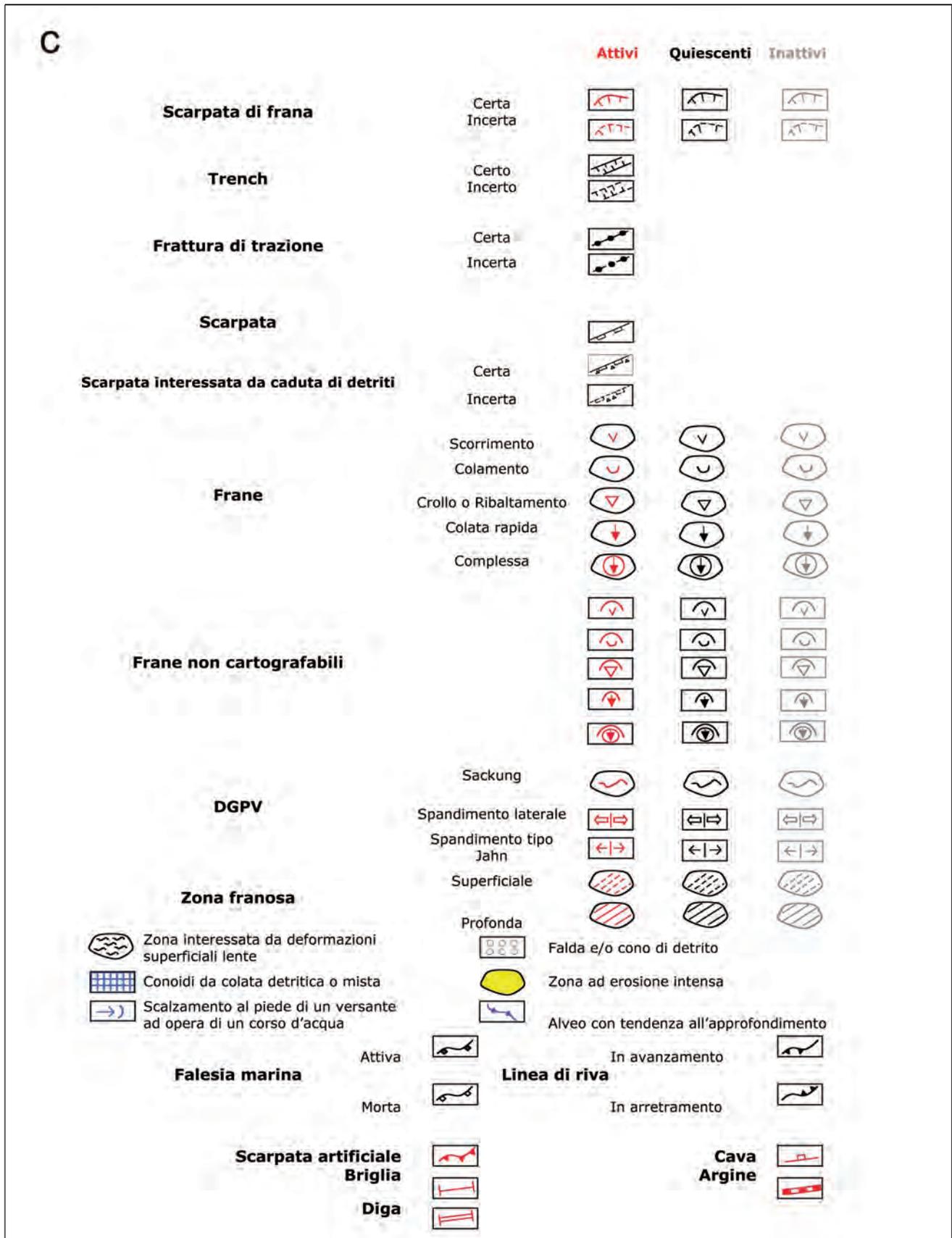


Fig. 2 - a) Carta geomorfologia dell'abitato di Aciri su ortofoto 1998; b) Carta geomorfologia dell'abitato di S. Luca su ortofoto; c) legenda delle carte (la stessa viene utilizzata in modo standard dall'Autorità di bacino della Calabria e comprende elementi non presenti nella carta)  
 - a) Orthophotomap based geomorphological map of the Aciri settlement area; b) Orthophotomap based geomorphological map of the S. Luca settlement area; c) Geomorphical legend of figure (the same legend, currently used by the Basin Authority of Calabria)

CARTA INVENTARIO FENOMENI  
FRANOSI, 1:10.000

ORTOIMMAGINI A COLORI,  
1:10.000 (1998)

PIANO DI VOLO FOTO AEREE,  
1978, 1990-1995, 2001

CARTA CASMEZ,  
1:10.000

CARTA GEOLOGICA,  
1:25.000

CARTA IGM,  
1:25.000

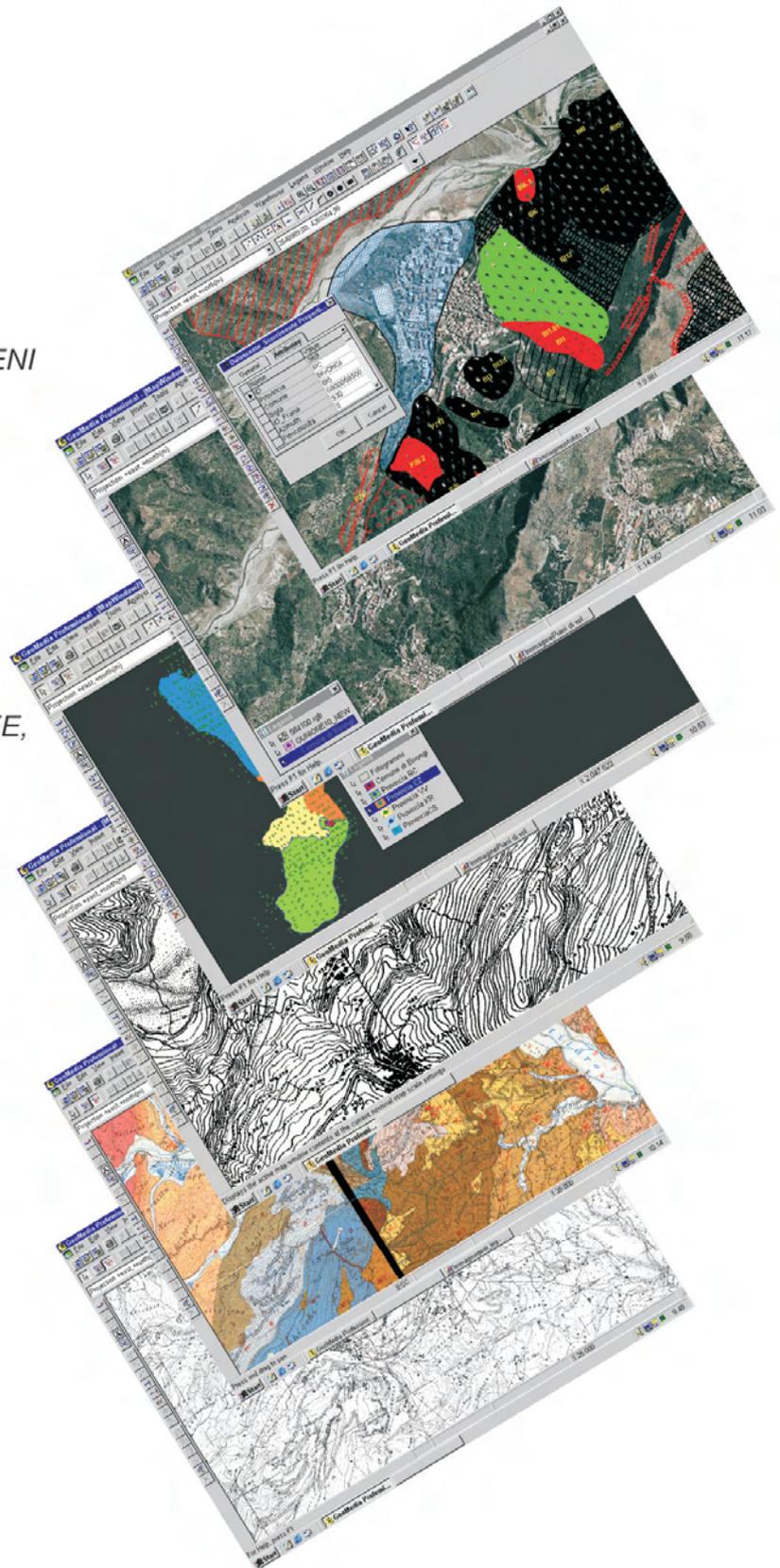


Fig. 3 - Layers informativi contenuti nella banca dati.  
- Informative layers included in the data bank.

studio. La scelta di tale immagine è stata effettuata in modo da minimizzare la distanza spaziale (*baseline*) e quella temporale rispetto a tutte le altre immagini.

Per analizzare l'evoluzione temporale degli spostamenti è stato necessario scegliere un insieme opportuno di coppie interferometriche, tra cui sono state selezionate quelle con migliore coerenza. Nella figura 4 sono riportati i grafici che mettono in relazione la *baseline* ed i tempi di acquisizione per San Luca e Aciri; gli archi che uniscono i nodi indicano le coppie interferometriche utilizzate nel processamento.

Al fine di effettuare il processamento DIFSAR e presentare i risultati sono stati utilizzati i dati ausiliari elencati in tabella 1

L'analisi DIFSAR fornita da Telespazio ha permesso di ottenere mappe contenenti diverse informazioni in formato interscambiabile (tab. 2).

Le mappe di velocità sono state restituite con un campionamento temporale inferiore rispetto alle mappe di spostamento, poiché la stima della velocità (derivata dallo spostamento) è meno precisa su piccoli intervalli temporali.

La geometria di osservazione di un SAR è caratterizzata da due assi principali: la direzione di volo e quella di vista. In particolare sui sensori montati sui satelliti ERS1-2 queste due direzioni sono ortogonali (geometria zero-Doppler), inoltre la direzione di vista presenta un'inclinazione media di 23° rispetto al nadir.

L'oggetto della misura interferometrica è lo spostamento misurato lungo la linea di vista del sensore radar, e quindi il segno positivo della misura interferometrica indica un allontanamento. Nel caso di aree piane, invece la misura si discosta di meno del 10% dal valore del movimento verticale.

Oltre alla misura interferometrica, Telespazio ha fornito una sua possibile interpretazione come spostamento lungo la linea di massima pendenza, per mezzo di un coefficiente legato all'angolo formato tra la direzione di vista del sensore e quella di massima pendenza del terreno. La scalatura è stata effettuata solo per terreni con pendenze superiori a 4°, assumendo invece che la direzione di movimento dominante fosse quella verticale per terreni con pendenze inferiori. Sono stati inoltre mascherati i punti per cui l'angolo formato fra la direzione di vista e quella di massima pendenza fosse compresa fra 78° e 102°, in quanto le due direzioni sono quasi ortogonali e non è quindi possibile determinare lo spostamento lungo la massima pendenza a partire dalla misura lungo la linea di vista del sensore. La misura di spostamento effettuata con la

tecnica DIFSAR è in ogni caso relativa rispetto al satellite.

Per quanto sopra, il valore dello spostamento è stato quindi fornito solo sulle aree urbane e sulle zone aride, non in *layover* o *shadow*. In base all'ipotesi che il movimento sia una funzione lentamente variabile nello spazio, è stato possibile fornire il risultato anche in un intorno limitato di questi per mezzo di interpolazione basata sulla triangolazione di Delaunay.

Infine, è stata messa a punto la seguente procedura di analisi delle mappe (fig. 5) per una corretta valutazione quantitativa ed opportuna rappresentazione dei relativi dati di output.

- Realizzazione di una serie di progetti (*sph file*) ognuno contenenti mappe di velocità ( $v$ , mm/year) e mappe sia di velocità che di spostamento relative allo stesso arco temporale ( $Dx$ , cm).
- Poiché ogni campo contenuto in legenda corrisponde nel *database*, associato agli *sph file*, ad un ID *gride\_code* (in media 50 per ogni *sph file*), si è proceduto all'identificazione a video dei relativi valori di  $v$  (mm/year) e  $Dx$  (cm).
- Definizione di una procedura informatica che ha comportato l'esecuzione di "Query builder" per ciascun ID *gride\_code* registrato e successiva assegnazione dei relativi valori di velocità o spostamento, tramite l'operazione "Field Calculator", all'interno di una tabella appositamente creata.

## 6. - DISCUSSIONE DEI DATI OUTPUT

All'apertura dei progetti realizzati appare una schermata con le frane cartografate su ortofoto (fig. 6). Per l'interrogazione del *database* basta evidenziare il tema oggetto di interesse e cliccare il pulsante "identify". In questa prima fase di studio dei dissesti, è stato creato un apposito *data set* contenente solo i campi principali contenuti nella scheda censimento IFFI; essi sono in corso di aggiornamento tramite la realizzazione del Progetto IFFI (BORRELLI & PELLEGRINO, in stampa). Il *data set* contiene anche i livelli di Pericolosità, desunti dalle matrici Sottoclassi di Pericolosità ed Intensità del PAI.

Altre possibili interrogazioni del *database* si possono eseguire direttamente utilizzando la funzione "query builder".

Dopo aver validato i dati DIFSAR (CARACCIOLO *et alii*, 2006), grazie alla creazione della relativa banca dati (fig. 5b), è possibile procedere all'analisi di ciascun fenomeno franoso relativamente sia all'evoluzione spazio-temporale dei diversi elementi morfologici che ad una sua

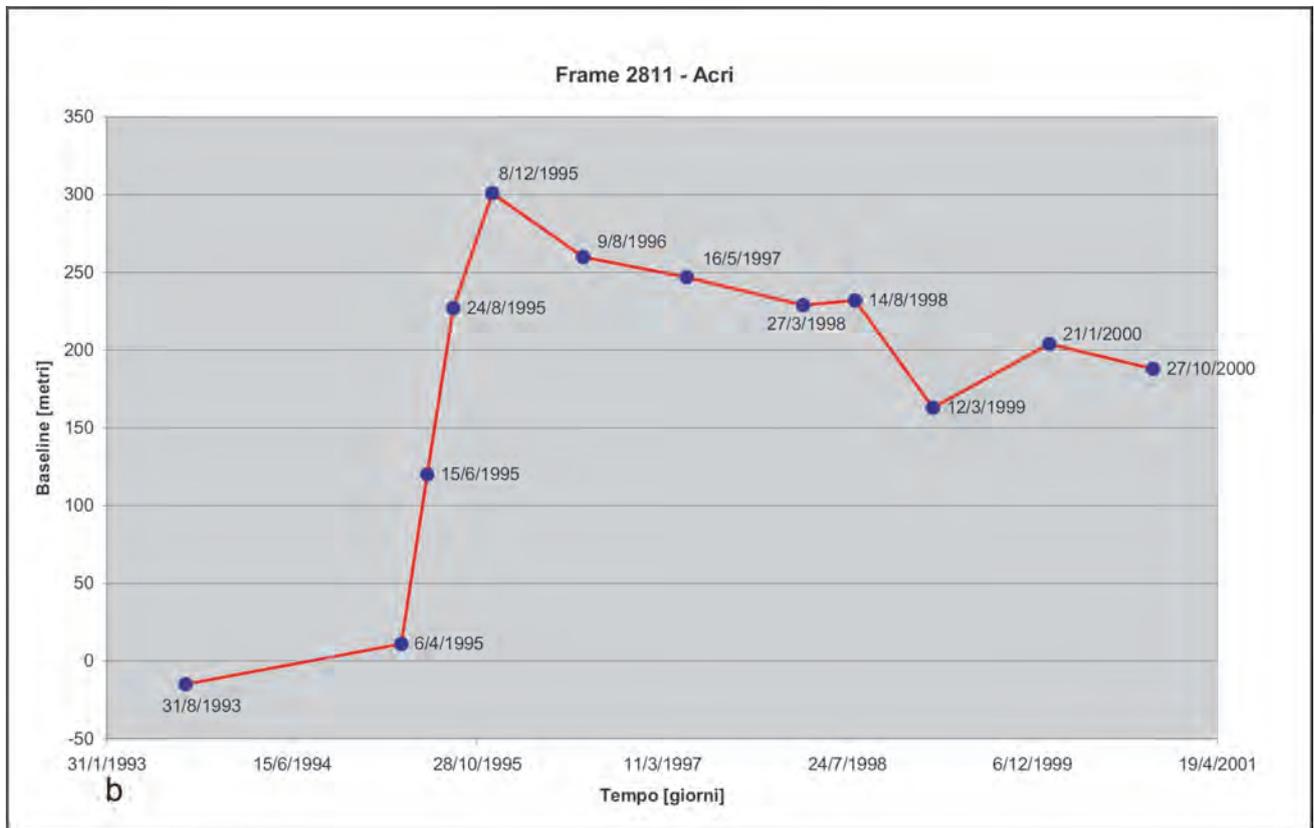
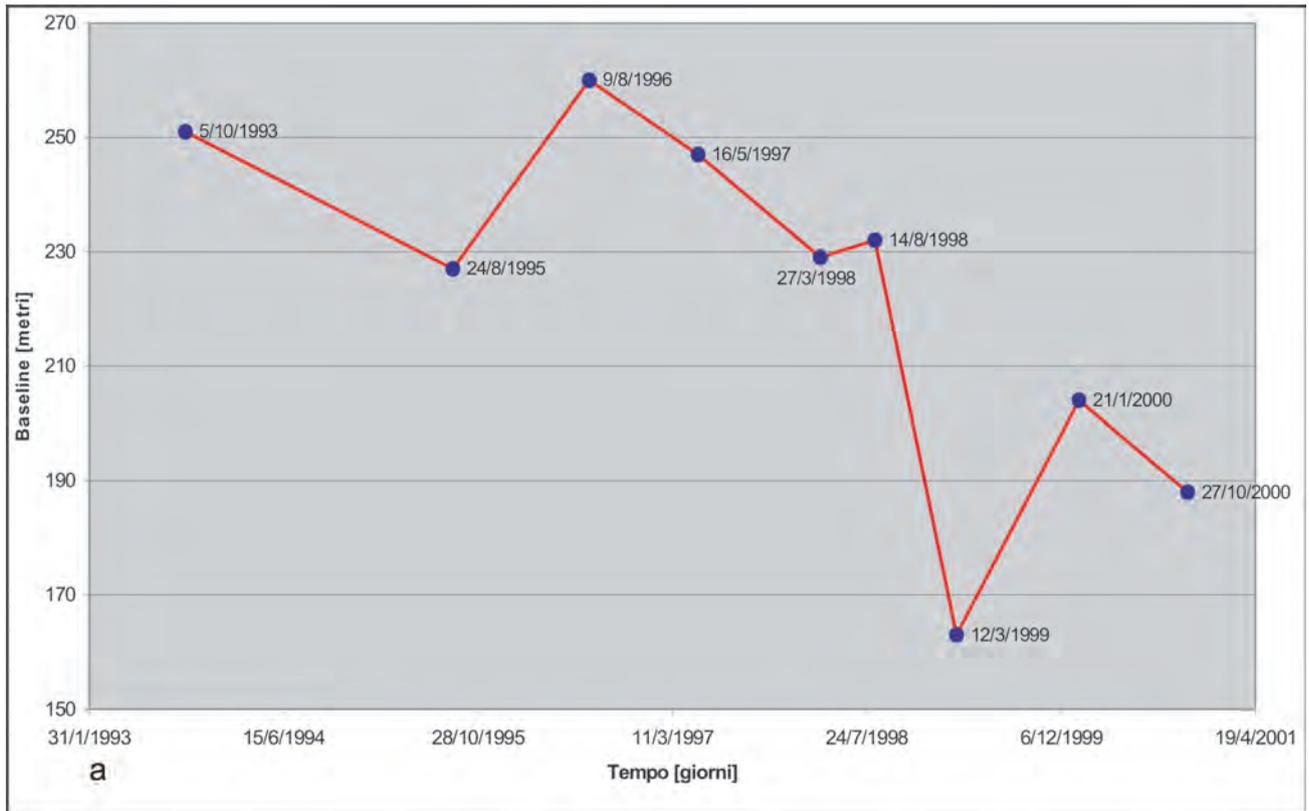


Fig. 4 - a) Diagramma baseline/tempi di acquisizione relativo al frame di San Luca. b) Diagramma baseline/tempi di acquisizione relativo al frame di Acri.  
 - a) Baseline/acquisition time diagram for the San Luca frame. b) Baseline/acquisition time diagram for the Acri frame.

TAB. 1 - *Dati ausiliari.*  
- Auxiliary data.

DATO	USO	CARATTERISTICHE
DEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminazione contributo topografico</li> <li>- Calibrazione baseline</li> <li>- Trasformazione mappe spostamento da coordinate RADAR a coordinate cartografiche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provenienza: SRTM C-band</li> <li>- Risoluzione: 1 arcsec x 1 arcsec</li> <li>- Accuratezza DTED1</li> </ul>
Immagini fotografiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presentazione risultato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provenienza: Telespazio S.p.a.</li> <li>- Data acquisizione: 2003</li> <li>- Risoluzione: 1m</li> <li>- Scala di acquisizione: 1:40000</li> <li>- Accuratezza orizzontale: adeguata alla cartografia in scala 1:10000 (2m)</li> </ul>

TAB. 2 - *Caratteristiche delle mappe fornite da Telespazio.*  
- Characteristics of the Telespazio maps.

DATO	CARATTERISTICHE
Mappe di sintesi degli spostamenti lungo la linea di vista del sensore e lungo la linea di massima pendenza su intervalli temporali definiti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proiezione:UTM 33 su ED50 trasformata in WGS84</li> <li>- Posting: 10 m</li> <li>- Quantizzazione: 1 mm</li> <li>- Campionamento temporale: 1 anno circa</li> <li>- Paletta dei colori: <i>Legend-spostamento linea vista/legend-spostamento slope.avl</i></li> <li>Data type:Unsigned Char (8 bit)</li> </ul>
Mappe di sintesi delle velocità medie, su un periodo di sette anni, lungo la linea di vista del sensore e lungo la linea di massima pendenza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proiezione:UTM 33 su ED50 trasformata in WGS84</li> <li>- Posting: 10 m</li> <li>- Quantizzazione: 0,5 cm/anno</li> <li>- Campionamento temporale: 2 anni circa</li> <li>- Paletta dei colori: <i>Legend-velocità/legend-velocità - slope.avl</i></li> <li>Data type:Unsigned Char (8 bit)</li> </ul>

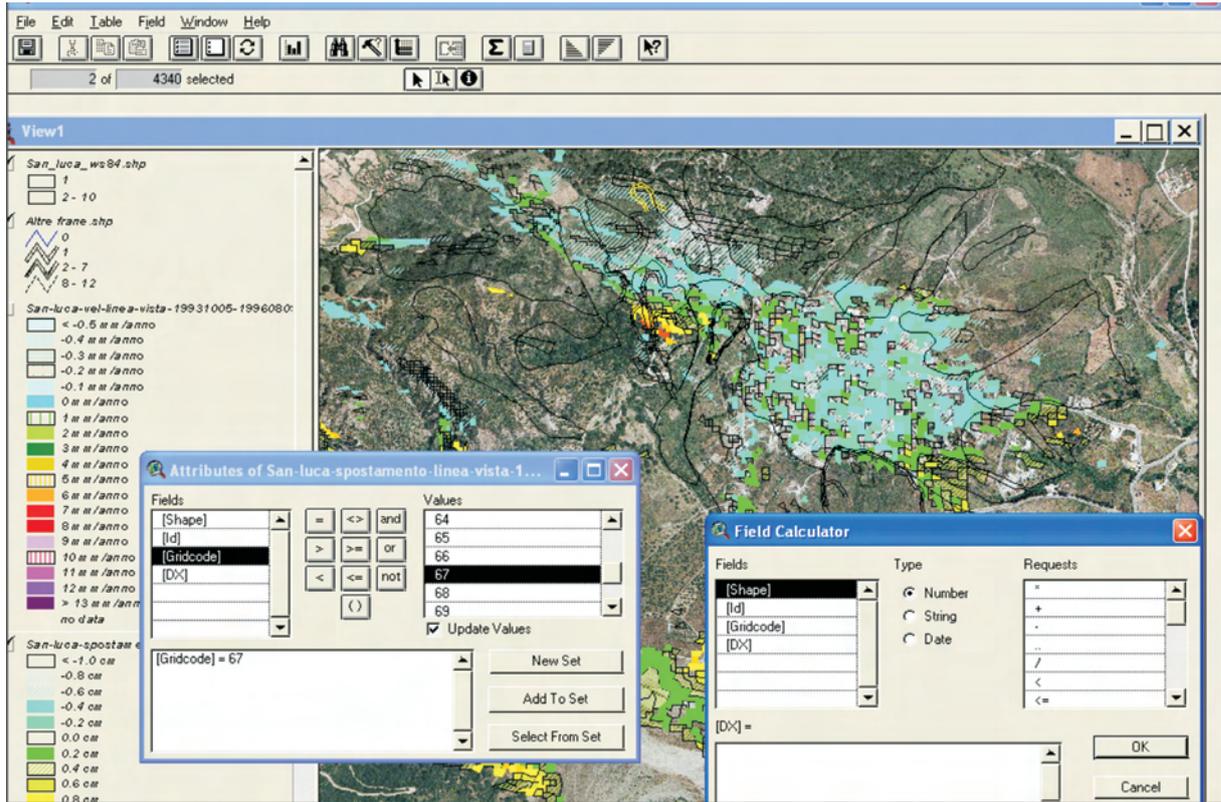
evoluzione complessiva.

È, infatti, possibile delineare il *trend* deformativo e delle relative velocità di deformazioni per le diverse aree in frana distinguendo, quando ritenuto necessario, la corona e la zona di distacco dalla zona di accumulo. A tal fine, in corrispondenza dei dissesti oggetto di studio, è stata messa a punto una procedura che ha previsto l'individuazione e la selezione dei *pixel* rappresentativi, il processamento dei valori contenuti nei campi relativi alle deformazioni o relative velocità di deformazione (fig. 5b), la restituzione finale del dato in termini quantitativi (fig. 7) e la

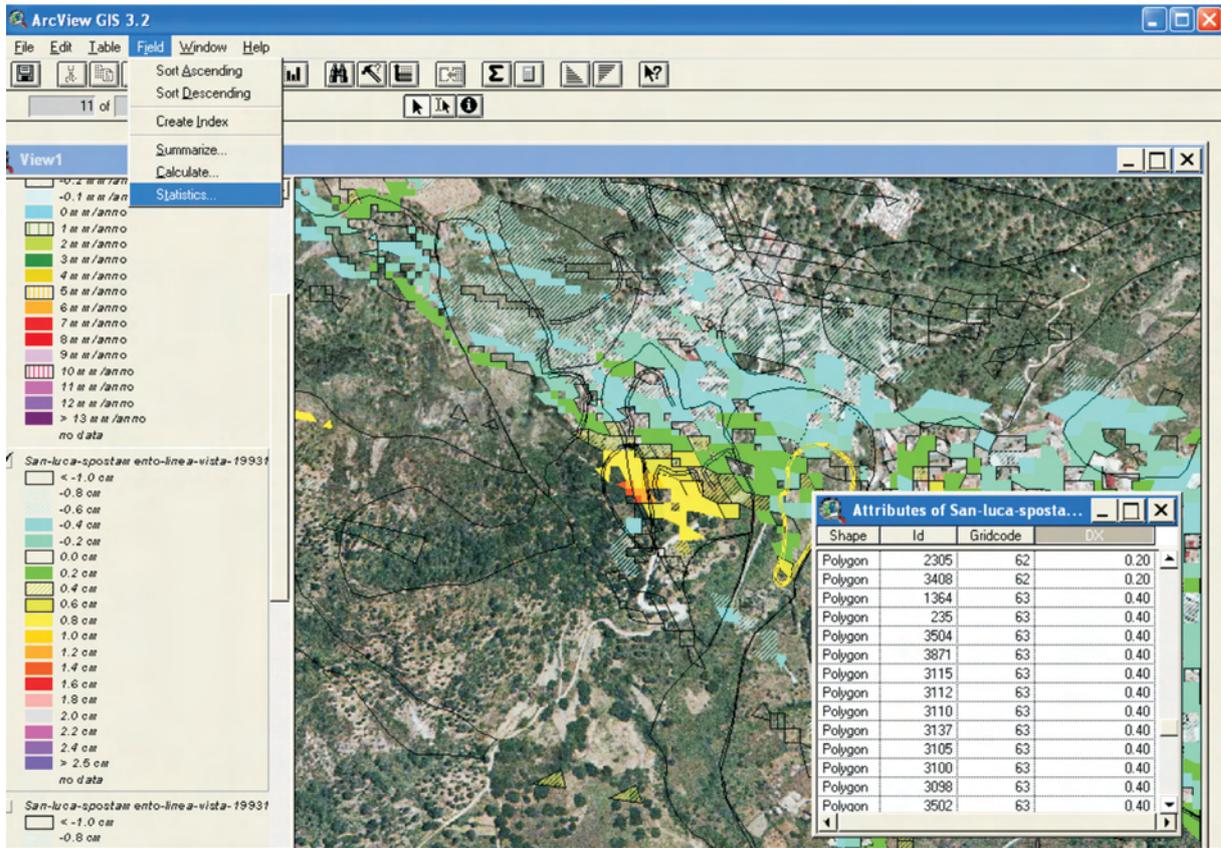
raccolta in apposito *data base*.

La figura 7a, rappresentativa dell'area in frana in loc. Calvario nell'abitato di S. Luca, costituisce un esempio di proiezione d'insieme dell'attività del fenomeno attraverso il *trend* della relativa velocità di deformazione, ottenuta dall'analisi ed elaborazione delle relative mappe lungo la linea di vista. La figura 7b mostra, invece, un dettagliato trend deformativo relativamente alla stessa area, con dovuta distinzione di alcuni elementi morfologici per la differenza dell'entità delle deformazioni ivi registrata.

La totalità dei dati DIFSAR, così come or-



a



b

Fig. 5 - a) Procedura per l'analisi quantitativa delle mappe di velocità e di spostamento. b) Banca dati DIF-SAR ed esempio di elaborazione quantitativa del dato di output.

- a) Procedure for the quantitative analysis of velocity and displacement maps. b) DIF-SAR data bank and example of quantitative elaboration of output data,

ganizzata, può condurre, limitatamente al periodo analizzato (1993-2000), anche alla stima delle zone di potenziale influenza del dissesto a seguito della sua evoluzione e delle aree a rischio associate (fig. 5b).

Definito lo scenario morfoevolutivo di ciascun dissesto analizzato nei due siti in studio, il confronto tra le mappe *spostamento-linea vista* con quelle *spostamento-slope* ha evidenziato che nelle seconde si assiste ad un completo mascheramento o restituzione parziale delle deformazioni in atto, da attribuire ai problemi geometrici di acquisizione su menzionati (fig. 8; prg 4). Ciononostante, una volta filtrate ed opportunamente interpretate le informazioni contenute nelle mappe *spostamento-slope*, i relativi dati di *output* possono ugualmente fornire informazioni sull'evoluzione del dissesto lungo la linea di massima pendenza per versanti con inclinazione maggiore di 4° e lungo la verticale per terreni con inclinazioni inferiori.

Al tempo stesso, dalla banca dati è possibile

ottenere dati puntuali sia per studi specifici che per la valutazione delle aree a rischio. Il controllo di singoli pixel nel tempo permette, infatti, di delineare il relativo *trend* deformativo attraverso l'analisi del tasso di spostamento temporale. La figura 10 mostra come per il fenomeno rilevato in loc. Padia, lato sud-ovest dell'abitato di Aciri, nei punti di maggior ampiezza il tasso di movimento osservato, costante durante tutto il periodo di osservazione (1993-2000), superi i 7,5 cm in 7 anni.

## 7. - CONCLUSIONI

Il presente lavoro costituisce un *input* sui criteri di elaborazione cartografica, nonché raccolta ed analisi dei dati sulle frane, in modo da delineare linee comuni estendibili anche ad altri contesti.

L'organizzazione e la costruzione di *database alfanumerici e cartografici*, contenenti i numerosi

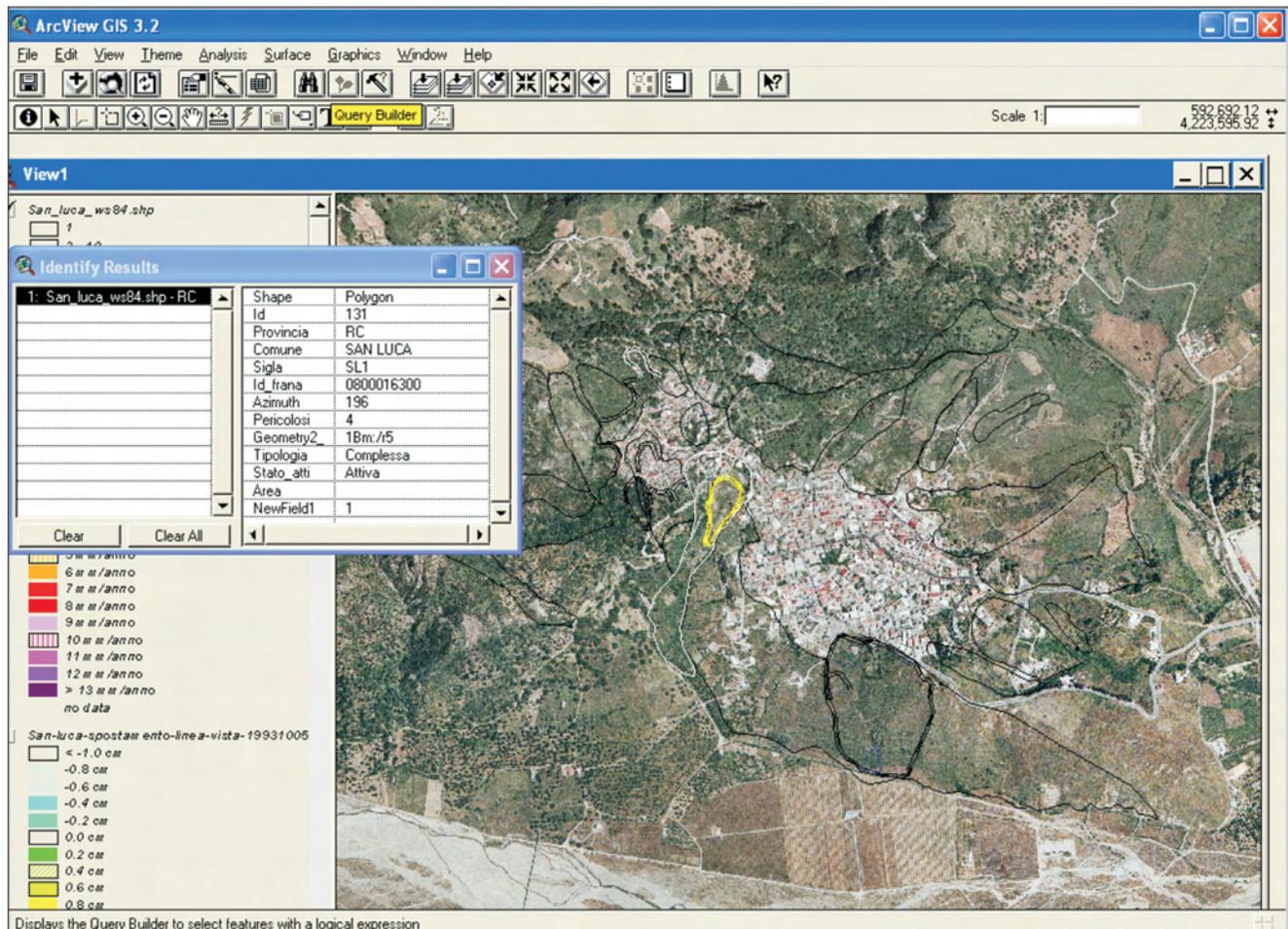


Fig. 6- Carta Inventario per l'abitato di S. Luca, con revisione di alcune aree in frana.  
- Inventory map of the S. Luca settlement area with revision of some landslide areas.

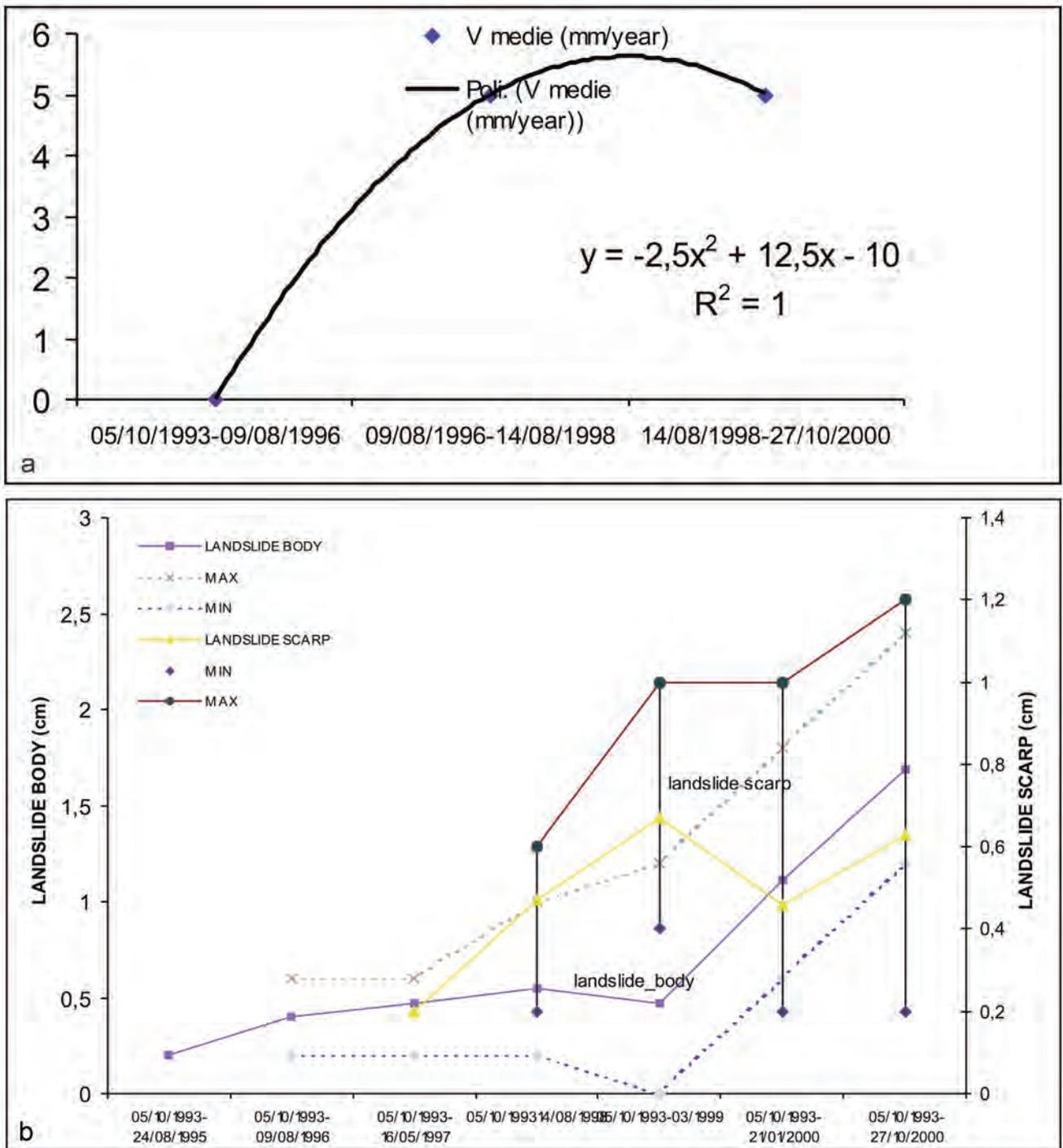


Fig. 7 - a) Quadro d'insieme delle velocità di deformazione per la frana in loc. Calvario (S. Luca). b) Dettaglio del *trend* deformativo della frana in loc. Calvario (S. Luca), ottenuto dall'elaborazione delle mappe di spostamento lungo la linea di vista.  
- a) Velocity pattern of landslide deformation of Calvario locality (S. Luca). b) Detailed deformative trend of formation rate pattern of Calvario locality (S. Luca), obtained by the elaboration of displacement maps along the view line.

dati ottenuti attraverso metodi geomorfologici convenzionali e innovativi, consentono sia una valutazione quantitativa del dato interferometrico, sia di ottenere indicazioni puntuali e complessive circa l'evoluzione spazio-temporale dei movimenti di massa analizzati ottemperando,

contestualmente, al monitoraggio degli stessi. Al tempo stesso, l'elaborazioni condotte forniscono un valido contributo per la valutazione quantitativa della pericolosità e rischio di frana ed in un'ultima analisi per la costruzione di modelli geologico-evolutivi di versante.

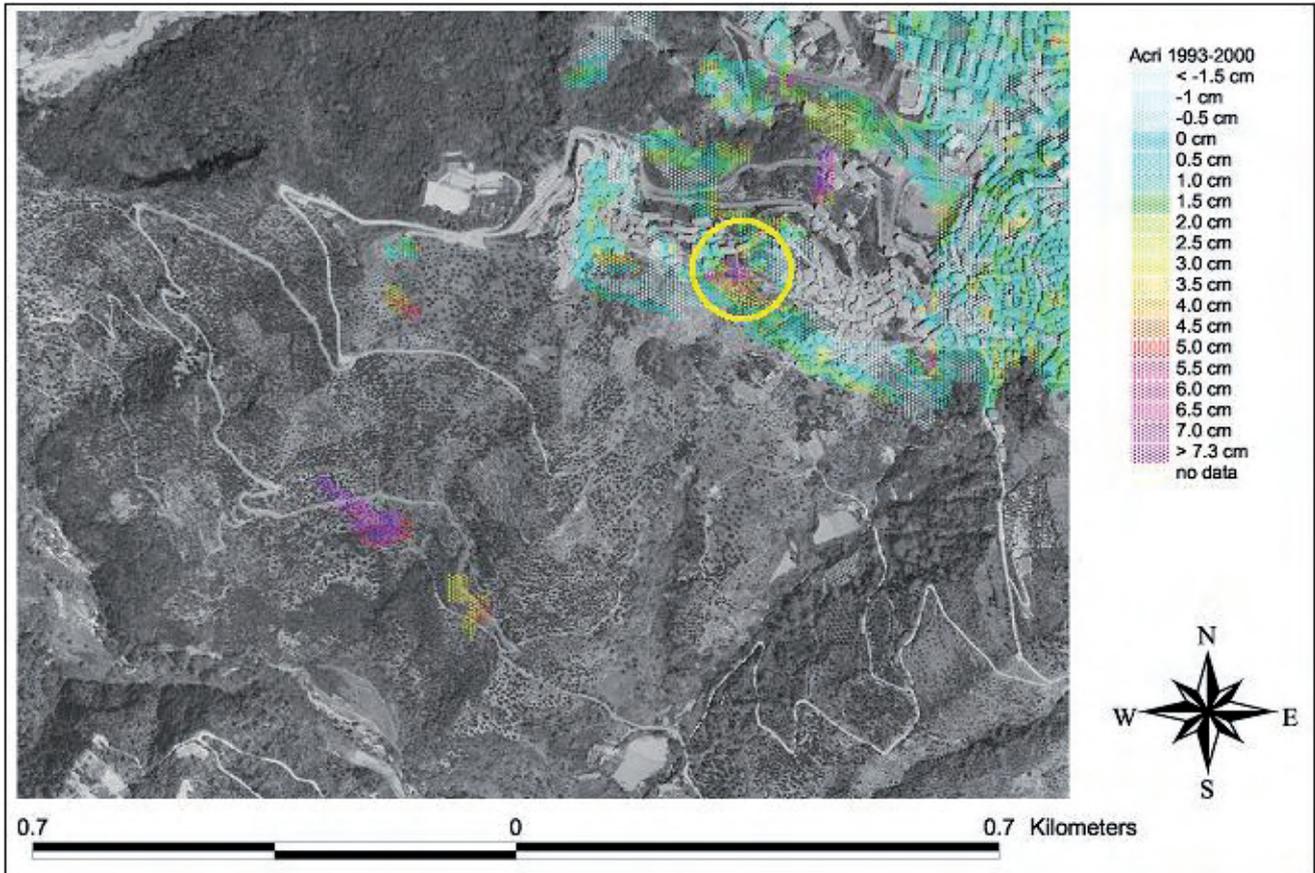


Fig. 8 - Mappa degli spostamenti nella zona di Aciri, relativi al periodo agosto 1993 - ottobre 2000, misurati lungo la linea di massima pendenza per terreni con inclinazione superiore a  $4^\circ$ , e lungo la verticale per terreni con inclinazioni inferiori. La mappa è sovrapposta ad un'immagine fotografica ad alta risoluzione. Sono stati mascherati i punti per i quali la pendenza del terreno rispetto alla linea di osservazione del sensore compone un angolo compreso tra  $78^\circ$  e  $102^\circ$ .

- Map of the August 1993-October 2000 displacements in the Aciri area, measured along the maximum gradient, for surfaces sloping more than  $4^\circ$ , and along the vertical for slopes less than  $4^\circ$ . This map is overlaid on a high resolution photographic image. The points where the surface slope forms a  $78^\circ$  to  $102^\circ$  angle with the sensor observation line have been masked.

## BIBLIOGRAFIA

- ABR - AUTORITÀ DI BACINO REGIONE CALABRIA (2001) - *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), Regione Calabria: Specifiche Tecniche*. Catanzaro. Versione digitale in 6 CD e disponibile anche sul sito internet: [www.autoritadibacino.it/pai](http://www.autoritadibacino.it/pai)
- ABR - AUTORITÀ DI BACINO REGIONE CALABRI (2002) - *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), Regione Calabria: Linee Guida per studi relativi alla valutazione ed alla zonazione della pericolosità e del rischio di frana - Studio di compatibilità geomorfologica relativo agli interventi per la mitigazione del rischio di frana*. Catanzaro. Pubblicato sul sito internet: [www.autoritadibacino.it/pai-BUR](http://www.autoritadibacino.it/pai-BUR) Calabria, 20.
- AMANTI M., BERTOLINI G., CHIESSI V., DE NARD M.T. & RAMASCO M. (1996a) - *Guida alla compilazione della scheda frane*. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento per i Servizi tecnici Nazionali - Servizio Geologico. 7 - Miscellanea.
- AMANTI M., CASAGLI N., CATANI F., D'OREFICE M. & MOTTERAN G. (1996b). *Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione*. Miscell. Serv. Geol. d'It., 7, 109.
- AMARO O., CARACCIOLLO T., GABRIELE G., LA PIETRA T., MOLLIKA L.M. & PELLEGRINO A. (2004) - *Progetto sperimentale di monitoraggio avanzato in siti a rischio frana: fornitura e messa in esercizio di un sistema di monitoraggio basato su studio mediante interferometria, sistemi GPS, sensori meteo e geotecnici, e realizzazione rete w-lan nei centri abitati di Aciri (Cosenza) e San Luca (Reggio Calabria)*. Riv. Ambiente Italia, (Protezione Civile) - Convegno Nazionale "L'Europa incontra l'Italia" PODIS: una risorsa per il Mezzogiorno: pp. 14-15, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.
- AMARO O., CARACCIOLLO T., LA PIETRA T., MOLLIKA L.M. & PELLEGRINO A. (2004) - *Analysis of different evolutionary-geological settings through a complex monitoring network: the case of Aciri and S. Luca (Calabria, Italy)*. 32<sup>nd</sup> Int. Geol. Congr., August 2004, Florence, Italy: p. 482.
- BORRELLI S. & PELLEGRINO A. - *Progetto IFFI Relazione Tecnica Regione Calabria* - APAT, Relazione Finale Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, in stampa su rivista APAT.
- CARACCIOLLO T., LA PIETRA T. & PELLEGRINO A. (2006) - *Primi risultati dal confronto tra tecniche geomorfologiche convenzionali e l'interferometria DIFSAR: applicazione per l'analisi di movimenti in massa in aree peri-urbane (Calabria, Italy)*. Giornale di Geologia

- Applicata, 2: 217-226.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslides Types and Processes*. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.): "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board Special Report 247: pp. 36-75, National Academy Press, Washington D.C..
- LA PIETRA T., MOLLIKA L.M. & PELLEGRINO A. (2004) - *Progetto sperimentale di monitoraggio avanzato in siti a rischio frana: fornitura e messa in esercizio di un sistema di monitoraggio basato su studio mediante interferometria, sistemi GPS, sensori meteo e geotecnici, e realizzazione rete w-lan nei centri abitati di Acri (Cosenza) e San Luca (Reggio Calabria)*, Relazione Tecnica Finale. Archivio Autorità di Bacino Regione Calabria (RIF 1003/ABR): pp. 36, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (PODIS).
- RIZZO V. (1990) - *Dati descrittivi della geologia, geomorfologia ed instabilità dei centri abitati*. In: "Il dissesto Idrogeologico in Calabria", Studio-dossier elaborato da CNR-IRPI per conto della Regione Calabria": pp. 6, Arti Grafiche Rubbettino.
- TANSI C. & GRECO R. (2001) - *Geologia, geologia strutturale e litologia*. In: "Studio e monitoraggio della frana di Serra di Buda (Acri)", Relazione Finale, 1: pp. 10, CNR IRPI.
- TELESPAZIO (2004) - *Rapporto Tecnico sull'Analisi DIF - SAR - Progetto PON-ATAS 2000-2006, Realizzazione di un Sistema di Monitoraggio avanzato nei siti a rischio frana di Acri (CS) e San Luca (RC)*", Archivio Autorità di Bacino Regione Calabria: pp. 54.
- TORTORICI L. (1982) - *Lineamenti geologico-strutturali dell'Arco Calabro Peloritano*. Rend. Soc. It. Miner. Petrogr., 38: 927-940.
- VAI G. B. (1992). *Il segmento calabro-peleoritano dell'orogene ercinico. Disaggregazione palinspastica*. Boll. Soc. Geol. It., 111: 109-129.
- VARNES D.J. (1984) - *Landslide hazard zonation*, pp. 63, UNESCO.WP/WLI (1993) - *A suggested method for describing the activity of a landslide*. Bull. IAEG, 47: 53-57