

NUOVE TECNOLOGIE DI ANALISI DELLE FRANE

Il monitoraggio SATELLITARE

Primi risultati in Liguria della sperimentazione
dell'utilizzo della tecnica PSInSAR™

DANIELE BOTTERO*,
FLAVIO POGGI*, STEFANO CESPÀ**

(*) REGIONE LIGURIA, DIPARTIMENTO AMBIENTE -
SERVIZIO POLITICHE ASSETTO DEL TERRITORIO

(**) TRE TELERILEVAMENTO EUROPA SPA, MILANO

Premessa

Le cronache, non solo recenti, testimoniano come nel nostro territorio l'esposizione al rischio di frana sia particolarmente elevata e costituisca, pertanto, un problema di grande rilevanza sociale, sia per il numero di vittime che per i danni arrecati al tessuto antropico.

Per rispondere all'esigenza di prevenzione del rischio geomorfologico diverse sono state nel tempo le azioni che lo Stato e gli Enti territoriali hanno intrapreso per individuare le zone a rischio e per ridurre sia la pericolosità dell'evento atteso sia la vulnerabilità dei soggetti esposti.

A livello nazionale sono stati infatti predisposti opportuni strumenti legislativi attraverso i quali si è giunti ad impiegare risorse finanziarie atte a realizzare gli interventi strutturali di bonifica e consolidamento, nonché le azioni di monitoraggio e controllo dei fenomeni franosi. In tale contesto il Servizio Politiche dell'Assetto del Territorio, del Dipartimento Ambiente della Regione Liguria, nell'ambito delle finalità di promozione ed innovazione tecnologica, ha svolto, nell'anno appena trascorso, una sperimentazione del monitoraggio satellitare dei movimenti franosi con tecnica PSInSAR™, che consente di

individuare bersagli radar caratterizzati da una firma elettromagnetica costante nel periodo di tempo indagato (diffusori permanenti o *permanent scatterers*) per i quali viene misurata la velocità media annua di spostamento. Disponendo dell'archivio di scene radar acquisite dai satelliti ERS1 ed ERS2 dell'ESA fra il 1992 ed il 2001, è stato, quindi, possibile ricostruire nell'arco temporale 1992-2001 i moti di deformazione dei versanti nelle aree prese a campione nelle provincie di Genova e Spezia, per complessivi 1.000 km² circa. I risultati dalla sperimentazione sono stati posti a confronto con i dati derivanti dal progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), in cui il Servizio regiona-

le è direttamente coinvolto, finanziato dal Comitato dei Ministri per la Difesa del Suolo, ex lege 183/89, e promosso da APAT, che si pone l'obiettivo di giungere ad un quadro completo ed aggiornato sulla distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale.

Oggetto del presente articolo è, appunto, la trattazione dei risultati della sperimentazione di monitoraggio satellitare in rapporto ai dati conoscitivi della franosità nel "genovesato", sia per evidenziare le potenzialità della tecnica sperimentata nella validazione ed aggiornamento della cartografia d'inventario dei fenomeni franosi sia come integrazione ai tradizionali metodi di analisi del rischio idrogeologico.

Foto: ESA

L'analisi interferometrica di immagini radar satellitari e la tecnica dei diffusori permanenti

Le immagini radar vengono acquisite da particolari sistemi, denominati ad "radar apertura sintetica" (SAR), in grado cioè di sfruttare il moto lungo un'orbita per osservare la stessa porzione di superficie sotto più angoli di vista e quindi "sintetizzare" un'antenna di grandi dimensioni per incrementare la risoluzione al suolo.

L'obiettivo principale è quello comune a tutti i radar: misurare la distanza sensore-bersaglio.

Si tratta di sistemi "attivi": emettono un segnale e registrano l'eco di ritorno; quindi

in grado di operare sia di giorno che di notte e anche in presenza di copertura nuvolosa. Inoltre sono sistemi "coerenti", ovvero acquisiscono sia il dato di ampiezza del campo elettromagnetico rilevato (valore di modulo), sia l'informazione associata alla distanza sensore-bersaglio (valore di fase).

Si hanno dunque a disposizione immagini di vaste aree del territorio che riportano informazioni sulla riflettività e sulla distanza dei bersagli al suolo dal sensore, inoltre sono misure ripetute nel tempo dato che i satelliti seguono orbite tali per cui dopo un periodo definito (*revisting time*) viene osservata nuovamente la stessa porzione di territorio.

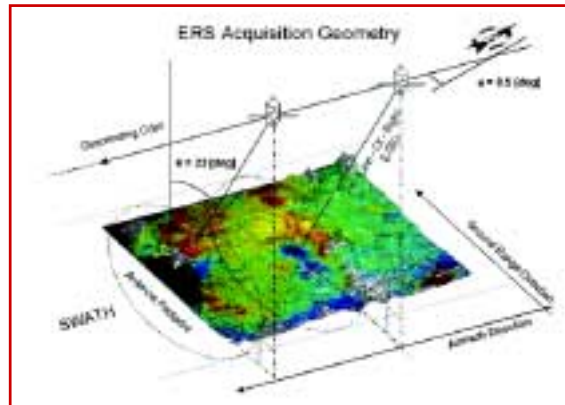
La tecnica applicata per elaborare i dati acquisiti è denominata interferometria differenziale.

L'idea di base è quella di confrontare due immagini acquisite dalla stessa orbita e sulla stessa area di interesse, eseguendo una differenza delle distanze sensore-bersaglio misurate nei due istanti di acquisizione, mettendo così in luce possibili movimenti superficiali.

L'operazione dà luogo ad un "interferogramma", ovvero la matrice delle differenze di fase tra le due immagini. I

contributi che determinano le variazioni di fase tuttavia non sono legati solo a possibili fenomeni di movimento, ma sono relativi anche alla topografia dell'area analizzata, alla riflettività del suolo e alle variazioni delle condizioni atmosferiche tra le due acquisizioni.

Qualora questi contributi assumano va-



lori considerevoli, si manifestano come disturbi (fenomeni di decorrelazione) e la lettura dell'interferogramma non risulta quindi immediata, non è possibile cioè associare direttamente una variazione di valore della fase ad uno spostamento del terreno. Ad esempio, se le acquisizioni sono lontane nel tempo, in aree vegetate l'informazione di fase può risultare fortemente deteriorata a causa del variare della riflettività dei bersagli (decorrelazione temporale). Oppure, una distanza di poche centinaia di metri tra le due orbite del satellite in corrispondenza delle due diverse acquisizioni, è sufficiente a rendere completamente illeggibile la fase interferometrica (in questo caso si parla di decorrelazione geometrica).

I limiti dell'interferometria SAR classica sono dunque legati ai fenomeni di decorrelazione e in particolar modo al contributo di fase dovuto alle variazioni atmo-

sferiche nelle diverse acquisizioni, che sovente genera effetti difficili da distinguere dai fenomeni di movimento del terreno.

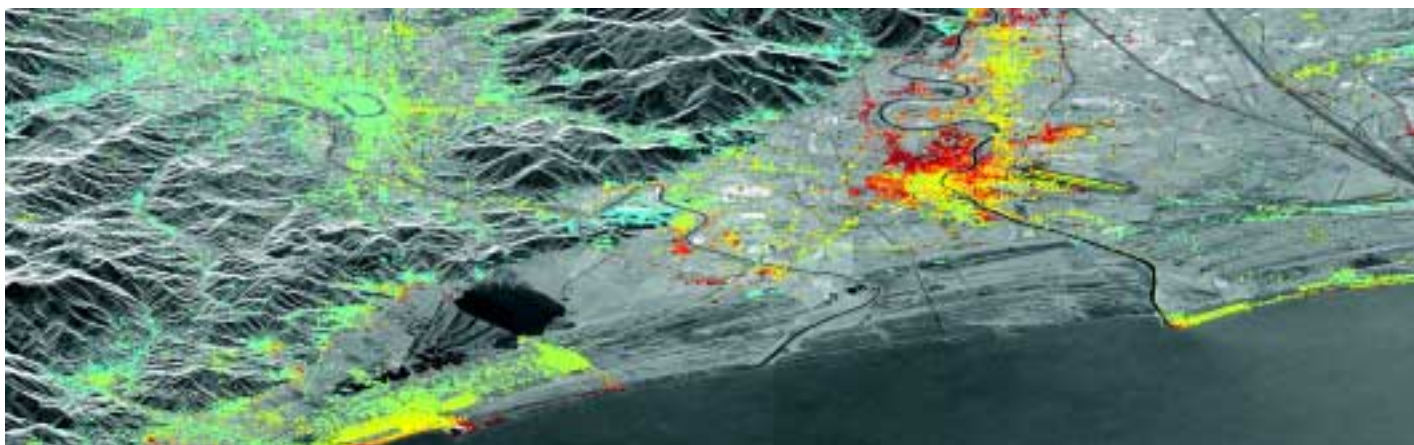
Entrambe le difficoltà sono state superate dalla Tecnica dei Diffusori Permanenti.

L'approccio si basa sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar di piccole dimensioni, i *Permanent Scatterers* (PS), risultano praticamente immuni dagli effetti di decorrelazione temporale e geometrica. Tipicamente i *Permanent Scatterers* corrispondono ad elementi già presenti al suolo, ovvero edifici, pali, strutture metalliche, rocce esposte, in generale oggetti che sono riconoscibili in tutte le acquisizioni successive poiché non variando la loro geometria sono in grado di riflettere in modo costante il campo elettromagnetico incidente emesso dal sensore. Si pensi ad esempio alla differenza tra il campo riflesso in due acquisizioni distinte da un albero e dal tetto di un edificio.

I PS preservano dunque coerenza di fase in lunghe serie storiche di immagini e possono essere utilizzati per ricostruire e compensare efficacemente il

Bersagli radar sovrapposti a ortofoto carta digitale





Pisa, campo delle velocità medie di spostamento dei permanent scatterers nel periodo 1992-2000

disturbo atmosferico. Infatti si può definire e stimare un modello per il contributo di fase legato al movimento del bersaglio in quanto presenta una determinata evoluzione temporale e scinderlo da quello legato alle condizioni atmosferiche che presenta invece una correlazione spaziale all'interno della singola immagine ma risulta incorrelato tra acquisizioni distinte di una lunga serie storica.

Per fare ciò è necessario avvalersi di dataset consistenti in almeno 25-30 immagini radar e che la densità spaziale dei PS sia sufficientemente elevata (> 5-10 PS/kmq), vincolo sempre verificato in aree urbane dove si raggiungono, in genere, valori di 100-300 PS/kmq.

In corrispondenza dei PS è, inoltre, possibile separare il termine di fase dovuto alla topografia da quello dovuto al movimento. Si ricava quindi il trend medio di deformazione, con una precisione compresa tra 0.1 e 1 mm/anno, oltre all'intera serie temporale di deformazione (in questo caso la precisione arriva a 1 mm sulla singola misura, per i PS migliori, ed è tale da far apprezzare fenomeni di dilatazione termica stagionale di singole strutture). Oltre a precisione delle misure e densità spaziale dei punti di misura, un ulteriore vantaggio è costituito dalla ricchezza di dati disponibili negli archivi dell'Agenzia Spaziale Europea. È infatti possibile avviare un'analisi PS oggi, avendo a disposizione dati a partire dal 1992, con la possibilità di rico-

struire la storia passata dell'area di interesse.

I limiti della tecnica consistono sostanzialmente nei seguenti aspetti:

- le misure sono possibili solo in corrispondenza dei PS; è necessario cioè che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte), quindi in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettive causate dalla topografia del terreno, non si hanno punti di misura;

- l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (maggiore di 80 mm/anno) è possibile solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto; anche i fenomeni a cinematica impulsiva, caratterizzati, cioè, da brevi fasi di attività, per lo più legate a eventi meteorologici intensi, intervallati da lunghi periodi di quiescenza, non appaiono particolarmente adatti ad essere monitorati con questa tecnica, soprattutto quando movimenti di entità centimetrica sono concentrati in pochi giorni;

- è possibile apprezzare solo deformazioni lungo la direzione di LOS (congiungente sensore-bersaglio a terra), cioè approssimativamente lungo la verticale, secondo la geometria dei satelliti attualmente in orbita;

Pur con le problematiche esposte, al Tecnica PS sta riscuotendo un notevole successo grazie ai notevoli vantaggi

introdotti:

- i PS costituiscono una sorta di "rete geodetica naturale", ovvero sono oggetti già presenti sul territorio quali edifici, rocce esposte, pali, antenne, condotte, elementi antropici, per i quali è possibile stimare misure di spostamento a partire dal 1992 per l'analisi dei fenomeni di deformazione superficiale (subsidenze, frane, faglie sismiche);

- l'estensione delle immagini è pari a 100x100 km, si possono quindi analizzare vaste aree in tempi ristretti e a costi contenuti;

- la precisione delle misure è millimetrica permettendo così l'individuazione di fenomeni lenti su vaste aree altrimenti non rilevabili;

- l'archivio storico sul territorio italiano risale al 1992, quindi è possibile indagare fenomeni di movimento attivi da oltre un decennio;

- i risultati vengono prodotti in formato di database compatibile con i sistemi informativi territoriali permettendo così una rapida integrazione con altre rilievi del territorio.

La Tecnica PS è dunque uno strumento operativo, di utilizzo immediato e che per le sue caratteristiche peculiare risulta complementare con altre tecniche di telerilevamento ambientale.

La Tecnica PS è un brevetto internazionale del Politecnico di Milano concesso in licenza esclusiva a Tele-Rilevamento Europa, primo spin-off dell'ateneo milanese.

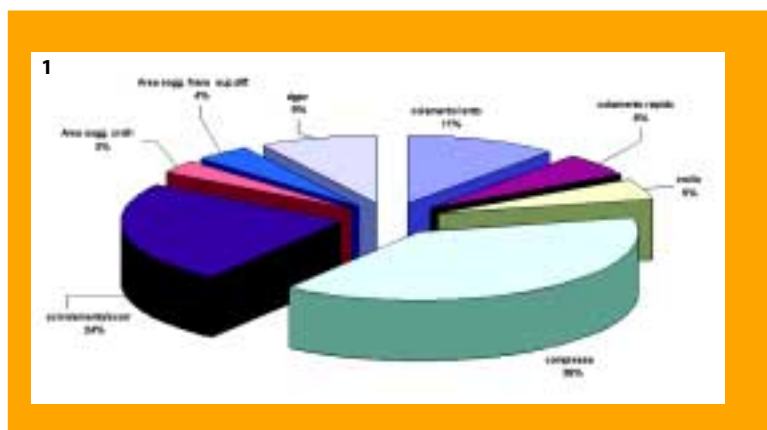
Base dati utilizzata nell'analisi

Per l'analisi dell'area indagata in Provincia di Genova, che comprende una porzione di territorio rettangolare estesa per oltre 700 km² fra Sestri Ponente a Ovest e Recco a Est e fra la linea di costa e Busalla verso Nord, sono state utilizzate 102 immagini acquisite in modalità discendente (orbita Nord-Sud) fra il maggio 1992 e il luglio 2003 e 33 immagini acquisite in modalità ascendente (orbita Sud-Nord) fra il Giugno 1992 ed il Luglio 2003.

Per l'analisi dell'areale spezzino, comprendente la fascia costiera compresa tra Framura e Portovenere nonché l'abitato della Spezia, per circa 270 km², sono state selezionate 86 immagini in orbita discendente acquisite fra l'aprile 1992 e il febbraio 2003 e 36 immagini acquisite da Giugno 1995 a Novembre 2003.

Il Progetto IFFI

Con riferimento al Progetto IFFI¹ i tecnici della Regione Liguria, nell'ambito delle funzioni di acquisizione e organizzazione dei dati sui fenomeni franosi, hanno proceduto alla "messa a sistema" dei dati provenienti dagli studi dei Piani di Bacino Stralcio redatti dalle Province e dall'Autorità di Bacino Interregionale del Magra nonché al rilevamento ex-novo di circa 1500 km² appartenenti ai bacini liguri di pertinenza padana. Relativamente al territorio regionale sono state così censite 6.003 frane aventi un'estensione superiore ad 1 ha che determinano una superficie complessiva interessata da fenomeni di instabilità di



oltre 352 km², pari a circa il 7% dell'estensione complessiva del territorio regionale.

Dal quadro generale della franosità del Progetto IFFI, per lo specifico areale del genovesato indagato con la tecnica interferometrica risultano presenti 1092 corpi franosi con un'estensione complessiva di circa 57 km². Tra le più diffuse tipologie² troviamo le frane com-

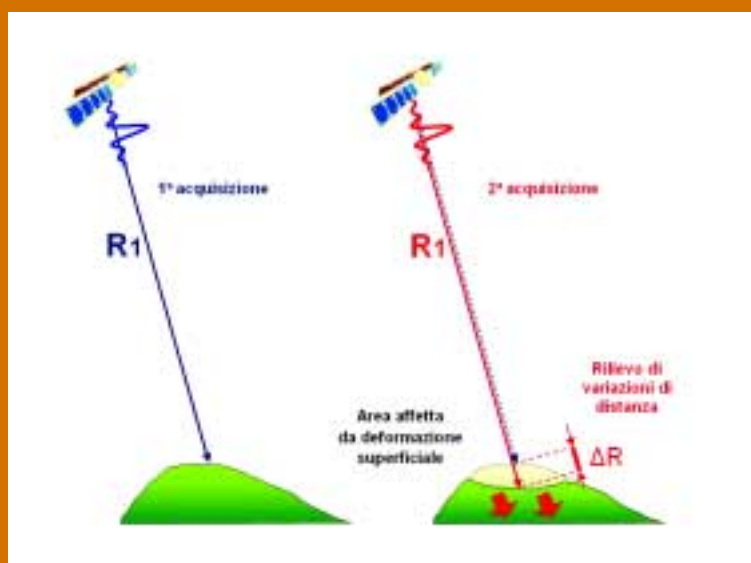
Misurare millimetri da 800 km

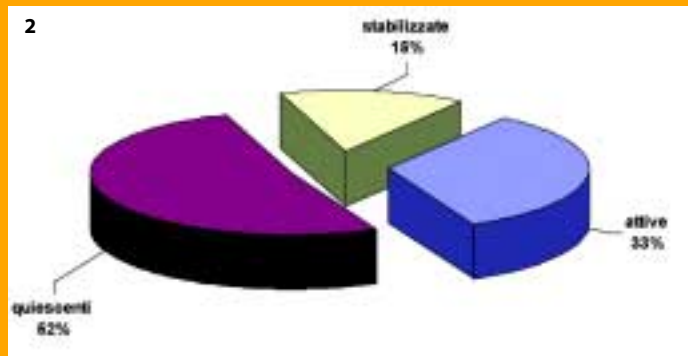
Uno degli aspetti più affascinanti delle tecniche interferometriche è senza dubbio l'elevato grado di precisione che permettono di ottenere per quel che riguarda le misure di spostamento lungo la direzione di puntamento del sensore. Il "segreto" della precisione millimetrica da centinaia di chilometri di distanza sta nella tecnica utilizzata per evidenziare questa elevata accuratezza, ovvero l'interferometria. Nelle misure interferometriche il grado di accuratezza raggiungibile dipende dalla lunghezza d'onda utilizzata e dalla "coerenza" dei segnali utilizzati.

Nel caso dei dati radar satellitari, la lunghezza d'onda (λ) è centimetrica (5.6 cm nel caso di ENVISAT o RADARSAT) e risulta possibile mettere in evidenza spostamenti differenziali di un bersaglio tra due acquisizioni in istanti diversi pari ad un frazione di λ (vedi Figura). I sistemi SAR sono infatti sensori "coerenti", che registrano, oltre ad un dato di ampiezza legato all'energia elettromagnetica riflessa dal bersaglio, anche la fase del treno d'onda monocromatico utilizzato per illuminarlo.

La tecnologia interferometrica, per essere affidabile, deve però tenere conto di molteplici fattori quali ad esempio le piccole variazioni di lunghezza d'onda in ionosfera e troposfera dovute alle variazioni della velocità di propagazione della luce, gli inevitabili

errori di stima delle posizioni del satellite, variazioni di assetto dell'antenna, variazioni della "firma radar" dell'oggetto (perché ad esempio in una acquisizione c'era copertura nevosca), ecc. Tutte queste problematiche sono state superate grazie all'introduzione, alla fine degli anni '90, della Tecnica PS, grazie agli sforzi del gruppo SAR del Politecnico di Milano.





plesse seguite dagli scorrimenti e dai colamenti lenti (vedi grafico 1). Per quanto riguarda lo stato di attività, il maggior numero delle frane censite, oltre il 50% dei casi, è classificato come quiescente, oltre il 30% risulta attivo e le restanti sono inquadrate come stabilizzate o relitte (vedi grafico 2).

Risultati della sperimentazione - analisi dei dati

Come già anticipato lo scopo della sperimentazione è consistito nel verificare l'efficacia della tecnica dei *Permanent Scatterers* per il monitoraggio in remoto dei versanti; tale tecnologia infatti presentava in linea teorica buone potenzialità in una regione dove sono alquanto diffusi i centri abitati edificati sui corpi

di "grandi antiche frane", le quali presentano alcune caratteristiche interessanti per la tecnica di monitoraggio satellitare: sono infatti arealmente estese e caratterizzate da parziali riattivazioni frequentemente con cinematica lenta, per lo più legata ai cicli stagionali.

Il primo obiettivo della sperimentazione è stato quello di verificare la presenza e diffusione dei riflettori radar sul territorio indagato che per l'area genovese si è rivelata molto interessante; nello specifico il numero totale di PS acquisiti nell'ambito della sperimentazione sui due areali è pari a 59.539, suddivisi in tabella.

Il numero di PS rapportato all'estensione territoriale delle aree indagate fornisce una differente densità del dato, infatti, per l'areale genovese abbiamo ottenuto 69 PS/km² contro i 31 PS/km² dell'areale spezzino; ciò è essenzialmen-

| | Orbita | Numero PS | |
|-----------|-------------|-----------|--------|
| GENOVA | Discendente | 39.717 | 51.132 |
| | Ascendente | 11.415 | |
| LA SPEZIA | Discendente | 7.230 | 8.407 |
| | Ascendente | 1.177 | |

te funzione della densità di antropizzazione, oggettivamente superiore nell'area di Genova, e della morfologia delle aree indagate (vedi fig. 1); la zona di Spezia presenta, infatti, elevata energia del rilievo, trattandosi di una zona di costa alta del litorale ligure, ed è, pertanto, fortemente affetta dalle problematiche derivanti dalle deformazioni prospettive che pregiudicano l'efficacia della tecnica PSInSAR in presenza di versanti con caratteristiche geometriche particolari (es.: pendenze molto elevate, esposizione dei versanti ortogonali alla congiungente sensore-bersaglio, ecc.).

Quindi, in considerazione di quanto sopra esposto, in relazione soprattutto agli aspetti relativi alla misurazione dello spostamento lungo la LOS ed alle deformazioni prospettive, consegue che:

- i PS rilevati dall'elaborazione delle immagini in orbita discendente consentono la risoluzione ottimale dei versanti esposti a W e, in minor misura, di quelli

Figura 1 - Panoramica della città di Genova, vista da Loc. Apparizione, si evidenzia l'elevata densità di urbanizzazione della fascia costiera ed il favorevole assetto morfologico



esposti a S. Le deformazioni prospettiche e le caratteristiche del versore N della v_{LOS} , riducono pesantemente la risoluzione per i versanti esposti a E ed a N;

- i PS rilevati in orbita ascendente consentono la risoluzione ottimale dei versanti esposti a E e, in minor misura di quelli esposti a N. Le deformazioni prospettiche e le caratteristiche del versore S della v_{LOS} , riducono pesantemente la risoluzione per i versanti esposti a W e a S; il numero ridotto di immagini acquisite in orbita ascendente, tuttavia, aumenta le problematiche relative alla decorrelazione del segnale e, quindi, abbatte sensibilmente il numero di bersagli ottenuti.

Quindi, se per i versanti esposti a E ed W, i data set ottenuti con le due diverse acquisizioni tendono a compensarsi, maggiori problemi si hanno per i versanti esposti a N e a S; ne consegue che i migliori risultati conseguibili con que-

sta tecnica di monitoraggio saranno da attendersi per i settori territoriali nei quali gli assi vallivi siano orientati prevalentemente N-S (Es. Val Polcevera), mentre quelli dove gli assi vallivi sono in prevalenza orientati E-W forniranno indicazioni decisamente più povere (Es. Valfontanabuona).

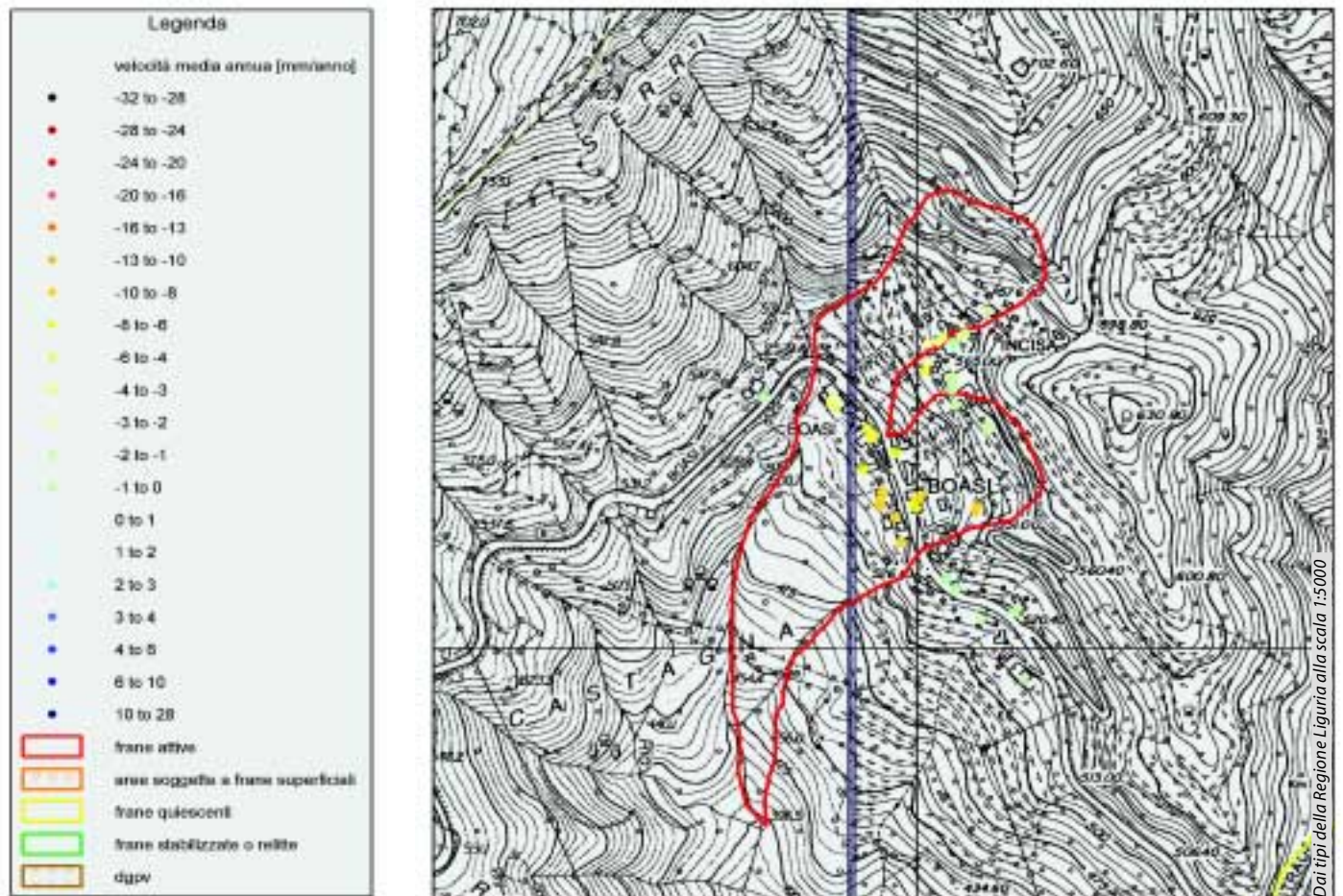
In conclusione, pertanto, in conseguenza della distribuzione dei PS rilevati, si è preferito concentrare l'attenzione sull'areale genovese, trascurando, in questa fase, la porzione indagata della Provincia della Spezia.

Una volta accertata la buona diffusione di PS nella zona di interesse, come secondo obiettivo si è verificata la ricorrenza di riflettori nelle aree in frana; si è osservato come circa il 23% degli oltre 1500 dissesti censiti nell'inventario IFFI³ contengano PS. È altresì importante rilevare che, in termini areali, questa fra-

zione percentuale rappresenta quasi il 50% dell'area in frana all'interno del settore di studio. In altri termini le frane che contengono PS sono solitamente quelle più estese e conseguentemente quelle per le quali è maggiormente rilevante la possibilità di poter disporre di dati di monitoraggio.

Il terzo obiettivo della sperimentazione, avendo verificato la presenza di PS e la loro ricorrenza sui corpi di frana, è stato quello di testare l'utilizzo dei dati PS come integrazione all'analisi geomorfologia tradizionale. Nello specifico i risultati dell'analisi interferometrica sono stati utilizzati per la validazione ed aggiornamento della carta inventario dei fenomeni franosi, sia per una più accurata perimetrazione dei fenomeni, sia per una oggettiva determinazione dello stato di attività, sia, infine, per la mappatura di nuove aree in frana.

Figura 2 - Stralcio cartografico fuori scala relativo all'area di Boasi, con i PS individuati cromaticamente suddivisi per classi di velocità di spostamento medio annuo come riportate in legenda. Sono riportati i perimetri delle frane desunte dal Progetto IFFI suddivise per stato d'attività come indicato in legenda



Conferma o revisione dello stato di attività e perimetrazione

Attraverso i dati interferometrici si è ottenuta una conferma dello stato di attività di alcuni corpi franosi. Ad esempio in fig. 2 si può osservare la distribuzione dei PS all'interno del corpo franoso su cui insiste l'abitato di Boasi, Comune di Lumarzo (GE), inquadrato nel censimento IFFI come fenomeno di tipo complesso attivo; sono stati individuati 12 PS i cui valori di velocità media annua variano da meno di 1 mm/anno fino a circa 9 mm/anno. La distribuzione delle velocità di spostamento rilevate appare,



Figura 3 - Panoramica di Boasi



Figura 5 - Panoramica zona Loc. Sella di Bavari, da notare sulla parte sinistra dell'immagine il corpo di accumulo relitto



Figura 4 - Esempio di lesioni su un'abitazione in loc. Boasi

inoltre, ben relazionata con l'assetto morfologico del corpo franoso: infatti i bersagli radar caratterizzati dalle velocità più basse, inferiori ad 1 mm/anno, sono situati nelle porzioni sommitali della nicchia in roccia, di fatto stabili. Lungo i fianchi e sulla parte "alta" dell'accumulo si rilevano velocità maggiori, in ogni caso inferiori ai 3 mm/anno, mentre le velocità più elevate sono localizzate nella parte centrale del corpo di frana con valori tra i 4 ed i 9 mm/anno.

Un altro caso in cui si è ottenuta una sostanziale conferma dei dati presenti nel catasto dissesti è quello relativo al corpo franoso ubicato nell'entroterra di Genova, nel bacino del T. Sturla, presso la località Sella di Bavari. Si tratta di una frana di tipo complesso, in stato di quiescenza, sviluppata in corrispondenza del contatto tra le Formazioni delle Argilliti di Montoggio e dei Flysch calcareo-marnosi del Monte Antola. All'interno del perimetro del corpo franoso sono presenti oltre 40 bersagli radar, vedi fig. 6, le cui velocità medie annue risultano in grande maggioranza compatibili con lo stato di quiescenza della frana.

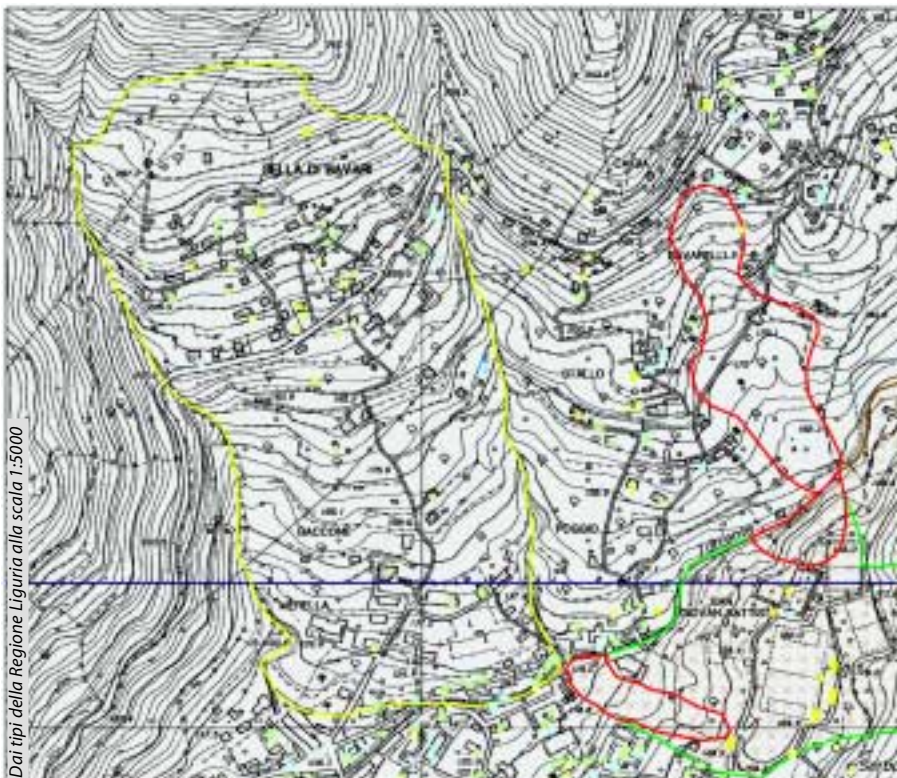


Figura 6 - Stralcio cartografico fuori scala relativo all'area di Sella di Bavari

Revisione dello stato di attività e perimetrazione corpo di frana

Nel caso del corpo franoso in loc. Vivagna - Pian del Mulino, nel Comune di S. Olcese (GE), l'inventario dei fenomeni franosi indica un colamento attivo mentre i valori di spostamento dei bersagli radar sembrerebbero indicare una possibile evoluzione attiva del fenomeno ristretto unicamente alla porzione di testata (vedi fig. 7); la porzione medio bassa dell'accumulo presenta valori di spostamento dei PS assolutamente irrilevanti che suggeriscono un possibile inquadramento di questo settore di frana come inattivo.

Un altro caso inquadrabile in questo sottoparagrafo, ma di segno opposto, è quello riscontrato per la frana di Ternano (fig. 8), in Comune di Valbrevenna: qui si è verificato come un accumulo di frana, noto da fonti di archivio ma privo di evidenti segni di movimento, registri in realtà la presenza di numerosi bersagli radar con tassi di spostamento medio annuo di oltre 5 mm. In questa zona le abitazioni sono tutte di recente edificazione in cemento armato e la verifica di

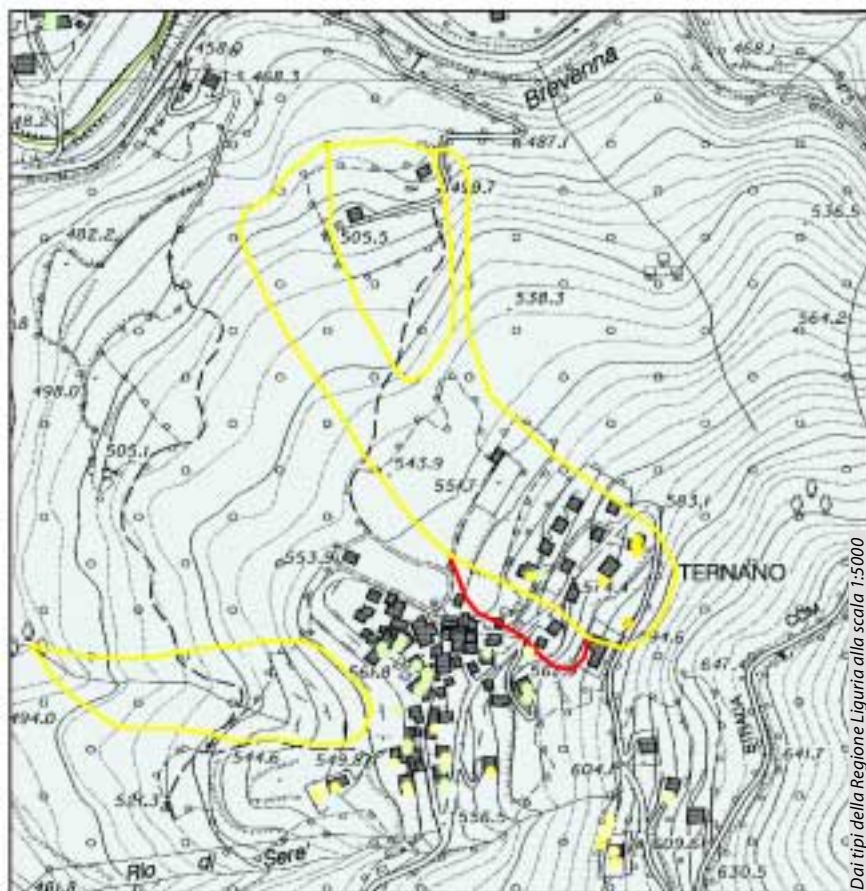


Figura 7 - Stralcio cartografico fuori scala relativo all'area di Vivagna - Pian del Mulino

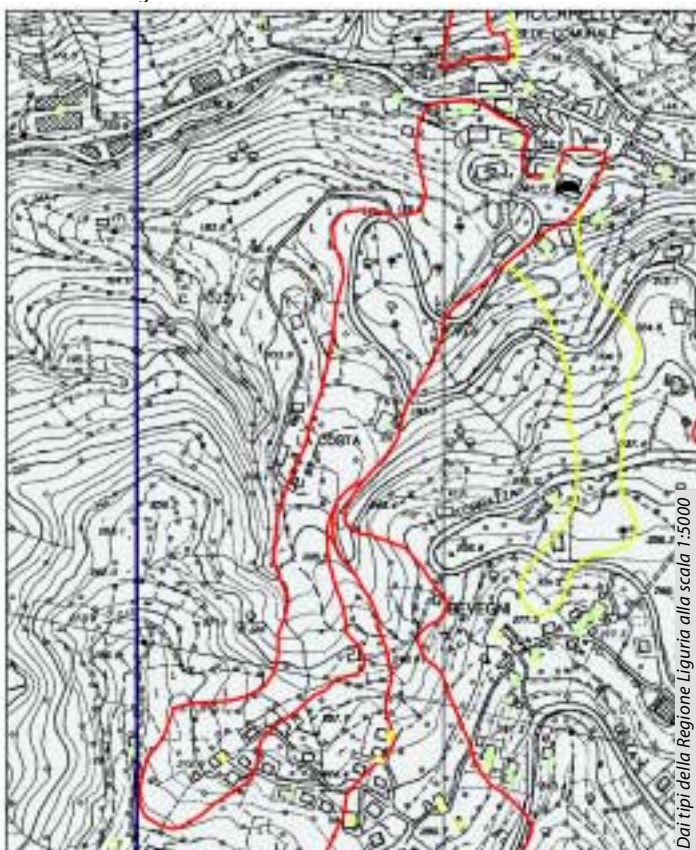


Figura 8 - Stralcio cartografico fuori scala relativo all'area di Ternano

campagna, condotta al fine di correlare con precisione i manufatti ai rispettivi PS, ha consentito di osservare come le abitazioni fossero nel complesso prive di lesioni, anche modeste, mentre si sono osservate fratture e dissesti in molti manufatti pertinenziali (muretti di contenimento di terrapieni, piazzali impermeabilizzati, ecc.) solitamente costruiti in maniera approssimativa. Le indicazioni di movimento fornite dall'indagine radar satellitare, unitamente ad alcune considerazioni desunte dalle indagini di campagna, quali, ad esempio, l'assetto geologico-strutturale del basamento, a franapoggio inclinato come il pendio, e la presenza di una stretta porzione sul fianco meridionale dell'accumulo che manifesta evidenti segni di instabilità in atto, ha suggerito di rivedere la perimetrazione e la classificazione dello stato di attività della frana individuandone una porzione attiva. Per gran parte del corpo si è invece optato di confermare lo stato di quiescenza stante, per il caso specifico, una eccessiva incertezza nell'ascrivere le misure di spostamento ottenute con l'analisi dei dati SAR all'effettivo movimento dell'accumulo piuttosto che a cedimenti locali dei manufatti. Per tale situazione attraverso ulteriori monitoraggi a mezzo di tecniche topografiche tradizionali sarà possibile sciogliere i dubbi e determinare se la frana sia da considerarsi effettivamente attiva oppure se non sia addirittura il caso di declassificarla a stabilizzata onde consentire nuovi interventi di carattere urbanistico, attualmente condizionati per quanto imposto dai regimi normativi dei Piani di Bacino Stralcio.

Possibile presenza di un areale soggetto ad instabilità di versante

Nella fig. 9 viene mostrata una nuvola di bersagli radar caratterizzata da velocità di spostamento medio annuo significative, variabili tra 9 mm/anno e 17 mm/anno, ben concentrate e distribuite in un'area a pendenza limitata sita in testa del Rio dei Campi, in Comune di Campomorone; tale zona, geologicamente ubicata in corrispondenza della linea Sestri-Voltaggio, si colloca in un'ampia conca di dubbia genesi, caratterizzata dalla presenza di importanti coperture detritiche, interessate da numerose sorgenti e zone di ristagno idrico, e dall'affioramento di imponenti massi basaltici isolati e disarticolati. I dati d'archivio disponibili fino ad oggi non evidenziavano la presenza di particolari dissesti connessi a movimenti di massa del versante e, pertanto, in questo caso i dati derivanti dall'indagine interferometrica dovranno essere integrati da una puntuale verifica di campagna di carattere geomorfologico, opportunamente corredata da un censimento del quadro lesivo dei manufatti. In tal modo si potrà verificare se i movimenti registrati debbano essere ricondotti alla deformazione complessiva del versante su cui insiste il nucleo abitato piuttosto che a cedimenti strutturali diffusi correlabili all'inadeguatezza delle strutture in rapporto alle scadenti caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione.

In un altro caso, in Comune di Casella, in una zona del capoluogo comunale oggetto di recente urbanizzazione, è stata osservata la presenza di un addensamento di bersagli radar caratterizzati da velocità medie attorno ai 3 mm/anno (fig. 10). Tale area, escludendo alcuni localizzati fenomeni di instabilità, non manifesta l'evidenza di particolari problematiche né cedimenti dei manufatti. Dal punto di vista della geologia, ci si trova in corrispondenza di una importante falda detritica di smantellamento delle balze calcareo-marnose, affioranti a settentrione, che ricopre il contatto con le sottostanti argilliti. Nell'ambito dell'aggiornamento dello strumento urbanistico comunale, svolto con il supporto degli uffici regionali, tale

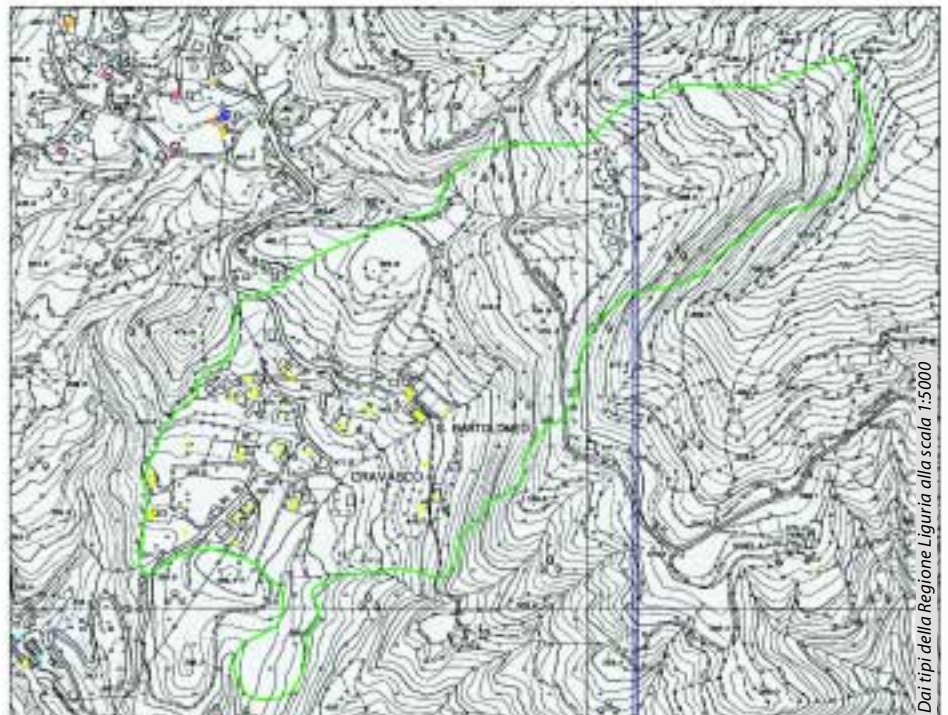
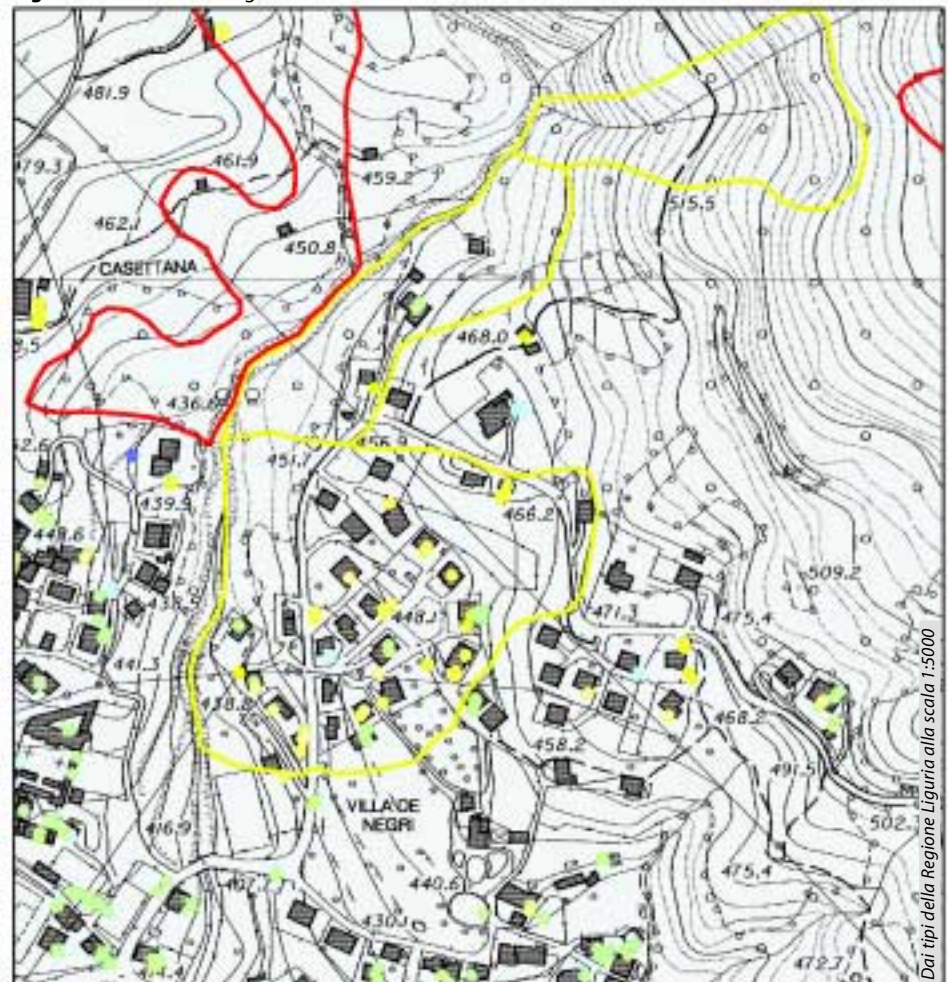


Figura 9 - Stralci cartografico fuori scala relativo all'area di Cravasco

Figura 10 - Stralci cartografico fuori scala relativo all'area di Casella



area è stata cautelativamente inquadrata come frana quiescente, in ragione, anche, dei bassi tassi di spostamento rilevati.

Conclusioni

La sperimentazione svolta su parte del territorio regionale ha consentito di verificare la rispondenza della tecnica alle attese; in particolare si è verificato come dal 30 al 50% delle aree in frana contengano bersagli radar e, pertanto, come in molti di questi casi sia possibile conseguire indicazioni quantitative sui tassi di spostamento su un periodo temporale di quasi 10 anni; tale tecnica può, quindi, essere efficacemente utilizzata nell'ambito di diversi aspetti concernenti l'analisi della pericolosità spaziale da frana, in particolare per quanto riguarda:

- la conferma o la revisione dello stato di attività di un buon numero di frane su cui insistono bersagli radar, coincidenti per lo più con manufatti, e quindi elementi a rischio;
- la conferma o la revisione della perimetrazione di corpi franosi attivi sulla base della distribuzione dei PS con valori di spostamento associati diversi da zero all'interno e nell'intorno degli areali delineati in precedenza esclusivamente su base geomorfologica;

- l'individuazione ex novo di possibili aree soggette ad instabilità per presenza concentrata di PS che registrano spostamenti significativi;

- analisi diverse su PS isolati che registrano spostamenti.

Le prime verifiche puntuali svolte attraverso sopralluoghi di campagna finalizzati all'individuazione ed al censimento dei riflettori radar hanno consentito di elaborare le seguenti considerazioni:

- in buona parte dei casi analizzati i bersagli radar associati a valori di spostamento non nulli corrispondono a manufatti che evidenziano lesioni o deformazioni o, nel caso di strutture di nuova realizzazione o recentemente ristrutturata prive di sintomi di cedimenti, si è osservato come esse fossero ubicate in areali con problematiche geologiche manifeste;

- occorre sempre avere presente che le rilevazioni di spostamento ottenute con tecnica PS si riferiscono al bersaglio, pertanto, tali valori possono essere determinati sia da assestamenti/cedimenti strutturali dello stesso sia dalla reazione della struttura al movimento del terreno; ciò implica che un PS con velocità di spostamento non nulle, corrispondente ad un manufatto posizionato su un versante, non necessariamente debba esse-

re ritenuto indizio della presenza di una frana attiva. D'altra parte è evidente che, quando su un areale ristretto si individuano un buon numero di PS caratterizzati da valori di spostamento confrontabili e non nulli, difficilmente si potranno trovare giustificazioni diverse dalla presenza di un cinematismo in atto che coinvolga l'intero versante;

- a parità di velocità di spostamento, le reazioni registrate sulle costruzioni in pietra e prive di fondazioni sono molto più marcate rispetto a quelle evidenziate da edifici in c.a. di costruzione più recente; nel caso di questi ultimi si è addirittura osservato l'assenza di cedimenti in presenza velocità di spostamento medio-basse (3-5 mm/anno);

- oltre alle caratteristiche strutturali dei manufatti, anche la loro geometria riveste un ruolo non secondario nel determinare la presenza e la significatività delle lesioni: a parità di velocità di spostamento registrato e di caratteristiche strutturali dei manufatti, il quadro fessurativo, infatti, tende ad aggravarsi all'aumentare dell'asimmetria delle costruzioni. Strutture molto allungate o molto alte tendono a lesionarsi in maniera molto più consistente;

- la cinematica della frana sembrerebbe molto importante nella comprensione

Tele-Rilevamento Europa

Le tecniche avanzate di monitoraggio del territorio con Radar ad Apertura Sintetica (SAR) hanno subito, nell'ultimo decennio, una continua evoluzione, grazie in particolare al Gruppo Radar del Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano il cui lavoro è culminato nella realizzazione dell'algoritmo denominato Tecnica PS (PSInSAR(tm)).

A seguito dei numerosi riconoscimenti della comunità scientifica internazionale e dei risultati ottenuti, nel giugno 1999 la Tecnica PS è stata brevettata dal Politecnico di Milano e dai suoi inventori (Prof. Rocca, Prof. Prati e Ing. Ferretti): IT: No. MI99A001154, May 25, 1999

Il brevetto è stato poi approvato anche negli Stati Uniti (US Patent: No. 6,583,751 B1, Jun. 24, 2003) e presso la Comunità Europea (EU Patent: No. 1183551, Dec. 17, 2003).

Sulla base di questo patrimonio e vista la necessità di trasferire le conoscenze acquisite e la tecnologia sviluppata al mercato, nel marzo 2000 è stata fondata Tele-Rilevamento Europa, prima società di spin-off del Politecnico di Milano, a cui è stato concesso in esclusiva l'utilizzo del brevetto della Tecnica PS.

Ad oggi, sono numerose le collaborazioni in essere con soggetti

privati (compagnie del settore energia), gruppi di ricerca (università e agenzie spaziali) ed enti istituzionali, quali Protezione Civile, Regioni e Autorità di Bacino, sia in ambito italiano che internazionale.

Servizio Politiche dell'Assetto del Territorio - Regione Liguria

Nell'ambito delle attività istituzionali di competenza regionale il Servizio Politiche dell'Assetto del Territorio si occupa delle azioni di pianificazione territoriale in relazione a quanto previsto dalle Leggi 183/89 e 267/99 in materia di pianificazione di bacino e programmazione delle risorse per gli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico. In particolare gli Autori forniscono il supporto tecnico per le attività di carattere geologico del Servizio ed in particolare sono i referenti relativamente agli aspetti legati alle attività estrattive ed alla tutela delle aree carsiche. Fanno, inoltre, parte della Sezione Geologica del Servizio che si occupa della realizzazione della cartografia geologica nazionale alla scala 1:50.000 (Progetto CARG) per il territorio regionale e che ha direttamente realizzato l'inventario dei fenomeni franosi regionali nell'ambito del Progetto I.F.F.I., a seguito di convenzione con APAT. La Sezione Geologica segue, inoltre, le attività di tele-rilevamento nell'ambito di quanto previsto all'art. 27 della Legge 179/2002, fra le quali l'interferometria satellitare con tecnica PS.

delle reazioni dei manufatti allo spostamento: a parità di velocità media annua e di caratteristiche dei manufatti, il quadro lesivo sui manufatti può essere variabile a seconda della tipologia della frana e, addirittura, in rapporto dell'ubicazione del manufatto-bersaglio rispetto al corpo in movimento (testata, corpo d'accumulo, piede);

- la traduzione automatica delle velocità medie annue rilevate con tecnica PS alle velocità di movimento dei fenomeni franosi è da evitare assolutamente. Ogni PS o gruppo di PS va valutato a sé e direttamente sul terreno; solo a seguito di tale analisi si potrà tentare un parallelo fra v_{LOS} e v_{FRANA} .

In conclusione, quindi, sulla base degli esiti preliminari della sperimentazione condotta sul territorio ligure di questa tecnica di analisi interferometrica di immagini radar satellitari con riflettori permanenti, si è potuto constatare come essa possa costituire un utilissimo strumento di supporto alla pianificazione territoriale, fornendo in tempi rapidi un'enorme mole di misure di spostamento oggettive a ritroso nel tempo per oltre 10 anni. La continua acquisizione di tali dati può far sì che essi possano tradursi anche in un utile strumento complementare per il monitoraggio dell'efficacia degli interventi di difesa del suolo post-opera ed a supporto dell'elaborazione dei programmi di interventi, fornendo utili indicazioni per l'individuazione delle priorità maggiormente significative.

Infine, a margine di tali considerazioni si evidenzia come i dati ottenuti tramite l'analisi PSInSAR "Standard" possano essere utilmente sfruttati anche per altre applicazioni, diverse dalla difesa del suolo; in particolare, possono essere mappati e monitorati eventuali fenomeni di subsidenza nelle piane alluvionali ed è altresì possibile individuare cedimenti strutturali di edifici, manufatti o infrastrutture (moli, dighe, riempimenti, viadotti, condotte forzate, ecc.) sia nell'entroterra che a mare: tale tecnica di monitoraggio del territorio rappresenta, pertanto, un utile e innovativo strumento di controllo dell'ambiente antropizzato che potrà garantire un efficace supporto alle attività istituzionali di pianificazione e programmazione.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare innanzitutto la Dott.ssa Giovanna Gorziglia e la Dott.ssa Valentina Ratto, del Servizio Politiche dell'Assetto del Territorio della Regione Liguria, per la collaborazione nell'analisi e nella gestione dei dati sia PSInSAR che relativi al Progetto IFFI. Un ringraziamento anche all'Ing Jacopo Allievi di T.R.E. per la collaborazione nella fornitura e interpretazione dei dati PSInSAR ed, infine, allo staff di Quarry & Construction per la pazienza dimostrata nei nostri confronti. ■

1 Per ulteriori indicazioni consultare l'indirizzo internet presso il sito dell'APAT (<http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/>).

2 Nell'analisi vengono considerate le tipologie di frana definite dalla classificazione internazionale Cruden & Varnes (1996).

3 La relazione tecnica "Progetto IFFI - Primi Risultati in Liguria" è consultabile e scaricabile sul sito della Regione Liguria (www.regione.liguria.it)