

**SAR interferometrico terrestre
per il monitoraggio di versanti instabili:
analisi di limiti e potenzialità
con riferimento a casi di studio
nell'Appennino Emiliano (Italia)**

Tesi di dottorato di:
Eleonora Bertacchini

Tutor:
Chiar.mo prof. ing. Alessandro Capra

Co-tutor:
Prof. Geol. Alessandro Corsini

Coordinatore del Dottorato:
Prof. Ing. Angelo Oreste Andrisano

Direttore della Scuola di Dottorato:
Prof. Antonio Strozzi

Scuola di D.R. in HIGH MECHANICS AND AUTOMOTIVE DESIGN & TECHNOLOGY /
MECCANICA AVANZATA E TECNICA DEL VEICOLO

Corso di dottorato METODI DI SIMULAZIONE E PROGETTAZIONE MECCANICA

XXIII ciclo

A.A. 2009-2010

Alla mia famiglia,
a chi c'è e a chi presto arriverà

La teoria è quando si sa tutto, ma non
funziona niente; la pratica è quando
funziona tutto, ma non si sa perché.

Mai coniugare teoria e pratica, non
funzionerebbe niente senza sapere perché.

(A. Einstein)

Riassunto

Questo lavoro di tesi riguarda lo studio di versanti instabili attraverso la tecnica GB-InSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar). L'obiettivo principale del lavoro è l'approfondimento di questa tecnica di remote sensing per l'analisi di fenomeni di instabilità in condizioni operative diversificate e per casi di studio differenti. I versanti in frana studiati con la tecnica GB-InSAR sono interessati da fenomeni che hanno subito riattivazioni parziali o complete nei recenti anni ed in riferimento alle quali, durante la fase di attenzione seguita agli eventi idro-meteorologici delle stagioni autunno invernali 2009-2010 e 2010-2011, si nutriva una preoccupazione circa una ripresa di movimenti diffusi. Lo studio si inquadra all'interno di una sperimentazione condotta tra l'università di Modena e Reggio Emilia, l'università di Bologna e la Regione Emilia Romagna (Agenzia di Protezione Civile, Servizio Geologico, Servizi Tecnici di Bacino), per valutare l'applicabilità, i limiti e le potenzialità del metodo GB-InSAR, quale strumento di supporto alle fasi di attenzione e sorveglianza che scattano a seguito di periodi di piovosità cumulata accentuata.

Grazie a collaborazioni e convenzioni in essere tra Università di Modena e Reggio Emilia (Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e Civile - DIMeC- e di Scienze della Terra -DST-) e Servizio Tecnico di Bacino degli Affluenti del Fiume Po (sezione di Reggio Emilia e Sezione di Modena) per la predisposizione, lo studio e l'analisi di sistemi di monitoraggio topografico di versanti instabili (Frana di Collagna e Frana di Valoria, Appennino Settentrionale, Italia) è stato possibile integrare GB-InSAR e stazione totale per un confronto quantitativo dei risultati. Le distanze operative di misura, che si spingono fino a oltre il chilometro, hanno richiesto un'approfondita analisi delle osservazioni e una dettagliata valutazione della precisione e dell'accuratezza delle tecniche. Anche per sistemi più consolidati come la stazione totale, è doveroso soffermarsi su precisione e accuratezza raggiungibili per osservazioni di distanza dell'ordine di grandezza del chilometro (e oltre), applicando le opportune correzioni atmosferiche alle osservazioni dell'elettrodistanziometro (EDM), se necessario. Solo le stazioni totali di ultima generazione, infatti, sono in grado di misurare a queste distanze e da precisione e accuratezza dipende la capacità di discriminare movimenti da errori di misura: tanto più i movimenti sono lenti, tanto più precise e accurate devono essere misurazioni e risultati.

Il sistema GB-InSAR ben si presta al monitoraggio di elementi come dighe, miniere, cave, ecc. Le applicazioni per il monitoraggio di versanti instabili si stanno evolvendo grazie alle potenzialità di questa tecnica: determinazione di spostamenti con precisione millimetrica o sub-millimetrica, capacità di osservazione su distanze fino a 4 km, campo di osservazione spazialmente continuo, applicabilità come sistema di allerta con capacità di operare in near real time, sono solo alcuni esempi di queste potenzialità. L'ambiente di osservazione in cui il sistema opera, però, ne è un limite: le condizioni operative che si presentano nel monitoraggio dei versanti instabili non rendono la tecnica GB-InSAR utilizzabile su vasta scala. I principali fattori che la condizionano negativamente sono legati all'interazione del segnale con l'atmosfera, alla decorrelazione spaziale legata alla copertura del suolo, alla distribuzione relativa di aree "stabili" e "in movimento" all'interno della scena, al segnale di risposta in termini di SNR (Signal to Noise Ratio) ed alla coerenza spazio-temporale. L'analisi dell'influenza di questi fattori sui risultati delle elaborazioni non è immediata, perché sono spesso tra loro concatenati; l'esame è ulteriormente complicato dal fatto che i dati di spostamento sono riferiti alla la linea di vista del sensore (LoS - Line of Sight) e se la scena non è posta frontalmente al sensore stesso, si perdono componenti di spostamento.

Questa tecnica si adatta a monitoraggi di tipo continuo (singola campagna di acquisizione) di lungo periodo, anche per applicazioni near real time, come sistema di allerta. Nonostante il peso e l'ingombro della strumentazione, in poche ore il sistema può essere reso operativo e funzionante, con controllo da remoto e possibilità di trasferimento dei dati su un pc locale. Tra i problemi logistici più considerevoli si trovano il trasporto della strumentazione e l'approvvigionamento di energia elettrica: lo strumento può essere installato solo in postazioni facilmente raggiungibili da mezzi di trasporto e qualora non sia disponibile alimentazione di rete è necessario munirsi di un generatore di corrente elettrica. Esistono anche apparati di alimentazione a pannelli solari, ma in questo caso la logistica si complica ulteriormente.

Grazie all'accuratezza raggiungibile (nominalmente millimetrica e sub-millimetrica) dalla tecnica GB-InSAR è possibile determinare spostamenti anche di frane lente o molto lente, facendo però particolare attenzione alla fase di pre-analisi delle immagini e non trascurando le fasi di elaborazione successive per ottimizzare la precisione e l'accuratezza del metodo. I risultati delle elaborazioni presentano una certa variabilità in funzione della definizione del set di calibrazione, della strategia di selezione dei dati e dei parametri di elaborazione, pertanto richiedono di essere debitamente interpretati.

L'utilizzo della tecnica GB-InSAR per lo studio dei versanti instabili non è ancora del tutto consolidato e dal momento che l'influenza delle variabili in gioco la rende sensibile alle operazioni di trattamento delle osservazioni è stata approfondita l'applicazione integrata con altri sistemi topografici, come stazione totale, per il confronto quantitativo degli spostamenti, e laser scanner (ALS – Airborne Laser Scanner e TLS – Terrestrial Laser Scanner) da cui ricavare DTM/DSM ad alta risoluzione (Digital Terrain Model/Digital Surface Model) per la georeferenziazione e per la generazione di mappe di spostamento 2D (2Dimensional) e 3D (3Dimensional).

Nel confrontare GB-InSAR e stazione totale, è emerso che ben si integrano e che i risultati di spostamento sono quantitativamente consistenti, anche se una questione chiave del confronto puntuale degli spostamenti rimane la georeferenziazione/registrazione dei dati in uno stesso sistema di riferimento. Tra gli sviluppi futuri si considerano interessanti approfondimenti in merito alle tematiche di georeferenziazione (con e senza corner reflector) e generazione di mappe 2D e 3D di spostamento per morfologie complesse, abitati e versanti rocciosi. Inoltre, ci si propone di studiare meglio il problema del riaggancio di serie temporali discontinue di acquisizioni, che è ancora in fase di test: lavorando in banda Ku, con spostamenti superiori a circa 4.4 mm si introduce una decorrelazione temporale non risolvibile. Un'altra tematica che merita ulteriore attenzione è l'analisi di stabilità della postazione di misura nel tempo, di cruciale importanza per qualsiasi tipo di sistema di monitoraggio, ma specialmente per le applicazioni di lungo periodo.

Abstract

Ground Based SAR for unstable slopes monitoring: limits and potentials for case studies in the Northern Apennines (Italy)

This Phd thesis work concerns the study of unstable slope through the GB-InSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique. The main objective of this work is the study of this remote sensing technique for the analysis of instability of slopes in the diverse operating conditions and for different case studies.

The unstable slopes studied with the GB-InSAR technique are affected by phenomena that have undergone partial or complete reactivation in recent years, during autumn-winter seasons 2009-2010 and 2010-2011. For these landslides there was a concern about a reactivation of sparse movements.

The use of this technique is framed within a study conducted between the University of Modena and Reggio Emilia, the University of Bologna and the Emilia Romagna Region (Civil Protection Agency, Geological Survey office, Servizio Tecnico di Bacino) for the evaluation of the applicability, the limits and the potentials of the GB-InSAR method, as a support to the phases of attention after periods with high rate of cumulated rainfall.

Through partnerships and agreements between the University of Modena and Reggio Emilia (Departments of Mechanical and Civil Engineering - DIMeC- and Earth Sciences -DST-) and the Servizio Tecnico di Bacino del Fiume Po (Reggio Emilia and Modena offices) for the project, the study and the analysis of topographic monitoring systems of unstable slopes (Collagna and Valoria Landslides, Northern Apennines, Italy) the integration of GB-InSAR and total station was performed, in order to compare results in a quantitative way. The distances of observation (up to 1 km) required a thorough analysis of the observations and a detailed assessment of the precision and accuracy of both techniques. Even for more established systems such as Total Station, we focused on precision and accuracy achievable with measurements of distance, analyzing the application of atmospheric corrections to the elettrodistancemeter (EDM) observations. Only total stations of last generation, in fact, are able to measure distances in the order of magnitude of one kilometre or more, and precision and accuracy of

results depend on the ability to discriminate movements by measurement error: the more the movements are slow, the more precise and accurate measurements and the results would be.

The GB-InSAR technique is well suited for the monitoring of elements such as dams, mines, quarries, etc... The applications to unstable slopes are evolving thanks to the potentialities of this technique: determination of displacements with a precision in the order of magnitude of the millimetre or more, operating range distance up to 4 km, spatially continuous field of view and applicability as alert system with near real time elaboration capabilities, are just some examples of these potentialities. The environment of observation in which the system operates, however, is a limit: the operating conditions that occur in the monitoring of unstable slopes do not make the GB-InSAR technique applicable on a large scale. Main factors that negatively affect GB-InSAR concern the interaction of the signal with the atmosphere, the spatial decorrelation due to land cover, the relative distribution of "stable" and "moving" areas within the scene, the SNR (Signal to Noise Ratio) of the signal and the spatio-temporal coherence. The analysis of the influence of these factors on results is not immediate, because they are often chained together; the question is further complicated by the fact that displacements refer to the sensor line of sight (LoS-Line of Sight) (displacement is negative if the point moves towards the sensor while is positive if the point moves away from the sensor) and if the scene is not located on the front of the instrument there is a loss of displacement components.

This technique is well suited for long-term continuous monitoring (single campaign), but also as warning system in near-real time applications. Despite the weight and bulk of the equipment, in a few hours the system can be installed and made running, with remote control and data transfer to a local PC. Among the most noteworthy logistical problems there are the transport and the power supply: the instrument can be installed only in locations with an easy access for the transport and if there is no electric power, it is necessary to have a generator of electricity. Solar power supply devices exists, but in this case the logistic is further complicated.

Thanks to the achievable accuracy (nominally millimetre and sub-millimetre) from the GB-InSAR technique is also possible to determine displacements of slow or very slow landslides, paying particular attention to the pre-analysis of the images and not neglecting the subsequent processing to optimize the precision and the accuracy of the method.

The use of the GB-InSAR technique is not yet fully consolidated for the study of unstable slopes and since the influence of the variables involved makes it sensitive to the processing operations of the observations it is interesting to deepen the application with the integration with other topographic systems: the total station for the comparison of displacements and the laser scanning ((ALS – Airborne Laser Scanner e TLS – Terrestrial Laser Scanner) in order to obtain DTM/DSM (Digital Terrain Model/Digital Surface Model) for the georeferencing/coregistration of information and for the reprojection of displacement maps on 2D and 3D supports. The use of high resolution digital terrain/surface models can facilitate and improve the interpretation of results due to their accurate spatial localization.

In the future it will be interesting to experiment the use of corner reflectors, to explore the use of GB-InSAR technique with the aid of artificial targets that can overcome deficits of natural targets. In addition, among the future developments, it is proposed to optimize the reprojection and the georeferencing of displacement maps, because fundamental to the integration between different monitoring techniques.

Comparing GB-InSAR and total station was found that they integrate well and that results of displacement are quantitatively significant, although a key issue for a detailed comparison remains the georeferencing in the same reference system. It is not common, in fact, to link together different reference frames, especially when it is necessary to switch from local scale to larger areas.

The applications for the hook of the time series of discontinuous acquisitions are still being tested: working at the Ku band, displacements greater than about 4 mm introduce a temporal decorrelation that is not resolvable. Periodic monitoring is therefore suitable for the study of very slow phenomena.

All the problems related to the repositioning of the instrument and to the study of stability of the location, relatively to the slope, have not to be neglected. The analysis of stability of the monitoring stations or of reference points external to the landslide body is of crucial importance for any type of monitoring system, especially for long-term applications: if the monitoring location suffers of some kind of movement it is possible to run into erroneous interpretations of the monitored phenomenon.

Indice

Riassunto	i
Abstract	iv
Indice	vii
1 Capitolo 1. Introduzione e obiettivi	1
2 Capitolo 2. METODI: Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)	3
2.1 Principi del GB-InSAR	3
2.1.1 Imaging Radar	4
Risoluzione in Range	5
Risoluzione cross-range	8
2.1.2 Interferometria radar	9
L'interferogramma	11
La coerenza	12
2.2 Il sistema di acquisizione GB-SAR	13
2.2.1 Il modulo sensore	14
2.2.2 Scanner lineare	15
2.2.3 Control unit e power supply	15
2.2.4 Corner reflector	15
2.2.5 Accuratezza e precisione	16
2.2.6 Installazione e acquisizione	16
2.3 Elaborazione dei dati	17
2.3.1 Dati da singola campagna	18
2.3.2 Dati da campagne successive	19
Riaggancio tramite "Repeat Pass Tool"	19
Riaggancio tramite "Discontinuous Monitoring Tool"	20

2.4	Attività sperimentale di rilievo	21
3	Capitolo 3. RISULTATI: analisi dei limiti e delle potenzialità operative per lo studio di versanti instabili	27
3.1	Introduzione	27
3.2	Focalizzazione	28
3.3	Interazione del segnale con l'atmosfera	29
3.4	Phase unwrapping e errore di aliasing	32
3.5	Intensità, Rumore e Coerenza del Segnale radar	34
3.5.1	Coerenza spazio-temporale e analisi interferometrica	35
3.5.2	Ampiezza Media (MA), Dispersione di Ampiezza (DA) e coerenza spazio-temporale	40
3.6	Elaborazione dati: approccio Permanent Scatterers (PS) e selezione di Ground Control Point (GCP) per la determinazione dello spostamento	49
3.6.1	Risultati dell'elaborazione con approccio Permanent Scatterers	49
3.6.2	Risultati dell'elaborazione con selezione di Ground Control Point (GCP)	52
3.6.3	Confronto dei risultati tra approccio Permanent Scatterers e selezione di Ground Control Point	55
3.7	Selezione dati: frequenza temporale di selezione delle scene in una singola campagna di monitoraggio per la determinazione dello spostamento	58
3.7.1	Determinazione di movimenti lenti (cm/settimana)	58
	Differenti criteri di selezione dati	58
	Elaborazione di tutte le acquisizioni per monitoraggio real-time per l'allerta	61
3.7.2	Determinazione di movimenti molto lenti (cm/mese)	64
3.8	Dati da campagne successive	70
3.8.1	Riaggancio di serie temporali discontinue: "Discontinuous Monitoring Tool"	70
3.9	Georeferenziazione, mappe 2D e mappe 3D	72
4	Capitolo 4. RISULTATI: Validazione Quantitativa	81
4.1	Introduzione	81
4.2	Validazione in caso di movimenti molto lenti (cm/mese)	82
4.2.1	Il caso di studio	84
4.2.2	Il sistema di monitoraggio topografico	85
4.2.3	Determinazione dell'influenza dell'atmosfera sulle misure dell'elettrodistanziometro (EDM) della stazione totale	87
	Correzione della rifrazione atmosferica	88

Misure periodiche di rete: data set e metodi	89
Misure in continuo: applicazione delle correzioni atmosferiche alle osservazioni di distanza inclinata	94
4.2.4 Rilievi LiDAR terrestri e aviotrasportati e loro integrazione per la determinazione di DTM ad alta risoluzione	99
4.2.5 Sistema GB-InSAR, integrazione e confronto con il sistema topografico	102
4.3 Validazione in caso di movimenti moderati (cm/giorno)	108
4.3.1 Il caso di studio	108
4.3.2 Il sistema di monitoraggio topografico	110
4.3.3 Sistema GB-InSAR, integrazione e confronto con il sistema topografico	114
5 Capitolo 5. Discussioni e conclusioni	120
Bibliografia	126
<i>Allegato 1. Selezione dati per la determinazione di movimenti lenti (cm/settimana) in una singola campagna di monitoraggio: confronto tra serie temporali di spostamento</i>	<i>135</i>
<i>Allegato 2. Selezione dati per la determinazione di movimenti molto lenti (mm/mese) in una singola campagna di monitoraggio: confronto tra serie temporali di spostamento</i>	<i>139</i>
<i>Allegato 3. Serie temporali di distanza inclinata misurata e distanza inclinata corretta con correzioni atmosferiche</i>	<i>145</i>
<i>Allegato 4. Confronto quantitativo tra GB-InSAR e stazione totale per la determinazione di movimenti molto lenti (cm/mese)</i>	<i>149</i>
<i>Ringraziamenti</i>	<i>155</i>

Capitolo 1. Introduzione e obiettivi

Questo lavoro di tesi riguarda lo studio di versanti instabili attraverso la tecnica GB-InSAR (Ground Based Synthetic Interferometric Radar). L'obiettivo principale del lavoro è l'approfondimento di questa tecnica di remote sensing per l'analisi di fenomeni di instabilità di versanti in condizioni operative diversificate e per casi di studio differenti. Le applicazioni presentate si inquadrano all'interno di una sperimentazione condotta tra l'università di Modena e Reggio Emilia, l'Università di Bologna e la Regione Emilia Romagna (Agenzia di Protezione Civile, Servizio Geologico, Servizi Tecnici di Bacino), per valutare l'applicabilità del metodo GB-InSAR quale strumento di supporto alle fasi di attenzione e sorveglianza che scattano a seguito di periodi di piovosità cumulata accentuata. Grazie a collaborazioni e convenzioni in essere tra Università di Modena e Reggio Emilia (Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e Civile - DIMeC- e di Scienze della Terra -DST-) e Servizio Tecnico di Bacino degli Affluenti del Fiume Po (sezione di Reggio Emilia e Sezione di Modena) per la predisposizione, lo studio e l'analisi di sistemi di monitoraggio topografico di versanti instabili (Frana di Collagna e Frana di Valoria, Appennino Settentrionale, Italia) è stato possibile integrare la tecnica GB-InSAR con altre tecniche, come stazione totale, laser scanner aereo e terrestre. L'utilizzo congiunto di GB-InSAR e strumentazione topografica, come stazione totale automatizzata per il monitoraggio continuo, ha permesso di evidenziare limiti e potenzialità della tecnica GB-InSAR, oltre ad essere di supporto alla validazione quantitativa dei risultati. Le distanze di misura, che si estendono fino a oltre il chilometro, hanno richiesto un'approfondita analisi delle osservazioni e una dettagliata valutazione della precisione e dell'accuratezza delle diverse tecniche applicate. La capacità di discriminare spostamenti, infatti, è intimamente legata a questi due parametri, che in condizioni operative possono discostarsi anche sensibilmente dai loro valori nominali. La georeferenziazione/registrazione delle informazioni derivate dalle diverse tecniche è uno degli aspetti sicuramente più delicati dell'integrazione: la trasformazione tra sistemi di riferimento differenti come quello della stazione totale, dei sistemi ALS (Airborne Laser Scanner), GNSS (Global Navigation Satellite System), o del GB-InSAR, non è sempre semplice ed immediata e talvolta è fonte di deformazioni o di errori che fanno sì che permanga una certa indeterminazione nel posizionamento dei punti.

La tecnica GB-InSAR per il monitoraggio continuo con dati derivati da una singola campagna, è stata studiata utilizzando approcci differenti sia in termini di definizione del “set di calibrazione” sia in termini di elaborazione e selezione dei dati, senza mai prescindere da una pre-analisi approfondita delle immagini acquisite. Le condizioni operative limite che si presentano nell’ambito dello studio di versanti instabili sono dovute principalmente alla decorrelazione spazio-temporale, all’interazione dell’osservabile con l’atmosfera, all’umidità del terreno e alle distanze di osservazione superiori al chilometro. È stato condotto anche qualche test in termini di monitoraggio periodico, ma il problema è ancora aperto: gli aspetti da considerare per la buona riuscita delle campagne discontinue sono molti, ma la decorrelazione temporale è sicuramente quello più incisivo.

La versatilità dello strumento e la possibilità di attuare attività di monitoraggio continuo di spostamenti anche solo di millimetri da posizione remota e in modalità near real time senza la necessità di creare costose infrastrutture di monitoraggio sul versante oggetto di analisi, è il punto di forza del radar interferometrico terrestre dal punto di vista operativo. I limiti di tale strumentazione derivano principalmente dalla limitata entità degli spostamenti che possono essere rilevati senza ambiguità tra due acquisizioni successive (fino a circa 4 mm, per la banda Ku) e dalla decorrelazione che il segnale può subire in presenza di vegetazione. Questo vale per il monitoraggio continuo (singola campagna) e ancor più per il monitoraggio periodico (campagne successive). Il range di spostamento di circa 4 mm tra due acquisizioni successive è compatibile con il monitoraggio continuo, con massima frequenza di acquisizione delle immagini (5-10 minuti) di larga parte dei fenomeni franosi che caratterizzano l’Appennino Emiliano, costituiti prevalentemente da frane di scorrimento-colata che possono al massimo, nelle fasi di riattivazione, arrivare a velocità di qualche metro al giorno e che quindi rientrano nel range di velocità dello strumento. Si consideri che, in casi di movimento prolungato, le velocità scendono a millimetri o centimetri al mese e all’anno, quindi si possono valutare anche applicazioni di tipo discontinuo, anche se ancora in fase di test.

Lo studio della tecnica è stato approfondito grazie al supporto di IDS (Ingegneria dei Sistemi, Pisa, Italia) e anche grazie a Michele Crosetto, Oriol Monserrat e Guido Luzi dell’Institut de Geometica (Castelldefels, Barcellona, Spagna), presso il quale è stato condotto un periodo di tirocinio di tre mesi durante il 2011.

Capitolo 2. METODI: Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR)

2.1 Principi del GB-InSAR

Un sistema SAR terrestre (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR) è un sistema di acquisizione attivo che lavora con lunghezze d'onda della banda spettrale delle microonde. Essendo un sistema attivo, emette un segnale e ne misura la parte riflessa. Questo consente di acquisire sia durante il giorno, che durante la notte. Recentemente, la tecnica SAR, già utilizzata su piattaforme satellitari, è stata implementata anche su piattaforma terrestre (Antonello et al., 2004; Bozzano et al., 2011; Catani et al., 2005; Casagli et al., 2009; Casagli et al., 2010; Castaneda et al., 2009; Delacourt et al., 2009; Herrera et al., 2009; Luzi et al., 2006; Luzi et al., 2007; Luzi et al., 2010; Martinez-Vazquez et al., 2005; Moss et al., 1999; Nico et al., 2004; Pieraccini et al., 2002; Pipia et al., 2007; Sansosti et al., 2010; Strozzi et al., 2005; Tarchi et al., 1999; Tarchi et al., 2009). Questo consente di illuminare l'area di interesse da un punto di vista privilegiato, per esempio frontale al versante, rispetto alle acquisizioni da piattaforma satellitare; inoltre ha la possibilità di acquisire immagini con intervalli di campionamento frequenti (5-10 minuti). Proprio per questo, la tecnica ben si presta al monitoraggio di dighe, fenomeni di instabilità di versanti, deformazioni di ghiacciai, fenomeni vulcanici, ecc. fornendo immagini bidimensionali dell'oggetto monitorato, con potenzialità di utilizzo per distanze fino a 4 km (Jungner, 2009).

La tecnica GB-InSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) si basa fondamentalmente su tre diverse tecniche:

- Stepped Frequency Continuous Wave (SF-CW) che permette di risolvere la risoluzione in range attraverso la modulazione della frequenza;
- Synthetic Aperture Radar (SAR), che permette di risolvere la risoluzione cross-range;
- interferometria, che sfrutta la coerenza di fase degli echi di ritorno.

Le tecniche SF-CW e SAR insieme, consentono di creare immagini radar bidimensionali, mentre attraverso l'interferometria è possibile determinare i valori di spostamento.

2.1.1 Imaging Radar

Radar (Range Detection And Ranging) è un termine che si riferisce sia alla tecnica, che allo strumento. Un radar funziona tramite un'antenna che emette piccoli impulsi di energia elettromagnetica, che si propagano alla velocità della luce e che vengono riflessi dalla superficie che incontrano sul loro percorso creando eco di ritorno raccolte da un'antenna ricevente.

Misurando il tempo T_0 che il segnale impiega a percorrere il tratto di andata e ritorno è possibile determinare il range R , attraverso l'equazione (Figura 2.1):

$$T_0 = \frac{2R}{c} \quad [2.1]$$

dove: c = velocità della luce.

Questa capacità di determinare la distanza misurando il tempo di andata e ritorno del segnale è caratteristico di molte tipologie convenzionali di radar (Skolnik, 1990).

Una classe speciale di radar, sono gli "imaging radar", in grado non solo di determinare le distanze ma di creare immagini bidimensionali. Per permettere questo, la risoluzione viene risolta sia in range che in cross-range. Un requisito importante per sfruttare l'immagine 2D (2Dimensional) è che il radar sia coerente, che significa che deve essere coerente sia in fase, che in ampiezza e che entrambi questi valori, fase e ampiezza, siano memorizzati per il processamento dell'immagine.

Gli impulsi elettromagnetici trasmessi sono di forma conica (Figura 2.2), con una base ellittica che illumina una certa area (angolare), creando immagini con geometria polare (Figura 2.3 e Figura 2.4). Per facilitare l'analisi delle immagini polari, esse vengono trasformate in immagini inquadrare in un sistema di riferimento cartesiano ortogonale (x,y) e ad ogni pixel vengono assegnate coordinate immagine (i,j). Immagini radar 2D vengono allora georeferenziate e riproiettate su supporti 3D (3Dimensional) derivati da DTM/DSM (Digital Terrain Model/Digital Surface Model) per facilitarne l'interpretazione.



Figura 2.1: Schema esemplificativo del principio di funzionamento del radar.

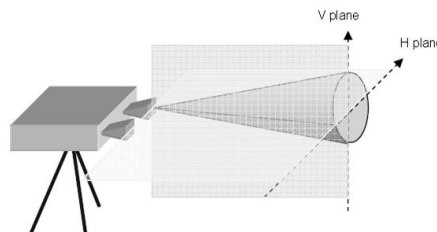


Figura 2.2: Rappresentazione schematica dell'antenna beam (o lobo).

Con il termine lobo (o beam) principale dell'antenna, si intende l'area angolare entro cui l'antenna concentra la maggior parte della potenza che fornisce. Il lobo principale dell'antenna può essere rappresentato come un cono tronco, con una base ellittica, dove il vertice del cono è posizionato in corrispondenza dell'antenna. La base dell'antenna è ellittica poiché l'antenna ha lobi di ampiezza diversa, in altezza (V) e sul piano azimutale (H).

Da un punto di vista applicativo il sensore deve essere posizionato in modo che lo scenario da acquisire cada all'interno del lobo dell'antenna. Perciò, in base alla distanza e all'inclinazione del sensore rispetto alla scena, dovrebbe essere scelto il tipo di antenna (IBIS-L, User manual, 2006, 2008).

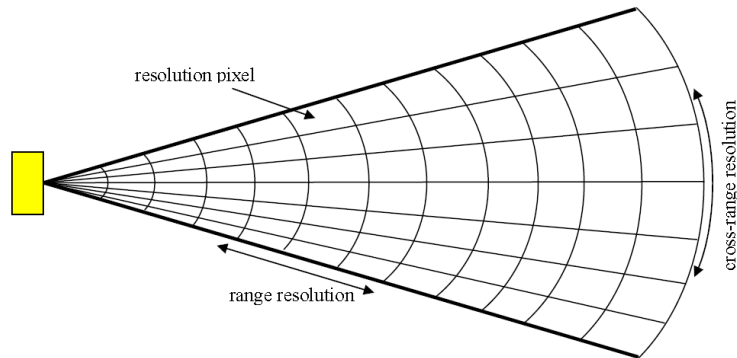


Figura 2.3: Esempio di griglia di risoluzione (sistema 2D polare).

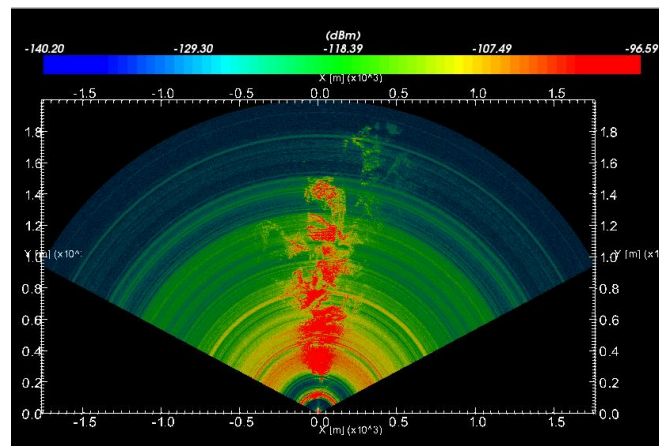


Figura 2.4: Immagine SAR polare in potenza di un versante in frana (Frana di Fravica, Pianello Val Tidone, PC). Le aree in rosso rappresentano valori alti di potenza, mentre le parti in blu, valori bassi.

Geometria e tipologia di superficie influenzano il segnale di ritorno.

Risoluzione in Range

La risoluzione è definita come la minima distanza a cui due riflettori (scatterers) con la stessa riflettività, possono essere discriminati come segnali separati (Hanssen, 2001). Per distinguere oggetti a distanze differenti viene utilizzato un impulso breve: più breve è l'impulso, migliore è la risoluzione (Skolnik, 1990). Sono necessari sia un impulso breve, che un Rapporto Segnale Rumore (SNR) con un elevato picco di potenza per poter discriminare oggetti vicini a distanze abbastanza elevate. Però, più breve è l'impulso, minore è l'energia trasmessa, poiché l'energia che lo strumento può trasmettere in un intervallo di tempo limitato, è limitata. Allora, l'effetto di un breve impulso è ottenuto con un impulso di

durata maggiore, usando una frequenza modulata su un'onda portante che incrementa l'ampiezza spettrale dell'impulso. Quando il segnale di ritorno viene filtrato sulla base della forma d'onda modulante emessa, viene creato un impulso compresso, la cui durata è circa il reciproco dell'ampiezza

spettrale del segnale modulato $\tau \approx \frac{1}{B}$ (Skolnik, 1990; Hanssen, 2001). Questo si riferisce a un impulso compresso e definisce la risoluzione in range ΔR in funzione dell'ampiezza della banda spettrale. E' quindi possibile definire la risoluzione in range, sia in termini di durata dell'impulso che di ampiezza della banda spettrale (Figura 2.5):

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \approx \frac{c}{2B} \quad [2.2]$$

dove: c = velocità della luce;

τ = durata del segnale compresso;

B = ampiezza della banda spettrale.

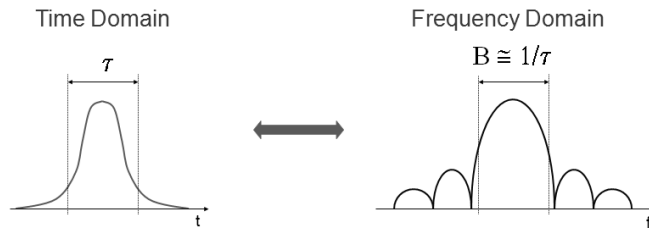


Figura 2.5: Dominio temporale e dominio in frequenza.

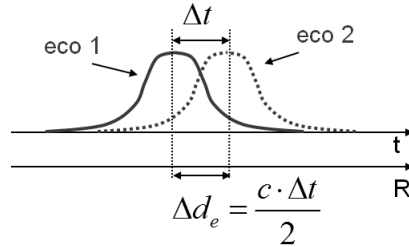


Figura 2.6: Discriminazione tra target determinata dall'eco di ritorno, possibile solo se $\Delta t > \tau$ e se $\Delta d_e > \Delta R$.

In particolare (Figura 2.6) è possibile distinguere tra due target differenti se tra due eco di ritorno intercorre un intervallo di tempo $\Delta t > \tau$ e se $\Delta d_e > \Delta R$, dove Δd_e è la distanza tra i picchi di due segnali di ritorno, definita come:

$$\Delta d_e = \frac{c \Delta t}{2} \quad [2.3]$$

Ogni valore di distanza ΔR è un range bin (Figura 2.7). La misura di distanza è mono-dimensionale, per cui non è possibile distinguere oggetti diversi alla stessa distanza dallo strumento. Più elementi riflettenti all'interno dello stesso range bin concorrono a cumulare la loro risposta.

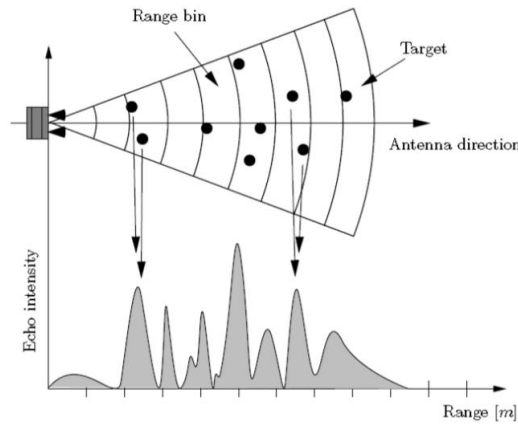


Figura 2.7: Geometria di acquisizione in range. Nell'area illuminata ci sono diversi target: target all'interno dello stesso range bin forniscono risposte che si cumulano nel segnale di ritorno.

Stepped Frequency Continuous Wave

Con la tecnica di modulazione SF-CW è possibile ottenere una larghezza ampia di banda. In genere, la tecnica viene usata per applicazioni close-range perché permette di modulare l'impulso con una durata maggiore di quella relativa alla propagazione del segnale in andata e ritorno.

Con questa tecnica è possibile trasmettere un ventaglio (sweep) di N di segnali di una certa durata T_{tones} (Continuous Wave) a frequenze differenti (Stepped Frequency), con intervallo di frequenza fisso Δf all'interno dell'intervallo di ampiezza della banda B (Figura 2.8 e Figura 2.9). La frequenza viene incrementata ad intervalli discreti di ampiezza di banda, soffermandosi, per ciascuno step, per una durata tale da permettere al segnale (alla frequenza trasmessa) di ritornare (Bernardini et al., 2007 a,b). La tecnica consente di ottenere le stesse performance di un impulso di durata $\tau = \frac{1}{B}$, con una risoluzione

$\Delta R = \frac{c\tau}{2}$. B è definito come:

$$B = \Delta f (N - 1) \quad [2.4]$$

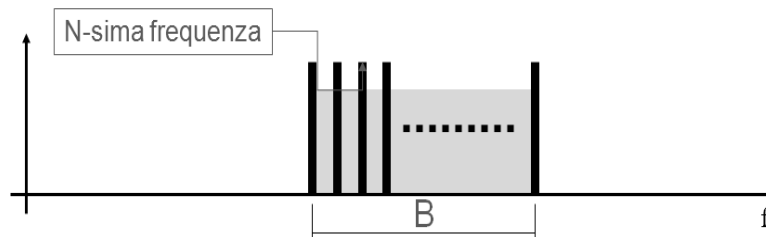


Figura 2.8: SF-CW, emissione degli impulsi.

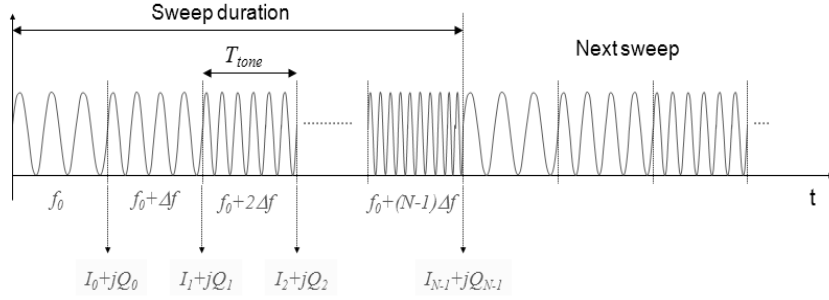


Figura 2.9: SF-CW, rappresentazione del segnale.

La durata di un tono T_{tones} deve essere sufficiente per ricevere il segnale di ritorno dal target localizzato alla massima distanza R_{max} :

$$T_{tone} > \frac{2 R_{max}}{c} \quad [2.5]$$

Ad ogni step di frequenza trasmessa, vengono memorizzate le informazioni della frequenza di ritorno degli N impulsi, in termini delle componenti complesse, l'ortogonale In-phase (I) e la Quadratura (Q). Le informazioni vengono, quindi, ricostruite nel dominio spaziale attraverso la Trasformazione Discreta Inversa di Fourier (IDFT) (Bernardini et al., 2007a).

Dalla quadratura delle componenti nel dominio spaziale, i valori di ampiezza A (modulo del numero reale) e di fase φ (argomento del numero reale) vengono ricavati dalla parte reale (I) e immaginaria (Q) del numero complesso (Figura 2.10):

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad [2.6]$$

$$\varphi = \tan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad [2.7]$$

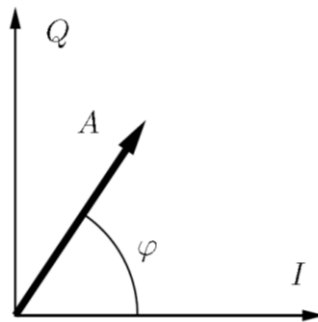


Figura 2.10: Relazione, nel piano complesso di Gauss, tra le componenti complesse (I e Q) e modulo e argomento (Ampiezza A e fase φ).

Risoluzione cross-range

Non è possibile distinguere oggetti differenti che si trovano alla stesa distanza rispetto al sensore, solo attraverso misure in range. Combinando tutte le acquisizioni coerenti in range acquisite osservando la

stessa scena, ma con un lieve offset del sensore, creando perciò un'antenna sintetica di grandi dimensioni, è possibile focalizzare le acquisizioni in immagini 2D, sfruttando la tecnica SAR. Questa si realizza spostando il sensore lungo un binario, parallelo alla scena illuminata, osservando sempre la stessa scena, ma con angolazioni leggermente differenti. Tutte le osservazioni registrate vengono focalizzate in una singola immagine che ha origine al centro della linea di spostamento (Figura 2.11).

Analogamente a quanto accade per la compressione in range, la risoluzione cross-range è ottenuta comprimendo le misura in range nella direzione cross range (Hanssen, 2001). Per ottenere la risoluzione cross-range, un impulso lungo viene compresso: nella direzione cross-range, viene compressa una lunga acquisizione che comprende acquisizioni multiple in range, in una singola immagine, considerata acquisita in un unico istante di tempo. La risoluzione cross-range è definita in termini angolari:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2L} \quad [2.8]$$

dove: λ = lunghezza d'onda;

L = lunghezza dell'antenna sintetica;

$\frac{1}{2}$ fattore che tiene conto che le acquisizioni combinate non sono relative allo stesso istante di acquisizione.

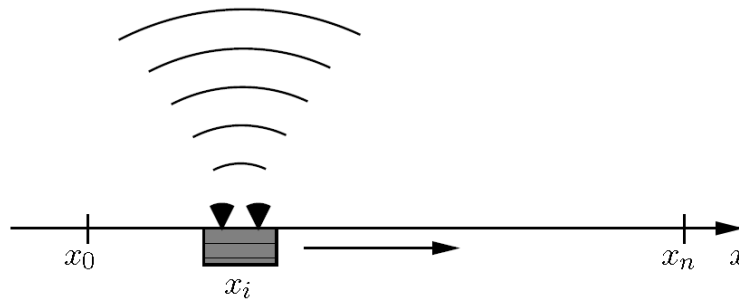


Figura 2.11: Il sensore si muove lungo un'alinea da x_0 a x_n , acquisendo misure di distanza della stessa scena. Questo permette poi di focalizzare tutte le misure in range in una singola immagine usando la tecnica SAR.

Dal momento che la risoluzione cross-range è una risoluzione angolare, la dimensione del pixel aumenta linearmente con la distanza nella direzione cross-range. Elementi che si muovono molto velocemente sulla scena, possono provocare distorsioni nella focalizzazione, poiché la tecnica SAR si basa sull'ipotesi di osservazione della stessa scena da posizioni leggermente differenti in un piccolo lasso temporale.

2.1.2 Interferometria radar

L'interferometria è possibile grazie all'utilizzo di dati coerenti, acquisiti in istanti differenti o da punti di vista differenti. La tecnica interferometrica si basa sulla misura relativa di distanza, confrontando le componenti in fase di due immagini, di cui una di riferimento è la master, mentre l'altra è la slave.

La differenza di fase di ogni pixel è calcolata come argomento della moltiplicazione scalare tra l'immagine master M (con componenti complesse I e Q) e il complesso coniugato della immagine slave S^* . Lo spostamento d di ogni pixel è quindi dato dalla formula seguente (Figura 2.12):

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \arg (M \cdot S^*) = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi_{M-S} \quad [2.9]$$

dove: λ = lunghezza d'onda;

$\arg ()$ = funzione argomento di numeri complessi;

$\Delta\varphi_{M-S}$ = differenza di fase di ogni pixel tra l'immagine Master e la Slave.

I dati da confrontare devono essere acquisiti esattamente dalla stessa posizione. Poiché le immagini confrontate sono state acquisite in momenti diversi, devono essere considerate condizioni atmosferiche differenti: la variazione dell'indice di rifrazione atmosferica, dato da pressione, temperatura e umidità relativa dell'atmosfera, causa una variazione della velocità di propagazione dell'onda portante che può introdurre un errore nelle misure di distanza.

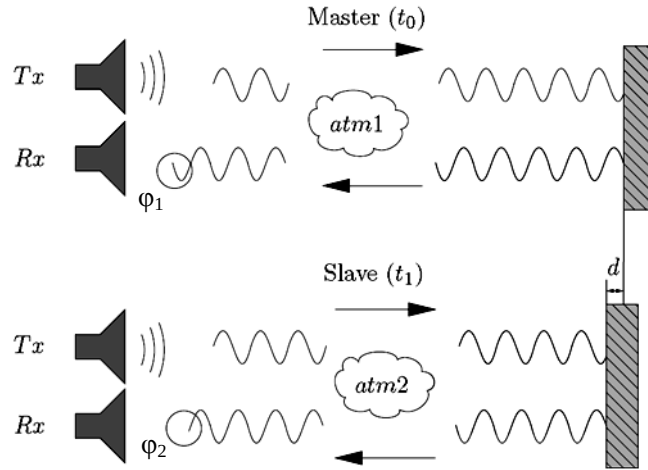


Figura 2.12: Tecnica interferometrica tra acquisizioni ad istanti successivi $\Delta T = t_1 - t_0$. La componente di fase dell'immagine master influenzata dall'atmosfera 1 e l'acquisizione slave influenzata dall'atmosfera 2 vengono confrontate per determinare lo spostamento d .

Introducendo il contributo atmosferico, l'ambiguità di fase e l'errore, la differenza di fase tra master e slave diventa:

$$\Delta\varphi_{M-S} = \Delta\varphi(R) + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_{noise} \quad [2.10]$$

dove: $\Delta\varphi_{M-S}$ = differenza di fase misurata;

$\Delta\varphi(R)$ = differenza di fase reale;

$\Delta\varphi_{atm}$ = contributo atmosferico;

$\Delta\varphi_n$ = ambiguità di fase;

$\Delta\varphi_{noise}$ = rumore.

Tutte le misure sono relative alla direzione radiale delle antenne (Line of Sight, LoS). Questo deve essere considerato nel posizionare il sensore rispetto all'area di cui si vogliono determinare gli spostamenti. Per convenzione, gli spostamenti “verso” il sensore sono negativi, mentre quelli “in allontanamento” dal sensore sono positivi.

In (Figura 2.13) sono rappresentate le relazioni geometriche tra lo spostamento misurato d (lungo la LoS) e lo spostamento effettivo del punto d_p , espresse nella relazione seguente:

$$d = d_p \left(\frac{R}{h} \right) \quad [2.11]$$

dove: d = spostamento effettivo del punto;

d_p = spostamento proiettato (misurato);

R = range;

h = è l'altezza del sensore.

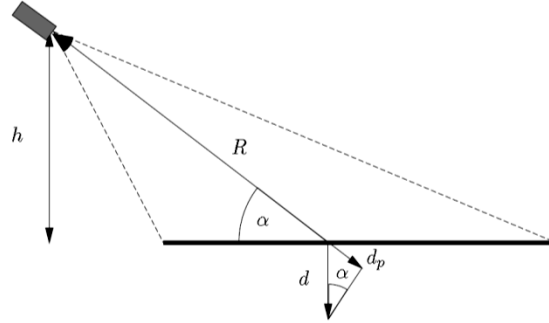


Figura 2.13: L'area illuminata, disegnata con tratto più spesso è osservata da un'altezza h , il sensore registra informazioni relative uno spostamento proiettato d_p . Il rapporto tra l'altezza h e il Range di misura R determina l'effettivo spostamento d .

L'interferogramma

Per determinare variazioni in range usando interferometria SAR, è necessario avere due immagini radar della stessa area, differenziate in fase, per formare l'interferogramma. L'interferogramma complesso è definito come (Kampes and Usai, 1999) differenza di fase tra immagine master e immagine slave:

$$\Delta\phi_{M-S} = \arctan \left(\frac{Q_A}{I_A} \right) \quad [2.12]$$

La fase, però è periodica tra $[\pi; -\pi)$, il che significa che se la differenza di fase eccede da questo intervallo si ha un salto di fase. Questo fenomeno è abbastanza frequente e se si visualizza l'immagine in fase questi salti sono visibili nelle frange interferometriche (Figura 2.14).

Il valore che caratterizza il dominio di fase definisce anche il valore massimo di fase misurabile in modo non ambiguo tra pixel adiacenti o tra immagini successive (Figura 2.15), come $\pm \lambda/4$, inserendo $\pm \pi$, nell'equazione [2.9]. Bisogna sottolineare che fino a che il gradiente di fase è sotto questo valore, ma non varia con continuità, allora è possibile ricostruire il valore assoluto di fase attraverso il phase unwrapping.

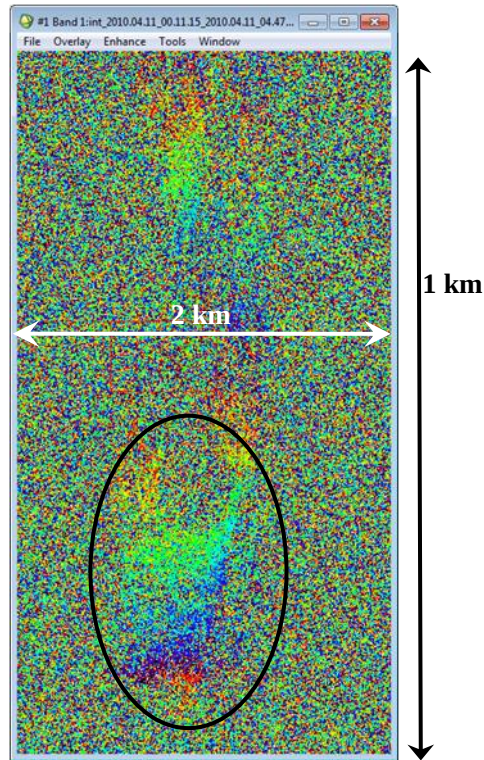


Figura 2.14: *Frangie interferometriche. Frana di Montecagno (Ligonchio, RE).*

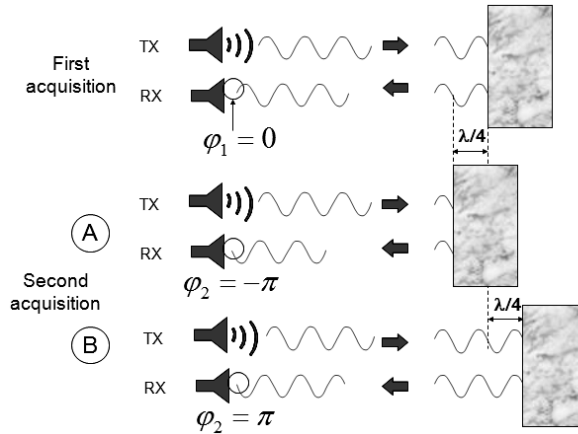


Figura 2.15: *Acquisizione e ambiguità di fase.*

La coerenza

L'interferometria SAR lavora in condizioni di coerenza, dove i segnali acquisiti vengono correlati in una coppia di immagini SAR. La coerenza descrive la correlazione tra le immagini ed è un importante parametro che serve a valutare dove la fase è "utilizzabile". La coerenza è un parametro fondamentale sia in fase di acquisizione, che in fase di processing del dato: di tutte le informazioni acquisite, le uniche utili sono quelle coerenti. La coerenza complessa tra due immagini è definita come:

$$\gamma_c = \frac{E\{M \cdot S^*\}}{\sqrt{E\{M \cdot M^*\} \cdot E\{S \cdot S^*\}}} \quad [2.13]$$

dove: $E\{\cdot\}$: è il valore statistico atteso.

La coerenza è definita da $|\gamma_c|$ e il suo stimatore da (Kampes and Usai, 1999):

$$\hat{\gamma} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n M_i M_i^* \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n S_i S_i^*}} \quad [2.14]$$

La coerenza ha un valore $[0, 1]$, dove 1 rappresenta la coerenza massima. La coerenza decorrela nel tempo per cambiamenti nella scena osservata. Il materiale e la forma dell'oggetto misurato influenzano molto questo parametro: la vegetazione tende ad avere bassi valori di coerenza, mentre materiali come le rocce o manufatti artificiali come le abitazioni mantengono alti valori di coerenza per lunghi periodi di tempo.

2.2 Il sistema di acquisizione GB-SAR

Lo strumento GB-SAR utilizzato è stato ideato e sviluppato da IDS (Ingegneria dei Sistemi S. p. A., Georadar Division, Pisa, Italia) e si chiama IBIS-L (Image By Interferometric Survey – L) (<http://www.idsgeoradar.com>). E' un radar ad apertura sintetica basato sulla tecnica SF-CW per la creazione di immagini radar bidimensionali.

L'apparato di acquisizione consiste di (Figura 2.16):

- sensore: testa radar ed antenne;
- scanner lineare: binario di 2.5 m di lunghezza di cui 2 m utilizzati per realizzare l'antenna ad apertura sintetica, dotato di motore per spostare il sensore parallelamente alla scena osservata;
- control unit: pc e software per le acquisizioni e componenti accessori (cavi, alimentatori, ecc);
- power supply: cavi per collegamento alla rete elettrica o pannelli solari o generatore di corrente, batterie tampone, fusibili, quadro di controllo elettrico;
- corner reflector: facoltativi.

Le caratteristiche fondamentali del sistema, che verranno descritte nel dettaglio di seguito, sono sintetizzate in Tabella 2.1.

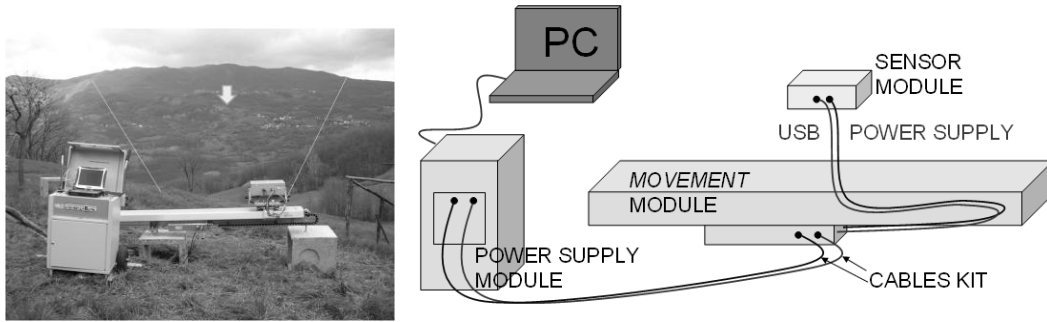


Figura 2.16: Foto di un'installazione non permanente (Frana di Romanoro) e schematizzazione dell'apparato strumentale IBIS-L.

Parametri strumentali	Descrizione
Banda di frequenza	Ku band (disponibile anche in banda X), 17.05-17.35 GHz
Antenne	20 dB e 13.5 dB
Lunghezza d'onda	1.8 cm
Range operativo	[10 - 4000] m
Massima risoluzione in Range	0.5 m
Massima risoluzione Cross-range	~ 4.4 mrad
Accuratezza spostam.	Fino a 0.1 mm
Tempo di acquisizione	≥ 5 min
Limite di ambiguità in fase	~ 4.4 mm
Peso unità alimentazione	89 kg
Peso binario	54 kg

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche dello strumento IBIS-L.

2.2.1 Il modulo sensore

Il sensore dello strumento lavora in banda Ku, a 17.1 GHz, con una larghezza massima di banda di 300 MHz, che fornisce una risoluzione massima in range di 0.5 m (equazione 2.2):

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = 0.5 \text{ m}$$

Il sistema usa due antenne identiche, una per trasmettere e una per ricevere. Le antenne standard sono caratterizzate da un massimo guadagno di 20 dBi (i = isotropico). L'ampiezza angolare del lobo principale dell'antenna (a -3 dB) è di 17° sul piano orizzontale e di 15° sul piano verticale (Figura 2.17). E' possibile cambiare il modello dell'antenna e utilizzare antenne con apertura maggiore: in questo caso, però, l'energia trasmessa necessita di essere aumentata e il tempo di acquisizione aumenta.

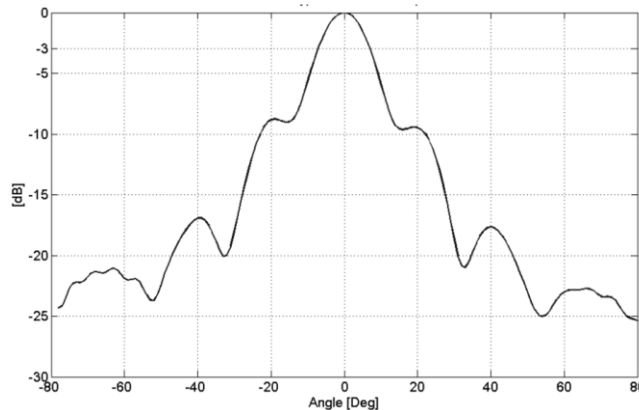


Figura 2.17: Irradiazione verticale dell'antenna con guadagno 20 dBi.

2.2.2 Scanner lineare

Lo scanner lineare (binario) serve come piattaforma per acquisire le osservazioni in range, lungo una direzione lineare, per creare l'antenna ad aperture sintetica. Lo scanner è lungo 2.5 m, di cui solo 2 m sono disponibili per creare l'antenna ad apertura sintetica. La risoluzione cross-range è funzione della dimensione dell'antenna sintetica, cioè della lunghezza del binario e della lunghezza d'onda, come si ricava dall'equazione 2.8.

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{2L} = 4.4 \text{ mrad}$$

2.2.3 Control unit e power supply

Il sistema è controllato da un pc con il software di gestione (IBIS-L controller), con la possibilità di un collegamento remoto con il pc dell'ufficio, per esempio. Con il software di gestione è possibile inserire i parametri di acquisizione (risoluzione in range e cross-range, distanza massima e minima di acquisizione, ecc).

L'unità di alimentazione fornisce energia al sistema di acquisizione tramite rete elettrica o con batterie. In genere, però, in caso non ci sia disponibilità di corrente elettrica di rete, è consigliato l'uso di un generatore o di pannelli solari debitamente integrati a sistemi di accumulo di energia.

2.2.4 Corner reflector

L'installazione di corner reflector non è indispensabile, ma avere elementi altamente riflettenti sulla scena, ben riconoscibili anche sull'immagine radar, potrebbe agevolare le operazioni di georeferenziazione/riproiezione delle immagini SAR; inoltre, potrebbe fornire informazioni in zone in cui la risposta del segnale data da elementi naturali non è sufficientemente coerente o potente.

I corner reflector (Figura 2.18) riducono la dispersione del segnale riflettendo il segnale incidente in modo tale che il segnale “in uscita” abbia la stessa direzione ma verso opposto rispetto al segnale “in ingresso”. Le applicazioni relative alle aree test presentate nel seguito non hanno mai sfruttato l'uso di corner reflector.

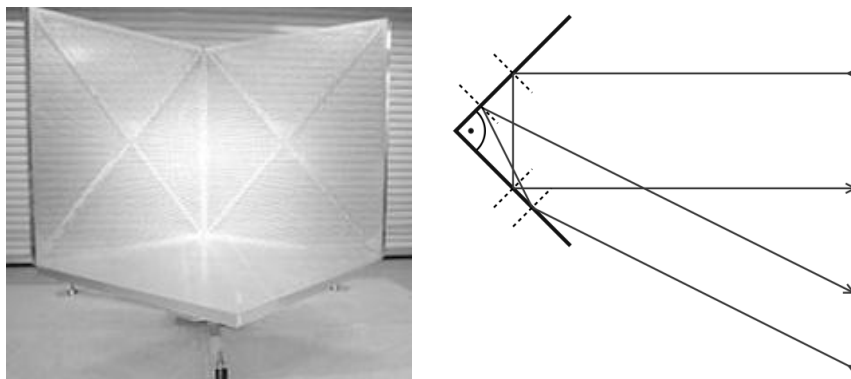


Figura 2.18: Esempio di corner reflector e esemplificazione di funzionalità.

2.2.5 Accuratezza e precisione

L'accuratezza delle misure ha una precisione che dipende dall'intensità dell'eco di ritorno per un determinato pixel, o meglio, la precisione dipende dal rapporto segnale rumore di un determinato punto. La precisione nominale dello strumento può raggiungere il millesimo di millimetro, ma per ragioni operative, questa precisione non è raggiungibile se non in laboratorio. Nell'ambito applicativo del monitoraggio di versanti instabili, nel migliore dei casi è possibile ottenere la precisione di 0.1 mm (Figura 2.19) (IBIS-L controller, manual, 2008). Se si lavora su lunghe distanze, in condizioni atmosferiche estremamente variabili e con coperture vegetative di una certa estensione, spesso la precisione raggiunta si riduce ulteriormente.

Per definire in modo appropriato la significatività dei risultati, è sempre bene analizzare le time series di spostamento considerando gli obiettivi del monitoraggio e l'entità degli spostamenti.

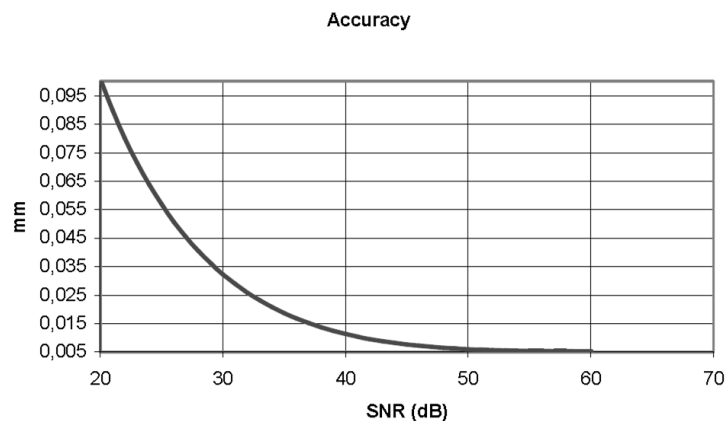


Figura 2.19: Grafico della misura di accuratezza in funzione del rapporto segnale rumore (SNR).

La distanza operativa massima è di 4 km, anche se in teoria, non vi è un massimo di distanza: tutto dipende dal modo di propagarsi delle onde elettromagnetiche, che riducono la potenza del segnale proporzionalmente al quadrato della distanza percorsa.

Questo significa che più ci si allontana dal sensore, più si riduce il valore SNR del segnale di ritorno. Di conseguenza, il massimo range operativo dello strumento è stato ridotto per ottenere precisione di pochi millimetri. Il valore di SNR può essere ulteriormente migliorato installando appositi corner reflector in punti specifici (IBIS-L controller manual, 2008).

2.2.6 Installazione e acquisizione

Dopo avere valutato l'idoneità del sito ad ospitare l'installazione della strumentazione, il primo fondamentale passo del rilievo è l'acquisizione delle osservazioni. Questo include una fase logistica importante che riguarda il trasporto e la monumentazione di uno strumento poco maneggevole e pesante, come il GB-SAR. Lo strumento può essere installato su monumentazione permanente con dispositivo per il centramento forzato, per un monitoraggio continuo o per monitoraggio periodico, oppure può essere montato su monumentazioni non fisse, che una volta terminata l'acquisizione possono essere rimosse insieme allo strumento. In entrambi i casi, lo strumento deve avere un supporto sufficientemente stabile per non creare problemi di focalizzazione delle immagini, e nel contempo, deve essere

“relativamente fermo” per il periodo di acquisizione. Qualora si installi strumentazione in monitoraggio continuo, per mesi o anni, è assolutamente necessario controllare la stabilità della postazione nel tempo per poter interpretare correttamente gli effetti di spostamento di lungo termine dell’oggetto monitorato. La stabilità della postazione di misura nel tempo è comunque un fattore fondamentale per qualsiasi sistema di monitoraggio, sia a lungo che a breve termine, che dovrebbe sempre essere verificata.

Il successo di una campagna di osservazione o di un sistema di monitoraggio è legato anche alla posizione della postazione di misura. A maggior ragione, questa considerazione vale per un sistema come questo che ha come posizione ottimale di osservazione quella frontale al movimento.

Anche se l’installazione non è del tutto complessa, una volta che si è superata la logistica del trasporto, non tutti i siti sono idonei a essere monitorati con questo tipo di strumento, proprio per il vincolo della postazione di misura. Per siti in cui la visuale dal punto di presa è buona, la tecnica GB-InSAR è indicata anche perché può prescindere dall’uso di corner reflector, per cui in poco tempo (qualche ora) può essere installato e reso operativo.

Come accennato più volte, la copertura vegetativa e l’elevato grado di umidità, sia dell’ambiente che del terreno, potrebbero ridurre la qualità delle immagini acquisite, riducendo la coerenza del segnale e rendendo le immagini inutilizzabili. Pertanto, affinché sia garantito un certo grado di qualità delle osservazioni, è bene che la scena presenti elementi con buona riflettività (rocce, manufatti, abitazioni, ecc.) con una buona continuità spaziale.

Perché lo strumento possa acquisire, il software di gestione (IBIS-L controller) deve essere impostato con parametri che riguardano:

- maximum and minimum range;
- range resolution;
- maximum cross-range distance;
- cross range resolution;
- total acquisition number (numero di acquisizioni per ora: dipende anche dai precedenti parametri);
- inter acquisition delay (tempo che intercorre tra l’acquisizione di immagini successive).

2.3 Elaborazione dei dati

L’elaborazione dei dati è un aspetto importante nella determinazione di risultati significativi.

Per il monitoraggio continuo (singola campagna) è possibile lavorare in tempo reale, sfruttando le potenzialità della tecnica GB-InSAR per la sorveglianza e l’allerta; oppure si può lavorare off-line, cioè in post processing, simulando le applicazioni in tempo reale o per analisi più approfondite.

Il monitoraggio discontinuo (riaggancio di serie temporali derivanti da campagne successive) è un po’ più complicato da realizzare, in quanto risente più del monitoraggio continuo dei fenomeni di influenza dell’atmosfera o della decorrelazione spazio-temporale. Si sfrutta per il monitoraggio di fenomeni a

cinematica estremamente lenta, oppure per riagganciare serie temporali di osservazioni discontinue all'interno di campagne di monitoraggio continuo.

Prima di realizzare la vera e propria catena di processing, è necessario dedicare un po' di tempo alla pre-analisi delle immagini, finalizzata alla selezione del "set di calibrazione" utile al successivo data processing. Definire il "set di calibrazione" significa individuare i pixel su cui fare le analisi interferometriche. Non tutti i pixel acquisiti presentano caratteristiche idonee al processamento che, infatti, può essere applicato efficacemente solo se è rispettato il criterio di coerenza del segnale.

Per interpretare i risultati di spostamento LoS elaborati con la tecnica GB-InSAR, può essere utile georeferenziarli in un sistema cartografico, conservando però le informazioni tridimensionali sfruttando Modelli Digitali della Superficie (DSM) o Modelli Digitali del Terreno (DTM). Per fare questo, se non si hanno corner reflector, servono le coordinate del punto di presa del centro strumentale e l'angolo di orientamento (rispetto al Nord) e deve essere fornito il modello digitale del terreno per la riproiezione delle immagini SAR su supporto 3D. In genere, si lavora in sistemi di riferimento cartografici (UTM ETRF 2000, UTM ED50, ecc) per collocare i risultati in uno spazio georeferenziato, in cui si hanno già ortofoto satellitari o aeree, rilievi ALS, mappe di suscettibilità, carte tecniche regionali e così via, per agevolare l'integrazione dei risultati e l'interpretazione dei fenomeni rilevati. Però, in caso di emergenza, si può anche lavorare in un sistema di riferimento locale, quello del GB-InSAR o quello proprio di un laser scanner terrestre. Lo svantaggio di lavorare nel sistema di riferimento del GB-InSAR è che le mappe di spostamento sono distorte rispetto alla realtà proprio perché sono bidimensionali. Quindi, anche in caso di emergenza, è sempre consigliabile visualizzare i risultati su un supporto 3D.

2.3.1 *Dati da singola campagna*

Il data processing per il monitoraggio continuo si articola come segue:

- stima dell'ampiezza media;
- stima della qualità delle misure ed eventuale esclusione delle immagini che non superano i criteri di qualità impostati (un filtro viene comunque applicato di default);
- calcolo degli interferogrammi;
- phase unwrapping (srotolamento della fase);
- stima e correzione dell'atmosfera;
- stima degli spostamenti;
- stima delle velocità;
- georeferenziazione, mappe 2D, mappe 3D e time series.

Queste analisi vengono applicate ai punti scelti attraverso il set di calibrazione. Nel software IBIS Guardian (IDS, Ingegneria Dei Sistemi, Pisa) per poter calcolare mappe di spostamento, anche in tempo reale, devono essere selezionati anche parametri relativi a:

- dimensione del Block Size (BS - gruppo di immagini) sulla base del quale fare la stima dell'atmosfera e per il quale calcolare il valore di spostamento cumulato;

- Result Update Time (RUT), che è il numero di immagini impiegate per aggiornare il block size per il calcolo di spostamento cumulato.

Per fare una stima abbastanza buona dell’atmosfera, in genere si imposta il block size con un numero di immagini che vanno da 35 a 70; il result update time è in genere di una immagine se si lavora in real time (Grapes user manual v 2.5).

Il processing dei dati può essere fatto utilizzando la tecnica PS (Permanent Scatterers) oppure attraverso GCP (Ground Control Point).

2.3.2 Dati da campagne successive

Riaggancio tramite “Repeat Pass Tool”

Il tool di elaborazione delle campagne discontinue (Repeat Pass Tool, IDS- Ingegneria dei Sistemi) che è utilizzato insieme al software IBIS Guardian (v. 1.2), ad oggi, funziona da linea di comando e calcola lo spostamento tra campagne successive o tra serie discontinue di dati, sfruttando immagini acquisite durante due distinti periodi di osservazione. Perché questa “analisi di discontinuità” possa essere applicata, è necessario che la postazione di misura non abbia subito nessuna variazione tra i due periodi di acquisizione, e che lo strumento sia riposizionato secondo i criteri del centramento forzato. La variazione del punto di presa anche solo di qualche centimetro può precludere la buona riuscita dell’elaborazione. Servono, quindi, installazioni permanenti che consentano un centramento forzato del binario e del sensore, affinché possa essere realizzato il matching tra le immagini delle diverse campagne. Non esiste ancora una fase del processing in cui si prevede una registrazione delle scene acquisite in periodi differenti, per cui, se viene a mancare il requisito di perfetto riposizionamento dello strumento, gli spostamenti tra campagne periodiche non possono essere calcolati. Pertanto è bene assicurarsi, magari anche attraverso strumentazione topografica (stazione totale, livello, GPS – Global Positioning System) che la postazione di misura non subisca variazioni di posizione nel tempo.

Per elaborare campagne discontinue è necessario avere a disposizione un numero sufficiente di immagini appartenenti sia al primo rilievo che al secondo per la stima dei riflettori permanenti e dell’atmosfera. Quindi, servono almeno 20 immagini per ogni campagna, ma se si ha a disposizione un intero giorno di osservazioni, la stima dell’atmosfera potenzialmente migliora. E’ comunque bene evitare di usare poche immagini acquisite nei momenti della giornata in cui le condizioni atmosferiche variano più rapidamente.

```

1. Directory della prima serie di acquisizioni      : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_primi40\PSV_
2. Directory della seconda serie di acquisizioni    : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_prim
3. Path completo della SelectionMask               : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_primi40\mask
4. Directory dell'RTR compensato                   : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_prim
5. Path completo degli index still                 : ""
6. Directory degli RTR da compensare                : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_primi40\RTR_
7. Inizio numerazione degli RTR                    : "3"
8. Path completo dell'ultimo RTR                   : "D:\GB_SAR_phd\Collagna_gua1.2_elab\PSV_02RP_ch09_prim
9. Compensazione dello spostamento con la velocità [Yes=1, NO=0] : "0"
10. Unwrap spaziale dello spostamento [Yes=1, NO=0] : "1"
11. Soglia di coerenza per l'unwrap spaziale dello spostamento : "0.6"
12. modalità observer [Yes=1, No=0]                 : "0"
13. Soluzione iniziale con mappa di velocità [Yes=1, NO=0]       : "0"

```

Figura 2.20: File di configurazione dell'applicazione Repeat Pass Tool (IDS, Ingegneria dei Sistemi).

I parametri e i dati necessari all'elaborazione sono elencati in Figura 2.20. Le immagini grezze (formato .GBD) delle singole campagne devono essere pre-elaborate applicando le opportune soglie di coerenza ecc., attraverso il selection mask tool, per creare i file .PSV (righe 1 e 2). La selection mask usata è bene che sia la stessa per tutte le campagne discontinue (riga 3). E' possibile inserire, comunque una soglia di coerenza di cui tenere conto (riga 11), la cui funzionalità varia in funzione della soglia applicata nella selection mask. Per le stime di spostamento si sconsiglia di usare GCP (riga 5) anche se ne è previsto un eventuale utilizzo.

Se si vogliono unire campagne di monitoraggio discontinue che hanno previsto acquisizioni di qualche settimana ciascuna, allora i file grezzi da utilizzare per il riaggancio, sono quelli relativi all'ultimo periodo di acquisizione della prima campagna e al primo della seconda campagna. E' quindi possibile calcolare lo spostamento che è intercorso tra le due campagne (riga 4) e cumularlo con i precedenti spostamenti rilevati nella prima campagna (righe 7 e 8) e poi cumulare questo spostamento con quelli del secondo periodo di misura (riga 6). Se gli spostamenti in gioco sono abbastanza veloci, si può fare il calcolo di spostamento tra le campagne basandosi sulla stima delle velocità (riga 9 e riga 13). Naturalmente è possibile calcolare anche il phase unwrapping spaziale (riga 10).

Per la visualizzare i valori di spostamento derivati è possibile usare il software IBIS Guardian, creando un progetto per georeferenziare le informazioni di spostamento calcolate, oppure è possibile lavorare direttamente in ambiente Matlab, osservando e analizzando i singoli file generati (riga 12).

Riaggancio tramite “Discontinuous Monitoring Tool”

Il monitoraggio periodico può essere applicato calcolando la co-registrazione delle immagini riguardanti le campagne di misura discontinue. Il software di elaborazione è stato implementato dall'Institut de Geomatica (Castelldefels, Barcellona, Spagna). In questo caso il processing si articola come segue:

- focalizzazione;
- estrazione delle immagini di ampiezza e fase (medie per i due rilievi);
- pre-analisi delle immagini e selezione dei punti;
- co-registrazione delle immagini relative alle due campagne e stima dei parametri di trasformazione;
- ricampionamento delle immagini;
- generazione degli interferogrammi;
- phase unwrapping;
- “direct integration” rispetto a un punto di riferimento;
- stima dell'atmosfera tramite GCP (Ground Control Point).

Il processo di elaborazione è abbastanza semplice, quello che è complesso è interpretare i dati nel modo corretto, in relazione agli obiettivi di monitoraggio.

2.4 Attività sperimentale di rilievo

I versanti in frana studiati con la tecnica GB-InSAR presentati in questo contributo sono interessati da fenomeni che hanno subito riattivazioni parziali o complete nei recenti anni, ed in riferimento alle quali, durante la fase di attenzione seguita agli eventi idro-meteorologici delle stagioni autunno invernali 2009-2010 e 2010-2011, si nutriva una preoccupazione circa una ripresa di movimenti diffusi. Questo studio si inquadra all'interno di una sperimentazione condotta tra l'università di Modena e Reggio Emilia, l'Università di Bologna e la Regione Emilia Romagna (Agenzia di Protezione Civile, Servizio Geologico, Servizi Tecnici di Bacino), per valutare l'applicabilità del metodo GB-InSAR quale strumento di supporto alle fasi di attenzione e sorveglianza che scattano a seguito di periodi di piovosità cumulata accentuata. La localizzazione dei siti oggetto di monitoraggio è rappresentata in Figura 2.21. Dalla Figura 2.22 alla Figura 2.26 si trovano le schede monografiche sei siti, in cui si riportano le caratteristiche salienti del versante instabile e le relative caratteristiche di acquisizione della campagna GB-InSAR.

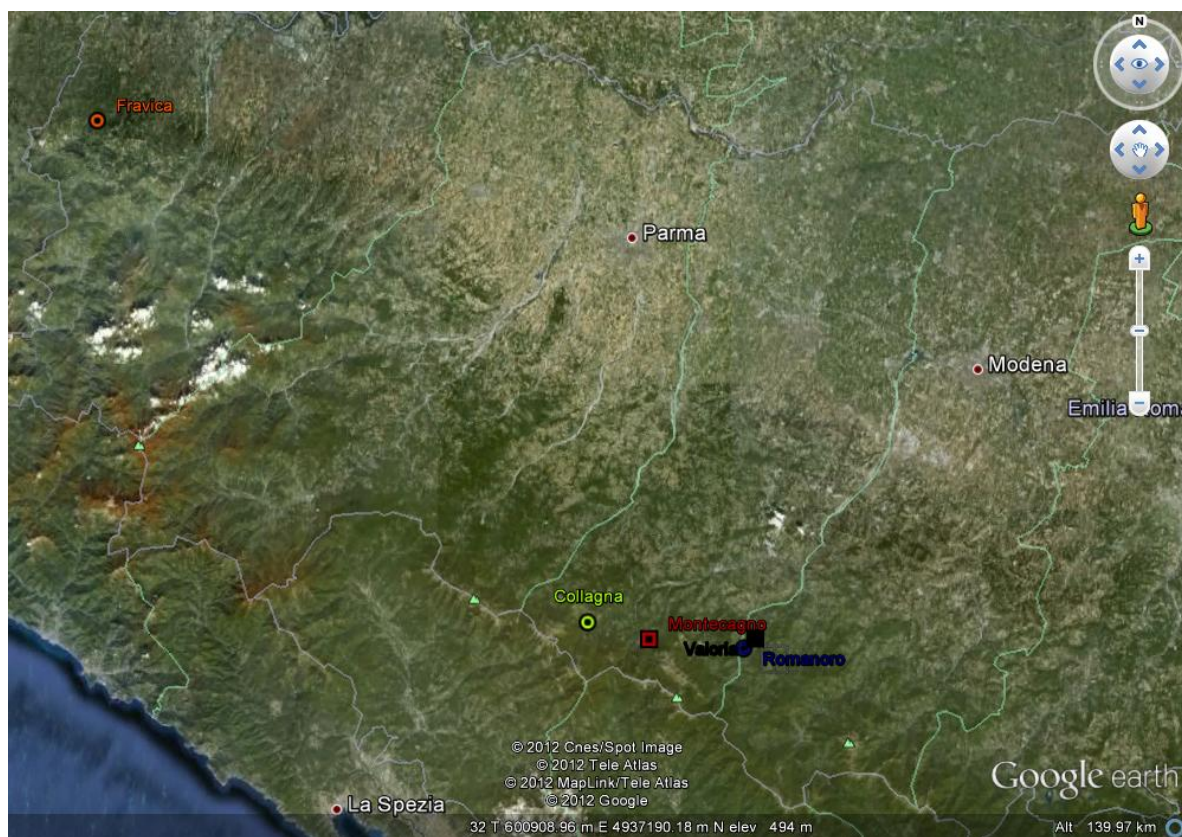


Figura 2.21: Localizzazione dei siti oggetto del monitoraggio.

Sito di COLLAGNA			
Denominazione del Sito	COL PIAGNETO - COLLAGNA		
Provincia, Comune, Località	Reggio Emilia, Collagna, Col Piagneto (S.S.63)		
Bacino idrografico	Fiume Secchia (Torrente Biola)		
Tipo di dissesto	Scivolamento roto-traslativo di roccia		
Stato di attività	Attivo		
Classe di velocità	mm-cm/anno		
Motivazione del sito	Il versante meridionale del Col Piagneto è interessato da diversi fenomeni franosi che hanno implicazioni di rischio per la SS63 del Passo del Cerreto. La SS63 è stata interessata nel dicembre 2008 da una frana di scivolamento di terra che ha costretto a riattivare la viabilità pre-1974. Nel 1974 infatti un tratto della SS63 fu distrutta da una colata-scorrimento di detrito. Dal 2009 è attivo un monitoraggio con stazione totale dei diversi principali fenomeni. Il rilievo radar ha avuto l'obiettivo di valutare l'applicabilità del metodo a scorrimenti di roccia, e validare i risultati attraverso confronto diretto con i valori di spostamento ottenuti da stazione totale robotica.		
Date Campagne misura	1° Campagna: dal 17/11/2010 - 07/12/2010 (20 gg)		

Mappa inquadramento e fotografie





Generalità acquisizione IBIS-L			
Coordinate punto di presa IBIS (UTM* ED50 32N)	E: 600580.5 m	N: 910746.8 m	El: 891.0 m
Coordinate punto di presa IBIS (UTM ETRF2000 32N)	E: 600497.9 m	N: 4910547.5 m	El: 891.0 m
Direzione di puntamento radar	243 ° N		
Distanza IBIS-centro della scena	980 m		
Distanza IBIS-corona di frana	1100 m		
Parametri acquisizione IBIS controller			
Max range distance	2000 m		
Max cross-range distance	+/- 1000 m		
Range resolution	0,5 m		
Cross-Range resolution	4,4 mrad		
Antenna type	20 Db (type 2)		
Total acquisition number	0 (infinito)		
Inter acquisition delay	6 sec.		
Durata acquisizione ogni singola scena (mm:ss)	07:52		

Figura 2.22: Scheda monografica della Frana di Collagna.

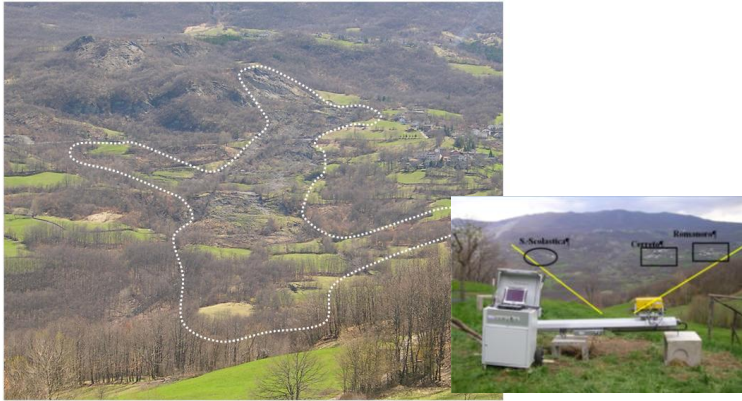
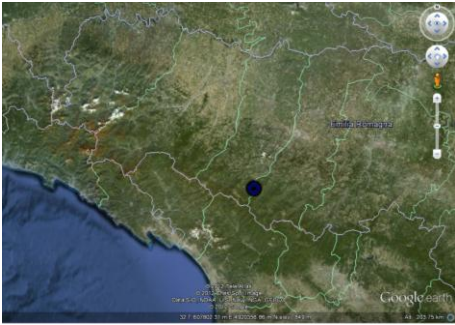
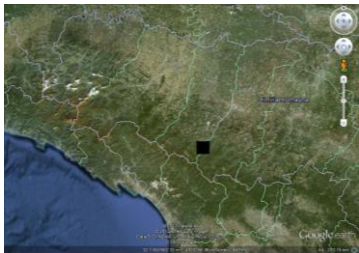
Sito di ROMANORO			
Denominazione del Sito	ROMANORO		
Provincia, Comune, Località	Modena, Frassinoro, Cerreto-Romanoro		
Bacino idrografico	Fiume Secchia (Torrente Dolo)		
Tipo di dissesto	Scivolamento-Colata terra		
Stato di attività	Attivo		
Classe di velocità	mm-cm/anno (con accelerazioni durante le riattivazioni)		
Motivazione del sito	Frana riattivata nel 01/2010 con danni a strada fondovalle Dolo ed edifici e conseguente evacuazione di alcune abitazioni e successiva Ordinanza di Protezione Civile. Frana in fase di rallentamento generale durante il periodo del rilievo con movimenti residuali. Il rilievo ha avuto l'obiettivo di valutare lo stato di attività della frana e verificare la risposta alle piogge, in assenza di altri strumenti di monitoraggio che coprissero il versante. Attualmente è installata rete monitoraggio inclinometrico e GPS (periodico).		
Date Campagne misura	1° Campagna: 12/04/2010 – 19/04/2010 (7gg)		
Mappa di inquadramento e fotografie			
			
Generalità acquisizione IBIS-L			
Coordinate punto di presa IBIS (UTM* ED50 32N)	E: 620429.39 m	N: 909169.14 m	El: 704.2 m
Coordinate punto di presa IBIS (UTM ETRF2000 32N)	--	--	--
Direzione di puntamento radar	127° N		
Distanza IBIS-centro della scena	1500 m		
Distanza IBIS-corona di frana	2300 m		
Parametri acquisizione IBIS controller			
Max range distance	3000 m		
Max cross-range distance	+/- 1000 m		
Range resolution	0,5 m		
Cross-Range resolution	4,4 mrad		
Antenna type	13 Db (type 3)		
Total acquisition number	0 (infinito)		
Inter acquisition delay	6 sec.		
Durata acquisizione ogni singola scena (mm:ss)	12:03		

Figura 2.23: Scheda monografica della Frana di Romanoro.

Sito di VALORIA			
Denominazione del Sito	VALORIA		
Provincia, Comune, Località	Modena, Frassinoro, Boschi di Valoria		
Bacino idrografico	Fiume Secchia (Torrente Dolo)		
Tipo di dissesto	Scivolamento-Colata terra		
Stato di attività	Attivo		
Classe di velocità	m/anno (con accelerazioni durante le riattivazioni)		
Motivazione del sito	Frana riattivata nel 2001, 2005-06 e nel 2008-09 con danni a strada fondovalle Dolo, edifici e metanodotto; in fase di rallentamento generale durante il periodo del rilievo con movimenti residuali. Il rilievo ha avuto l'obiettivo di valutare lo stato di attività della frana, verificare la risposta dello strumento a terreno sciolto con elevato grado di umidità e movimenti moderatamente veloci e confrontare/integrare il sistema GB-InSAR con sistema di monitoraggio topografico continuo tramite stazione totale.		
Date Campagne misura	1° Campagna: dal 23/02/2009 (h 15.35) – 24/02/2009 (1 gg.) (h 14.57)		

Mappa inquadramento e fotografie





Generalità acquisizione IBIS-L			
Coordinate punto di presa IBIS (UTM* ED50 32N)	--	--	--
Coordinate punto di presa IBIS (UTM ETRF89 32N)	E: 623658.3 m	N: 4908890.5 m	El: 1021.2 m
Direzione di puntamento radar	159.3 ° N		
Distanza IBIS-centro della scena	110 m		
Distanza IBIS-corona di frana	1500 m		
Parametri acquisizione IBIS controller			
Max range distance	2000 m		
Max cross-range distance	+/- 1000 m		
Range resolution	0,5 m		
Cross-Range resolution	4,4 mrad		
Antenna Aperture	38 °		
Total acquisition number	0 (infinito)		
Inter acquisition delay	6 sec.		
Durata acquisizione ogni singola scena (mm:ss)	07:23		

Figura 2.24: Scheda monografica della Frana di Valoria.

Sito di MONTECAGNO			
Denominazione del Sito	MONTECAGNO		
Provincia, Comune, Località	Reggio Emilia, Ligonchio, Montecagno		
Bacino idrografico	Fiume Secchia (Torrente Freddara)		
Tipo di dissesto	Complesso: scivolamento roccia- detrito		
Stato di attività	Attivo		
Classe di velocità	mm-cm/anno		
Motivazione del sito	Nella frazione di Montecagno sono state segnalate diverse lesioni ad edifici. Nel 2010 STB-Po ha installato inclinometri che hanno confermato movimenti in taluni punti, in un quadro di difficile interpretazione. Scopo principale dei rilievi radar è stato quello di verificare l'estensione e la continuità delle aree in movimento all'interno dell'abitato al fine di affinare il quadro interpretativo e supportare la pianificazione di interventi di consolidamento.		
Date Campagne misura	1° Campagna: dal 31/03/2010 al 12/04/2010 (12 gg) (ENEL) 2° Campagna: dal 03/11/2010 al 17/11/2010 (14 gg) (ENEL) 3° Campagna: dal 09/02/2011 al 21/02/2011 (12 gg) (ENEL)		
Mappa di inquadramento e fotografie			
			
Generalità acquisizione IBIS-L			
Coordinate punto di presa IBIS (UTM* ED50 32N)	E: 607359.4 m	N: 908883.5 m	El: 914.0 m
Coordinate punto di presa IBIS (UTM ETRF2000 32N)	--	--	--
Direzione di puntamento radar	58.5 ° N		
Distanza IBIS-centro della scena	1600 m		
Distanza IBIS-corona di frana	2200 m		
Parametri acquisizione IBIS controller			
Max range distance	3000 m		
Max cross-range distance	+/- 1000 m		
Range resolution	0,75 m (1° camp.); 0,5 m (2°, 3° camp.)		
Cross-Range resolution	4,4 mrad		
Antenna type	20 Db (type 2)		
Total acquisition number	0 (infinito)		
Inter acquisition delay	6 sec.		
Durata acquisizione ogni singola scena (mm:ss)	09:11 (1° camp.); 12.16 (2°, 3° camp.)		

Figura 2.25: Scheda monografica della Frana di Montecagno.

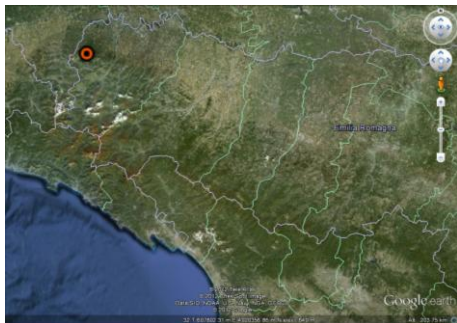
Sito di FRAVICA			
Denominazione del Sito	FRAVICA		
Provincia, Comune, Località	Piacenza, Pianello Valtidone, Fravica		
Bacino idrografico	Fiume Tidone (Torrente Chiarone)		
Tipo di dissesto	Scivolamento-Colata terra		
Stato di attività	Attivo		
Classe di velocità	mm-cm/anno (con accelerazioni durante le riattivazioni)		
Motivazione del sito	Frana riattivata il 27/04/2009 che ha provocato spostamenti complessivi di decine di metri in pochi giorni, distruggendo alcune abitazioni, un tratto di 400 m della SP60 e causando il parziale sbarramento del T. Chiarone. Il rilievo svolto circa 1 anno dopo la riattivazione ha avuto l'obiettivo di valutare lo stato di attività della frana e verificare la risposta alle piogge, in assenza di altri strumenti di monitoraggio ancora operativi che coprissero il versante. Anche allo scopo di indirizzare gli interventi di consolidamento.		
Date Campagne misura	1° Campagna: dal 26/04/2010 - 06/05/2010 (10 gg.)		
Mappa inquadramento e fotografie			
			
Generalità acquisizione IBIS-L			
Coordinate punto di presa IBIS (UTM* ED50 32N)	E: 532935.62 m	N: 976103.06 m	El: 244 m
Coordinate punto di presa IBIS (UTM ETRF2000 32N)	--	--	--
Direzione di puntamento radar	231 ° N		
Distanza IBIS-centro della scena	900 m		
Distanza IBIS-corona di frana	2000 m		
Parametri acquisizione IBIS controller			
Max range distance	2000 m		
Max cross-range distance	+/- 1000 m		
Range resolution	0,5 m		
Cross-Range resolution	4,4 mrad		
Antenna type	20 Db (type 2)		
Total acquisition number	0 (infinito)		
Inter acquisition delay	6 sec.		
Durata acquisizione ogni singola scena (mm:ss)	07:56		

Figura 2.26: Scheda monografica della Frana di Fravica.

Capitolo 3. RISULTATI: analisi dei limiti e delle potenzialità operative per lo studio di versanti instabili

3.1 Introduzione

Le applicazioni GB-InSAR per il monitoraggio di versanti instabili si stanno evolvendo grazie alle potenzialità della tecnica, già ampiamente utilizzata per il monitoraggio di miniere, dighe, ghiacciai: determinazione di spostamenti con precisione millimetrica o sub-millimetrica, capacità di osservazione a distanze fino a 4 km, campo di osservazione spazialmente continuo, applicabilità come sistema di allerta, sono solo alcuni esempi di queste potenzialità. Le condizioni al contorno, come interferenza del segnale con l'atmosfera, angolo di osservazione, copertura del suolo, però ne limitano l'effettivo utilizzo, anche se rispetto alle applicazioni satellitari da cui discendono presentano innumerevoli vantaggi (Antonello et al., 2004; Bozzano et al., 2011; Catani et al., 2005; Casagli et al., 2009; Casagli et al., 2010; Castaneda et al., 2009; Delacourt et al., 2009; Herrera et al., 2009; Luzi et al., 2006; Luzi et al., 2007; Luzi et al., 2010; Martinez-Vazquez et al., 2005; Moss et al., 1999; Nico et al., 2004; Pieraccini et al., 2002; Pipia et al., 2007; Sansosti et al., 2010; Strozzi et al., 2005; Tarchi et al., 1999; Tarchi et al., 2000; Tarchi et al., 2003a; Tarchi et al., 2003b; Tarchi et al., 2009). Queste condizioni al contorno, influiscono nell'elaborazione, pesando sulla precisione e sull'accuratezza dei risultati, nonché sulla loro significatività (Corsini et al., 2010; Corsini et al., 2011a; Lauknes et al., 2010; Leva et al., 2003).

L'intento di questo contributo è innanzitutto di capire in che modo la tecnica possa essere sfruttata al massimo delle sue potenzialità, senza trascurare i limiti che la caratterizzano, in particolare in termini di variabilità dei risultati al variare delle elaborazioni. Anche se in linea teorica avere immagini distanziate temporalmente di 5-10 minuti, consentirebbe una stima ottimale degli spostamenti minimizzando i problemi di decorrelazione spazio-temporale (Pipia et al., 2005; Zebker e Villasenor, 1992), può accadere che non sia così: su immagini temporalmente troppo frequenti la variabilità introdotta dall'errore residuo nella stima degli spostamenti può "nascondere" lo spostamento stesso. Questo è tanto più vero, quanto più gli spostamenti da rilevare sono piccoli. Se si lavora su lunghe distanze di osservazione, che raggiungono il chilometro o ne sono superiori, il problema si complica ulteriormente,

in quanto maggiore è la distanza, maggiore è l'influenza delle variabili atmosferiche, la cui modellazione è ancora un problema aperto.

Lo spostamento LoS è per convenzione negativo se in avvicinamento al sensore, negativo se in allontanamento. Se il sensore viene collocato frontalmente rispetto alla frana, gli spostamenti negativi sono quelli lungo il versante.

3.2 Focalizzazione

La focalizzazione delle immagini è il primo passo che si compie per l'elaborazione delle osservazioni acquisite dallo strumento. Pertanto immagini ben focalizzate sono indispensabili per la buona riuscita del processing. La focalizzazione viene applicata sia nella direzione in range e che in quella cross-range. Nella direzione in range l'informazione deve essere focalizzata perché acquisita con tecnica SF-CW, mentre nella direzione cross range, perché acquisita con tecnica SAR.

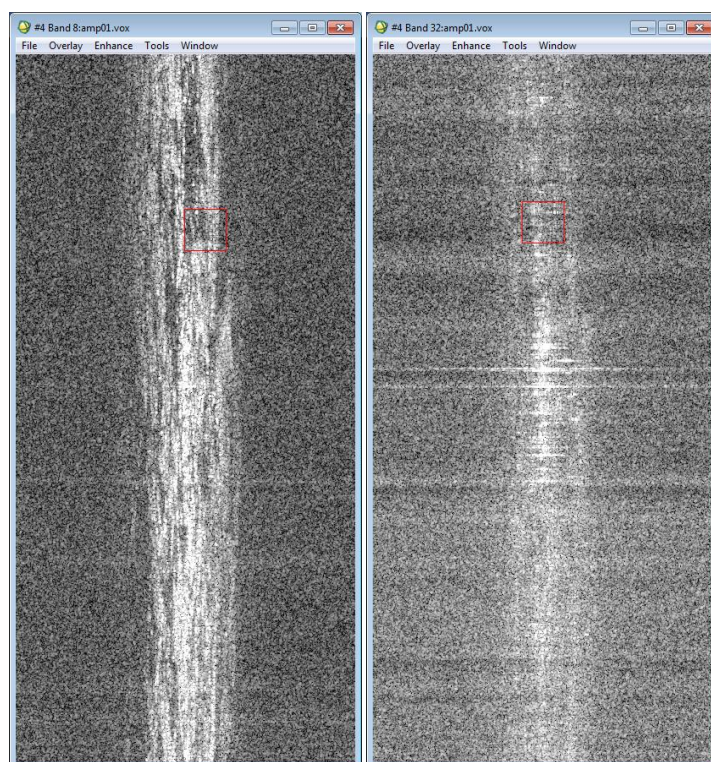


Figura 3.1: Immagini in ampiezza della stessa area, acquisite in momenti differenti. Sinistra: 04/11/2010 ore 17.42, ben focalizzata. Destra: 05/11/2010 ore 11.43, con problemi di focalizzazione. Frana di Montecagno (Ligonchio, RE).

Il processo di focalizzazione serve per concentrare in un pixel unico l'informazione relativa a una certa porzione di terreno, che in fase di acquisizione viene memorizzata in un array di pixel.

Nella fase di focalizzazione possono riscontrarsi errori se durante l'acquisizione di una singola immagine si verificano movimenti della piattaforma o dell'oggetto. Gli errori possono essere anche dovuti a cambiamenti delle condizioni atmosferiche nel corso dell'acquisizione stessa o a livelli elevati di umidità del terreno o dell'atmosfera (Figura 3.1). Lo stesso effetto di immagine sfocata si riscontra

anche in pixel adiacenti a target molto riflettenti (Figura 3.2), come corner reflector o rocce, attraverso in linee bianche (code) che si dipartono dai pixel con risposta più intensa (pixel bianchi). Errori di focalizzazione legati a movimenti della piattaforma o del target, o alle condizioni atmosferiche non sono compensabili, mentre gli errori di focalizzazione legati all'effetto di pixel adiacenti possono essere ridotti variando i parametri (Kaiser o Hamming) che fungono da filtro del segnale, proprio nel processo di focalizzazione. A volte, per ridurre gli errori di focalizzazione dati dai pixel adiacenti, si può arrivare al compromesso di ridurre l'intensità del segnale relativo a tutta l'immagine.

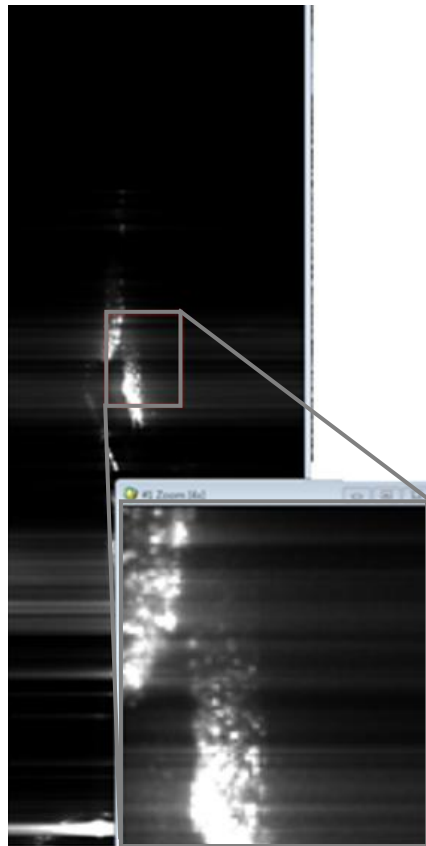


Figura 3.2: Immagine in ampiezza media (Mean Amplitude di tutte le immagini della campagna di acquisizione). I pixel bianchi sono quelli in cui il segnale di risposta è più potente. È possibile vedere strisce orizzontali bianche (code) che partono da questi pixel, per effetto dei pixel adiacenti. Frana di Romanoro (MO, Italia).

3.3 Interazione del segnale con l'atmosfera

La tecnica GB-InSAR si basa sulle osservazioni derivate da onde elettromagnetiche che si propagano attraverso un mezzo, che è l'atmosfera. Quindi, le misure sono fortemente influenzate dalle condizioni atmosferiche, in particolare da pressione e umidità relativa. L'influenza dell'atmosfera non può essere pertanto trascurata quando si compiono misure su periodi di osservazione abbastanza lunghi e su distanze elevate (qualche chilometro), ma anche all'interno dell'arco temporale di una giornata primaverile in cui si hanno evidenti fenomeni di escursione termica. L'effetto dell'interazione atmosferica con la radiazione elettromagnetica si ripercuote sulla determinazione degli spostamenti,

producendo “falsi” spostamenti. E’ quindi necessario correggere questo effetto (Iannini et al., 2009; Iannini e Monti Guarnieri, 2011; Luzi et al., 2004; Noferini et al., 2005; Pipia et al., 2006; Pipia et al., 2008), confrontando gli spostamenti dell’intera scena osservata con lo spostamento virtuale di alcuni determinati pixel. Da un punto di vista operativo è necessario, quindi che la scena osservata presenti delle zone geologicamente stabili, relativamente al periodo di osservazione, per avere punti fissi sulla base dei quali calcolare le correzioni atmosferiche e applicarle (IBIS-L controller, manual, 2008).

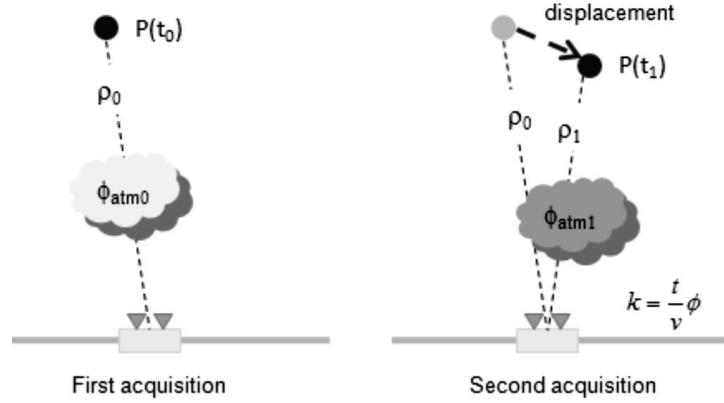


Figura 3.3: Rappresentazione semplificata alla base della tecnica interferometrica: la differenza di fase tra due immagini viene sfruttata per misurare lo spostamento dei punti osservati.

In Figura 3.3 vi è una rappresentazione semplificata del metodo di acquisizione GB-SAR. La scena (in questo caso un punto in movimento), è osservata dallo strumento in due momenti differenti (t_0 e t_1), con la stessa geometria di acquisizione e con la stessa configurazione strumentale. In questa rappresentazione semplificata, misurando la fase del punto $P(t_0)$, come esemplificato nell’immagine di sinistra, si avrebbero più contributi, quello atmosferico (φ_{atm0}), il contributo della distanza ($\varphi(\rho_0)$) e il rumore (φ_{n0}) (Grapes user manual v 2.5).

$$\varphi_o = \varphi(\rho_0) + \varphi_{atm0} + \varphi_{n0} \quad [3.1]$$

Quando, invece si calcola la differenza di fase ($\Delta\varphi$) tra le due immagini, il risultato è:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = \Delta\varphi(\rho) + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_n \quad [3.2]$$

Per rimuovere gli effetti atmosferici, è possibile seguire due approcci. Il primo si basa sulla tecnica basata sui Persistent Scatterers (PS). Il secondo prevede di definire manualmente punti di controllo (Ground Control Point -GCP-) di riferimento per il calcolo delle correzioni. Questo secondo metodo, attualmente meno utilizzato del primo, è poco efficiente se il numero di punti è esiguo rispetto all’estensione dell’intera area e se la loro distribuzione non è adeguata rispetto alle aree in movimento (Figura 3.4): considerando che l’atmosfera varia principalmente in range, i punti dovrebbero essere distribuiti uniformemente longitudinalmente alla scena, ma questo non è sempre possibile. Con la tecnica PS, basata su approccio statistico, è possibile selezionare un numero maggiore di punti garantendo, in genere, maggiore efficienza nel risultato.

Se però, nella scena acquisita non sono presenti aree stabili con un'estensione sufficiente, allora, gli effetti atmosferici verranno stimati rispetto ai punti più lenti: questo si traduce in una riduzione dell'accuratezza e della precisione del risultato e da un punto di vista dell'interpretazione degli spostamenti, è possibile parlare solo di spostamenti relativi di un punto rispetto a un altro.

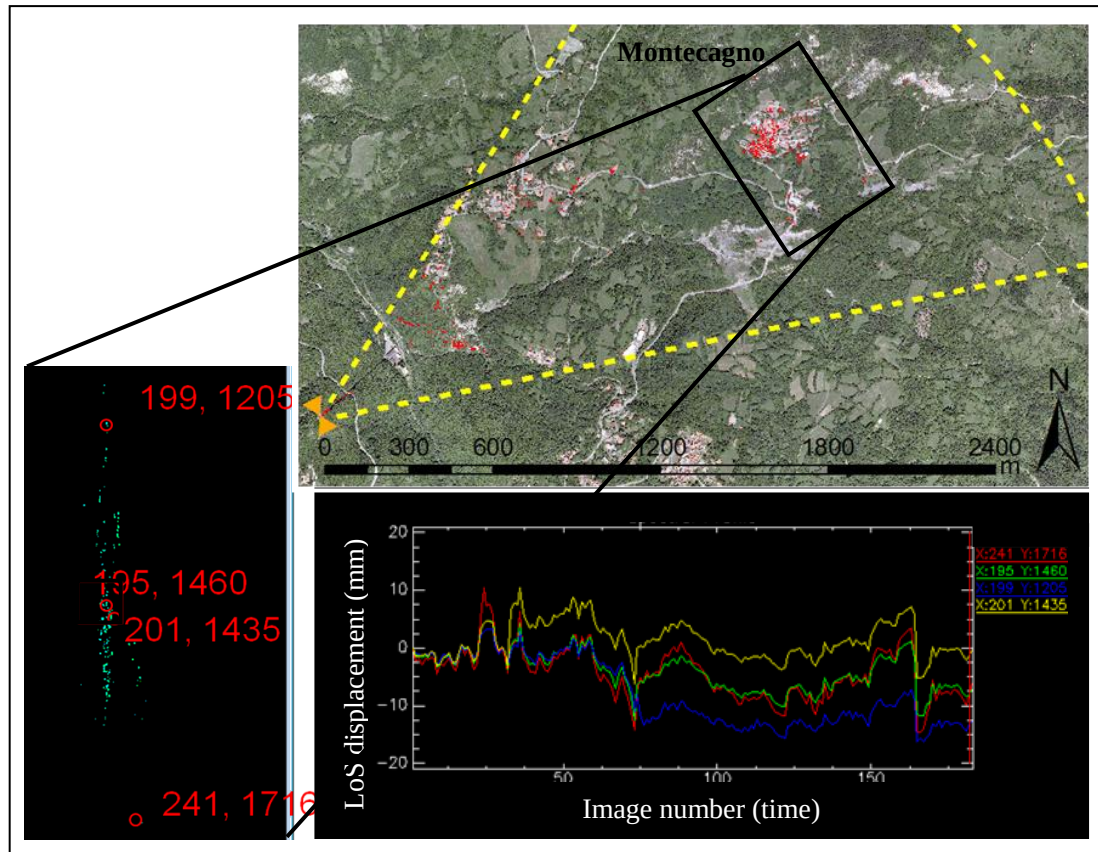


Figura 3.4: Time series con effetti atmosferici residui. Risultato NON soddisfacente. Frana di Montecagno, Ligonchio, RE.

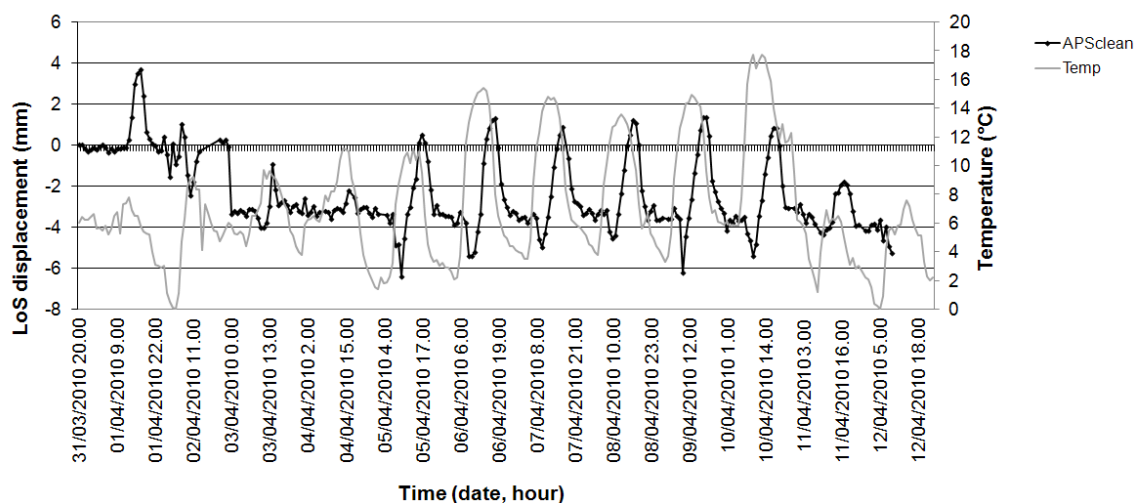


Figura 3.5: Relazione tra variazione di temperatura atmosferica (Temp) e spostamento LoS (APS clean) di un pixel appartenente al paese di Montecagno (Frana di Montecagno, Ligonchio, RE).

Talvolta può capitare che su alcuni pixel rimangano effetti residui dell'atmosfera. In Figura 3.5 è visibile una correlazione tra temperatura atmosferica e andamento dello spostamento cumulato (LoS), anche dopo la correzione degli effetti atmosferici. Questo può capitare per punti della scena con una particolare risposta al ciclo di insolazione diurna, come metalli o rocce esposte all'irradiazione solare. Sulla base della georeferenziazione della mappa di spostamento da cui è stata estratta la time series di spostamento, anche se con un po' di incertezza dovuta all'errore di georeferenziazione è molto probabile che il punto sia il campanile della Chiesa di Montecagno (copertura di rame o piombo). Gli andamenti del valore di spostamento e di temperatura sono molto simili, anche se si nota un ritardo nel picco di spostamento rispetto al picco di temperatura.

Per ipotesi, l'atmosfera viene considerata come una struttura a strati, in cui la rifrazione varia verticalmente e non orizzontalmente all'interno di uno stesso strato, considerando un numero infinito di strati orizzontali. Quindi, non c'è delay atmosferico su un terreno piatto, anche per differenti profili verticali di rifrazione. Questo non vale per zone montuose o collinari, per cui il profilo varia.

Nel caso di acquisizioni da piattaforma terrestre, è possibile ipotizzare che l'atmosfera vari linearmente o in modo quadratico lungo il piano dell'immagine. Questo piano è quello che si viene a costituire lungo la direzione di puntamento del sensore e rispetto alla linea dello scanner. Inoltre, si considerano celle di dimensioni di 300-500 m entro le quali le condizioni atmosferiche si ipotizzano costanti (Hanssen, 2001). Di norma, si ipotizza che l'atmosfera non vari trasversalmente (direzione cross-range) all'immagine, ma solo longitudinalmente (direzione in range); inoltre si considera che questa variazione sia lineare quando la distanza massima operativa è inferiore a 700-800 m, altrimenti si applica un modello quadratico. Per i casi di studio presentati, considerando che le distanze operative è sempre stato applicato il modello quadratico.

3.4 Phase unwrapping e errore di aliasing

L'immagine in fase è bidimensionale, costituita da pixel contenenti informazione di fase relativa, compresa in un range di 2π . Il problema dello srotolamento della fase (phase unwrapping) dall'intervallo $[-\pi; \pi)$ è sicuramente uno dei maggiori problemi legati all'interferometria radar (Costantini e Rosen, 1999; Davidson e Bamler, 1999; Prati et al., 1990; Xu e Cumming, 1999). Il valore assoluto di fase (unwrapped), per un pixel (i, j) è uguale al valore relativo di fase $\pm 2\pi$ in modulo (Grapes user manual v 2.5):

$$\Psi(i, j) = \varphi(i, j) + 2\pi k(i, j) \quad [3.3]$$

dove: $\Psi(i, j)$ = fase unwrapped;

$\varphi(i, j)$ = fase wrapped;

$2\pi k(i, j)$ = numero di cicli.

Assumendo che la differenza di fase tra pixel adiacenti è sempre minore di $|\pi|$, la formula seguente è valida per pixel adiacenti, in direzione x e analogamente in direzione y:

$$\Psi_x = \begin{cases} \Delta\varphi_x & \text{se } |\Delta\varphi_x| \leq \pi \\ \Delta\varphi_x - 2\pi & \text{se } \Delta\varphi_x > \pi \\ \Delta\varphi_x + 2\pi & \text{se } \Delta\varphi_x < -\pi \end{cases} \quad [2.4]$$

dove: Ψ_x = fase unwrapped;

$\varphi(i,j)$ = fase wrapped.

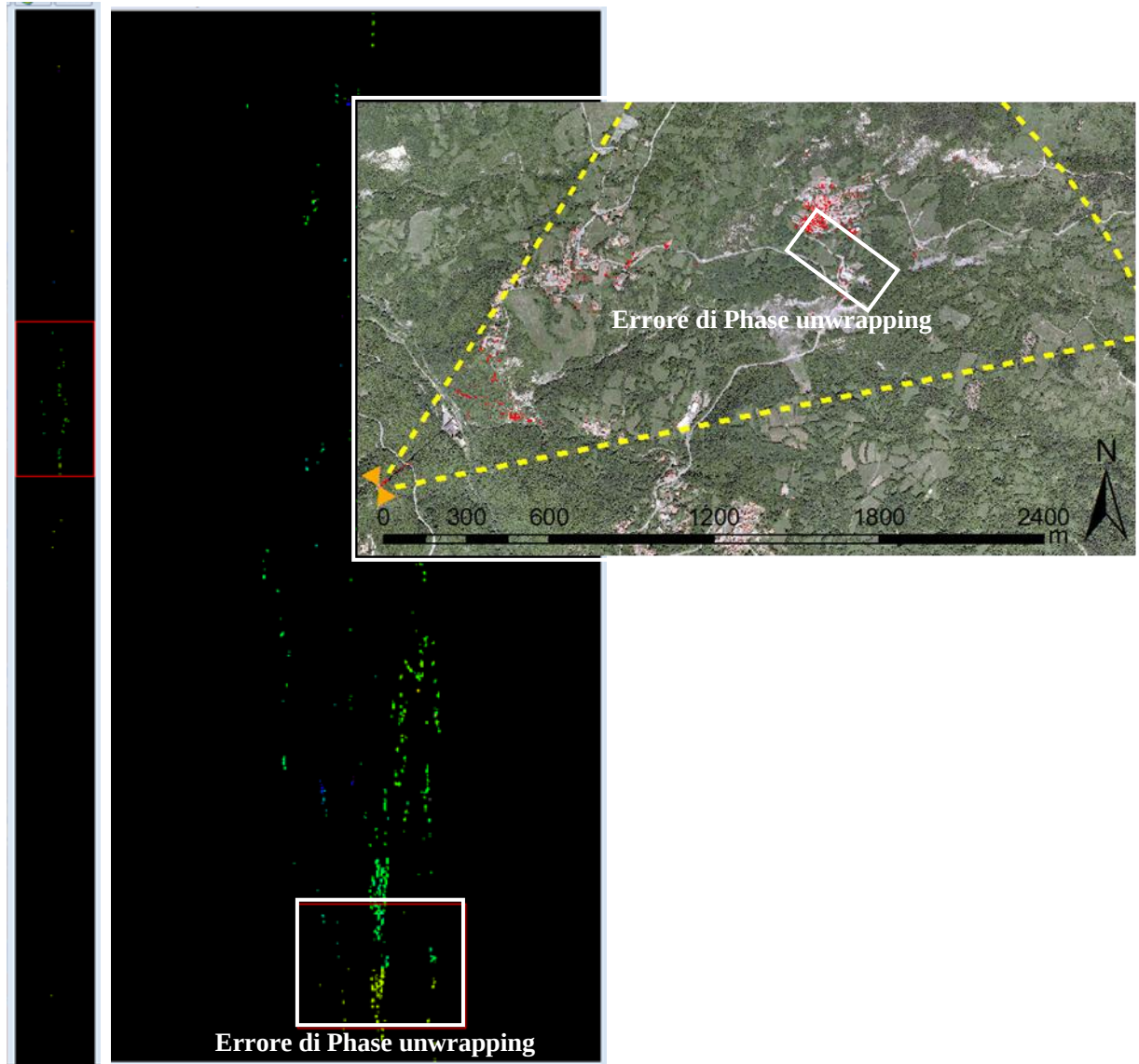


Figura 3.6: Mappa di spostamento cumulato dell'intera immagine e dettaglio, con evidenza di un effetto di errore di phase unwrapping nella zona evidenziata. Frana di Montecagno (Ligonchio, RE).

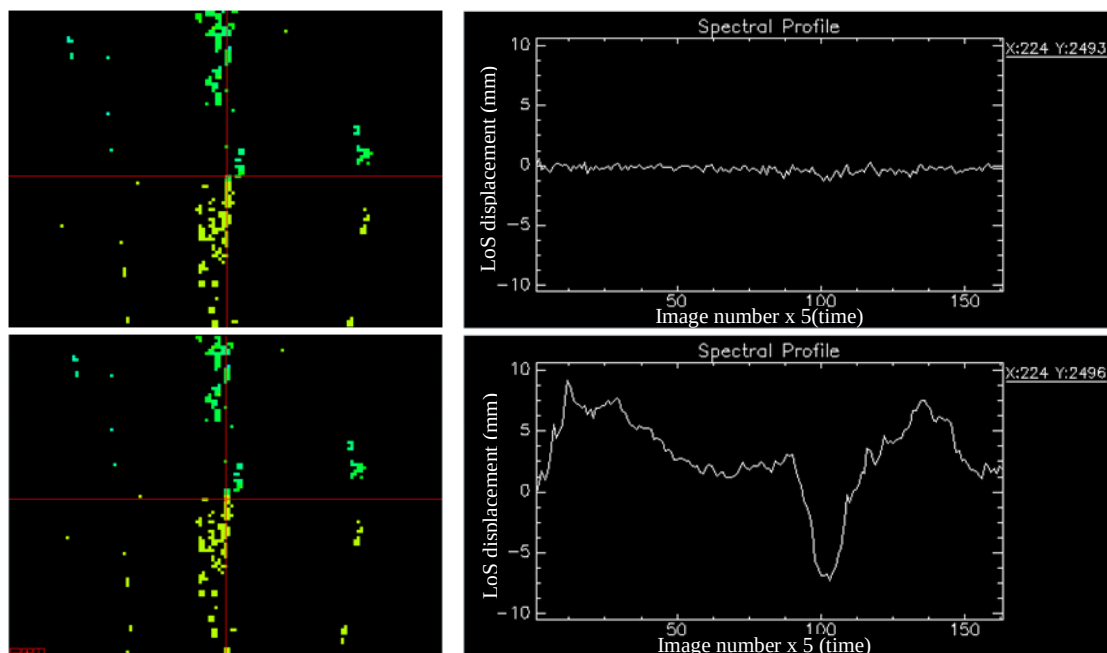


Figura 3.7: Time series di spostamento (destra) e relativi pixel a cui si riferiscono (sinistra). La serie temporale di spostamento in alto a destra indica che il pixel è fermo; la serie temporale in basso a destra, invece evidenzia errori di srotolamento della fase. Frana di Montecagno (Ligonchio, RE).

Se la differenza di fase di pixel adiacenti è maggiore di $|\pi|$, allora si verificano aliasing: non può essere sciolta un'ambiguità di modulo superiore a 2π . In genere, per risolvere questo problema, se non è dato da una singolarità legata ad un artefatto atmosferico, è necessario creare interferogrammi tra immagini acquisite con un intervallo temporale più breve. In Figura 3.6 e in Figura 3.7 l'effetto dell'errore legato al phase unwrapping è evidenziato dalla netta separazione di colore tra una zona e quella adiacente ed è evidente anche dalle time series (spostamento nel tempo) dei punti appartenenti alle due aree. Passando, infatti, dalla zona di colore verde, alla zona di colore giallo, l'andamento dello spostamento cumulato nel tempo assume un andamento non sensato.

3.5 Intensità, Rumore e Coerenza del Segnale radar

Per impostare l'elaborazione dei dati, è necessario stabilire quali sono i pixel che presentano caratteristiche tali da renderli idonei al calcolo dello spostamento. A questo scopo si possono adottare criteri differenti, basati su requisiti di:

- coerenza;
- rapporto segnale rumore (SNR);
- potenza e ampiezza dell'eco di ritorno.

Per fare questa selezione è necessario definire delle soglie, con cui scartare i punti non coerenti o con una pessima risposta in termini di rapporto segnale rumore. Viene pertanto definito quello che possiamo chiamare “set di calibrazione”, sulla base del quale fare le stime di spostamento della campagna di

misura attraverso l'elaborazione dei dati. Questa fase di selezione dei punti, prevede di utilizzare un certo numero di immagini, che possono essere tutte quelle della campagna o una sotto selezione, a seconda del tipo di elaborazione che si intende fare e del tipo di risultato che si cerca, monitoraggio di movimenti lenti, monitoraggio continuo real-time, alert system, ecc.

3.5.1 Coerenza spazio-temporale e analisi interferometrica

Uno dei requisiti indispensabili per le analisi GB-InSAR è che la immagini siano coerenti, sia nel tempo, che nello spazio. Se manca il requisito della coerenza temporale, infatti, si perdono le informazioni legate alla fase da cui è possibile estrarre i valori di spostamento. Se invece non si ha sufficiente coerenza spaziale, gli algoritmi per l'unwrapping e per la stima dell'atmosfera non sono in grado di produrre soluzioni soddisfacenti. Infatti, il rumore di fase degli interferogrammi è legato alla coerenza dei pixel nelle immagini acquisite (Hanssen, 2001).

In Figura 3.8 è possibile vedere come in un interferogramma relativo a immagini acquisite a distanza temporale di 6 ore si perda completamente ogni informazione relativa alla fase: l'immagine è un arlecchino di colori, anche sull'abitato di Montecagno, che per la natura dei materiali dovrebbe essere coerente. In casi come questi, è necessario ridurre l'intervallo temporale tra le immagini per cercare di acquistare informazioni di fase, riducendo l'effetto di decorrelazione temporale.

Nell'immagine di Figura 3.9, l'interferogramma è calcolato su un lasso di tempo di 2 giorni: appare abbastanza nitido e dalla variazione trasversale del colore della fase, si evince un possibile movimento o un artefatto atmosferico. Si ha una certa continuità di informazione in fase, anche se le immagini sono state acquisite in giornate differenti. Anche se l'interpretazione delle immagini non è sempre immediata, si nota che l'informazione in fase è presente laddove i pixel hanno risposta migliore (colori chiari, nell'immagine in ampiezza ottenuta dalle stesse immagini da cui si è calcolato l'interferogramma). Con immagini in cui la coerenza varia molto nello spazio (forte decorrelazione spaziale), un buon criterio per la definizione del se di calibrazione è fondamentale e non sempre è possibile definire una regola valida per tutti i siti e in tutte le circostanze.

In generale, è difficile stabilire una regola precisa nel selezionare le immagini da cui estrarre la selezione di punti utilizzati per le elaborazioni: lo stato della scena e l'atmosfera possono creare una imprevedibile variabilità della coerenza, anche in elementi che possiedono per loro natura una buona riflettività. In Figura 3.10, infatti, la coerenza calcolata tra immagini acquisite ad intervalli di tempo differenti ha comportamento anomalo rispetto a quello che ci si aspetterebbe: l'immagine in coerenza tra due immagini successive presenta un grado di coerenza minore rispetto all'immagine in coerenza calcolata per immagini di due giorni distinti. In immagini notturne, le condizioni atmosferiche sono più stabili, quindi l'informazione in fase è soggetta a minor variabilità relativa. In Figura 3.11, sono visualizzati interferogrammi della stessa area di immagini acquisite ad un'ora di distanza: gli interferogrammi tra immagini notturne conservano più informazione di fase. Nella stessa figura si nota anche che mediamente, interferogrammi calcolati tra immagini giornaliere, anche ad intervalli di tempo differenti (1 ora o 3 ore), mantengono circa lo stesso grado di informazione di fase.

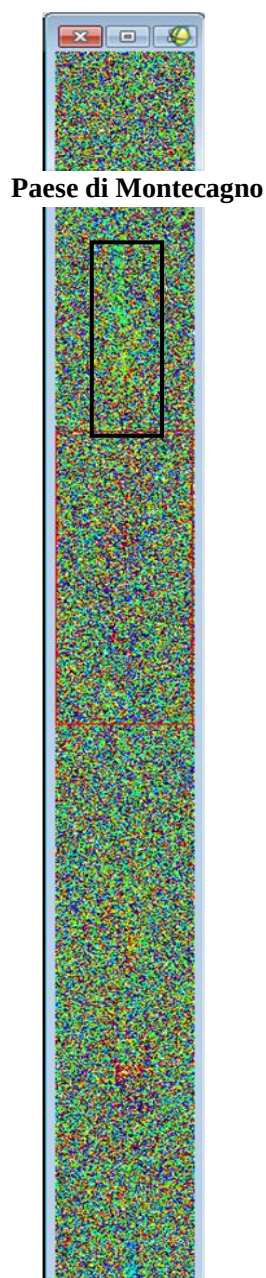


Figura 3.8: Interferogramma di immagini acquisite a distanza di 6 ore (tutta la scena). L'immagine è un arlecchino di colori: non vi è nessuna informazione di fase significativa, nemmeno sulle zone che riflettono meglio, come quelle del paese di Montecagno (Ligonchio, RE). 8 Aprile 2010, dalle 10.00 alle 16.00.

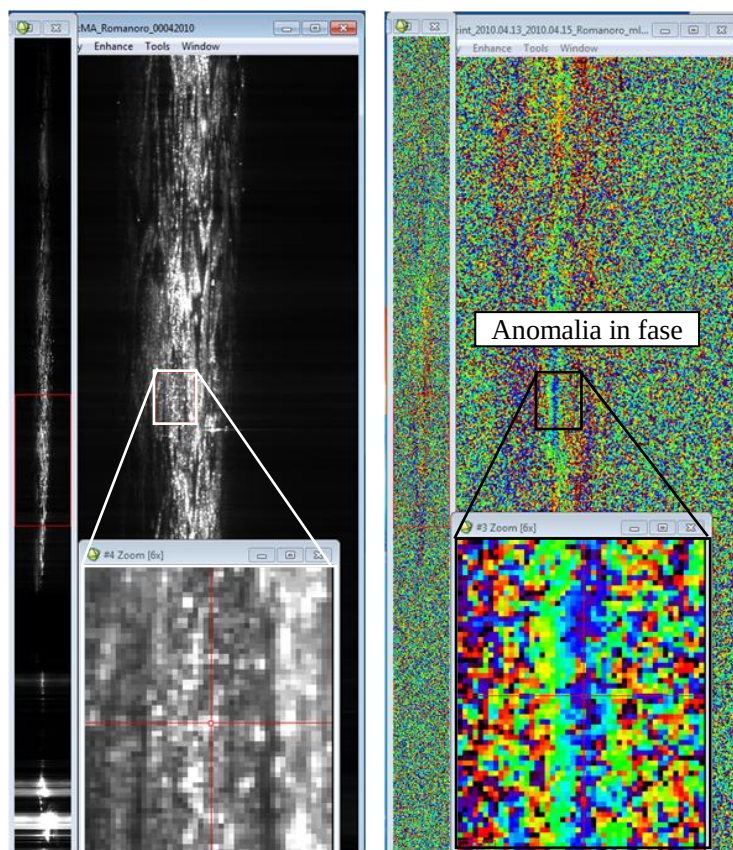


Figura 3.9: Immagine in ampiezza (sinistra) e interferogramma della stessa area (destra) relativi a immagini acquisite a distanza di tempo di due giorni. Nell'immagine di sinistra i pixel bianchi rappresentano i punti con valori di ampiezza maggiore. Nella figura di destra si osserva un'anomalia nella variazione di fase: è un possibile movimento. Frana di Romanoro (MO, Italia).

L'utilizzo di immagini notturne potrebbe essere un buon criterio per la scelta di immagini da cui selezionare i punti per le elaborazioni. Le immagini notturne sono quelle che presentano variazioni atmosferiche minori, per cui possono essere preferite ad altre.

In Figura 3.12 si confrontano interferogrammi calcolati per immagini acquisite a tre ore di distanza: dalle 18.00 alle 21.00, dalle 00.25 alle 3.00 e dalle 6.00 alle 9.00. Le variazioni di colore rappresentano le variazioni di fase: ad intervalli di tempo regolari, gli effetti atmosferici producono variazioni sensibili dei valori di fase all'interno di una stessa immagine. In Figura 3.13 che riporta interferogrammi calcolati tra immagini acquisite sempre a distanza di tre ore, nell'immagine all'estrema destra, vi è una zona con un'anomalia nella variazione trasversale della fase. Questa variazione trasversale della fase, potrebbe indicare spostamento o semplicemente un effetto atmosferico locale.

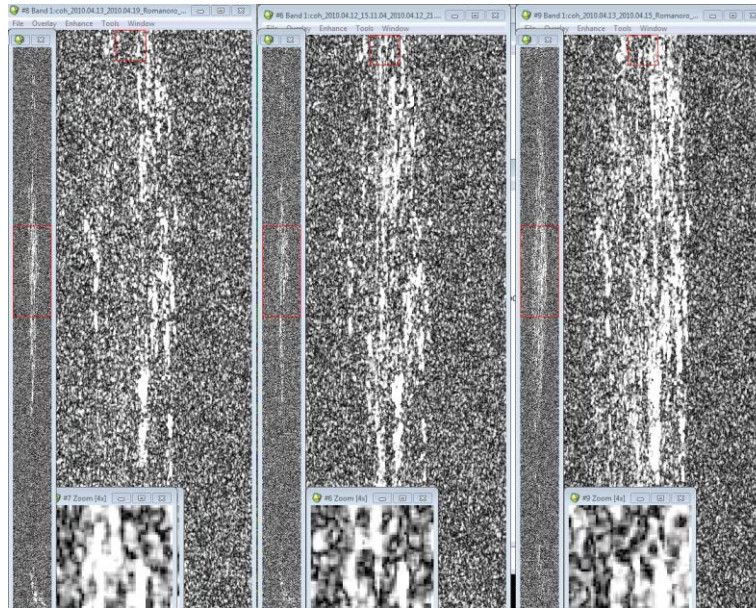


Figura 3.10: Confronto di immagini in coerenza, con coerenza calcolata tra immagini acquisite ad intervalli temporali diversi: (da sinistra) Δt = tutto il periodo, Δt = due immagini consecutive e Δt = due giorni. I pixel bianchi sono i pixel più coerenti: più pixel bianchi sono presenti, maggiore è la coerenza. Frana di Romanoro (MO, Italia).

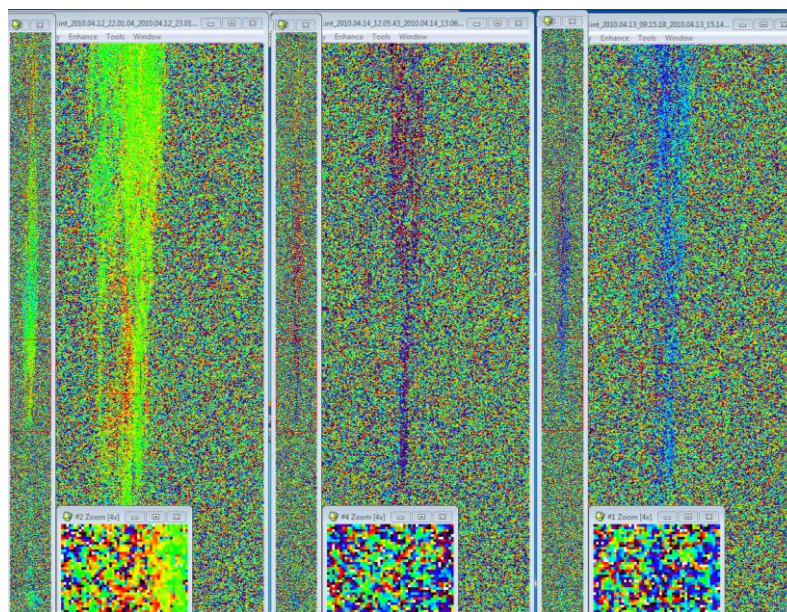


Figura 3.11: Interferogrammi della stessa area, calcolati tra immagini acquisite a intervalli di tempo differenti: da sinistra) Δt = 1 ora dalle 22.00 alle 23.00, Δt = 1 ora dalle 12.00 alle 13.00, Δt = 6 ore dalle 9.00 alle 15.00. L'interferogramma notturno conserva più informazione di fase rispetto agli altri interferogrammi. Frana di Romanoro (MO, Italia).

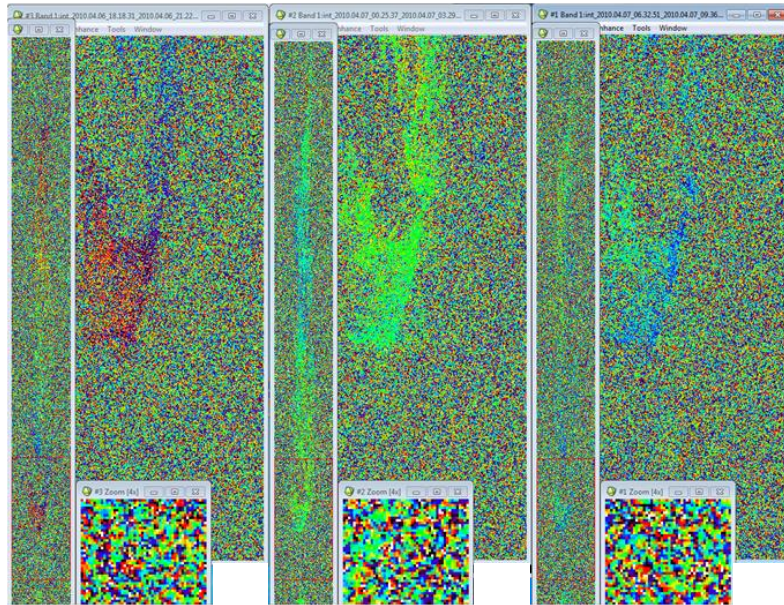


Figura 3.12: Confronto di interferogrammi calcolati per immagini acquisite a 3 ore di distanza: (da sinistra) 6 Aprile 2010 (dalle 18.00 alle 21.00), 7 Aprile 2010 (dalle 00.25 alle 3.00), 7 Aprile 2010 (dalle 6.00 alle 9.00). Le variazioni di colore rappresentano le variazioni di fase: ad intervalli di tempo regolari, gli effetti atmosferici indicano apprezzabili variazioni longitudinali dei valori di fase in una stessa scena.

Frana di Montecagno (Ligonchio, RE, Italia).

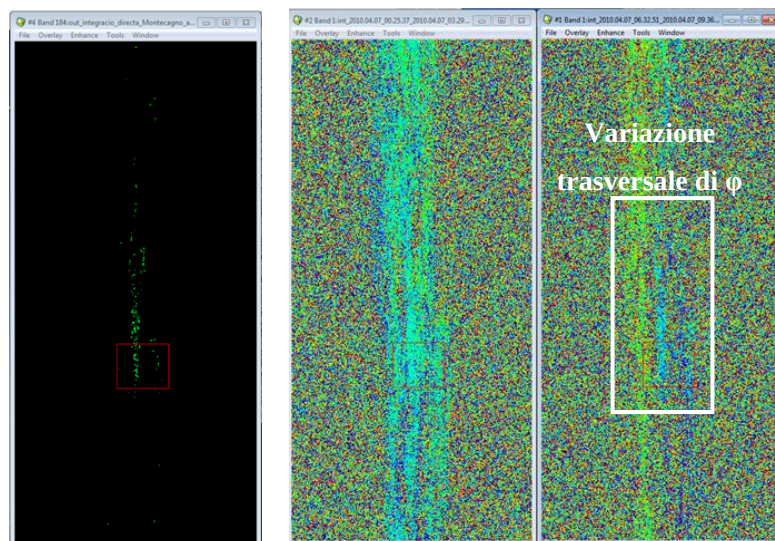


Figura 3.13: Da sinistra, mappa di spostamento cumulato, interferogramma calcolato tra immagini acquisite a distanza di tre ore, 7 Aprile 2010 (dalle 00.25 alle 3.00) e 7 Aprile 2010 (dalle 6.00 alle 9.00). Nell'immagine all'estrema destra, vi è una zona con un'anomalia nella variazione trasversale della fase (verde-azzurro-blu) che potrebbe indicare spostamento o semplicemente un effetto atmosferico locale.

Frana di Montecagno (Ligonchio, RE, Italia).

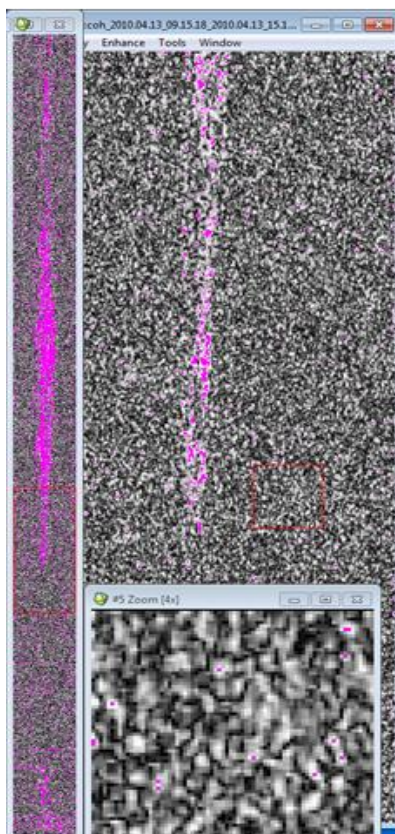


Figura 3.14: Immagine in coerenza. I pixel (46156) in magenta sono quelli con coerenza > 0.8 . E' importante scegliere la giusta soglia di coerenza per dare continuità spaziale, evitando di introdurre punti rumorosi e sparsi. Frana di Romanoro (MO, Italia).

Considerando che la coerenza è un valore adimensionale compreso tra 0 e 1, in cui 1 indica la massima coerenza, il giusto compromesso tra continuità spaziale e coerenza temporale, nello studio dei versanti instabili, si ottiene con soglie di coerenza di circa 0.8. In alcuni casi, però potrebbe essere conveniente abbassare tale valore di soglia per cercare di ottenere più continuità spaziale necessaria a garantire sufficiente affidabilità degli algoritmi di processing. In Figura 3.14, i punti con coerenza ≥ 0.8 (color magenta) sono eccessivamente dispersi. In questo caso la soglia dovrebbe essere alzata per ridurre l'eccessiva dispersione dei punti coerenti sull'immagine.

3.5.2 Ampiezza Media (MA), Dispersione di Ampiezza (DA) e coerenza spazio-temporale

Uno dei criteri più frequentemente utilizzati per la selezione dei punti si basa su analisi di coerenza, ma è possibile utilizzare altri criteri, come per esempio quello che si basa sull'intensità del segnale di risposta. In Figura 3.15 e Figura 3.17, con un'interfaccia differente da quella utilizzata fino ad ora, vengono presentate le immagini in coerenza derivate dall'applicazione di diverse soglie. Con questo tipo di interfaccia, si lavora sempre su immagini in coordinate locali (x,y), ma di cui si possono selezionare sotto aree. In Figura 3.15, sono rappresentate immagini relative alla Frana di Romanoro (MO, Italia) che riportano valori medi di coerenza calcolati per 30 immagini (le prima 30 della campagna). Si sono

considerate le prime 30 immagini della campagna, studiano il problema della selezione di punti nell'ottica di un processamento in near-real time, sfruttando la tecnica GB-InSAR come sistema di allerta per la gestione delle emergenza. Applicando differenti soglie di coerenza, mano a mano che aumenta il valore della soglia stessa (criterio più selettivo), il numero di punti selezionati diminuisce.

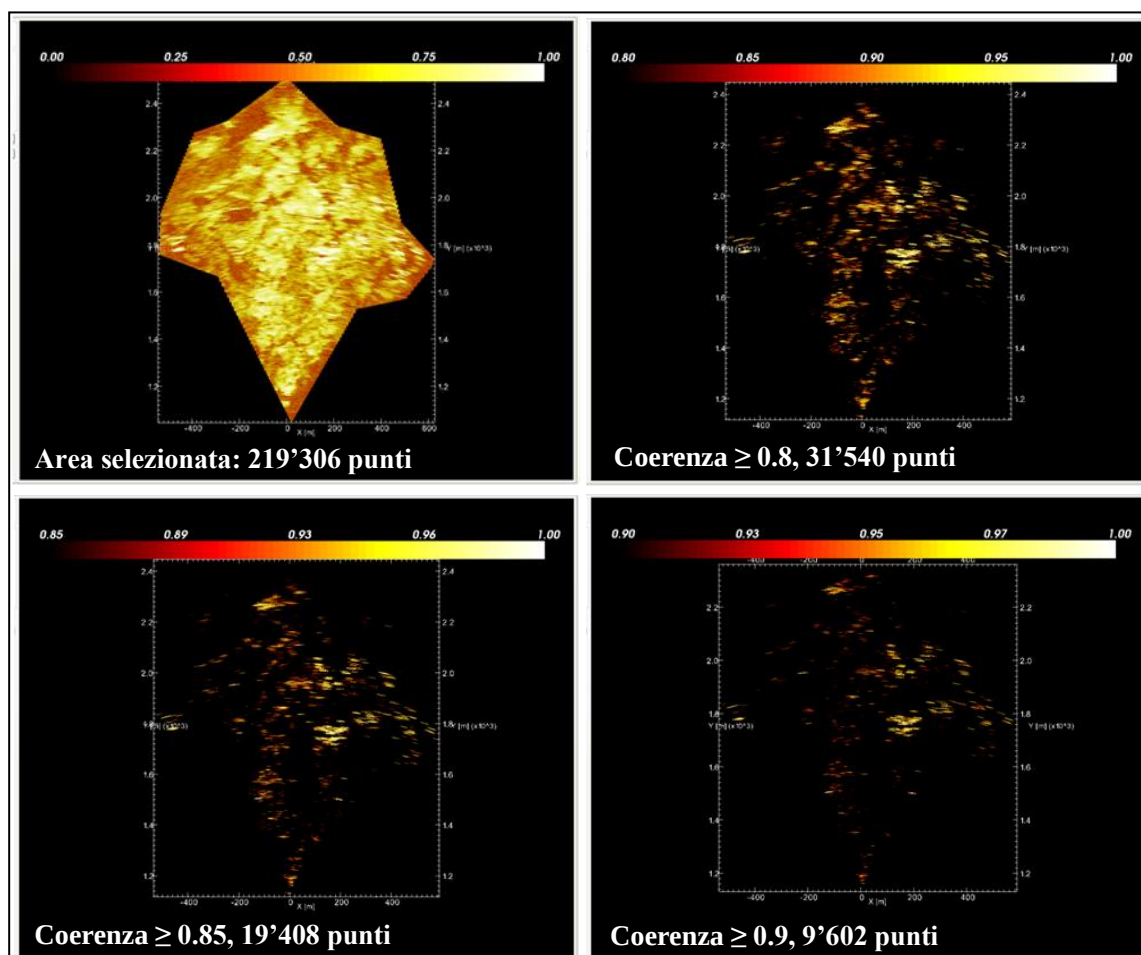


Figura 3.15: Variazione del numero di punti selezionati in funzione della soglia di coerenza. Il numero di punti si riduce drasticamente passando dalla soglia di 0.8 alla soglia 0.9. Frana di Romanoro (MO, Italia).

In Figura 3.16, sono riportate le mappe dei punti selezionati con soglia di coerenza 0.85 nel sistema di riferimento immagine e nel sistema di riferimento cartografico della Regione Emilia Romagna UTM* ED50 32N, per la Frana di Romanoro (MO, Italia). La distribuzione dei punti è abbastanza omogenea sulla scena e viene garantita una certa continuità spaziale.

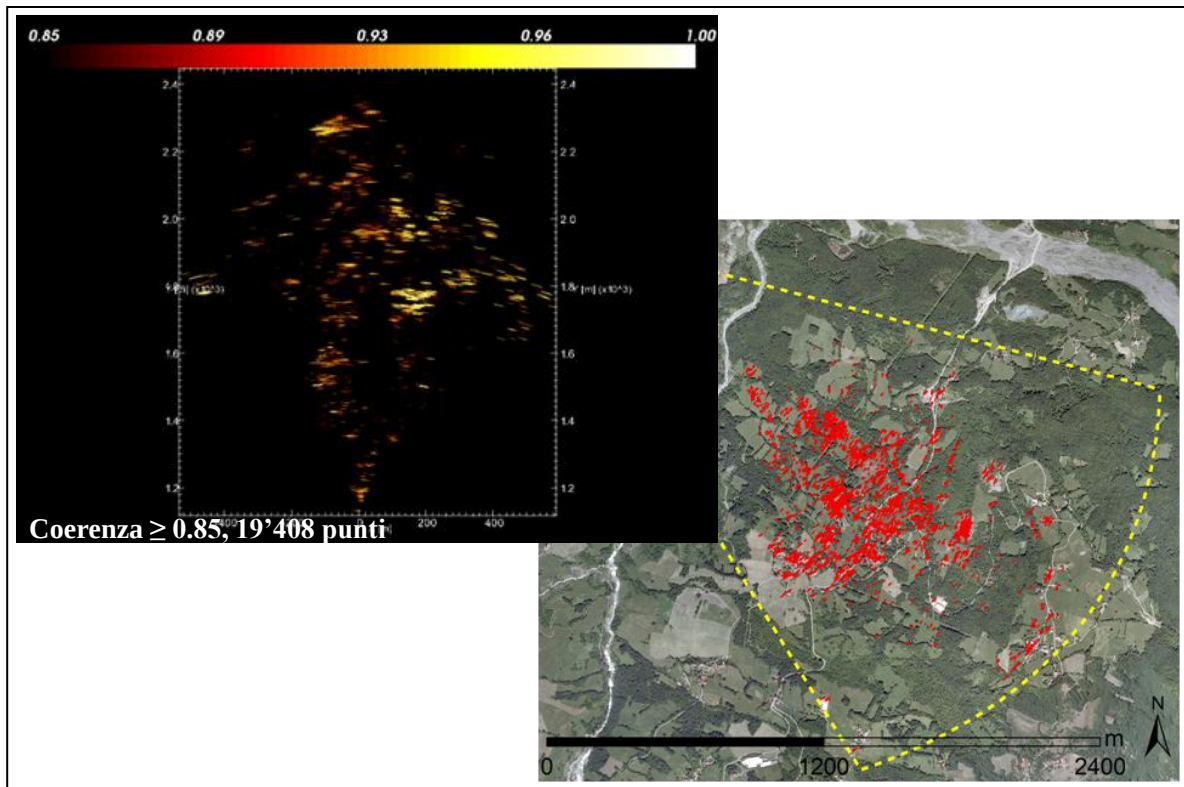


Figura 3.16: Mappa di coerenza [0.85, 1] nel sistema di riferimento cartesiano (sinistra) e georeferenziazione dei punti selezionati nel sistema di riferimento UTM* ED50 32N (destra). Frana di Romanoro, MO, Italia.

Per la Frana di Collagna (RE, Italia), la zona oggetto di monitoraggio è costituita da pareti e torri in roccia, di conseguenza è abbastanza evidente il fenomeno dei pixel adiacenti, anche alla distanza di osservazione di 1 km. Per ridurre le code, in fase di focalizzazione sono stati applicati filtri più restrittivi (Kaiser, $K = 4$) rispetto a quelli comunemente usati (Kaiser = 6): come illustrato in Figura 3.17, il numero dei punti selezionati diminuisce e si riduce anche l'effetto delle code.

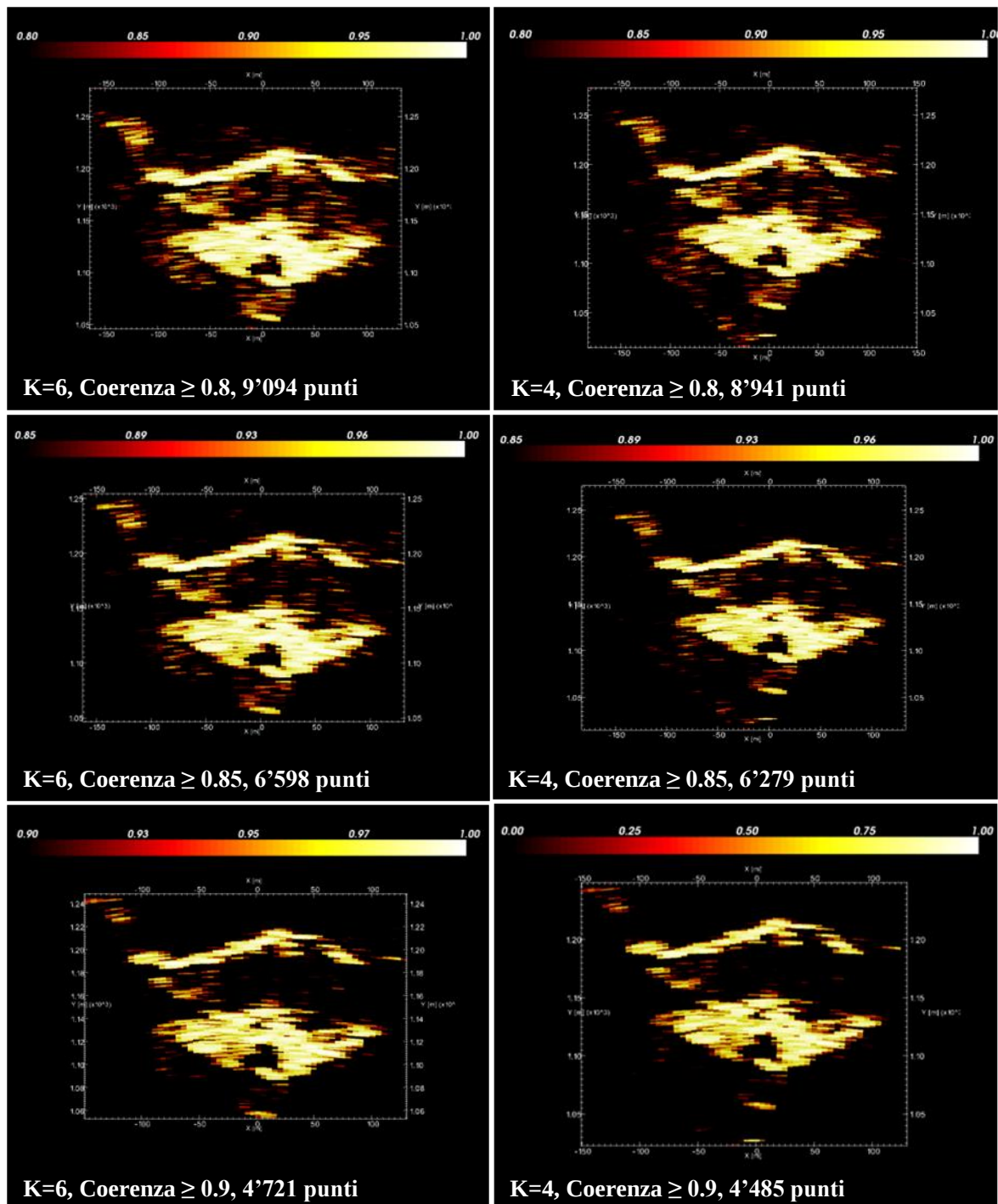


Figura 3.17: Variazione del numero di punti selezionati in funzione della soglia di coerenza con filtro di focalizzazione Kaiser = 6, oppure Kaiser = 4. Il numero di punti si riduce (dai 20'184 disponibili) applicando un filtro di focalizzazione più selettivo, perché si riduce l'effetto sui pixel adiacenti. Frana di Collagna (RE, Italia).

Secondo il criterio dell'ampiezza, i pixel vengono selezionati in funzione del valore di Dispersione di Ampiezza (DA) rispetto al valore Medio (MA). La dispersione di ampiezza varia tra 0 (dispersione

minima) e 1 (dispersione massima): più i valori di dispersione sono bassi, migliore è la risposta in ampiezza. I valori più comunemente usati come soglia sono dell'ordine di 0.2, 0.3.

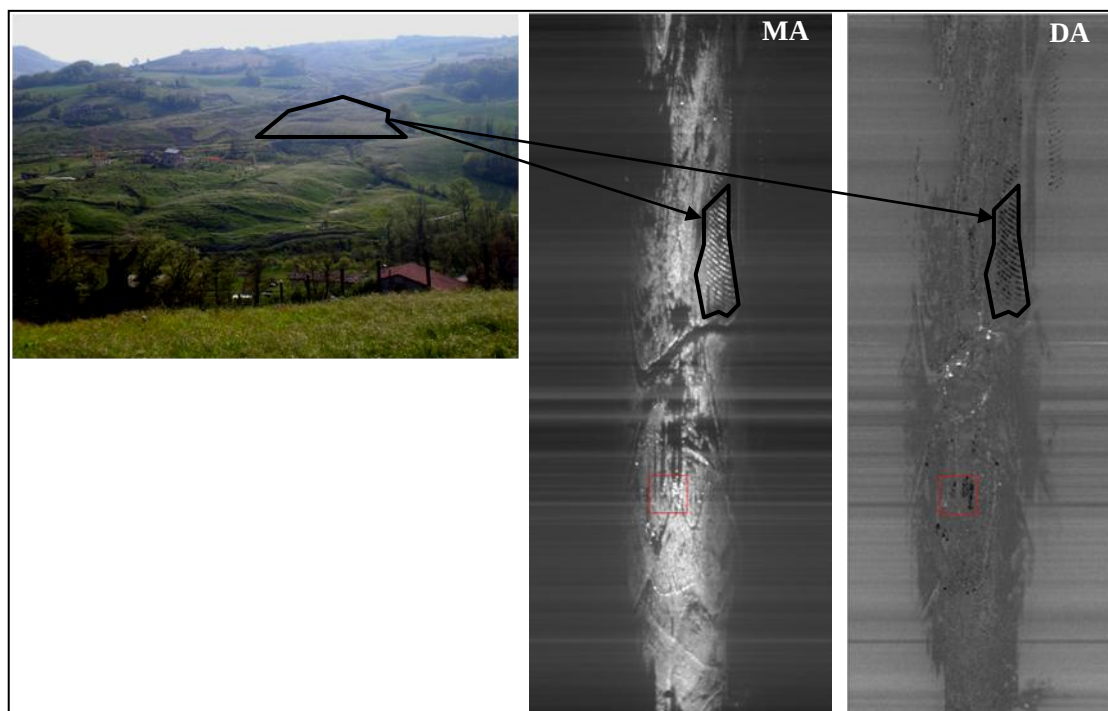


Figura 3.18: Foto dell'area monitorata (sinistra), e dettaglio delle immagini MA(centro) e DA (destra) relative a tutte le acquisizioni della campagna. I valori di ampiezza più alti sono in bianco (sinistra), mentre quelli con dispersione di ampiezza più contenuta (destra) sono in nero. Frana di Fravica (Pianello Val Tidone, PC).

In Figura 3.18 si evidenzia che la scena osservata è coperta da vigneti e da campi coltivati. I pali di vigneti e i fili di ferro degli impianti fanno sì che i filari della vigna siano ben identificabili nell'immagine acquisita, grazie all'elevata intensità del segnale di risposta che li caratterizza (area 1 e area 2, in Figura 3.19). Con valori di dispersione $[0, 0.3]$ comunemente usati per lo studio dei versanti instabili, ma anche ampliando la selezione a valori $[0, 0.4]$ i pixel selezionati sono praticamente tutti relativi alla superficie vitata, mentre vi è assenza di copertura dell'area in frana, ben visibile nell'immagine di Google Earth (Figura 3.20). Questo criterio di selezione, applicato con fattore di focalizzazione Kaiser, $K=6$, può essere utilizzato per il GB-InSAR qualora la copertura della scena indagata sia abbastanza uniforme senza elementi che forniscono picchi di risposta del segnale: la risposta di questi elementi oscura quella più debole, ma potenzialmente efficace degli elementi limitrofi, come per esempio il paese di Fravica (Pianello Val Tidone, PC).

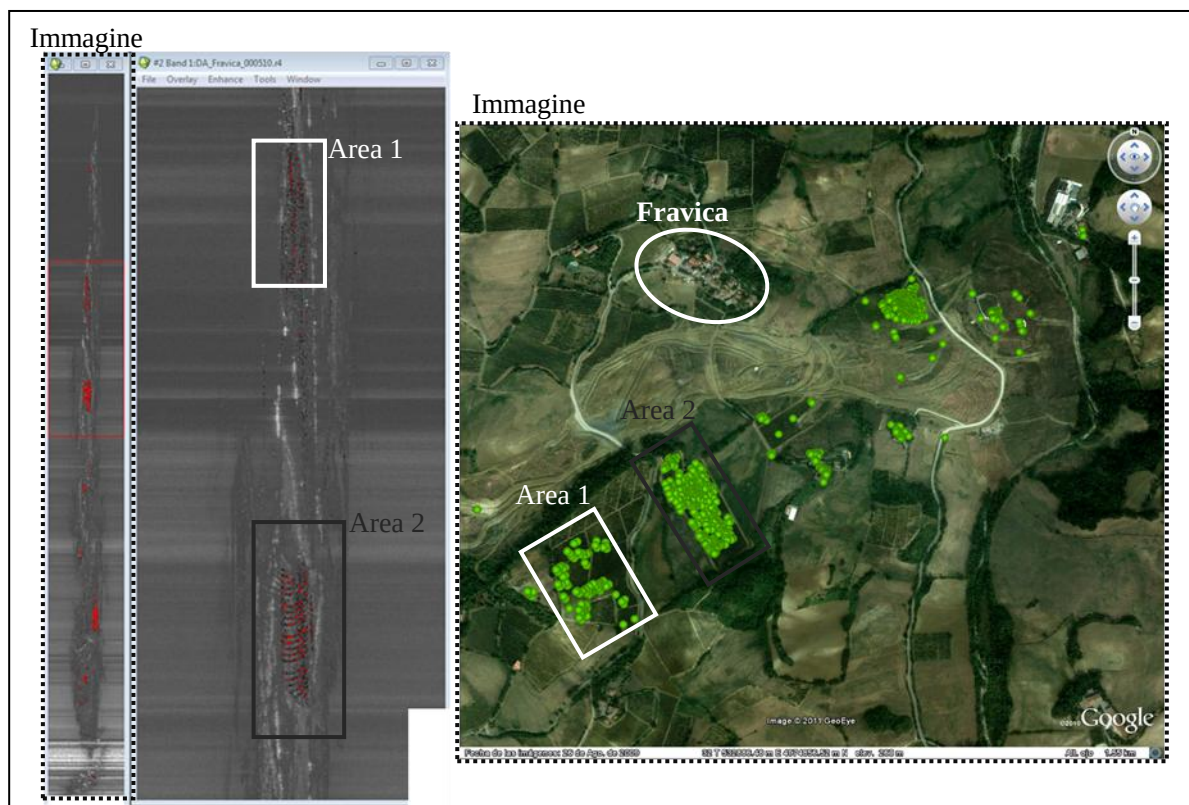


Figura 3.19: Mappe con distribuzione dei “punti buoni”. (Sinistra) I pixel in rosso rappresentano i punti con dispersione rispetto all’ampiezza media $DA = [0.0, 0.3]$ (1295 punti). (Destra) Punti con $DA = [0.0, 0.3]$, georeferenziati in Google Earth. Frana di Fravica (Pianello Val Tidone, PC).

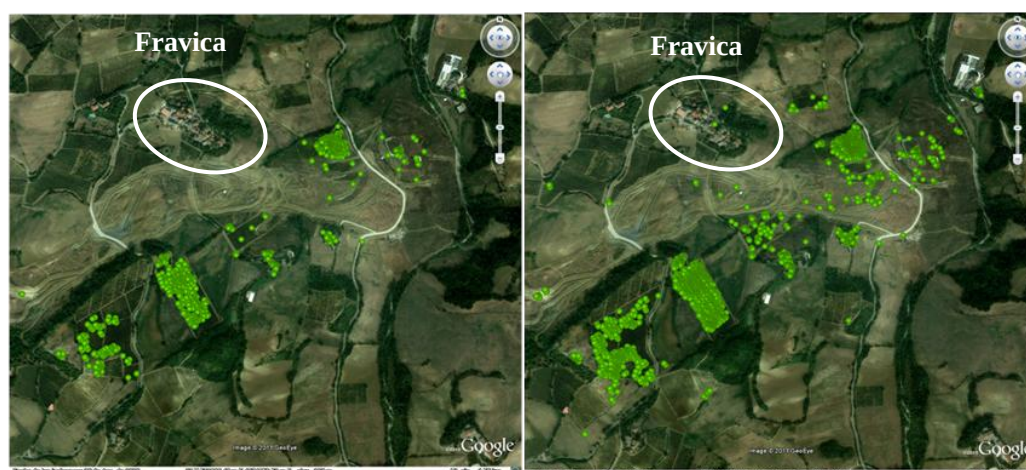


Figura 3.20: Georeferenziazione in Google Earth dei punti con $DA = 0.0-0.3$ (sinistra) e $DA = 0.0-0.4$ (destra): anche aumentando la soglia il numero di punti non aumenta sensibilmente e in modo significativo. Frana di Fravica (Pianello Val Tidone, PC)

Per questo caso applicativo la selezione dei punti con criterio di coerenza (Figura 3.21) è analoga a quella risultante da selezione secondo il criterio di DA. Il criterio di selezione attraverso dispersione di ampiezza rispetto al valore MA di tutte le immagini della campagna è però leggermente più selettivo

rispetto all'utilizzo del valore di coerenza. Questo viene confermato anche per il caso di studio della Frana di Romanoro (MO, Italia) (Figura 3.22), anche se in modo meno evidente.

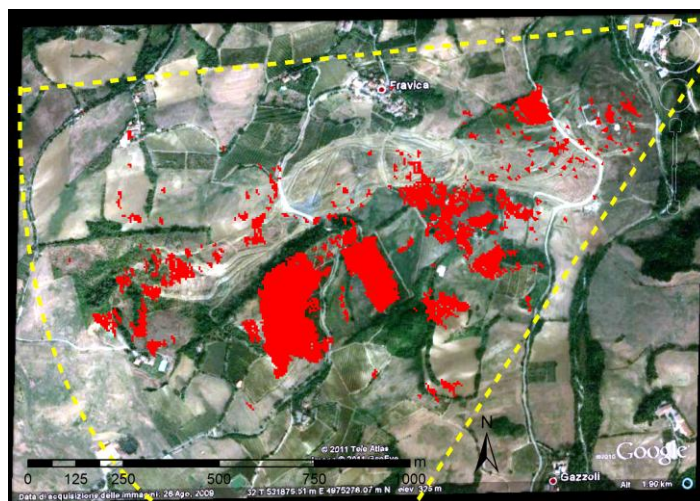


Figura 3.21: Mappa con distribuzione dei punti con coerenza = [0.7, 1]. Frana di Fravica (Pianello Val Tidone, PC).

Per la Frana di Romanoro, per cercare una distribuzione spaziale abbastanza omogenea, sono state utilizzate due soglie di dispersione di ampiezza, $DA = 0.3$ e $DA = 0.45$, comprendendo rispettivamente valori di $DA = [0, 0.3]$ e $DA = [0, 0.45]$. In Figura 3.23 a sinistra, sono riportate due immagini di dettaglio della stessa area, che riportano, in coordinate immagine, i punti con $DA \leq 0.3$ e $DA \leq 0.45$. Inoltre, a destra, in alto, è rappresentata una mappa georeferenziata dei punti con dispersione di ampiezza $DA \leq 0.3$, nel sistema cartografico ufficiale dalla Regione Emilia Romagna. Nella stessa figura si ha anche una foto dello strumento e dell'area illuminata (a destra, in basso). Il numero di punti selezionato con $DA = [0, 0.3]$ è di 1'725, mentre con $DA = [0, 0.45]$ è di 14'146: si ha una differenza sostanziale nel numero, che chiaramente influisce anche sulla distribuzione spaziale. Allargando l'intervallo di selezione si ha un incremento del numero di punti, con il rischio, però, di introdurre punti eccessivamente “rumorosi” che possono compromettere il risultato del calcolo di spostamento.

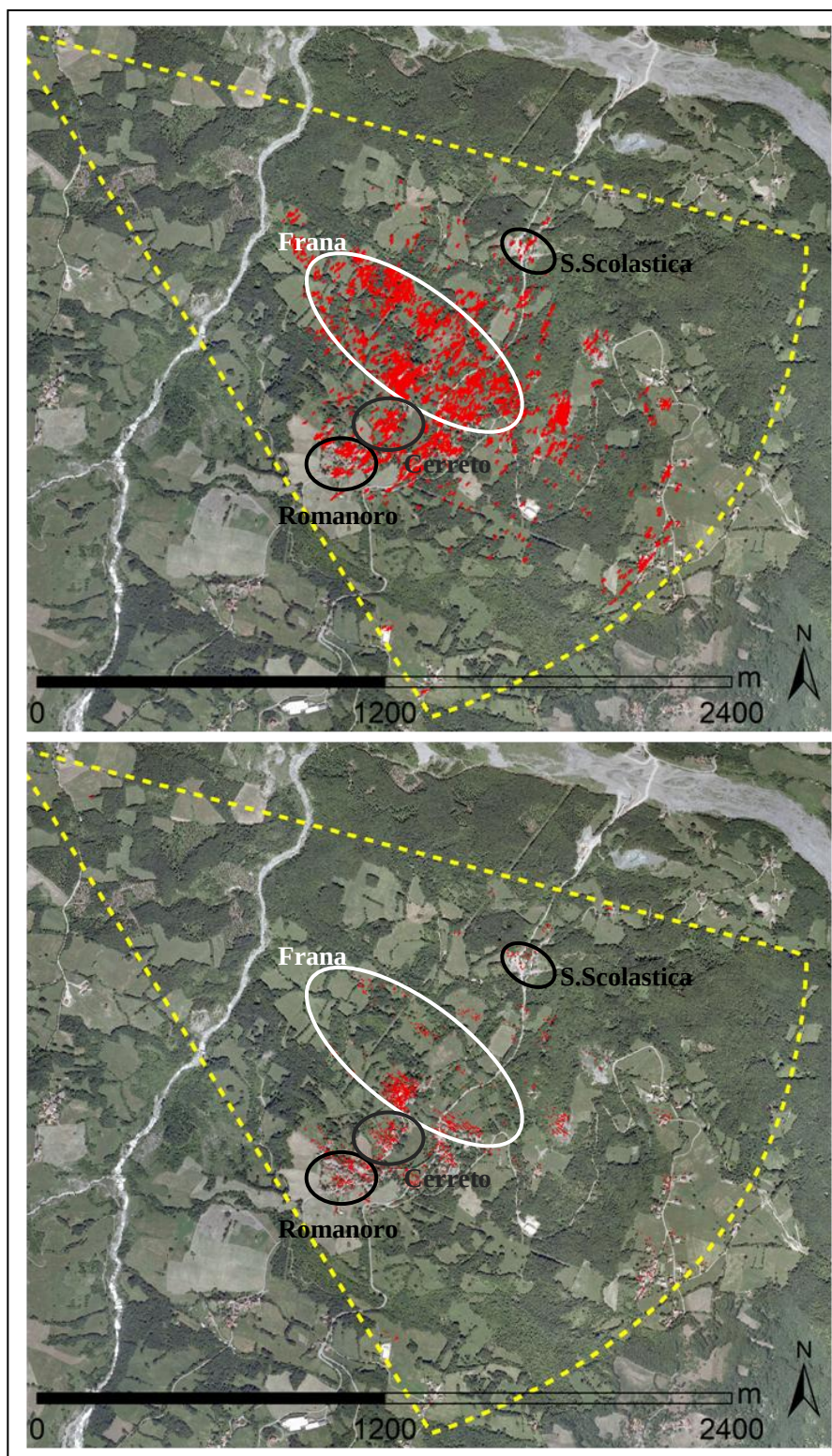


Figura 3.22: Mappe con distribuzione dei punti selezionati con criterio di coerenza (in alto, punti con coerenza = $[0.85, 1]$) e DA (in basso, punti con DA = $[0, 0.3]$). Frana di Romanoro (MO, Italia).

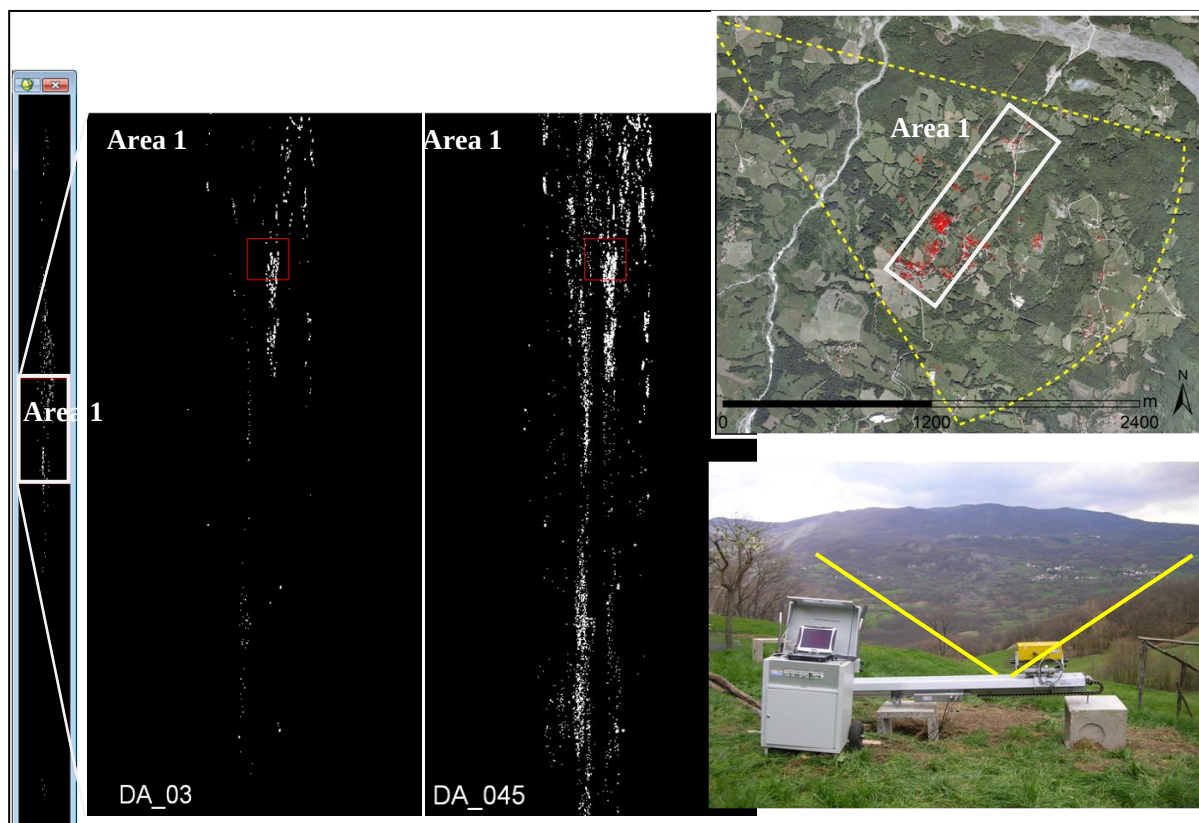


Figura 3.23: Selezione dei punti (colore bianco) con criterio di dispersione di ampiezza con valori $DA = [0,0.3]$ (1'725 punti) e $DA = [0,0.45]$ (14'146 punti) nel sistema di riferimento immagine, mappa dei punti con $DA = [0,0.3]$ georeferenziata nel sistema di riferimento della Regione Emilia Romagna e foto dell'installazione rivolta verso l'area illuminata. Frana di Romanoro, MO, Italia.

L'estensione della copertura vegetativa è considerevole, ma la distribuzione delle aree stabili è abbastanza favorevole, anche se non ideale: i paesi di Romanoro e S. Scolastica, ipotizzati stabili, sono adiacenti all'area in movimento; lo stesso paese di Cerreto, di cui si vuole studiare il comportamento, è vicino al paese di Romanoro. La distribuzione spaziale dei punti coerenti anche se non ottimale, potrebbe essere in grado di garantire risultati di spostamento sufficientemente affidabili per le zone immediatamente adiacenti a Romanoro e S. Scolastica. Man mano che si scende verso valle o si sale verso monte, però, si avranno risultati di spostamento più rumorosi: allontanandosi dalle zone stabili la stima dei parametri atmosferici e anche il phase unwrapping diventano meno robusti. Verso valle si ha completa assenza di elementi in grado di fornire una buona risposta al segnale, mentre verso monte sono presenti manufatti come abitazioni, che però sono molto lontani (circa 3 km dal sensore) e separati dalle altre aree da una fascia vegetata incoerente nel tempo.

3.6 Elaborazione dati: approccio Permanent Scatterers (PS) e selezione di Ground Control Point (GCP) per la determinazione dello spostamento

Per l'elaborazione dei dati vengono applicate due differenti strategie, una basata sulla tecnica PS e una sulla selezione di GCP utili allo srotolamento della fase ed anche per la stima dell'atmosfera (Costantini e Rosen, 1999; Ferretti et al., 2001). Con il primo approccio viene utilizzato un set di calibrazione definito sulla base del criterio di coerenza (prime 30 immagini acquisite, coerenza ≥ 0.85), mentre con il secondo viene utilizzato un set di calibrazione definito con dispersione di ampiezza ($DA = [0, 0.3]$ e poi, utilizzando gli stessi criteri di elaborazione il set di calibrazione con $DA = [0, 0.45]$).

3.6.1 Risultati dell'elaborazione con approccio Permanent Scatterers

L'approccio di elaborazione con tecnica PS è stato utilizzato per simulare il monitoraggio in tempo reale del versante. Definito il set di calibrazione, le immagini sono state elaborate con Block Size (BS) di 40 e con Result Update Time (RUT) di 1; le mappe di spostamento sono state riproiettate su un DTM con passo della griglia di 5 m. I risultati di spostamento così ottenuti sono poi stati esportati per essere inseriti in un GIS (Geographic Information System) (Figura 3.24). Di alcuni punti sono state anche estratte time series di spostamento, che sono state graficate in Figura 3.25 e Figura 3.26. Gli spostamenti negativi indicano un movimento lungo il versante: alcuni punti come il PS2 e il PS4 hanno subito movimenti di oltre 5 cm durante il periodo di monitoraggio. Altri punti come i PS1, PS5, PS11, sono soggetti a spostamenti meno importanti, ma comunque di una certa entità (1-2 cm): le time series di spostamento non sono particolarmente rumorose, pertanto lo spostamento rilevato sembra significativo. Il punto PS12, manifesta uno spostamento abbastanza consistente, anche se la serie temporale è un po' rumorosa. Per il PS13, invece, dato il movimento (positivo) in allontanamento dal sensore, l'ipotesi è che tale andamento sia legato a pessima stima della componente atmosferica della fase o ad un problema di phase unwrapping, ma non si evidenzia aliasing.

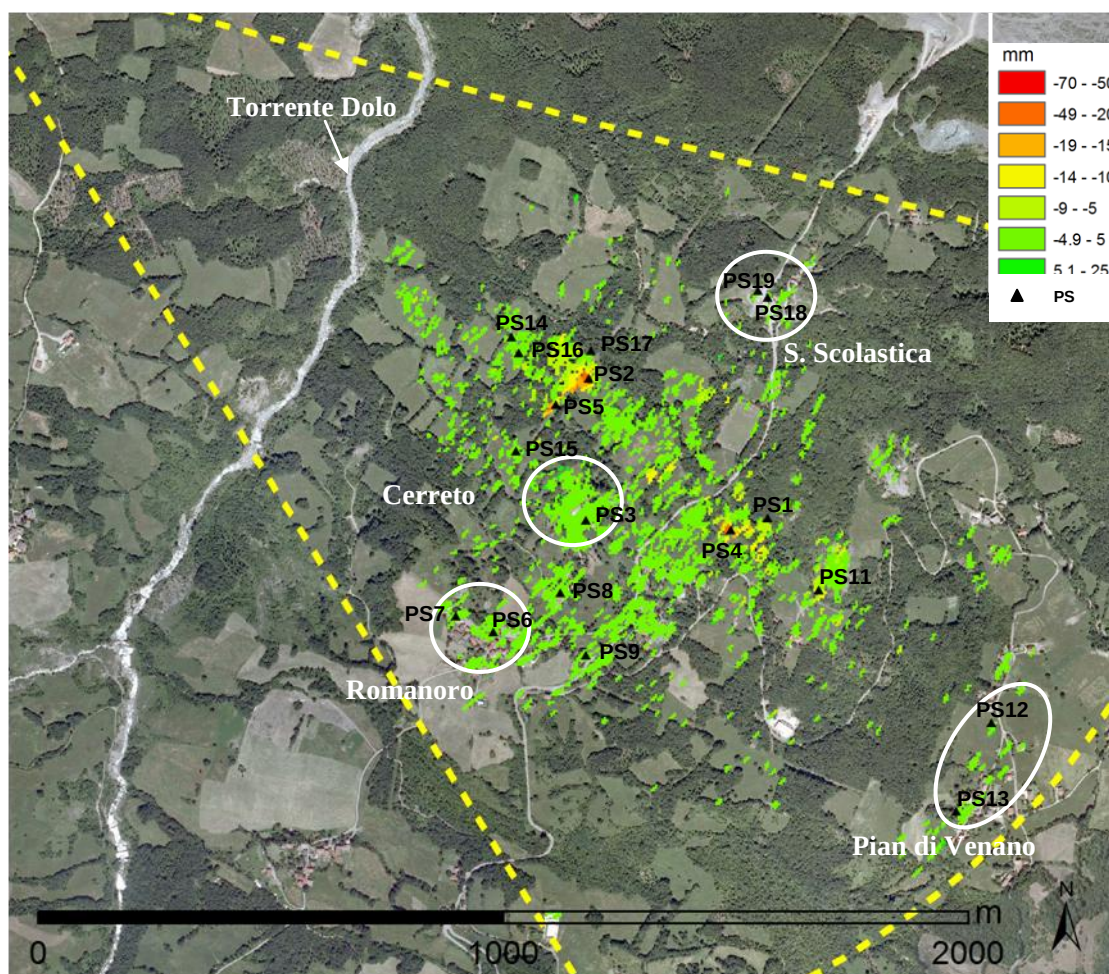


Figura 3.24: Mappa di spostamento georeferenziata (UTM* ED50 32N) e localizzazione di alcuni PS.
Frana di Romanoro, MO, Italia.

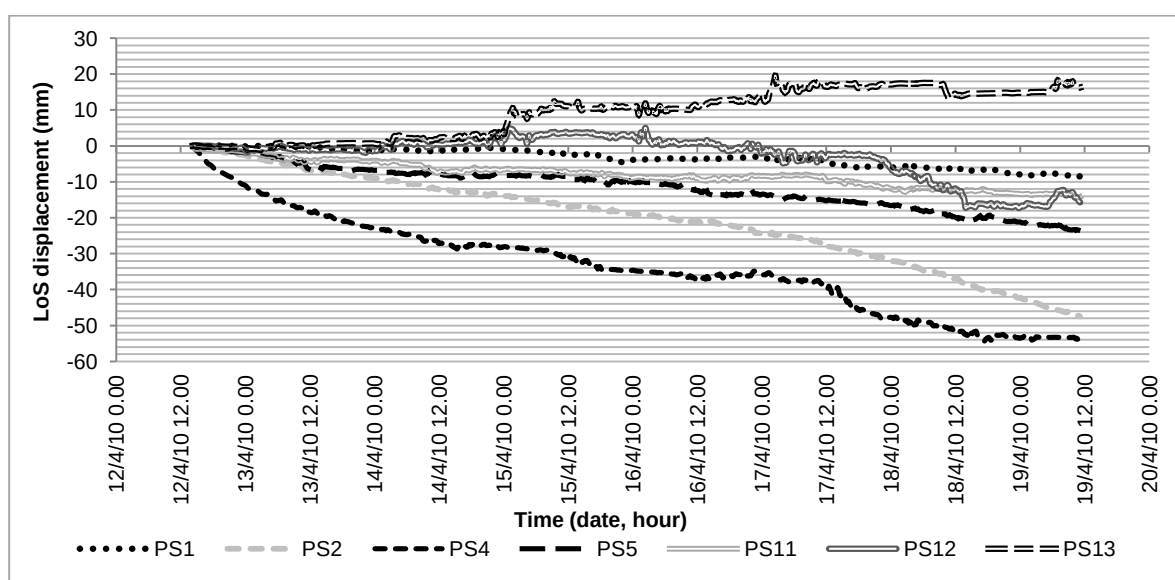


Figura 3.25: Spostamento LoS di alcuni PS. Frana di Romanoro, MO, Italia.

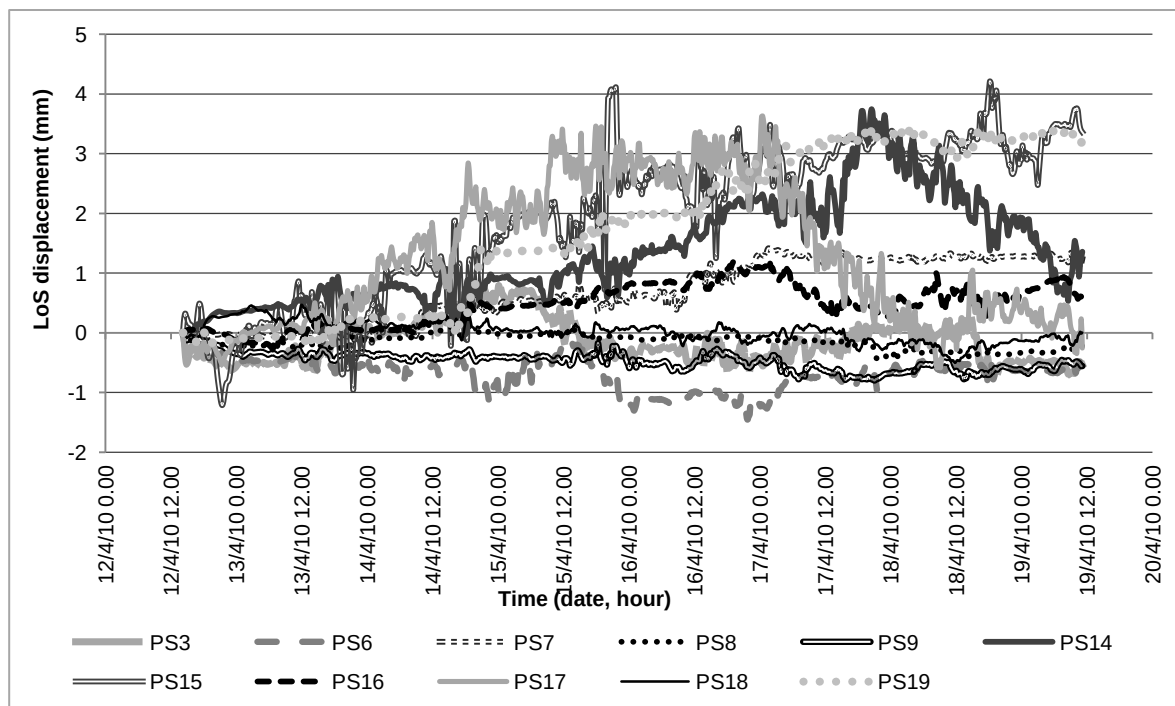


Figura 3.26: Spostamento LoS di alcuni PS che si possono considerare fermi. Frana di Romanoro, MO, Italia.

I punti, i cui grafici di spostamento sono riportati in Figura 3.26, invece, possono considerarsi stabili: i loro grafici di spostamento oscillano tra -2 mm e 5 mm; sono rappresentati in un grafico con scala delle ordinate differente da quella di Figura 3.25 proprio per mettere in evidenza la variazione di spostamento intorno allo zero, non apprezzabile a scala più ampia.

AREA	PS	RISULTATO
Romanoro	PS6, PS7	Stabilità (± 1 mm)
Cerreto	PS3	Stabilità
	PS15	Stabilità
Abitato tra Cerreto e Romanoro	PS8	Stabilità
	PS9	Stabilità (± 2 mm)
S. Scolastica	PS18	Stabilità (± 1 mm)
	PS19	Stabilità (± 2 mm)
Pian di Venano	PS12	Movimento
	PS13	Rumoroso in allontanamento
Area di frana	PS1, PS2, PS4, PS5, PS14, PS15, PS17, PS11	Spostamento
	PS16	Stabilità (± 1 mm)

Tabella 3.1: Schema riassuntivo dello spostamento rilevato attraverso le time series di alcuni PS in corrispondenza di zone significative dell'area indagata. Frana di Romanoro, MO, Italia.

In Tabella 3.1 vengono riassunti i risultati di spostamento derivati dall'analisi delle time series di alcuni PS selezionati e dalla mappa di spostamento. Complessivamente gli abitati di Romanoro, Cerreto e S. Scolastica risultano stabili, mentre Pian di Venano, anche se molto lontano dal sensore e separato spazialmente dagli altri punti, seppur con punti rumorosi, potenzialmente è in movimento. Nella zona di

movimento, che inizia da Pian di Venano e si collega al Torrente Dolo (piede della frana), si alternano zone più stabili ad aree con movimenti più accentuati. Il risultato dell'elaborazione può considerarsi soddisfacente, nel complesso.

3.6.2 Risultati dell'elaborazione con selezione di Ground Control Point (GCP)

Il processing che prevede la selezione di GCP per lo srotolamento della fase e per la stima dell'atmosfera è più complesso in termini di contributo dell'operatore, perché legato ad una scelta adeguata dei punti di controllo. I GCP vengono selezionati manualmente in due fasi dell'elaborazione e la loro scelta deve essere debitamente ponderata. Gli step di elaborazione in cui si interviene nella loro definizione sono:

- phase unwrapping-direct integration, in cui si sceglie un punto come riferimento, cioè si sceglie un punto a cui attribuire il valore zero per srotolare la fase relativamente a quel punto;
- stima dell'atmosfera, in cui si determinano i punti appartenenti alle aree considerate geologicamente stabili sulla base dei quali fare la stima di spostamento.

Nello specifico, il punto di riferimento scelto per il phase unwrapping-direct integration è un punto appartenente al paese di Romanoro (Figura 3.27); i punti per la stima dell'atmosfera sono quelli con $DA = [0, 0.3]$ nell'area indicata sempre in Figura 3.27.

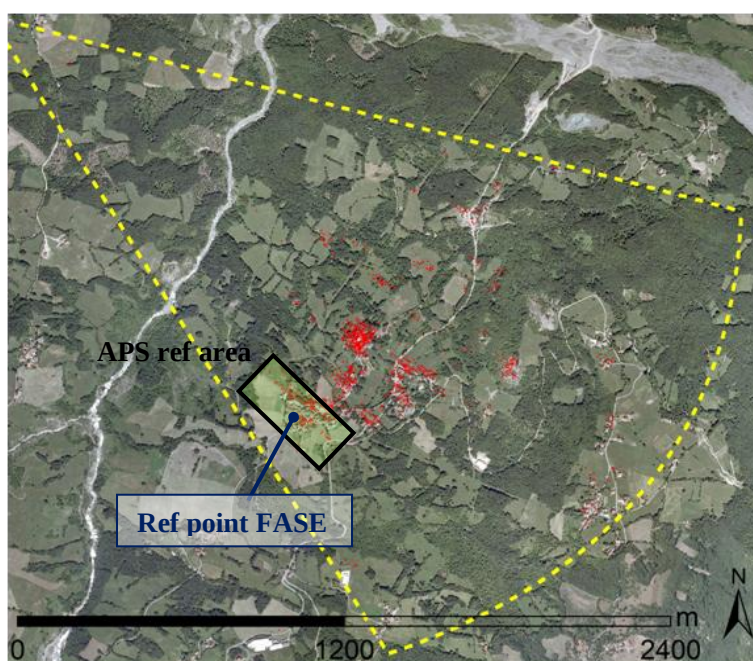


Figura 3.27: Selezione del punto di riferimento per lo srotolamento della fase e dei punti appartenenti all'area geologicamente stabile per la stima dell'atmosfera. Frana di Romanoro, MO, Italia.

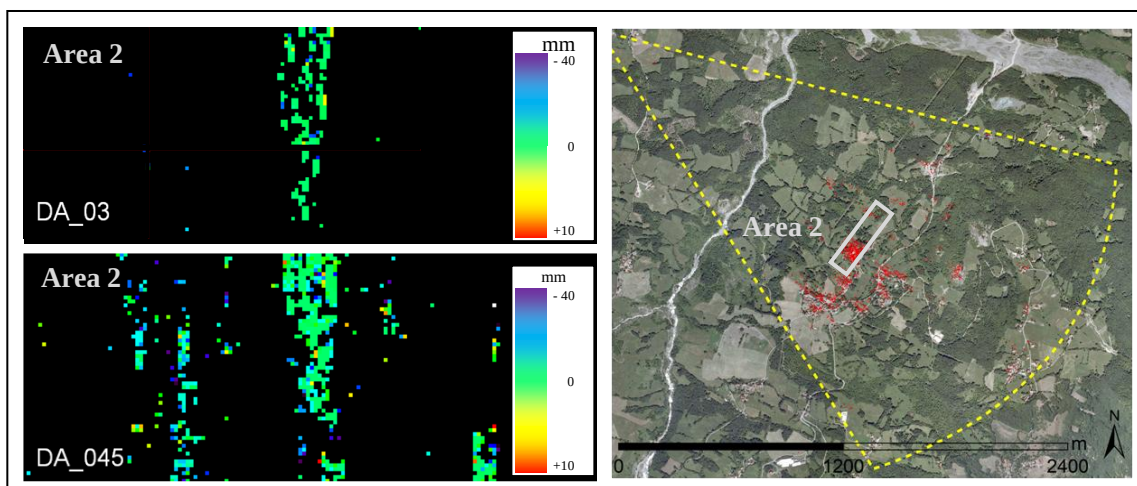


Figura 3.28: Dettaglio della mappa di spostamento LoS ricavata con criterio di selezione $DA = [0, 0.3]$ e $DA = [0, 0.45]$ in coordinate immagine (sinistra) e localizzazione dell'area e dei punti con $DA = [0, 0.3]$ in un sistema georeferenziato nel sistema della Regione (destra): aumentando la soglia di dispersione di ampiezza, aumenta significativamente il rumore. Frana di Romanoro, MO, Italia.

La scelta manuale dei GCP implica una ragguardevole fase di lavoro legata alla pre-analisi delle immagini e un certo grado di esperienza dell'operatore. L'analisi statistica del dato alla base della tecnica PS è più robusta, ma l'approccio con selezione di ground control point permette di "vigilare" meglio sui vari step del processing, dalla cui osservazione si possono ricavare informazioni importanti in merito alla campagna di acquisizione (qualità delle immagini, distribuzione dei punti con buon rapporto segnale rumore, andamento spazio-temporale del phase unwrapping, correzione degli errori di aliasing...).

Lo stesso tipo di processing, con gli stessi parametri e gli stessi GCP è stato applicato alla selezione dei punti definita con $DA = [0, 0.3]$ e con $DA = [0, 0.45]$. Un dettaglio del confronto dei risultati sul paese di Cerreto è riportato in Figura 3.28: la soluzione con $DA = [0, 0.45]$ è troppo rumorosa e non significativa, per cui è stata scartata. Un possibile sviluppo futuro potrebbe riguardare la selezione di punti con soglia intermedia tra 0.3 e 0.45 per ridurre il numero di punti rumorosi e affinare il risultato. La determinazione della soglia di DA per la scelta dei punti rimane comunque un problema aperto: restringendo l'intervallo di dispersione si rischia di non raggiungere una sufficiente continuità spaziale, ma allargandolo si possono guadagnare "punti buoni" accettando anche punti "non buoni" che difficilmente possono essere separati dai primi.

Il risultato dell'elaborazione (selezione dei punti $DA = 0.3$) è stato georeferenziato in Google Earth e sono state estratte anche alcune serie di spostamento dei punti (Figura 3.29). Anche se la scala di visualizzazione continua del colore non è del tutto funzionale all'interpretazione dei risultati è possibile osservare una certa presenza di punti rumorosi in corrispondenza di Romanoro e di S. Scolastica.

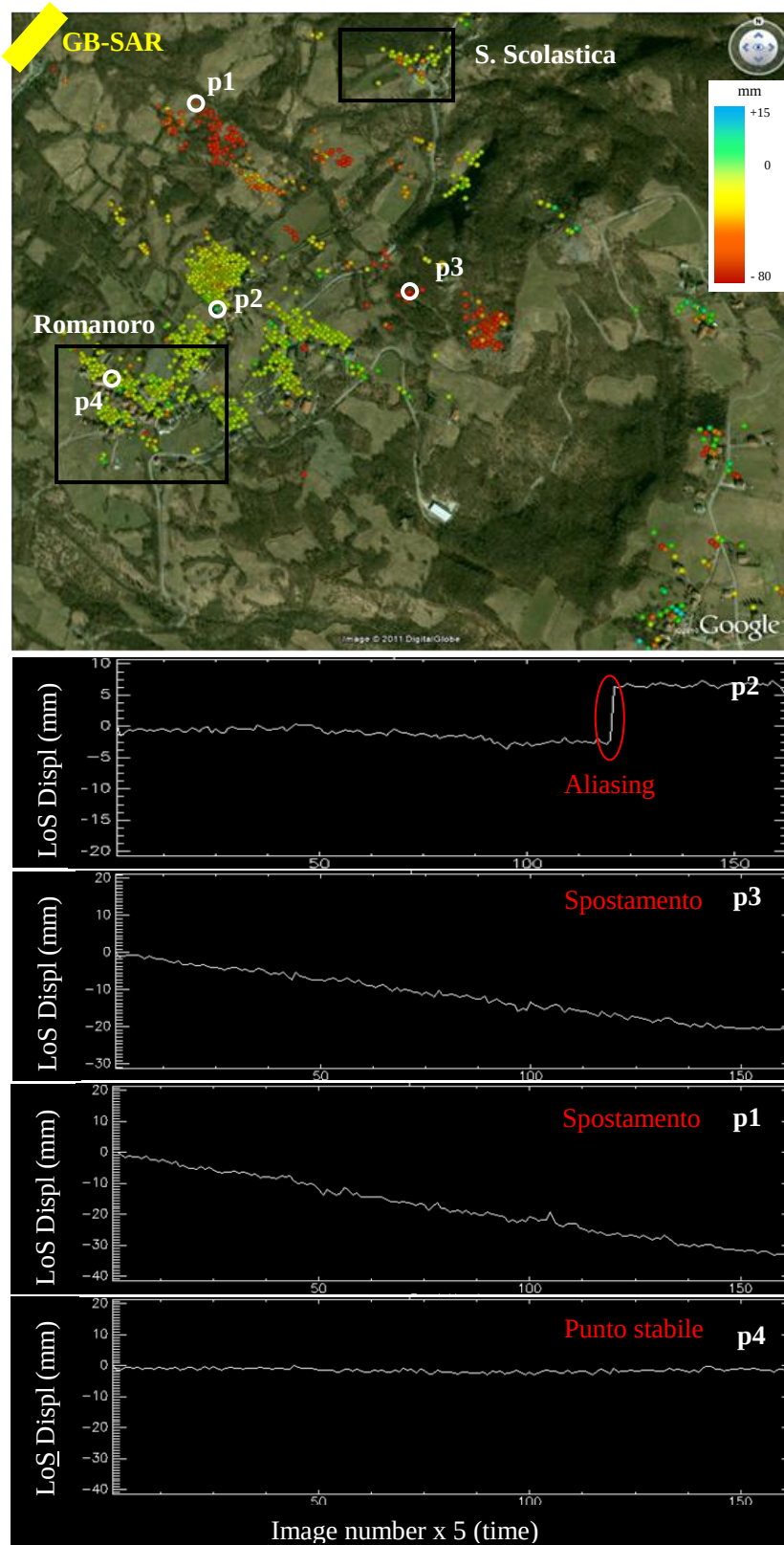


Figura 3.29: Mappa di spostamento LoS derivata da approccio di elaborazione con GCP, georeferenziata in Google Earth e time series di spostamento LoS di alcuni punti. Frana di Romanoro, MO, Italia.

Rispetto alla rappresentazione in GIS con mappa di spostamento raster con pixel di 5m (Figura 3.30 in basso) la copertura spaziale sembra più omogenea e continua, anche se la mappa di spostamento che

viene georeferenziata è la stessa: la rappresentazione dei risultati è funzionale all'interpretazione e a parità di risultati quantitativi si possono trarre conclusioni differenti sulla base di come li si rappresenta. Per quanto riguarda la selezione dei GCP per la stima dell'atmosfera, la morfologia, le caratteristiche geometriche del sito e la copertura vegetativa non permettono di ottenere la configurazione ideale che prevede aree stabili in prossimità del sensore e nelle zone più lontane, intercalate longitudinalmente all'immagine da altre aree stabili. I GCP sono stati scelti in corrispondenza del paese di Romanoro, in quanto geograficamente separato dalle zone più a rischio e realisticamente stabile rispetto agli altri abitati che presentavano lesioni agli edifici, come emerso dal sopralluogo in sito.

3.6.3 Confronto dei risultati tra appoggio *Permanent Scatterers* e selezione di *Ground Control Point*

Sulla base dell'analisi delle time series di spostamento graficate in Figura 3.25, Figura 3.26 e Figura 3.29 e delle mappe di spostamento ottenute con entrambe le strategie di definizione del set di calibrazione e di elaborazione dei dati (Figura 3.30) è possibile osservare che:

- si sono rilevati spostamenti fino a qualche centimetro nel periodo di osservazione;
- il set di calibrazione che utilizza il criterio di coerenza garantisce una maggiore continuità spaziale;
- il numero dei pixel selezionati con il criterio di coerenza = $[0.85, 1]$ è sensibilmente maggiore rispetto al numero dei pixel selezionati con dispersione di ampiezza = $[0, 0.3]$;
- la selezione con $DA = [0, 0.45]$ e la successiva elaborazione tramite selezione di GCP non hanno prodotto risultati significativi;
- i paesi di Cerreto e Romanoro sono sufficientemente descritti in entrambe le soluzioni e appaiono stabili, anche se il risultato con definizione di GCP è leggermente più rumoroso sul paese di Romanoro;
- anche il paese di S. Scolastica viene sufficientemente descritto e risulta complessivamente stabile, con punti non troppo rumorosi nonostante una certa discontinuità spaziale che lo separa dalla zona centrale dell'immagine;
- la significatività della soluzione è accettabile e i risultati delle elaborazioni sono consistenti, in particolare nelle zone adiacenti ai paesi di Cerreto, Romanoro e S. Scolastica, cioè dall'area 1 fino all'area 2, in virtù della distribuzione delle aree stabili;

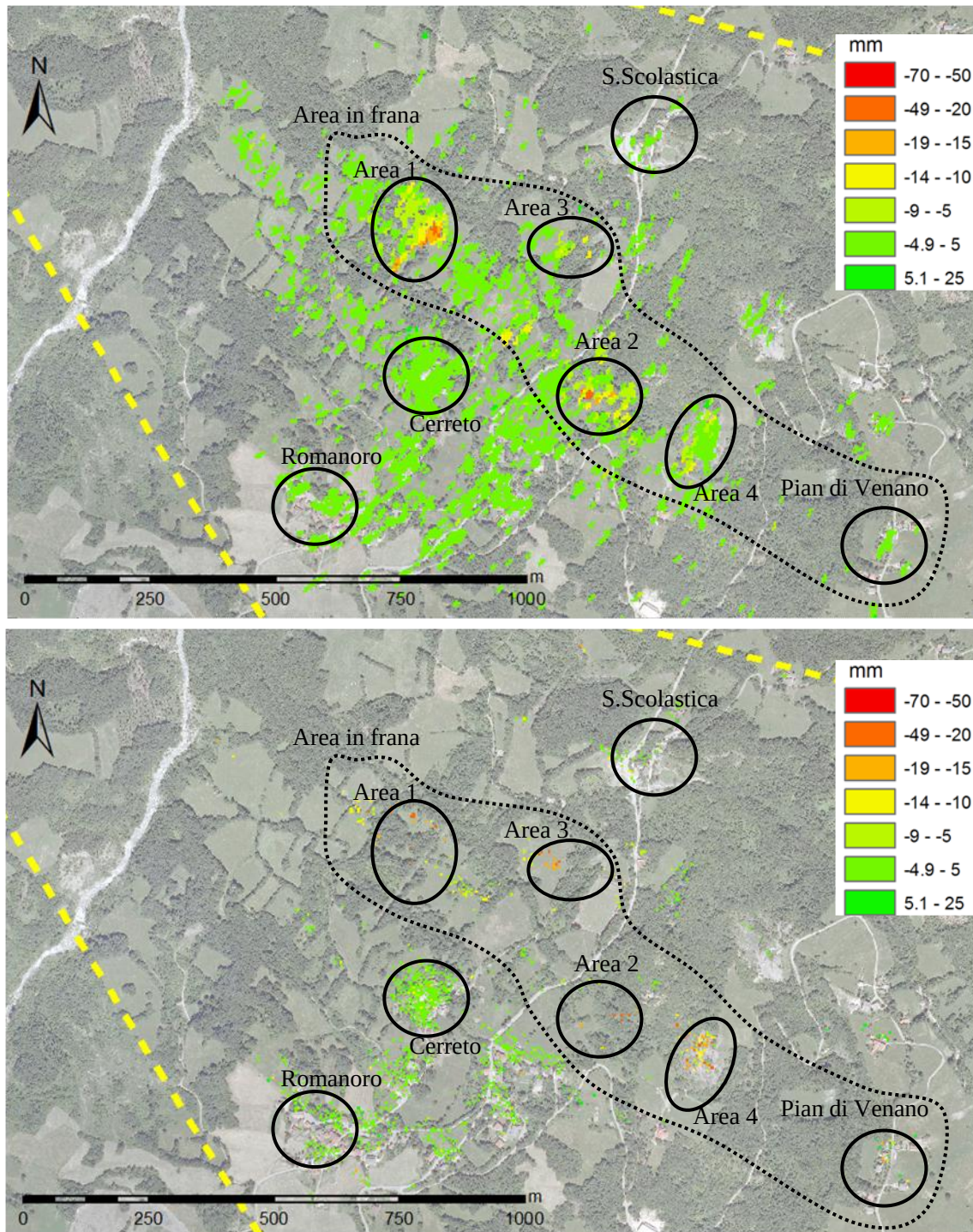


Figura 3.30: Mappe di spostamento georeferenziate (dimensione del pixel 5 m). (In alto) Criterio di selezione con coerenza delle prime 30 immagini [0.85, 1]. (In basso) Criterio di selezione di dispersione di ampiezza DA = [0-0.3] rispetto all'ampiezza media di tutte le immagini. Frana di Romanoro, MO, Italia.

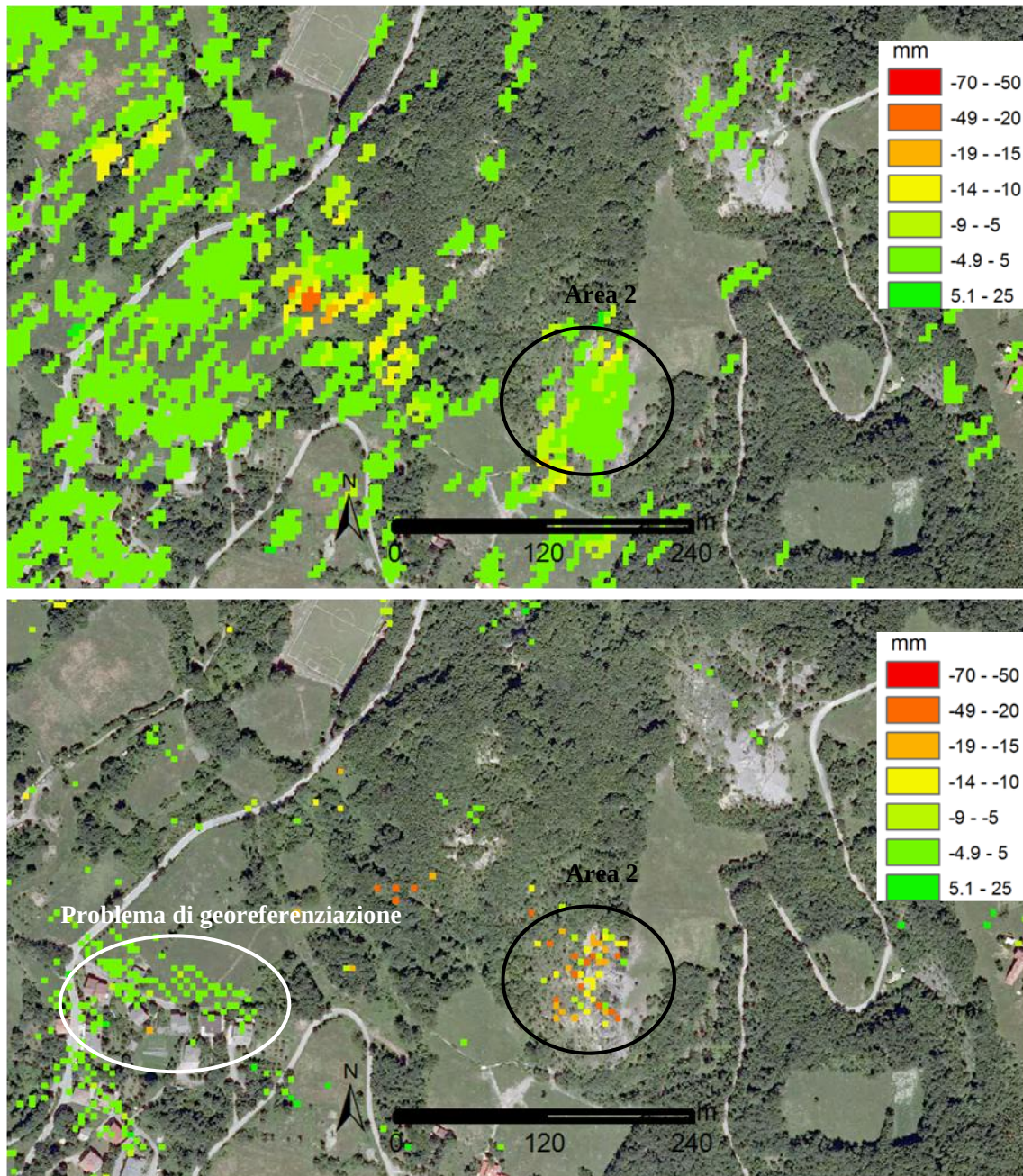


Figura 3.31: Dettaglio della mappa di spostamento georeferenziata. (In alto) Criterio di selezione coerenza con coerenza = $[0.85, 1]$. (In basso) Criterio di selezione di dispersione di ampiezza $DA = [0-0.3]$. Frana di Romanoro, MO, Italia.

- allontanandosi dall'area centrale della scena, verso le zone del Torrente Dolo e verso Pian di Venano, la soluzione diventa più rumorosa, perché ci si allontana dalle aree stabili sulla base delle quali vengono fatte le stime dell'atmosfera;
- con il criterio di coerenza l'area 1 e l'area 2 presentano una buona copertura spaziale, che è più scarsa con il criterio di selezione DA;

- attraverso la soluzione con GCP, per le aree 2, 3 e 4 in particolare, emergono spostamenti leggermente superiori (qualche millimetro) rispetto a quelli calcolati con la tecnica con approccio PS.

Osservando in dettaglio le mappe di spostamento sovrapposte alle ortofoto (Figura 3.31) le analisi degli spostamenti possono essere fatte in modo più preciso: è giusto avere un inquadramento generale del problema, ma poi analizzare i risultati alla giusta scala. Le ortofoto alla base del GIS sono aggiornate al 2006, quindi alla data del rilievo (2010) sono ormai sorpassate: alcune zone in frana hanno subito una rapida evoluzione e non si presentano più come sono raffigurate e questo può complicare un po' l'interpretazione dei risultati. Inoltre si evidenzia un problema di georeferenziazione dei risultati, di cui si tratterà in modo più approfondito al paragrafo 3.9.

3.7 Selezione dati: frequenza temporale di selezione delle scene in una singola campagna di monitoraggio per la determinazione dello spostamento

In questo paragrafo verranno presentati differenti approcci di data processing legati alla tecnica PS in cui a parità di set di calibrazione, basato sulla selezione dei punti con criterio di coerenza, sono stati confrontati i risultati di spostamento derivanti da impiego di immagini caratterizzate da una baseline temporale diversa (Noferini et al., 2008). Il primo approccio prevede l'utilizzo di tutte le immagini acquisite, mentre nel secondo si campionano scegliendo un'immagine per ora con l'intento di ridurre gli errori residui legati principalmente alla stima dell'atmosfera ed aumentare la precisione del metodo.

Sono stati considerati due casi applicativi con caratteristiche diverse di movimento, la Frana di Collagna con movimenti molto lenti dell'ordine di mm/mese e la Frana di Romanoro con movimenti lenti di cm/giorno. (Cruden e Varnes, 1996).

3.7.1 Determinazione di movimenti lenti (cm/settimana)

Differenti criteri di selezione dati

Per la Frana di Romanoro, il set di calibrazione è stato determinato con soglia di coerenza 0.8, quindi scegliendo i punti con coerenza [0.8, 1], utilizzando le prime 30 immagini acquisite (Figura 3.15). Sono stati selezionati 31'540 punti dei 219'306 disponibili nell'area individuata. L'elaborazione è poi avvenuta impostando:

- BS = 40, RUT = 1, per l'elaborazione con frequenza massima di campionamento;
- BS = 35, RUT = 1, per l'elaborazione con frequenza temporale di campionamento di 1 ora.

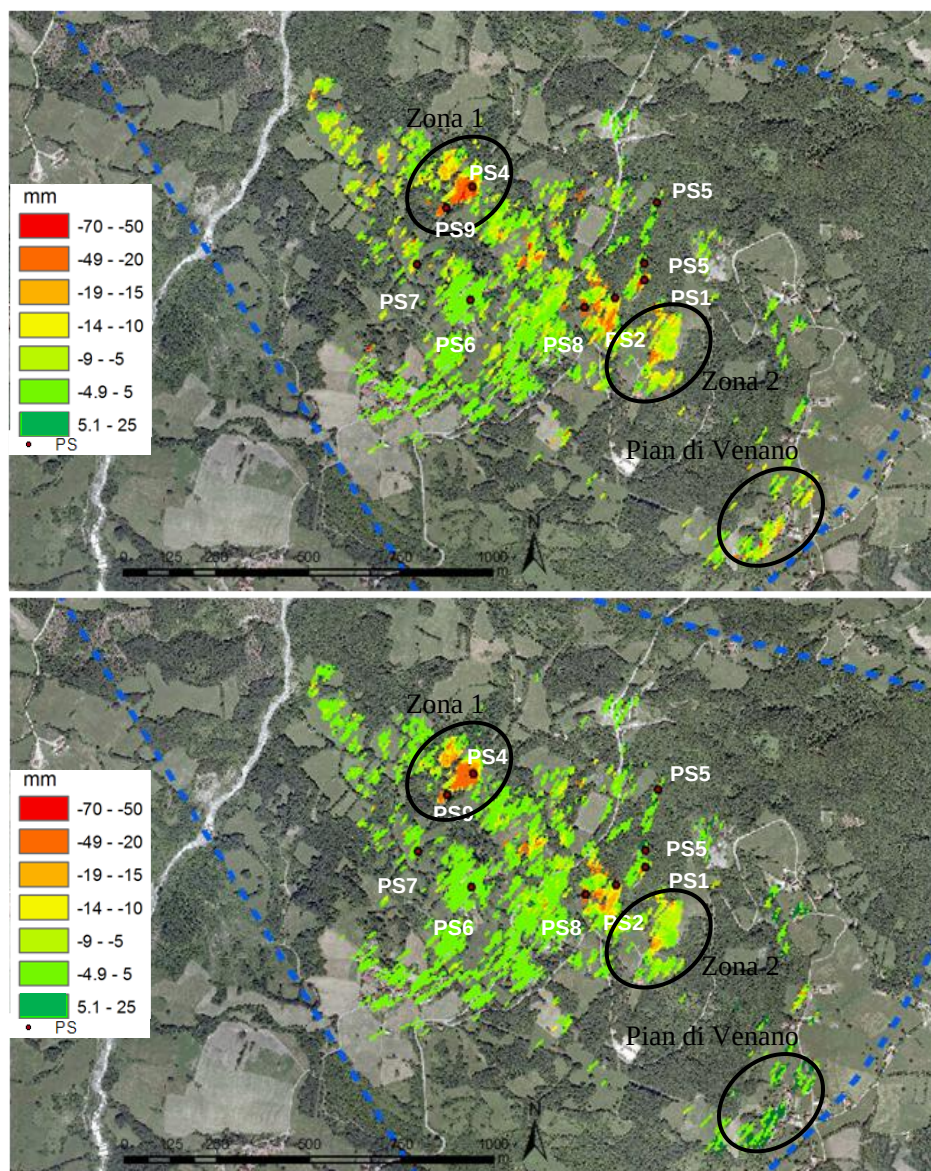


Figura 3.32: Mappe di spostamento LoS georeferenziate nel sistema di riferimento della Regione Emilia Romagna. In alto, mappa con frequenza di campionamento massima. In basso, mappa ottenuta con frequenza di campionamento di 1 ora. Frana di Romanoro, MO, Italia.

Le mappe di spostamento SAR sono state riproiettate su DTM del 2006, creando mappe raster 2D con dimensione del pixel di 5 m che sono state georeferenziate in un GIS (Figura 3.32). In merito ai risultati ottenuti si può osservare che:

- dalle mappe di spostamento appare che gli spostamenti calcolati con frequenza di campionamento massima (tutte le immagini) sono meno rumorosi, in particolare nelle zone a 3 km di distanza (Pian di Venano);
- per l'area di Pian di Venano, a 3 chilometri circa dal sensore, una maggiore frequenza temporale delle scene permette di ottenere una soluzione migliore, in quanto si hanno pochi punti in allontanamento cioè con un residuo nella stima dell'atmosfera (colore verde scuro) e si stima un

movimento dell'ordine di 1-2 cm/settimana, nonostante si evidenzia una certa variabilità differenziale dei valori di spostamento;

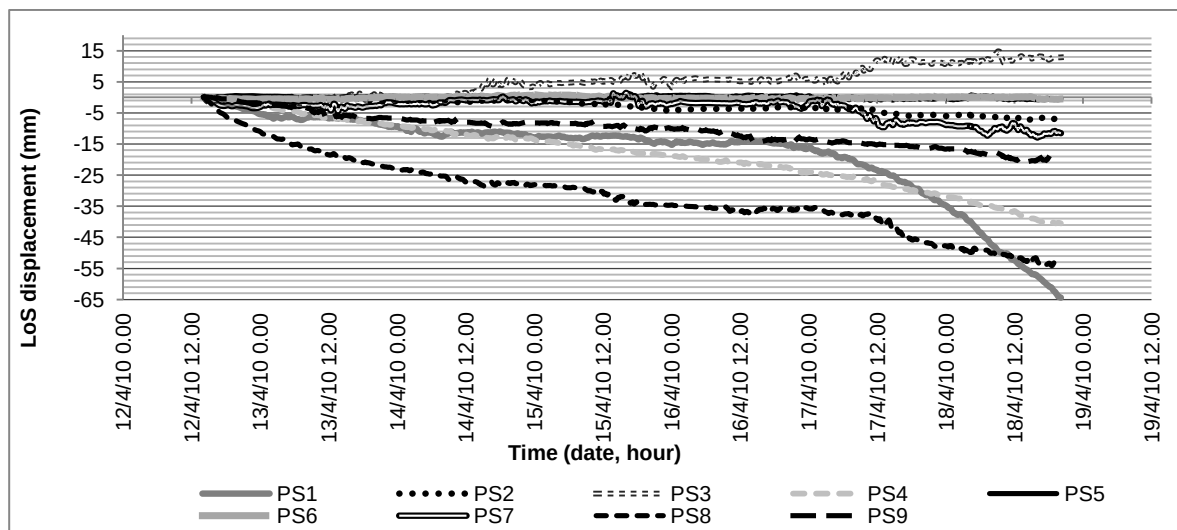


Figura 3.33: Spostamento LoS di alcuni PS derivato da frequenza di campionamento massima delle immagini. Frana di Romanoro, MO, Italia.

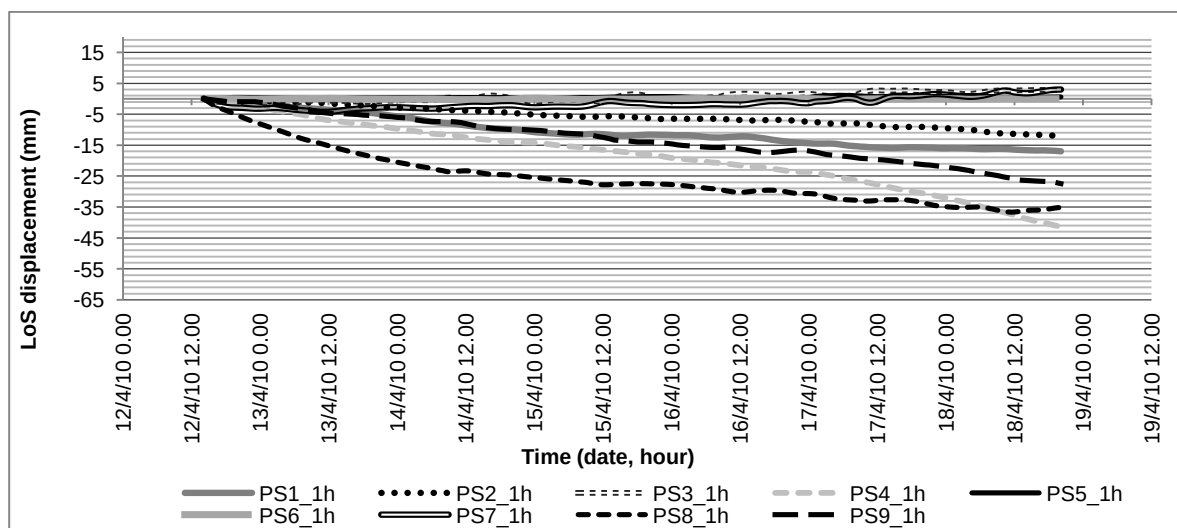


Figura 3.34: Spostamento LoS di alcuni PS derivato da frequenza di campionamento di una immagine per ora. Frana di Romanoro, MO, Italia.

- dalle mappe di spostamento risulta che l'entità dei movimenti calcolati con frequenza massima di campionamento delle immagini è maggiore rispetto allo spostamento calcolato con frequenza di campionamento di un'ora (zona 1 e zona 2);
- quanto emerge dalle mappe di spostamento viene confermato anche da alcune time series (Figura 3.33, Figura 3.34 e allegato 1), che evidenziano una sottostima degli spostamenti calcolati sulla base del campionamento delle immagini con frequenza temporale di un'ora, che

vale in modo particolare per punti che si muovono con velocità dell'ordine di cm/giorno (PS1, PS4, PS9);

- le differenze di entità di spostamento riscontrate con i due approcci sono dell'ordine del centimetro nel periodo di osservazione;
- è possibile distinguere punti in movimento da punti stabili per poter analizzare il fenomeno nella sua interezza con entrambi gli approcci, con complessivamente precisione dell'ordine di grandezza del centimetro.

Elaborazione di tutte le acquisizioni per monitoraggio real-time per l'allerta

La tecnica GB-InSAR per il monitoraggio di versanti instabili, viene usata prevalentemente per scopi di monitoraggio, anche di lungo periodo, ma se le condizioni operative e al contorno lo consentono è efficace anche come sistema di allerta: in poche ore è possibile rendere operativo lo strumento e ottenere risultati di spostamento.

Se gli spostamenti sono dell'ordine di qualche centimetro al giorno e nella scena la percentuale di aree stabili è abbastanza alta e queste stesse sono ben distribuite, le zone di movimento vengono ben discriminate e l'entità del movimento ben quantificata.

Perché i risultati delle elaborazioni in real time siano significative, è estremamente importante selezionare i punti per l'elaborazione in modo efficace e impostare l'elaborazione nel modo più corretto possibile, focalizzando l'attenzione su:

- selezione delle immagini per la definizione del set di calibrazione;
- definizione del set di calibrazione;
- scelta della dimensione del block size (gruppo di immagini) sulla base del quale fare la stima dell'atmosfera e per il quale calcolare il valore di spostamento cumulato;

Per fare una stima abbastanza buona dell'atmosfera, in genere si imposta il block size con un numero di immagini che vanno da 35 a 70; il result update time quando si lavora in real time è di una immagine (= 1). Nel post-processing, rispetto al near real time, per questioni logistico-operative, è possibile dedicare qualche sforzo in più alla pre-analisi delle immagini, cercando di ottimizzare la selezione dei punti, sia agendo sui criteri veri e propri di selezione dei punti, sia lavorando sulla scelta delle immagini a cui applicare i criteri di selezione. Nel processing in real-time questo non è sempre immediato da realizzare, specialmente se l'applicazione in tempo reale ha funzione di un sistema di allerta. In Figura 3.35, Figura 3.36 e Figura 3.37 sono riportati i risultati, in termini di mappe di spostamento LoS e come time series di spostamento, sempre LoS, del monitoraggio near real time della Frana di Romanoro (MO, Italia). Le immagini SAR sono proiettate su un DTM della zona derivato da un volo fotogrammetrico del 2006, georeferenziato nel sistema di riferimento ufficiale della regione Emilia Romagna (UTM* ED50 32N). Il set di calibrazione è stato creato utilizzando le prime 30 immagini acquisite durante la campagna, secondo il criterio di coerenza temporale (soglia di coerenza 0.85) per la selezione dei punti, cercando di garantire anche una buona distribuzione spaziale dei punti stessi. Il processing è stato impostato per elaborare gruppi di 50 immagini (BS), aggiornando il gruppo di un'immagine alla volta (RUT = 1).

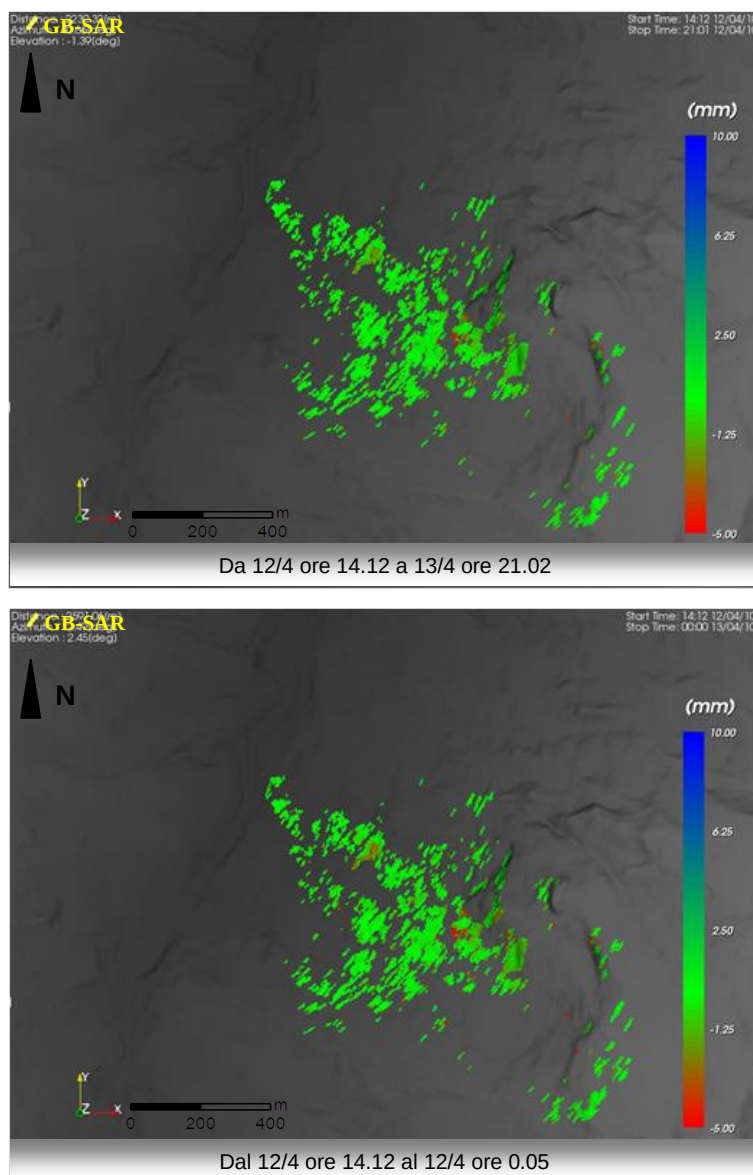


Figura 3.35: Mappe di spostamento per applicazioni della tecnica GB-InSAR come sistema di allerta dopo 7 ore e dopo 10 ore di monitoraggio. Frana di Romanoro (MO, Italia).

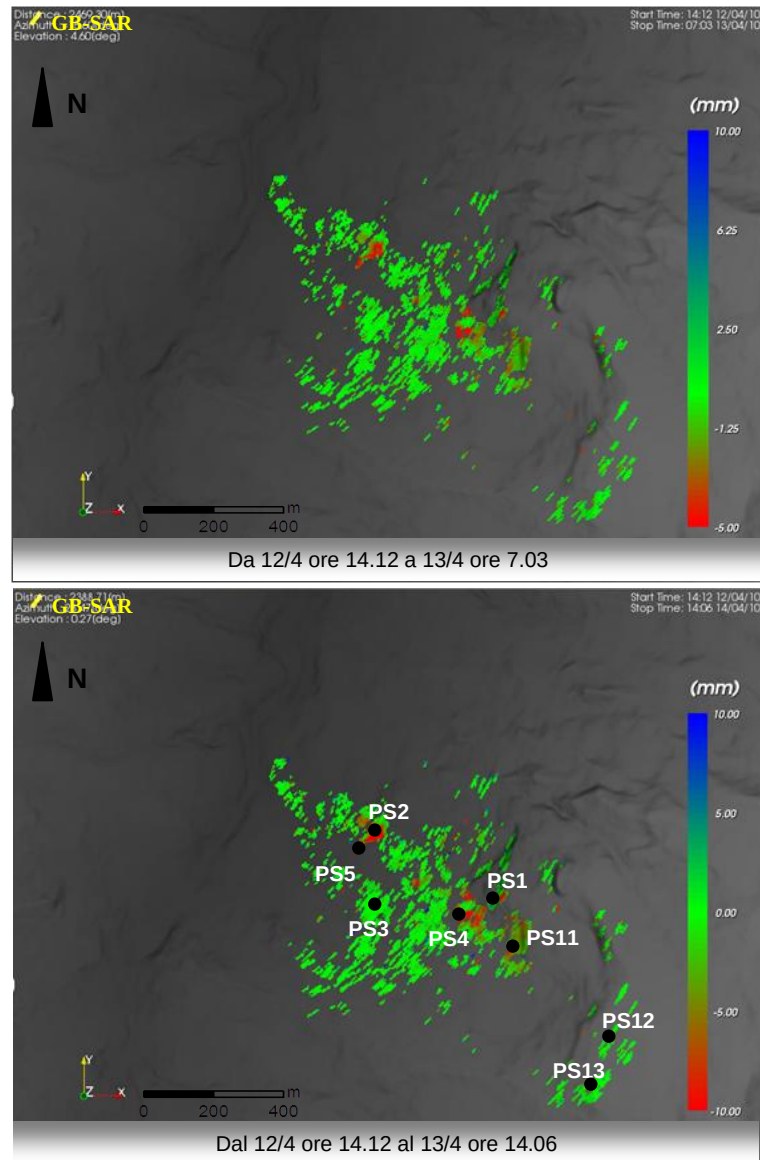


Figura 3.36: Mappe di spostamento LoS per applicazioni della tecnica GB-InSAR come sistema di allerta dopo 17 ore e dopo 24 ore di monitoraggio. Frana di Romanoro (MO, Italia).

La tecnica GB-InSAR e la strategia di elaborazione sono risultate efficaci: già dopo 7 ore di acquisizione, vengono rilevati spostamenti dell'ordine dei 5 mm; dopo 24 ore gli spostamenti arrivano al centimetro; non si osserva l'effetto "sale e pepe" sintomo di risultati rumorosi e gli spostamenti sono localizzati in determinate aree, quindi significativi. Le time series di spostamento di Figura 3.37, si riferiscono ai PS individuati in Figura 3.36 in basso.

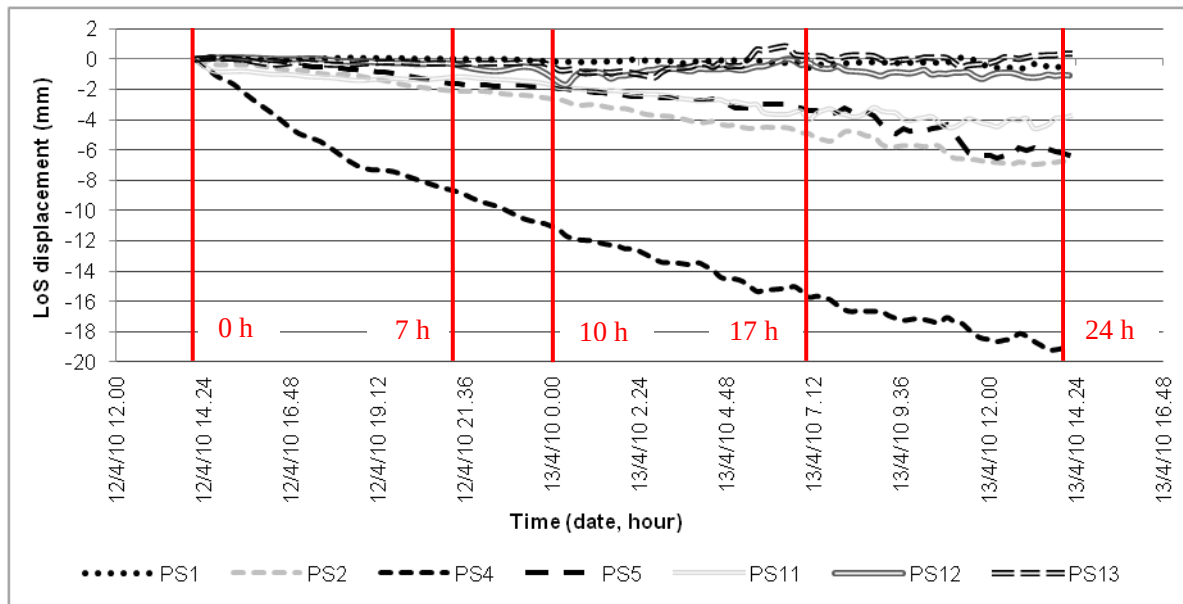


Figura 3.37: Time series di spostamento LoS di alcuni PS per applicazioni della tecnica GB-InSAR come sistema di allerta. Frana di Romanoro (MO, Italia).

3.7.2 Determinazione di movimenti molto lenti (cm/mese)

Per la Frana di Collagna, il set di calibrazione è stato definito con una soglia di coerenza di 0.9, quindi scegliendo i punti con coerenza $[0.9, 1]$, utilizzando le prime 30 immagini acquisite (Figura 3.15, kaiser=6; Figura 3.38).



Figura 3.38: Mappa di coerenza dell'area selezionata $[0.9, 1]$ georeferenziata e foto frontale del versante in basso a destra (Frana di Collagna, RE, Italia).

La scena osservata è costituita principalmente da rocce, quindi si è potuto utilizzare un valore di soglia abbastanza alto. Su frane caratterizzate da coperture del tipo terreno sciolto e vegetazione, invece, si tende ad abbassare la soglia di coerenza per guadagnare un po' più di punti che possano garantire una maggiore continuità spaziale.

Utilizzando la soglia di coerenza di 0.9, sono stati selezionati 4'721 punti dei 20'184 disponibili. Il processing è stato impostato sfruttando differenti frequenze temporali di campionamento delle immagini, applicando parametri di elaborazione differenti:

- frequenza di campionamento di circa 7 minuti (utilizzo di tutte le immagini acquisite) con Block Size (BS) = 35 e Result Update Time (RUT) = 1 (TEST all);
- frequenza di campionamento 1 ora (utilizzo di immagini distanziate temporalmente di 1 ora), con:
 - BS = 35 e RUT = 1 (TEST 1h_35+1);
 - BS = 50 e RUT = 1 (TEST 1h_50+1).

La configurazione delle aree stabili non è quella ottimale per la stima del contributo dell'atmosfera nella fase, ma può essere considerata sufficiente. L'area indagata non è molto vasta (250 m x 250 m) e si può ipotizzare che tra la zona di scarpata, che si considera geologicamente stabile nel periodo di osservazione, e quella di movimento, le condizioni atmosferiche non varino sensibilmente.

I risultati derivati dai diversi processing sono stati confrontati sulla base di serie temporali di spostamento di alcuni PS e di mappe 2D di spostamento LoS, georeferenziate nel sistema di riferimento UTM ETRF2000 32N. La morfologia della zona oggetto di studio, che è costituita da pareti rocciose a sviluppo prevalentemente verticale, rende complessa la visualizzazione dei risultati (Figura 3.39): la visualizzazione 3D proposta dal software di elaborazione, che ben si adatta alla maggior parte dei casi di studio di versanti instabili, non è ottimale per questo tipo di strutture morfologiche. Software dedicati alla visualizzazione 3D o GIS 3D sarebbero uno strumento ideale, ma non è immediato poterli utilizzare, per cui si rimanda al prossimo futuro l'approfondimento di questa problematica. Il passaggio dalla visualizzazione 3D alla visualizzazione 2D (Figura 3.39), però è cruciale, perché gli spostamenti individuati sulle pareti verticali non vengono ben rappresentati in due dimensioni. La riproiezione in due dimensioni, infatti impoverisce la soluzione di spostamento, "schiacciando" sul piano le informazioni che si hanno in quota. Questa problematica non si presenta per versanti instabili in cui la giacitura della superficie è sub-orizzontale o ha pendenze inferiori rispetto a quelle di pareti verticali. Nel tentativo di ridurre questo problema, si è cercato di utilizzare un DTM ad altissima risoluzione (formato grigliato con passo della griglia di 1 m) derivato dall'integrazione di rilievi ALS (Airborne Laser Scanner) e TLS (Terrestrial Laser Scanner).

CCC

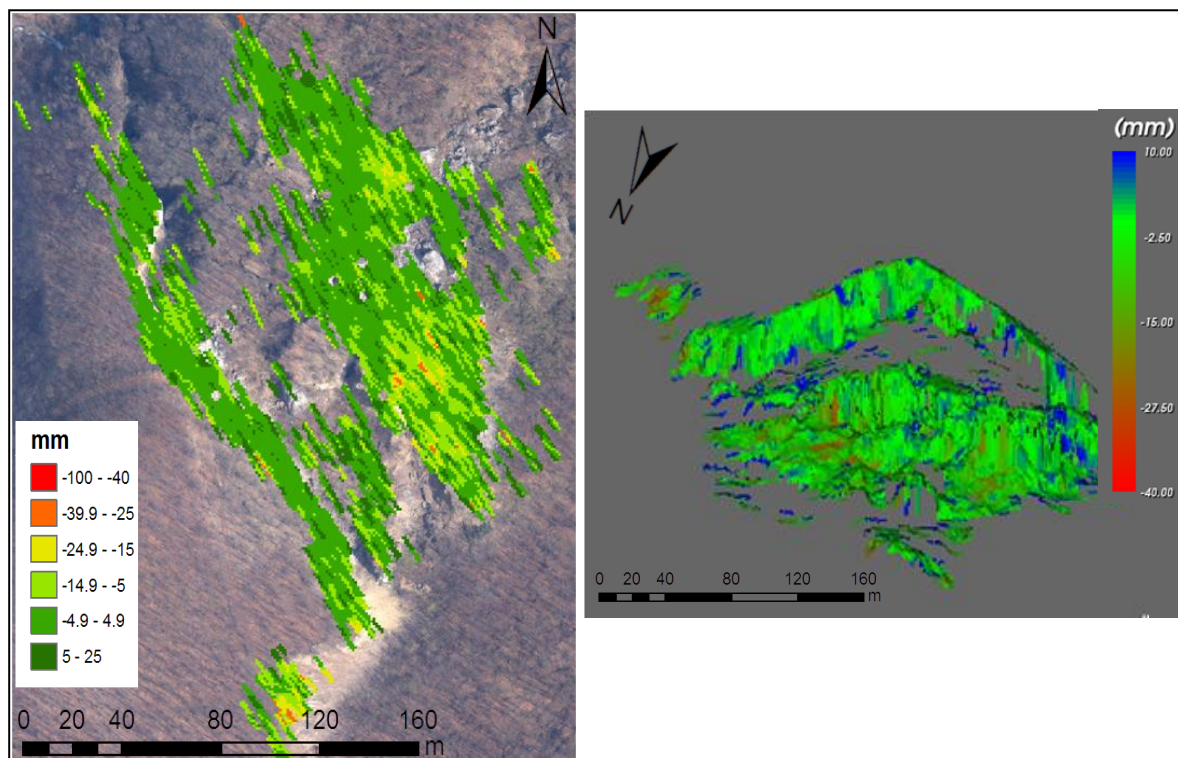


Figura 3.39: Mappa 2D di spostamento (sinistra) e mappa di spostamento 3D -IBIS Guardian- (destra) per il TEST 1h_50+1. Frana di Collagna, RE, Italia.

Le soluzioni prodotte dai diversi approcci di data processing della tecnica GB-InSAR per la Frana di Collagna non sono tra loro consistenti come per la Frana di Romanoro. Per confrontare i vari risultati si è scelto di ricavare le time series di spostamento e le relative mappe sfruttando il DTM integrato, con passo di griglia di 1 m, reputandolo di sufficiente dettaglio per queste prime considerazioni.

In Figura 3.40, sono raffigurate le mappe di spostamento 2D ricavate attraverso i diversi approcci di data processing (TEST all, TEST 1h_35+1 e TEST 1h_50+1). Con la scala di rappresentazione degli spostamenti proposta, non sembrano esserci sostanziali differenze tra TEST 1h_35+1 e TEST 1h_50+1. Il TEST all, con frequenza massima di campionamento delle immagini, si diversifica dai primi due, mostrando zone con spostamenti di entità maggiore lungo il versante e un numero maggiore di punti con spostamento positivo (in allontanamento dal sensore) cioè con un errore residuo nella stima di spostamento. In Figura 3.41 è riportato il grafico dello spostamento LoS nel tempo di un PS (PS23). Nel grafico si riportano gli andamenti temporali ricavati applicando i diversi approcci di elaborazione (TEST 1h_35+1 e TEST 1h_50+1). Altre time series di spostamento per PS riportati in Figura 3.40 sono raffigurate nei grafici dell'allegato 2.

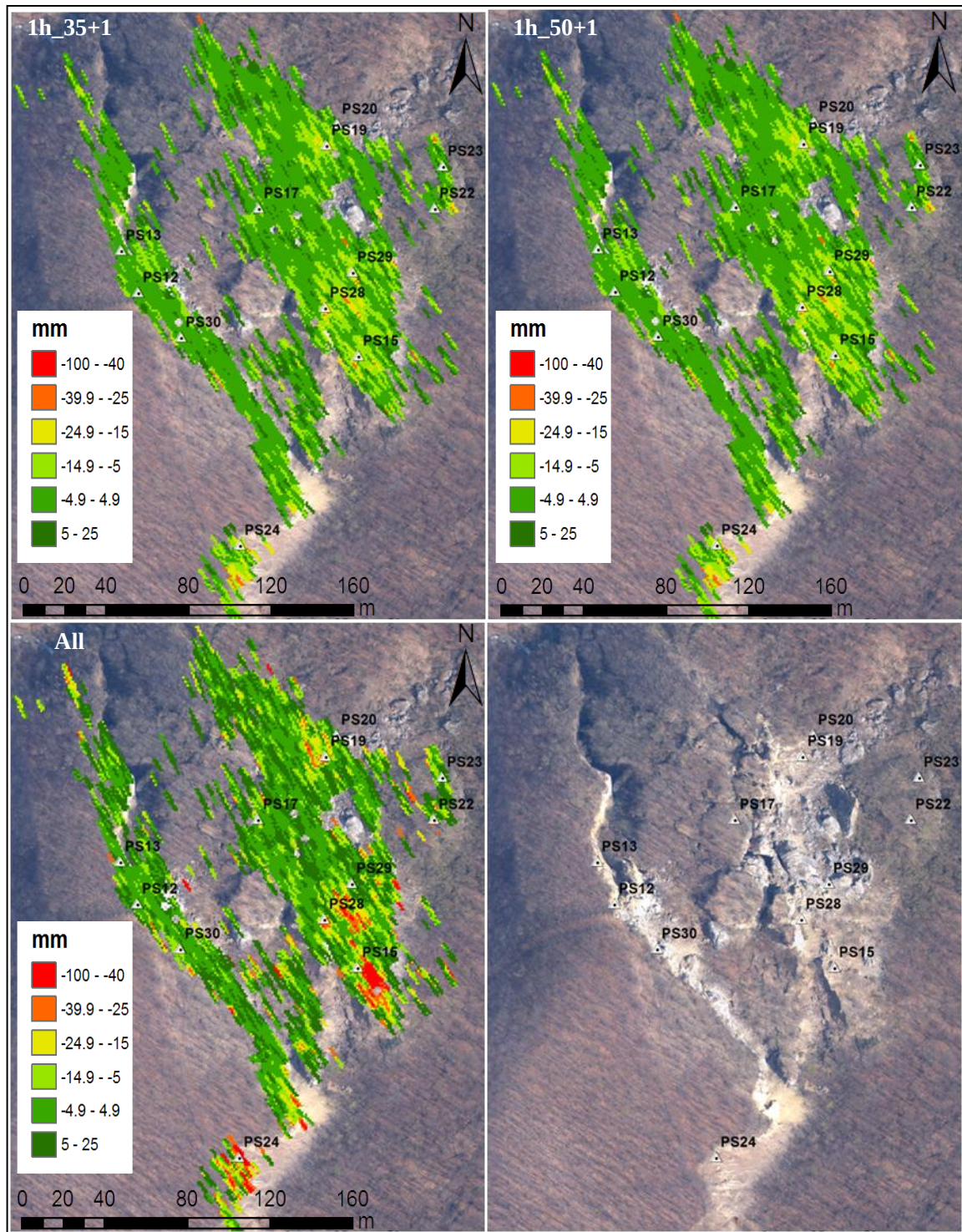


Figura 3.40: Mappe 2D di spostamento per le soluzioni TEST all, TEST 1h_35+1 e TEST 1h_50+1 proiettate tramite DTM con passo di 1 m e posizione di alcuni PS. Frana di Collagna, RE, Italia.

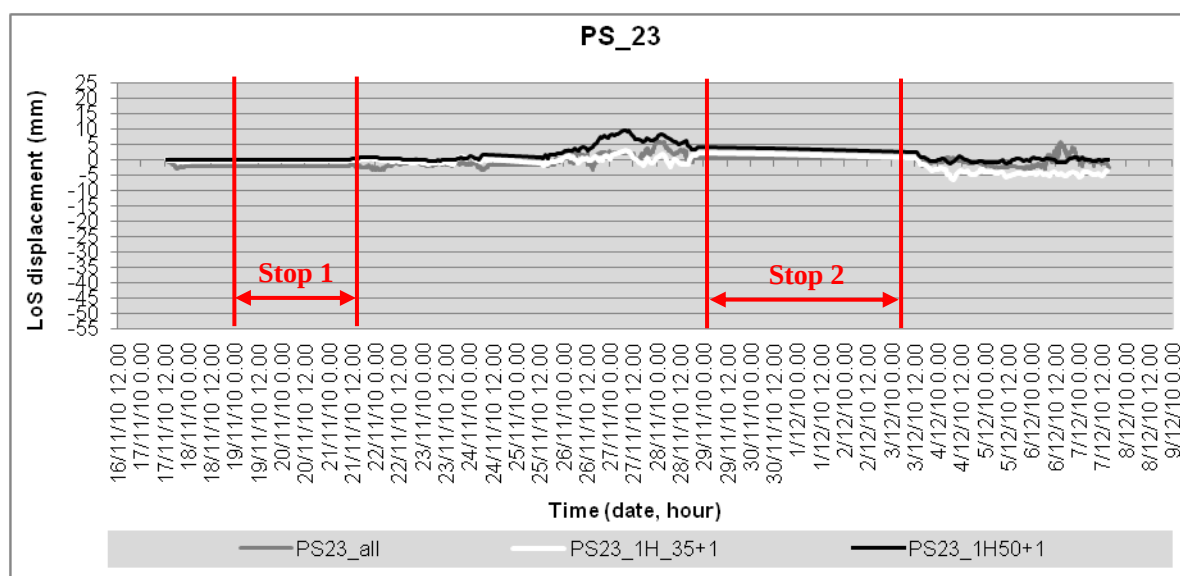


Figura 3.41: Spostamento LoS nel tempo del PS_23 calcolato secondo diversi approcci (TEST all, TEST 1h_35+1 e TEST 1h_50+1). Frana di Collagna, RE, Italia.

Dall'analisi delle time series, come già annunciato dalle mappe di spostamento, si evince che la soluzione con frequenza massima di campionamento delle immagini è più rumorosa, sia per spostamenti positivi, che negativi. Pertanto per la determinazione di movimenti dell'ordine di mm/mese, sembra più appropriato ridurre la frequenza di campionamento delle immagini per agevolare la stima del contributo atmosferico. Con movimenti dell'ordine di grandezza del mm/mese, con frequenza di campionamento di un'immagine/ora non si rischia di incorrere nella decorrelazione temporale per la quale si perde coerenza o si sottostimano gli spostamenti effettivamente rilevati.

Analizzando gli spostamenti (Figura 3.40, Figura 3.41 e grafici di spostamento LoS in allegato 2) si nota che:

- le zone più attive sono quelle alla base dei blocchi di roccia (nell'intorno di PS19, PS15, ai piedi di PS28), costituite da detrito, per cui è plausibile movimento e con certo grado di differenziazione da punto a punto;
- un'altra zona particolarmente attiva è l'area intorno al PS24, che in effetti è in evidente evoluzione dal 2009 mostrando crepe che si allargano e che diventano progressivamente più profonde;
- la zona di scarpata (PS12, PS13 e PS30) conferma la sua sostanziale stabilità, con risultati analoghi in tutti e tre i test di data processing effettuati;
- i PS22 e PS23 risultano sostanzialmente stabili, con un certo grado di variabilità atmosferica nella soluzione, evidenziata dal rumore che caratterizza le serie temporali. Lo stesso vale per PS15;
- per il PS17 si evidenzia un aliasing;
- le considerazioni più significative possono essere fatte su PS24, PS28, PS29 rappresentativi di zone in movimento, anche se questo movimento è difficilmente quantificabile.

Dal 3 Dicembre, dopo alcuni giorni di black-out dello strumento (29/11/10 al 3/12/10) le serie temporali evidenziano uno spostamento che viene quantificato in modo diverso nelle differenti elaborazioni, poiché lo spostamento che viene calcolato è uno spostamento cumulato che ha “memoria” di ciò che viene prima. A causa dell’assenza di osservazioni nel periodo precedente al 3 Dicembre, la stima dello spostamento relativamente a questo periodo non può essere computata in modo efficace. Per effetto della decorrelazione temporale, in caso gli spostamenti verificatisi, ma non misurati, fossero inferiori a circa 4 mm, la stima dello spostamento potrebbe essere significativa, ma se fossero superiori a circa 4 mm, allora non sarebbero quantificabili e verrebbero sottostimati. È verosimile credere che il movimento rilevato dal 3 Dicembre per PS24, PS28, PS29, sia effettivamente movimento e non rumore, ma non è possibile stabilire il momento in cui si è attivato e quantificarne anche solo con una stima l’entità con il tipo di processing utilizzato. Per cercare di risolvere questo problema, in collaborazione con IDS (Ingegneria Dei Sistemi, Pisa, Italia) si sta testando un’applicazione (Repeat Pass Tool) che lavora stimando la velocità tra due data set di immagini caratterizzati da una certa baseline temporale cercando di “ricostruire” andamenti temporali di spostamento per periodi di assenza di osservazioni come questi. Sulla base dello stesso principio, questo tool può venire impiegato per il monitoraggio discontinuo di fenomeni ad evoluzione estremamente lenta.

Per analizzare nel dettaglio il fenomeno rilevato si possono mantenere le serie temporali relative a tutto il periodo di osservazione, oppure si possono separare i data set in corrispondenza di assenza di osservazioni, analizzando ogni tratto temporale separatamente. Questo potrebbe essere significativo per il periodo in cui si rilevano spostamenti più consistenti o per le sole aree di interesse, sviluppando procedure di elaborazione ad hoc. Ridurre la frequenza temporale delle immagini nel tentativo di aumentare la precisione dell’elaborazione è una soluzione valida per punti con movimenti estremamente lenti come PS12 e PS13; per punti come il PS24, con la riduzione della frequenza temporale delle immagini si rischia di sottostimare gli spostamenti.

Con una frequenza temporale delle immagini di un’immagine per ora e processando con un $BS = 50$, piuttosto che $BS = 35$, si mediano ulteriormente gli effetti atmosferici, che vengono stimati su 50 immagini invece che su 35. Questo tipo di elaborazione è indicato per monitoraggio di movimenti estremamente lenti. Considerare 50 immagini campionate una per ora, significa considerare più di 2 giorni di acquisizione, il che implica che gli effetti atmosferici vengono mediati su un periodo di circa 2 giorni. Con un campionamento di un’immagine ogni sette minuti, considerando un blocco di immagini di 35, si mediano gli effetti su 5 ore circa. Centraline meteorologiche da cui ricavare informazioni atmosferiche di temperatura, pressione e umidità relativa, in prossimità del sensore e dell’area monitorata potrebbero essere un utile supporto all’elaborazione delle osservazioni nella determinazione di movimenti estremamente lenti.

3.8 Dati da campagne successive

Per il monitoraggio discontinuo, ovvero per il riaggancio di serie temporali discontinue tra campagne successive, vengono presentati i risultati preliminari delle analisi effettuate. Tali risultati sembrano incoraggianti, ma lasciano spazio ad ampi approfondimenti sull'utilizzo della tecnica GB-InSAR per il monitoraggio discontinuo.

3.8.1 Riaggancio di serie temporali discontinue: “Discontinuous Monitoring Tool”

Per la Frana di Montecagno, i cui movimenti attesi sono estremamente lenti, sono state condotte campagne periodiche di monitoraggio. L'installazione dello strumento è stata predisposta per il centramento forzato, con monumentazione permanente. Per il riaggancio tra le serie discontinue sono state utilizzate 20 immagini della prima campagna (14/11/10, dalle ore 00.00 alle 4.00) e 20 immagini della seconda campagna (21/01/11, dalle ore 00.00 alle 4.00).

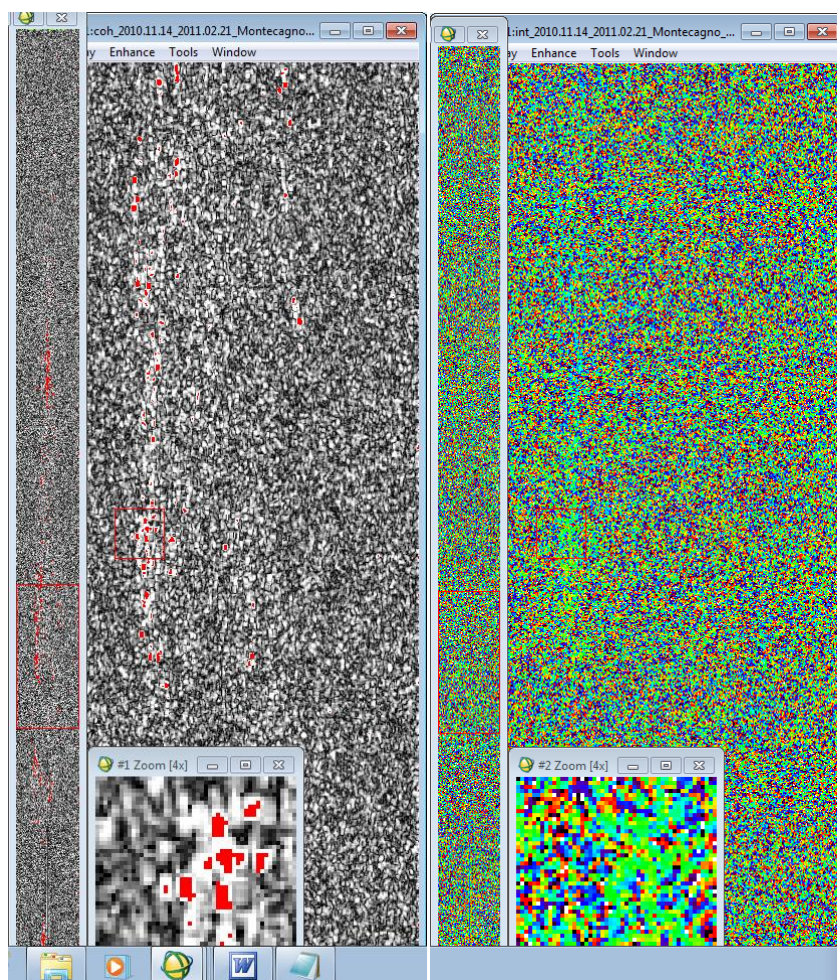


Figura 3.42: Interferogramma (sinistra) tra due immagini successive e immagine in coerenza (destra) tra le stesse due immagini, in ampiezza, media delle acquisizioni delle campagne del 14/11/10 e del 21/02/11. I punti rossi nell'immagine in coerenza sono i punti con coerenza ≥ 0.9 . Frana di Montecagno (Ligonchio, RE, Italia).

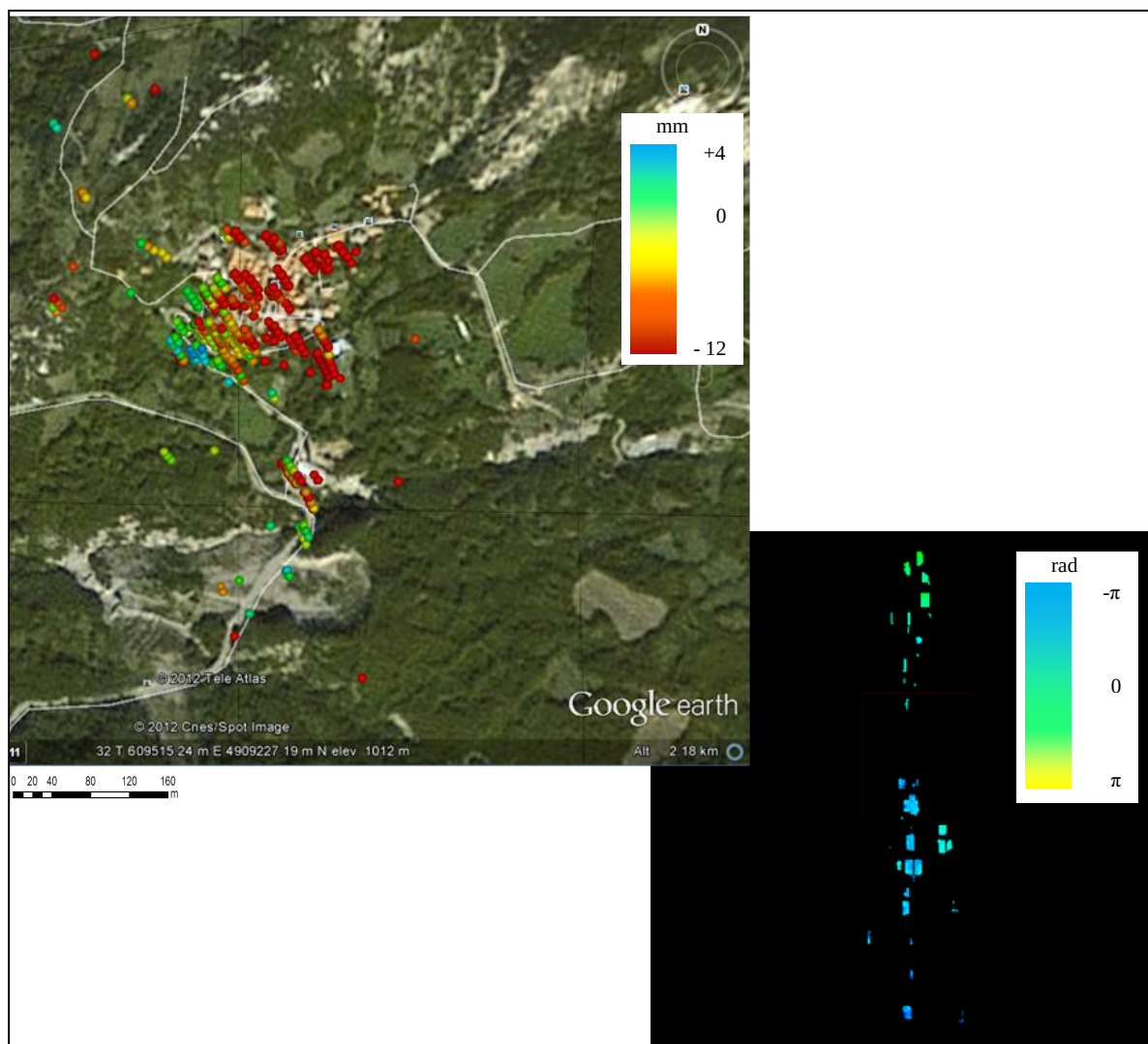


Figura 3.43: Monitoraggio periodico, con campagne del 14/11/10 e del 21/02/11. Mappa di spostamento LoS georeferenziata (sinistra) e interferogramma unwrapped in coordinate immagine (destra). Dettaglio del Paese di Montecagno (Ligonchio, RE, Italia).

Il processamento per il monitoraggio discontinuo è molto simile a quello per l'elaborazione di acquisizioni derivate da singola campagna. Con il Discontinuous Monitoring Tool, si lavora con la selezione manuale dei GCP, calcolando le immagini medie in ampiezza delle due campagne di cui viene fatta la registrazione e di cui si stimano i parametri di trasformazione; da queste due immagini si ricavano i valori interferometrici e l'immagine in coerenza per la selezione dei punti da cui si dipana tutta la successiva elaborazione (phase unwrapping, stima dell'atmosfera, ecc.).

Dall'interferogramma e dall'immagine in coerenza (Figura 3.42), che è stato possibile calcolare grazie a un buon riposizionamento dello strumento, si evince che i punti che rimangono coerenti nel tempo sono veramente molto pochi, probabilmente per la copertura prevalentemente vegetativa che caratterizza l'area. Come si nota in Figura 3.43, solo qualche punto sul paese di Montecagno rimane coerente, quindi le analisi possono essere ristrette solo a questa zona di interesse. Dall'interferogramma Unwrapped, proprio nella zona del paese di Montecagno, si nota una variazione longitudinale del valore di fase (da

blu a verde) giustificabile per effetto dell'atmosfera o per movimenti differenziali. Anche trasversalmente all'immagine si hanno variazioni di colore, imputabili molto probabilmente a movimenti differenziali. Per le ipotesi in cui si lavora per le dimensioni abbastanza ridotte dell'area coperta da punti, l'atmosfera dovrebbe essere costante sull'area indagata, pertanto gli effetti visualizzabili sono legati possibili movimenti. A causa della scarsità dei punti coerenti e della loro distribuzione, non è stata possibile stimare il contributo atmosferico, quindi i valori di spostamento LoS, georeferenziati in modo speditivo e riportati in Figura 3.43 a sinistra, contengono il contributo atmosferico della fase, essendo valori angolari tradotti semplicemente in valori metrici.

I risultati sono pertanto valutabili solo in modo relativo e qualitativo (confronto relativo tra punti), perché non è stata calcolata una vera e propria stima dello spostamento. I risultati sono promettenti, ma lasciano intendere che la strada da percorrere per applicare in modo significativo e quantitativo il riaggancio di serie discontinue di acquisizioni è lunga e piena di ostacoli. In Figura 3.43 sono rilevabili comportamenti differenziali tra gli elementi dell'abitato, ma non quantificabili con precisione. Rimane anche l'incertezza legata alla correlazione temporale: movimenti maggiori di circa 4 mm che non misurati, non possono essere stimati con semplice analisi interferometria. Il monitoraggio discontinuo è quindi utile per rilevare spostamenti molto piccoli, inferiori a circa 4 mm, lavorando nella banda Ku.

3.9 Georeferenziazione, mappe 2D e mappe 3D

La tecnica GB-InSAR lavora in un sistema di riferimento locale bidimensionale, in coordinate polari. Per semplificare la visualizzazione delle informazioni, spesso, l'immagine in coordinate polari viene tradotta in un'immagine in coordinate cartesiane ortogonali (x,y), producendo mappe bidimensionali di spostamento o velocità, in cui la posizione dei pixel è nel sistema di riferimento immagine (i, j). Per facilitare l'interpretazione dei risultati, di norma, le immagini vengono georeferenziate sistemi di riferimento cartografici, attraverso la riproiezione delle immagini, su un supporto 3D (DTM o DSM secondo le esigenze) ottenendo mappe 2D o 3D georeferenziate che possono essere importate in un GIS (2D o 3D). Non devono, però, essere trascurati gli aspetti legati al passaggio tra sistemi di riferimento (Bezoari et al., 2002; Watson, 2006), in particolare quando la trasformazione è verso un sistema cartografico, perché possono essere introdotti errori e deformazioni che influiscono sul corretto posizionamento dei pixel.

Le informazioni territoriali vengono comunemente gestite in archivi GIS, che per tradizione e tecnologia sono spesso bidimensionali. Gli enti pubblici e le Regioni dispongono di molteplici informazioni, come ortofoto aeree e satellitari, mappe del dissesto, mappe di suscettibilità, ecc., che possono essere definite "informazioni d'archivio", che aiutano ad interpretare i fenomeni di instabilità di versanti: Le informazioni derivanti dall'applicazione di tecniche di monitoraggio vengono spesso integrate in questi archivi per facilitarne l'interpretazione "geologica" dei risultati. Quindi i sistemi GIS (Carrara et al., 1991) sono un utile strumento di integrazione delle informazioni, che però necessitano di essere interpretate alla giusta scala, considerando sempre l'incertezza associata al passaggio tra sistemi di

riferimento differenti e la deformazione legata alla riproiezione cartografica. Per lo studio di ogni singolo fenomeno deve essere scelto il sistema di riferimento più opportuno.

Nell'analisi dei dati GB-InSAR, la riproiezione su un supporto tridimensionale, georeferenziato in un sistema di riferimento cartografico o in un sistema di riferimento locale è un passaggio obbligato.

Se la riproiezione avviene sulla base di DTM/DSM sorpassati, potrebbero verificarsi incongruenze tra realtà e modello 3D che lo rappresenta, che si riflettono sulla georeferenziazione dei risultati, laddove, per esempio, si sia creata una scarpata o un accumulo di materiale. Il supporto 3D per la proiezione dei risultati deve essere visto anche in termini di accuratezza del posizionamento del risultato oltre che in funzione della precisione. Se i movimenti sono generalizzati e la morfologia dell'area non ha subito variazioni importanti, la riproiezione su un supporto 3D non aggiornato può essere accettabile. Qualora, però volessero essere individuati spostamenti differenziali localizzati, è bene che le informazioni 3D (DTM o DSM) siano le più aggiornate possibili, in modo che la riproiezione possa essere accurata oltre che precisa.

In Figura 3.44 si nota un certo errore nella georeferenziazione della mappa di spostamento, nonostante le coordinate del punto di osservazione e l'angolo di orientamento al Nord siano stati misurati in modo attento (precisione di qualche centimetro). Con l'uso di corner reflector o con elementi naturali molto riflettenti e ben riconoscibili sull'immagine, la georeferenziazione potrebbe essere calcolata in modo più preciso. È comunque bene tener presente che la dimensione dei pixel dell'immagine SAR è di 0.5 m x 4.4 m a 1 km di distanza dal sensore e che sono accettabili precisioni di georeferenziazione dell'ordine della dimensione del pixel (Fraser, 2000; Fraser et al., 2001; Fraser et al., 2002). Precisione e accuratezza della georeferenziazione devono essere rapportate anche all'accuratezza e alla precisione proprie del supporto tridimensionale.

Per la georeferenziazione dei risultati della Frana di Romanoro (Figura 3.44), l'errore residuo riscontrato è quindi legato a molteplici concause:

- passaggio da sistema di riferimento ETRF89, proprio del rilievo GPS –Global Positioning System- per la determinazione di punti per la georeferenziazione, a sistema di riferimento cartografico UTM* ED50 32N;
- riproiezione su DTM e non su DSM;
- riproiezione su DTM abbastanza sorpassato.

Complessivamente si possono avere scostamenti tra posizione del punto sulla carta e posizione del punto rilevato che possono arrivare anche a 10-15 m per questo specifico caso.

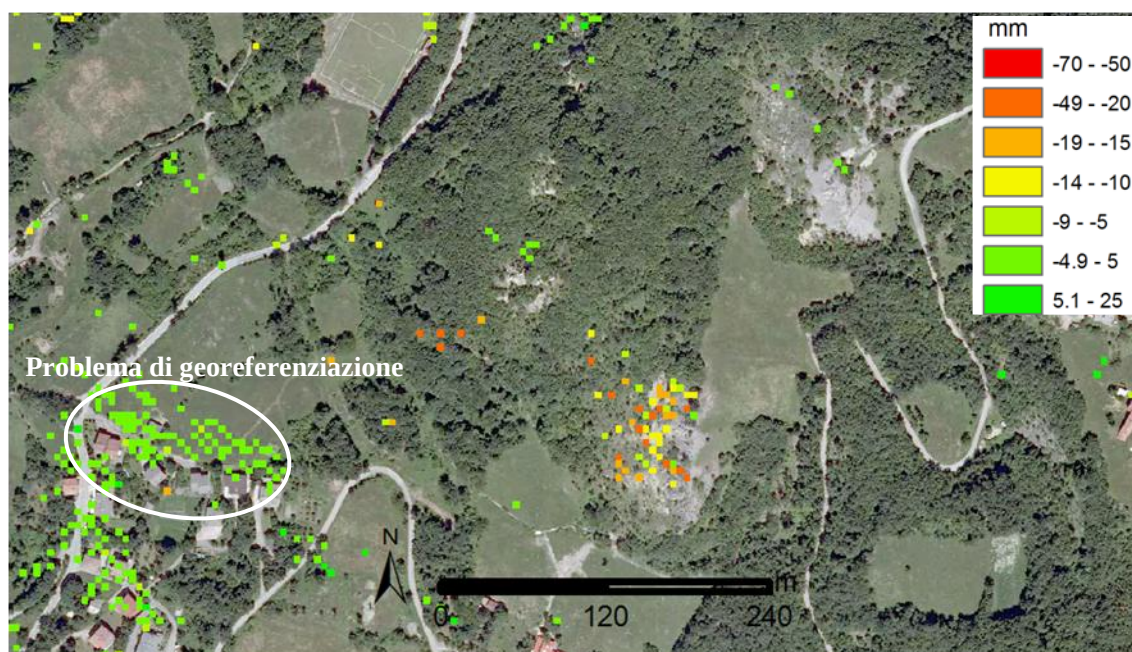


Figura 3.44: Dettaglio di una mappa di spostamento LOS georeferenziata. Frana di Romanoro, MO, Italia.

Gli obiettivi di precisione e accuratezza devono sempre essere pesati in funzione di ciò che si sta monitorando e con quali scopi. Per applicazioni in tempo reale è importante collocare spazialmente gli spostamenti, ma è cruciale quantificarli, predisponendo la strumentazione di misura nel minor tempo possibile. Pertanto non è sempre possibile programmare campagne di misura ad hoc per l'aggiornamento della cartografia esistente (da telerilevamento o da aereo (Bertacchini et al., 2007; Bertacchini e Capra, 2010) o per l'acquisizione di DTM/DSM di dettaglio (Luzi et al., 2009; Lingua et al., 2008; Monserrat e Crosetto., 2008; Teza et al., 2007). Per applicazioni in tempo reale per l'allerta possono essere sfruttati database liberi che si basano su immagini satellitari (ASTER DEM – Digital Elevation Model- o STRM -Shuttle Radar Topography Mission-, Google Earth, Portale cartografico Nazionale, Portale Cartografico Regionale, ecc). Se però, si devono monitorare abitati o se la morfologia dell'area si è modificata rispetto a quanto riportato nei dati di archivio di cui si dispone, o ancora se non si ha nessun modello tridimensionale della scena, è consigliabile acquisire informazioni tridimensionali aggiornate e dettagliate.

Se l'oggetto del monitoraggio tramite GB-InSAR presenta edifici o abitati, un modello a superfici dell'area, ricavato da scansioni laser scanner terrestri, opportunamente filtrate dalla vegetazione, potrebbe essere di estremo aiuto nel collocare spazialmente gli spostamenti rilevati: il modello a superfici, però, deve essere di estremo dettaglio dovendo individuare le pareti degli edifici. Un rilievo laser scanner terrestre long range potrebbe essere adatto a questo scopo anche se rimane centrale il problema della georeferenziazione e dell'utilizzo di modelli digitali delle superfici opportunamente rappresentati. Inoltre, sarebbe opportuno lavorare in 3D piuttosto che in 2D, generando una sorta di modello tridimensionale dello scenario, su cui fare una texturizzazione delle fotografie dello scenario acquisite contestualmente alla scansione laser scanner ed anche delle mappe di spostamento.

Il problema che si ha nell'individuazione delle pareti degli edifici si presenta analogo, anche se a una scala diversa quando l'oggetto di studio è costituito da pareti verticali in roccia, come per esempio per la Frana di Collagna (Reggio Emilia, Italia). Come descritto nel capitolo successivo (Paragrafo 4.2.4) il settore della frana monitorato attraverso GB-InSAR è stato oggetto di indagine anche attraverso rilievi ALS (Airborne Laser Scanner) e TLS (Terrestrial Laser Scanner). Confrontando i due rilievi è emersa l'esigenza di integrarli per avere una descrizione ottimale della morfologia dell'area: il rilievo TLS ottimale per le pareti verticali è complementare a quello ALS che dall'alto ha un punto di vista privilegiato dell'area nel complesso, ma che rileva con scarsità di punti superficiali, a giacitura verticale (Alba e Scaioni, 2007; Castagnetti et al., 2011; Guarnieri e Vettore, 2007).

Considerando che a circa 1 km di distanza dal sensore, la dimensione del pixel di un'immagine GB-SAR è di 0.5 m x 4.4 m (range x cross range) e che per questo caso applicativo la distanza massima di osservazione in range è di circa 1.2 km, la dimensione dei pixel è di questo ordine di grandezza. Quindi, avendo a disposizione una nuvola di punti derivata dall'integrazione TLS e ALS è stato testato in che modo, per DTM in formato grigliato (Kraus e Pfeifer, 2001), al variare della dimensione del passo della griglia (0.5 m, 1 m, 2 m) variasse la riproiezione delle mappe di spostamento LoS, 2D o 3D.

La soluzione ottimale per la riproiezione delle immagini SAR bidimensionali sarebbe quella di poter lavorare con modelli a superfici in formato TIN (Triangular Irregular Network) mesh (Delauney, 1934), piuttosto che in formato grigliato, per cui in futuro si lavorerà anche in questa direzione, ma per ora si è lavorato con DTM ad alta risoluzione in formato grigliato. In Figura 3.45 sono riportati dettagli del modello a superfici delle pareti rocciose del settore di frana G1, della Frana di Collagna (Reggio Emilia, Italia) visualizzate con vista 3D, nel software IBIS Guardian. Il modello a superfici, in formato grigliato con passo di 0.5 m, 1 m e 2 m, è derivato direttamente dalla nuvola di punti integrata. Si osserva che il grado di dettaglio diminuisce con la riduzione della risoluzione del grigliato, anche se il modello a superfici ben descrive la morfologia dell'area. Il software utilizzato non è esplicitamente pensato per la visualizzazione di DTM, pertanto appaiono discontinuità, presenti solo a livello visivo e non per assenza di dato.

In Figura 3.46 sono riportate le riproiezioni tridimensionali delle mappe di spostamento relative ad una stessa elaborazione (TEST 1h_50+1, presentato nel paragrafo 3.7), visualizzate con il software IBIS Guardian, ottenute con DTM integrato (ALS+TLS) grigliato con diversi passi (0.5 m, 1 m, 2 m). Per effetto della dimensione del grigliato la mappa di spostamento proiettata su DTM con passo di 2 m appare più continua spazialmente e meno rumorosa: maggiore è la risoluzione del DTM, più puntuali sono le informazioni e la loro corrispondenza agli elementi effettivamente misurati.

In Figura 3.47 sono riportate le mappe di spostamento 2D georeferenziate nel sistema UTM ETRF2000, derivate dalla riproiezione con DTM con passo del grigliato di 0.5 m, 1 m, 2 m. La dimensione del passo della griglia regola anche la dimensione del pixel dell'immagine 2D esportata: se il DTM ha passo 1 m, allora l'immagine 2D ha pixel di 1 m. Aumentando la dimensione del pixel (da 0.5 m a 2 m) si riduce il rumore legato alla definizione di spostamento e le mappe appaiono via via più lisce e smussate per effetto del ricampionamento delle informazioni. Nella mappa 2D con dimensione del pixel a 0.5 m si

conserva la risoluzione in range dell'immagine SAR, pertanto è possibile vedere blocchetti di colore uniforme di dimensioni 0.5 m x 4.4 m circa poiché il ricampionamento dell'informazione di spostamento è ridotto al minimo.

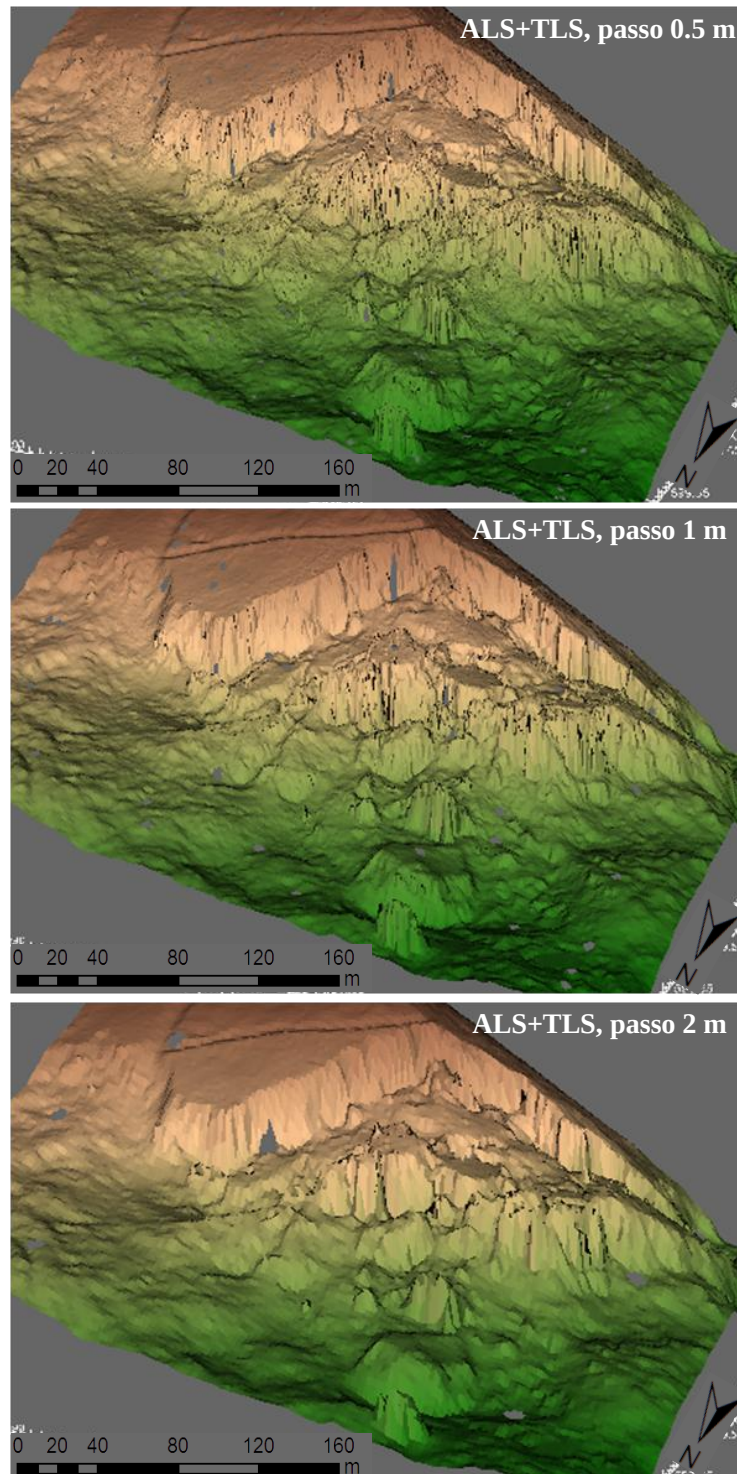


Figura 3.45: DTM integrato ALS+TLS visualizzato da software Guardian con passo della griglia 0.5 m, 1 m, 2 m. Frana di Collagna, RE, Italia.

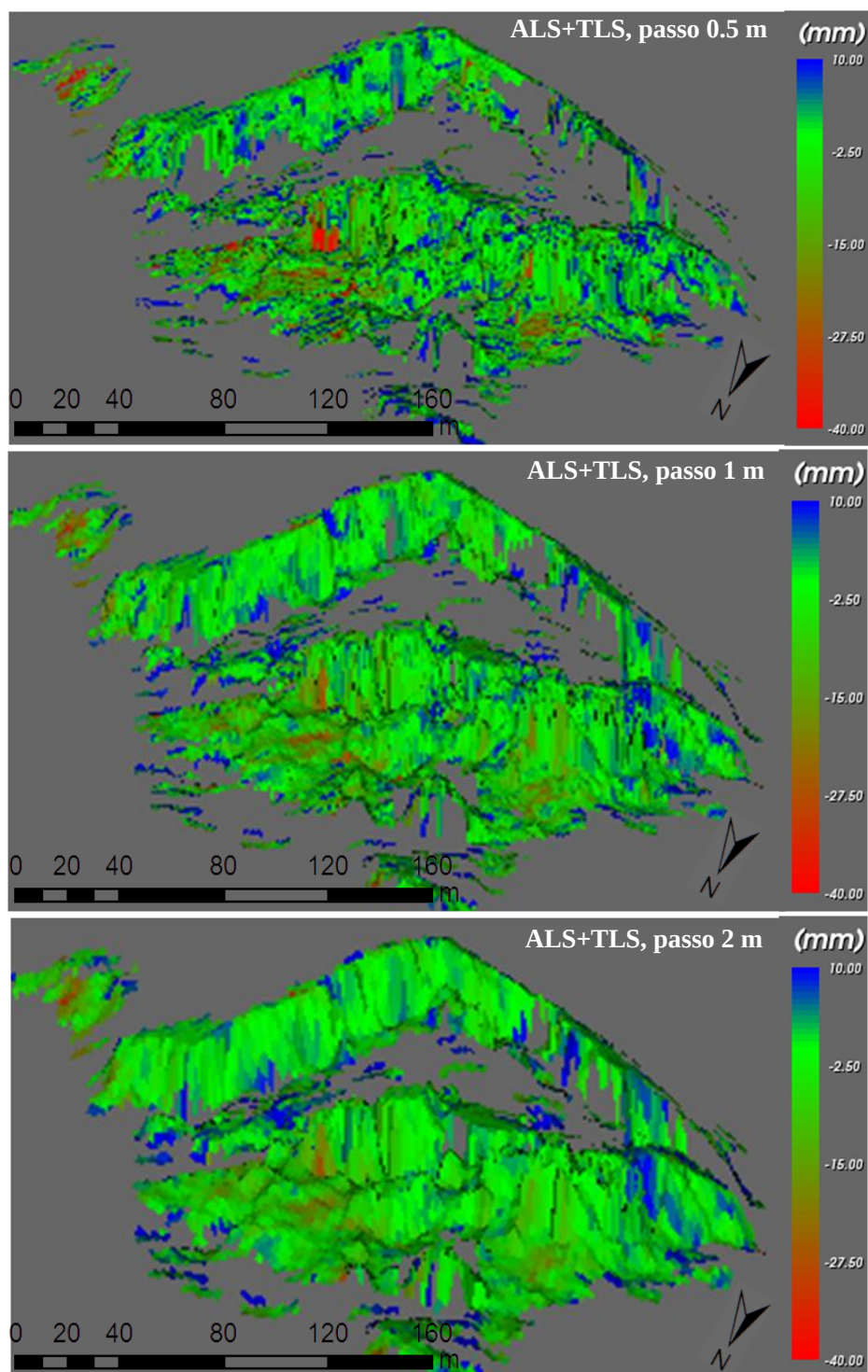


Figura 3.46: Spostamenti da processing 1h_50+1 proiettati su DTM integrato con passo 0.5 m, 1 m e 2 m, visualizzazione da software Guardian. Frana di Collagna (RE, Italia).

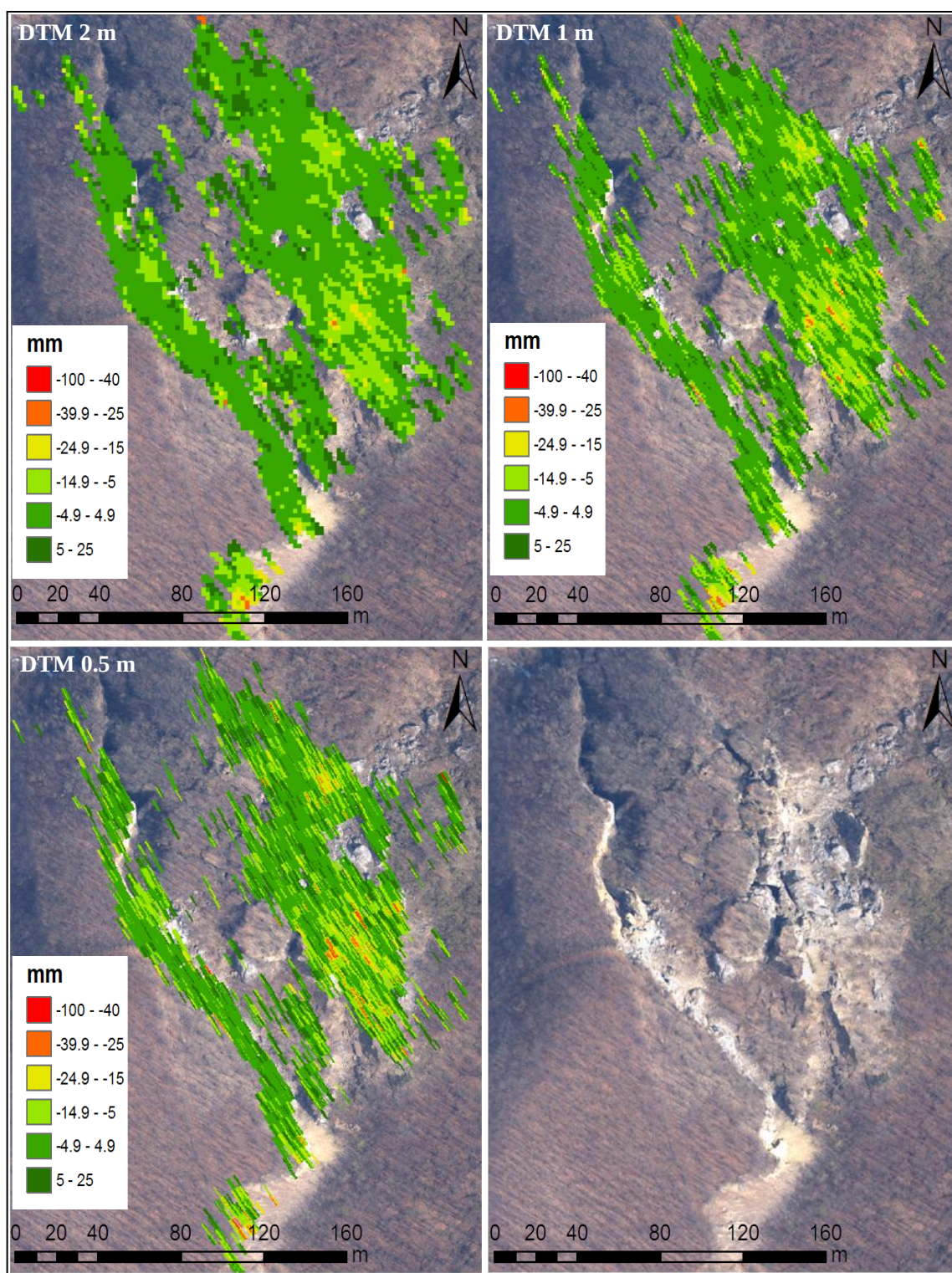


Figura 3.47: Mappe di spostamento 2D (TEST 1h_50+1), riproiettate su supporto bidimensionale attraverso DTM in formato grigliato con passo della griglia di 0.5 m, 1 m e 2 m. Frana di Collagna (RE, Italia).

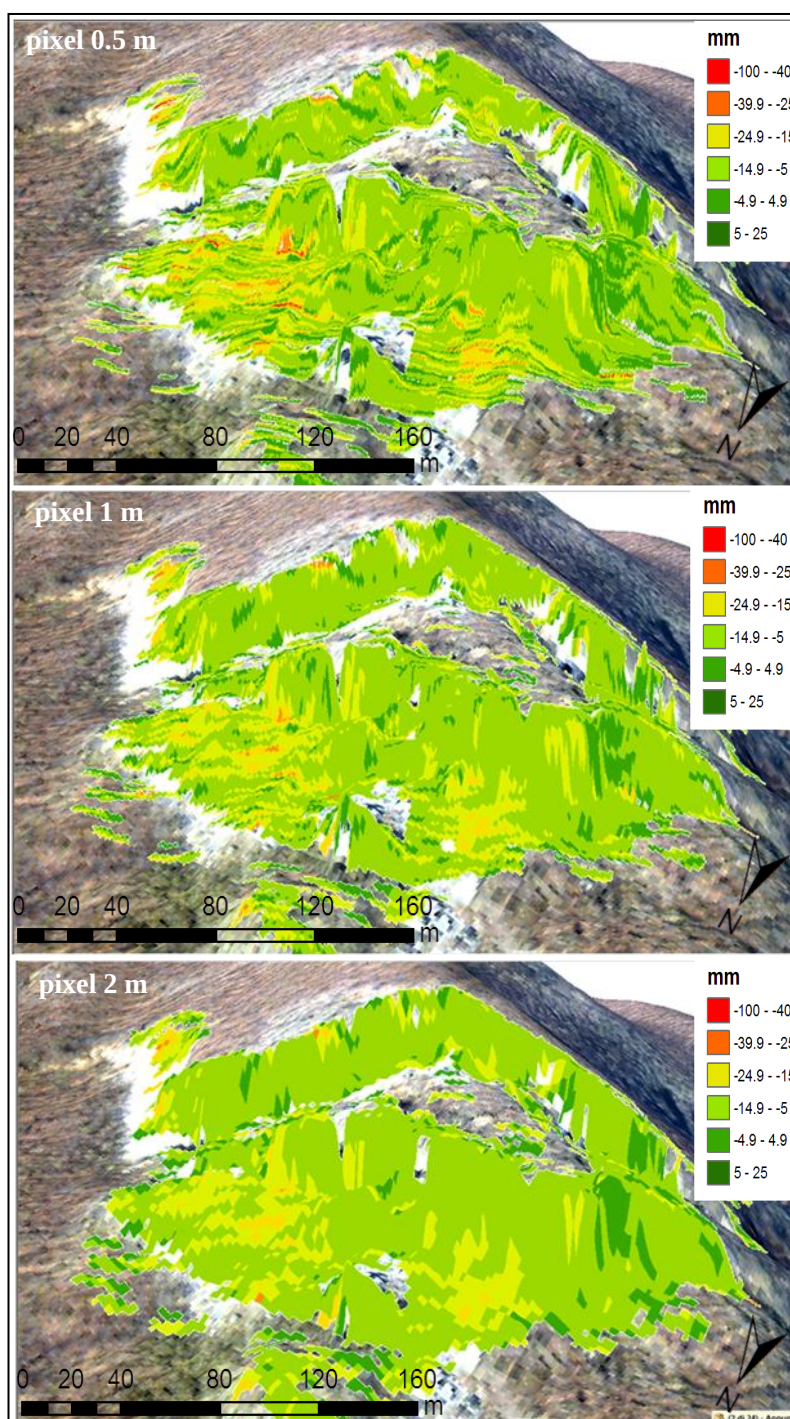


Figura 3.48: Mappe di spostamento 3D (TEST 1h_50+1) con pixel 0.5 m, 1 m, 2 m, riproiettate su supporto tridimensionale (DTM con passo della griglia 1 m). Frana di Collagna (RE, Italia).

Nel monitoraggio di elementi a sviluppo verticale, il passaggio dalla visualizzazione 3D alla visualizzazione 2D, però è decisivo, perché gli spostamenti individuati sulle pareti verticali non vengono ben rappresentati in due dimensioni, con visualizzazione dall'alto. La riproiezione in due dimensioni, infatti, impoverisce la soluzione di spostamento (Bezoari et al., 2002), “schiacciando” sul piano le informazioni che si hanno in quota. Questa problematica non si presenta per versanti instabili in cui la giacitura della superficie è sub-orizzontale o ha pendenze inferiori rispetto a quelle di pareti verticali.

In Figura 3.48 sono riportate le stesse mappe di Figura 3.47, ma in 3D. Il rendering è stato ottenuto riproiettando l'ortofoto aerea dell'area sul DTM integrato (ALS+TLS, passo della griglia di 1 m) e su questa sono state proiettate le mappe di spostamento. Con una visualizzazione di questo tipo è più facile interpretare i risultati del monitoraggio, perché si distinguono i spostamenti differenziali tra le differenti torri di roccia ed anche all'interno della singola struttura.

Le immagini di Figura 3.46, Figura 3.47 e Figura 3.48 vogliono essere esemplificative. Servono ad illustrare la problematica relativa alla riproiezione di mappe di spostamento GB-InSAR su supporti 2D e 3D georeferenziati, di elementi a sviluppo verticale, pensando a sviluppi futuri della tematica, che merita di essere ulteriormente approfondita. La soluzione per una visualizzazione ottimale dei risultati in 3D sarebbe quello di proiettare le immagini di spostamento SAR su supporto 3D in formato TIN mesh, e non solo come grigliato, sia per conservare il massimo grado di definizione della superficie, sia per non impoverire la soluzione di spostamento attraverso riproiezioni successive.

Software dedicati alla visualizzazione 3D o GIS 3D sarebbero uno strumento ideale per questi scopi, per cui in futuro se ne studieranno le potenziali applicazioni. Sistemi di navigazione virtuale 3D in grado di gestire un elevato contenuto di informazioni come quello posseduto da nuvole di punti da rilievi laser scanner iniziano oggi ad essere sfruttati, in campo architettonico/archeologico più che per lo studio dei versanti instabili, ma presentano ottime potenzialità anche in questo ambito.

Capitolo 4. RISULTATI: Validazione Quantitativa

4.1 Introduzione

Come visto nel capitolo precedente, i risultati di spostamento derivati da tecnica GB-InSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) presentano una certa variabilità in funzione del set di calibrazione e delle elaborazioni, raggiungendo comunque precisioni dell'ordine del centimetro. Data questa variabilità e per stabilire anche il grado di accuratezza dei risultati, in questo capitolo, verranno presentati i risultati del confronto quantitativo (Barla et al., 2010; Marambio et al., 2009) tra dati di spostamento GB-InSAR (LoS -Line of Sight-) e dati di spostamento derivati da Stazione Totale Automatizzata (ATS) operante in continuo per il monitoraggio del versante. L'integrazione e il confronto vengono presentati per casi applicativi dell'Appennino Emiliano (Bertacchini et al., 2009; Borgatti et al., 2006; Corsini et al., 2005; Cruden e Varnes, 1996; Gaffet et al., 2010; Manzi et al., 2004) caratterizzati da fenomeni molto lenti (Frana di Collagna, Reggio Emilia, Italia) e con velocità moderate (Frana di Valoria, Modena, Italia); nel primo caso le considerazioni verranno volte principalmente alla precisione del metodo, mentre nel secondo all'accuratezza.

Una precisione centimetrica o leggermente inferiore nello studio di versanti instabili è sufficiente per molte applicazioni. Ottenere precisioni più spinte, però, consentirebbe di estendere il monitoraggio tramite GB-InSAR a fenomeni con evoluzione molto lenta, riuscendo a discriminare tra rumore e spostamenti di piccola entità (Noferini et al., 2007). La tecnica GB-InSAR, potrebbe essere sfruttata, grazie alla sua precisione nominale, per lo studio di una tipologia di fenomeni per cui molti dei più comuni strumenti topografici hanno evidenziato limiti di applicabilità sia sul breve che sul lungo periodo.

Per fenomeni di instabilità caratterizzati da velocità moderate (m/giorno), a causa della decorrelazione temporale tra immagini successive anche acquisite con la massima frequenza temporale, gli spostamenti potrebbero essere sottostimati. Pertanto, anche raggiungendo una precisione di qualche centimetro, la tecnica GB-InSAR potrebbe non essere accurata. Le osservazioni tramite stazione totale, non presentano questo limite, se durante il movimento il prisma riesce comunque ad essere misurato.

Per la Frana di Collagna e la Frana di Valoria, grazie a collaborazioni e convenzioni tra Università di Modena e Reggio Emilia (Dipartimenti di Ingegneria Meccanica e Civile - DIMeC- e di Scienze della Terra -DST-) e Servizio Tecnico di Bacino degli Affluenti del Fiume Po (sezione di Reggio Emilia e Sezione di Modena) per la predisposizione, lo studio e l'analisi dei dati di sistemi intergati di monitoraggio topografico (Bonaccorso et al., 2009; Cosser et al., 2003; Duffy et al., 2001; Puglisi et al., 2004; Puglisi et al., 2005), è stato possibile integrare la tecnica GB-InSAR con altre tecniche, come stazione totale e laser scanner aereo e terrestre. La frana di Collagna e la Frana di Valoria si differenziano oltre che per la tipologia di movimento, anche per estensione, distanze di osservazione e copertura del suolo, pertanto si prestano anche a un reciproco confronto.

Dal confronto tra ATS e GB-InSAR è emerso che i risultati della stazione totale sono più robusti a livello quantitativo, ma le due tecniche ben si integrano fornendo informazioni tra loro complementari. Una questione chiave del confronto puntuale dei risultati rimane la georeferenziazione dei dati in un unico sistema di riferimento e la riproiezione delle immagini GB-InSAR su mappe 2D e 3D georeferenziate, come già evidenziato anche nel capitolo precedente. Le informazioni della stazione totale sono riferite a un punto, il prisma, mentre quelle del GB-SAR a un pixel di dimensione variabile in funzione della distanza: una georeferenziazione grossolana delle informazioni potrebbe inficiare il confronto specialmente dove sussistono variazioni differenziali di spostamento abbastanza localizzate.

Il confronto puntuale quantitativo tra GB-InSAR e stazione totale è stato valutato considerando la variazione di distanza inclinata misurata dalla stazione totale e lo spostamento cumulato LoS determinato dal GB-InSAR, nell'ipotesi che le due grandezze fossero confrontabili, essendo state misurate all'incirca dalla stessa posizione. La tecnica interferometrica è stata applicata utilizzando l'approccio PS (Permanent Scatterers) definendo il set di calibrazione attraverso il criterio di coerenza spazio-temporale dei punti. Per le osservazioni di distanza inclinata della stazione totale si è valutata l'applicazione delle cosiddette correzioni atmosferiche per aumentare precisione e accuratezza dei risultati. Lo spostamento LoS, è positivo se il pixel si "allontana" dal sensore, mentre è negativo se il pixel si "avvicina" al sensore. Le stesse considerazioni valgono anche per le misure di distanza inclinata: la distanza inclinata diminuisce se il prisma si avvicina al sensore (variazione negativa), mentre aumenta se il prisma si allontana (variazione positiva). Le postazioni di misura, sia per la Frana di Collagna che per la Frana di Valoria, sono abbastanza frontali rispetto al versante, quindi spostamenti negativi indicano un movimento del punto lungo il versante, mentre spostamenti positivi sono indice di un punto "in allontanamento". In quest'ultimo caso, non plausibile dal punto di vista geologico l'allontanamento del punto dal sensore si giustifica ammettendo errori residui nella stima dello spostamento.

4.2 Validazione in caso di movimenti molto lenti (cm/mese)

Il lavoro riportato in questo paragrafo riguarda la descrizione del confronto quantitativo tra risultati di spostamento derivati da misure GB-InSAR e da sistema topografico di monitoraggio continuo con stazione totale automatizzata. Si sono inoltre determinati vantaggi e svantaggi dell'utilizzo delle varie

tecniche integrate (GB-InSAR e stazione totale, tecniche LiDAR -Light Detection and Ranging) per lo studio di movimenti lenti (cm/mese o inferiori) di versanti rocciosi (Abellán et al., 2006; Bitelli et al., 2004; Blikra, 2008; Cantoni et al., 2002; Chambers et al., 2010; Henderson et al., 2011; Mazzanti e Brunetti, 2010; Nordvik e Nyrnes, 2009; Oppikofer et al., 2009).

Il monitoraggio dei fenomeni franosi e dei versanti instabili è di fondamentale importanza per la riduzione e la prevenzione del rischio, in particolare quando sono coinvolte infrastrutture (Pieraccini et al., 2006a; Pieraccini et al., 2006b) di interesse strategico, come la S.S. 63 del Cerreto. Questa importante struttura viaria di interesse nazionale è coinvolta da fenomeni di instabilità fin da metà degli anni '70, in località Piagneto (Collagna, Reggio Emilia). Data l'importanza della struttura e il rischio ad esso connessa, per lo studio della Frana di Collagna è stato predisposto un sistema di monitoraggio continuo tramite stazione totale automatizzata e sensori di tipo geotecnico, attivo dal 2009 (Bertacchini et al., 2011a; Bertacchini et al., 2011b; Corsini et al., 2011b); inoltre, sono state realizzate campagne di misura con strumentazione LiDAR (Light Detection and Ranging), sia terrestre che aviotrasportata, GB-InSAR e sistemi GNSS ed è stata installata una centralina meteorologica (Davis, Vintage PRO2) in acquisizione continua in prossimità della postazione della stazione totale (Figura 4.1).

Nell'analisi dell'integrazione tra tecnica GB-InSAR e stazione totale è stata dedicata particolare attenzione al sistema di monitoraggio topografico, in quanto è stato considerato come riferimento per il confronto quantitativo dei risultati.

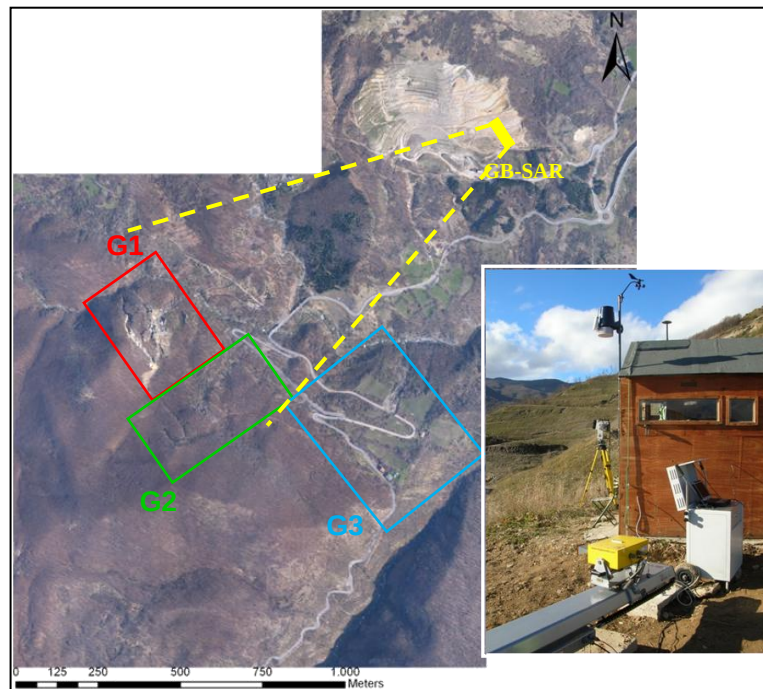


Figura 4.1: Inquadramento della frana di Collagna (ortofoto 2010, in alto) e foto della postazione master di misura (destra).

È stato testato un metodo per l'applicazione delle correzioni atmosferiche alle misure di distanza inclinata dell'elettrodistanziometro della stazione totale su misure periodiche e su misure rilevate in continuo, per cercare di ottenere massima precisione e accuratezza, al fine di discriminare piccoli

spostamenti da errori di misura. Attraverso le correzioni atmosferiche, infatti è possibile ridurre l'effetto di distorsione del raggio laser prodotto per effetto della rifrazione atmosferica (Bezoari et al., 2002). A questo proposito, sono state fatte anche considerazioni sulla stabilità della postazione di misura e dei punti di controllo esterni alla frana.

Dopo aver fatto queste considerazioni sul sistema di monitoraggio topografico è stata realizzata l'integrazione. I dati derivanti dalle due strumentazioni sono stati processati indipendentemente e poi sono stati confrontati.

4.2.1 Il caso di studio

La Frana di Collagna si trova sull'Appennino Settentrionale, in Provincia di Reggio Emilia (Italia). Nel Dicembre del 2008, dopo un elevato tasso di precipitazioni, una frana ha interrotto la Strada Nazionale 63 "Passo del Cerreto", in prossimità di Piagneto, nel Comune di Collagna. Per ripristinare la circolazione, è stato riaperto il vecchio tratto stradale, chiuso nei primi anni '70 a causa di un altro evento franoso. La variante creata, era apparsa una buona soluzione, appunto, fino al 2008, quando è stata chiusa a causa dell'evento franoso ed è stato riaperto il precedente tratto.

Nel 2009, è stato installato un sistema topografico di monitoraggio continuo tramite stazione totale, ad oggi ancora attivo, per controllare i movimenti della zona interessata dall'evento del 2008, ma anche quelli del vecchio tratto stradale riaperto, per ridurre il rischio connesso all'instabilità del versante. L'obiettivo del monitoraggio, formalizzato in diverse Convenzioni tra Università di Modena (Dipartimenti di Scienze della Terra e di Ingegneria Meccanica e Civile), Servizio Tecnico di Bacino degli Affluenti del Po (sede di Reggio Emilia) e Comune di Collagna, finanziato dall'Agenzia di Protezione Civile della Regione Emilia Romagna, è stato innanzitutto la determinazione di movimenti, ma anche uno studio più approfondito del versante per valutarne il comportamento, non solo nelle aree interessate dal percorso stradale.

La frana è stata suddivisa in settori, a seconda del tipo di movimento (Cruden and Varnes, 1996): frana di roccia, scivolamento di roccia e frana in terra nella parte Ovest del versante (settori G1 e G2); scivolamento di terra, nella parte orientale (settore G3) (Figura 4.1 e Figura 4.2).



Figura 4.2: Dettagli dell'interruzione della strada nazionale nel settore G3 (Novembre 2010).

Nel settore G1, di particolare interesse per le misure GB-InSAR, lo scivolamento di roccia è costituito da rocce di grandi dimensioni e torri in roccia, caratterizzate da una scarpata sub-verticale superiore. La

frana si estende, in questo settore fino al Torrente Biola, per una lunghezza totale di circa 250 m e una larghezza di 320 m, una profondità di 60 m, per un totale di circa 2.5 Mm³ (Corsini et al., 2011b).

4.2.2 Il sistema di monitoraggio topografico

Il sistema topografico di monitoraggio è costituito da una stazione totale automatizzata, in acquisizione continua, ogni 2 ore. In Tabella 4.1 sono descritte le caratteristiche del sistema, mentre in Figura 4.3 sono riportate foto della postazione di misura e la localizzazione su ortofoto del 2010 (UTM ETRF2000) degli elementi costitutivi del sistema di monitoraggio. La postazione di misura è collocata sul versante opposto alla frana, in località “Cava Riva Rossa” da dove è possibile monitorarne tutti i settori. La monumentazione dei punti di monitoraggio, dei punti di controllo (o di riferimento) e della postazione di misura è di fondamentale importanza in questi sistemi di monitoraggio, in particolare quando i movimenti attesi sono di piccola entità (mm/mese o inferiori). Per questa ragione per la stazione totale è stato realizzato un pilastro in cemento armato fondato su tre micropali di fondazione lunghi più di 13 m. Le stesse accortezze dovrebbero essere osservate anche per i punti di controllo esterni al corpo di frana, ma per questioni logistiche ed economiche non è sempre possibile farlo.

Stazione totale	
Modello	Leica TM30
Massima distanza operativa	3000 m
Distanza operativa	500-1500 m
Accuratezza angolare.	0.5'' (0,15 mgon)
Accuratezza in distanza	1 mm + 1 ppm, standard
Target	40 prismi: 34 di monitoraggio e 6 di controllo
Acquisizione	Ogni 2 ore
Alloggiamento	All'interno di una casetta in legno
Controllo di stabilità	Campagne periodiche GNSS, tiltmetro della stazione totale
Control unit	
Geomos sw	Comunicazione diretta con sistema di monitoraggio e archiviazione dati
Power Supply	220 V CA con 12 A back- up power
Remote Data Transmission	Connessione GPRS modem

Tabella 4.1: Parametri tecnici del sistema di monitoraggio topografico (Leica TPS1200 Technical Reference Manual, v. 7; Leica TS30/TM30 User Manual, v1.0).

Per i prismi di controllo possono essere accettate monumentazioni anche meno prestanti rispetto a quella della postazione master. Questi punti, infatti, servono come controllo e per orientare il sistema di riferimento locale della stazione totale, ma non sono fondamentali per la misura degli spostamenti.

Il controllo di stabilità nel tempo della postazione di misura è un altro elemento di fondamentale importanza, che permette di impedire l'introduzione di errori sistematici di misura e la loro erronea interpretazione come movimento. Anche per i punti di controllo esterni alla frana è consigliabile un controllo della stabilità nel tempo, per agevolare le operazioni di elaborazione e verifica dei risultati. Pertanto, le monumentazioni dei prismi possono essere differenziate a seconda della funzione dei prismi stessi, di riferimento o di monitoraggio.

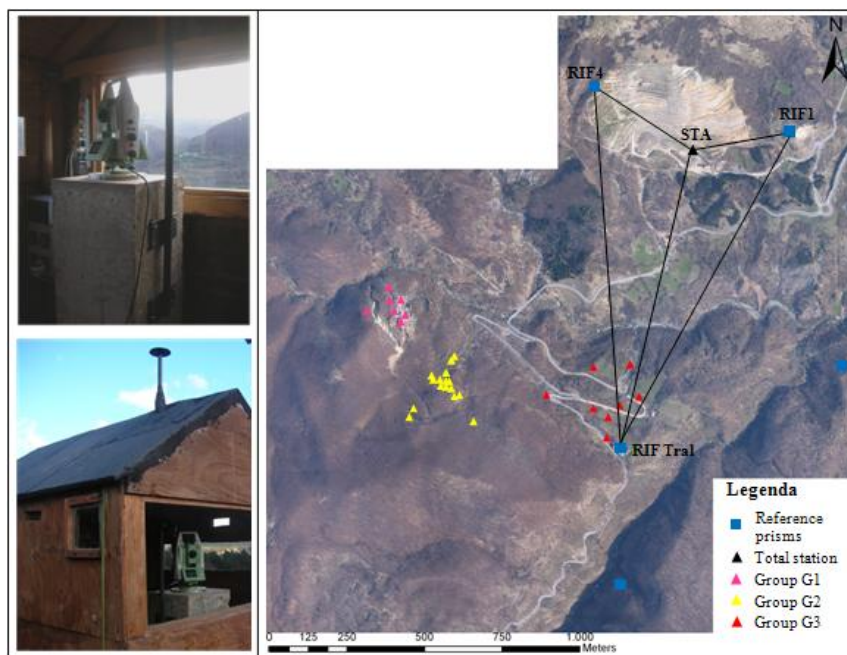


Figura 4.3: Sistema di monitoraggio topografico. Foto della postazione di misura della stazione totale con pilastrino per misure GNSS e ortofoto (2010) con localizzazione dei prismi e rete di prismi per misure periodiche.

In Figura 4.4, sono riportati alcuni esempi di materializzazione di prismi. A sinistra è rappresentato il prisma di controllo RIF1, monumentato con un sistema a centramento forzato; questo punto è utilizzato per l'orientamento del sistema locale della stazione totale; sul palo della monumentazione è installato anche un target per i rilievi TLS. Nelle altre foto sono riportati esempi di prismi di monitoraggio.

Non tutti i prismi di riferimento, ma solo alcuni di essi (RIF1, RIF4, RIF Tral) sono stati installati con un dispositivo per il centramento forzato in grado di ospitare sia il prisma, che un'antenna GNSS (Global Navigation Satellite System), che la stazione totale stessa. Questo è stato fatto, innanzitutto per predisporre un controllo di stabilità di questi punti attraverso misure periodiche GNSS, ed anche per creare una rete di punti (Figura 4.3 a destra) che potesse essere rilevata e compensata, anche tramite misure periodiche condotte con stazione totale. Dal 2009, sono state realizzate diverse campagne di misura periodiche sia GNSS, che con TS, contemporanee le une alle altre, secondo precisi schemi di rete. Attraverso le misure periodiche con la stazione totale sono stati realizzati test sugli effetti dell'influenza dell'atmosfera sulle misure di distanza dell'EDM dello strumento. Con le campagne periodiche GNSS è stato possibile fare un confronto nel tempo delle posizioni dei punti, per analizzarne la stabilità. Questi confronti hanno dimostrato, con precisione sub-centimetrica, che sia sul breve periodo (qualche mese), che sul lungo periodo (2 anni) i punti possono essere considerati stabili. Per la postazione di misura, dal tiltmetro della stazione totale non è emerso nessun tipo di variazione dell'asse verticale dello strumento, quindi nessun spostamento, per tutto il periodo di funzionamento dello strumento (dal 2009 ad oggi).



Figura 4.4: Esempi di prismi installati.

La stazione totale lavora nel sistema di riferimento locale, centrato nel centro dello strumento e con asse y orientato approssimativamente al Nord geografico (angolo di orientamento calcolato tramite le coordinate dei punti doppi TS -Total Station- e GNSS). Questa scelta consente di lavorare nel sistema proprio dello strumento evitando di introdurre deformazioni dovute alla trasformazione tra sistemi di riferimento, ma nello stesso tempo di avere planimetricamente una posizione dei prismi che riflette la loro collocazione cartografica, agevolando l'interpretazione dei dati.

I dati del sistema di monitoraggio sono anche georeferenziati all'interno di un GIS (Geographic Information System), per favorire la visualizzazione e la gestione delle informazioni. Il sistema di riferimento scelto è l'ETRF2000, nel tentativo di aggiornare l'ormai desueto, anche se ancora utilizzato UTM ED50* (sistema di riferimento della Regione Emilia Romagna).

4.2.3 Determinazione dell'influenza dell'atmosfera sulle misure dell'elettrodistanziometro (EDM) della stazione totale

Per determinare l'influenza dell'atmosfera sulle misure di distanza inclinata dell'elettrodistanziometro (EDM) della stazione totale, in primo luogo, sono stati applicati due modelli di correzione a misure periodiche rilevate a cadenza stagionale, su una rete locale costituita dalla postazione permanente di misura della stazione totale (STA) e dai punti di riferimento RIF1, RIF Tral, RIF4. La forma della rete non è quella ideale costituita da triangoli equilateri, ma da triangoli isosceli allungati (Figura 4.3), poiché la determinazione della posizione di punti è stata influenzata pesantemente dalla morfologia dell'area. In un secondo momento, si sono applicate le correzioni anche alle osservazioni in continuo.

Attraverso la compensazione delle osservazioni di rete è possibile associare ad ogni misura un errore, quantificandolo. Determinare il valore di questo errore non è possibile quando si lavora semplicemente "per polari", cioè senza realizzare una compensazione. Questo è il caso del sistema di monitoraggio qui installato, operante in continuo. Grazie alla compensazione delle osservazioni periodiche e all'individuazione dell'errore associato è stato confrontato l'errore di misura con l'entità della correzione atmosferica calcolata, valutando che questa fosse significativa (Bezoari et al., 2002). Sulle misure

periodiche di rete della stazione totale, durante le quali sono state rilevati anche pressione, umidità relativa e temperatura atmosferiche (Aprile 2010 e Ottobre 2010), sono state condotte tre tipi di analisi:

- la prima inerente le distanze inclinate rilevate dall'elettrodistanziometro, considerando o non considerando gli algoritmi per le correzioni atmosferiche;
- la seconda riguardante il confronto tra coordinate compensate corrette e non corrette;
- la terza per il confronto di coordinate corrette di diverse campagne.

Da queste prime analisi è emerso che le correzioni atmosferiche sembrano essere indispensabili per aumentare l'accuratezza delle osservazioni e che i risultati dei due modelli di correzione applicati fossero sostanzialmente congruenti.

Le correzioni sono state quindi applicate alle osservazioni di distanza inclinata acquisite in continuo dal sistema di monitoraggio, utilizzando i parametri atmosferici misurati in contemporanea alle osservazioni della stazione totale dalla centralina meteorologica posizionata in prossimità della stazione totale. Da queste analisi è emerso che l'applicazione delle correzioni atmosferiche alle misure in continuo, ne migliora la precisione oltre che l'accuratezza.

Correzione della rifrazione atmosferica

Alle osservazioni di distanza inclinata sono state applicate due tipologie di correzioni atmosferiche:

- correzioni atmosferiche (in ppm, parti per milione) calcolate dallo strumento, inserendo al momento della misura, grazie all'apposita interfaccia, i valori di pressione (mbar), temperatura (°C) e umidità relativa (%) dell'atmosfera;
- correzioni atmosferiche (in ppm) determinate in post-processing, secondo un opportuno modello (CECW-EE, 2002; Marini e Murray, 1973; Rüeger, 1990).

Il modello di correzione applicato dallo strumento è sommariamente descritto nel manuale (TM30/TS reference manual, v 7.3). Le informazioni fornite non sono sufficienti a ricostruire fedelmente le correzioni atmosferiche calcolate, per cui, in post processing è stato applicato il modello descritto da Rüeger (1990) e dalle norme CECW-EE (2002). Per calcolare le correzioni secondo quest'ultimo modello sono necessarie anche temperatura di bulbo secco e temperatura di bulbo umido, che non vengono fornite dalle centraline meteorologiche utilizzate. Questi valori sono stati ricavati dai valori misurati di umidità relativa e temperatura dell'aria, grazie ad alcune formule comunemente usate in termodinamica ed al diagramma psicrometrico (Çengel, 1998). Per applicare queste correzioni in post-processing, lo strumento è stato impostato su un valore di correzione di 0 ppm, che viene automaticamente settato in corrispondenza di valori atmosferici di temperatura di 13°C, pressione di 1013.3 mbar e 60% di umidità relativa (valori atmosferici standard).

Dal momento che l'atmosfera interferisce con la misura dell'elettrodistanziometro lungo tutto il percorso del raggio per effetto della rifrazione atmosferica, per applicare correzioni ottimali, si dovrebbero misurare i parametri atmosferici lungo tutto il percorso, ma questo è praticamente impossibile, in particolare quando i prismi sono innumerevoli e le distanze in gioco sono elevate. Pertanto, si è deciso di simulare le condizioni di monitoraggio in continuo, con misure di parametri atmosferici solo in

corrispondenza dello strumento, ammettendo un errore di qualche ppm su ogni correzione. Infatti, per raggiungere accuratezze dell'ordine di 1 ppm, sarebbe necessario installare sensori ogni 200-300 m, lungo il cammino ottico del raggio.

Applicazione delle ppm per ottenere distanze corrette

$$D_{\text{CORR}} = [(\text{ppm} / 1 \cdot 10^6) (D_{\text{MEAS}})] + D_{\text{MEAS}} \quad [4.1]$$

dove: D_{CORR} = misura corretta di distanza;
 ppm = termine di correzione in parti per milione;
 D_{MEAS} = distanza misurata (0 ppm).

Formule per la correzione dell'indice di rifrazione. Di seguito vengono brevemente spiegate le formule per la riduzione della distanza con il fattore di correzione atmosferica per misure precise con sistemi elettro-ottici.

La correzione della rifrazione viene applicata come di seguito:

$$d = (nR / nL) d_{\text{MEAS}} \quad [4.2]$$

dove: d = distanza corretta;
 nL = indice di rifrazione ambientale;
 nR = indice di rifrazione di riferimento (fornito dalla casa costruttrice dello strumento, per un dato EDM);
 d_{MEAS} = distanza misurata.

La correzione consiste essenzialmente dell'applicazione di un fattore di scala (nR/nL) alla distanza misurata, fattore che lega l'indice di rifrazione standard di riferimento a quello calcolato localmente in funzione dell'ambiente circostante lo strumento.

L'indice di rifrazione ambientale (nL) è:

$$nL = 1 + [(A + B) / (1 \cdot 10^8)] \quad [4.3]$$

dove: A e B sono funzione della temperatura (di bulbo secco e bulbo umido), della lunghezza d'onda portante dello strumento ($\lambda = 0.658 \mu\text{m}$), della densità del vapore d'acqua, del fattore di densità dell'aria secca, della pressione parziale di vapore, della pressione parziale dell'aria secca, della pressione atmosferica e di varie costanti empiriche.

Misure periodiche di rete: data set e metodi

Le misure di rete sono state realizzate seguendo le regole fondamentali per le misure di alta precisione con la stazione totale: sono stati utilizzati dispositivi per il centramento forzato; le basette montate sui punti di misura sono state livellate con la livella elettronica dello strumento prima di iniziare le

operazioni di misura; è stata preventivamente controllata la calibrazione dello strumento e delle basette; le operazioni di scambio prisma- strumento sono state condotte con estrema cura, facendo attenzione a non produrre spostamenti; le basette sono state montate in modo da ottenere un'altezza costante tra prisma e strumento attraverso le diverse campagne; lo strumento è stato fatto acclimatare per 20-25 minuti in corrispondenza di ogni nuova postazione di misura; sono state ripetute più volte le misure di ogni singolo punto sia in posizione principale che coniugata, ecc (CECW-EE, 2002).

Alcune immagini relative allo strumento e al posizionamento dei prismi sui punti di riferimento durante le misure di rete sono riportate in Figura 4.5.

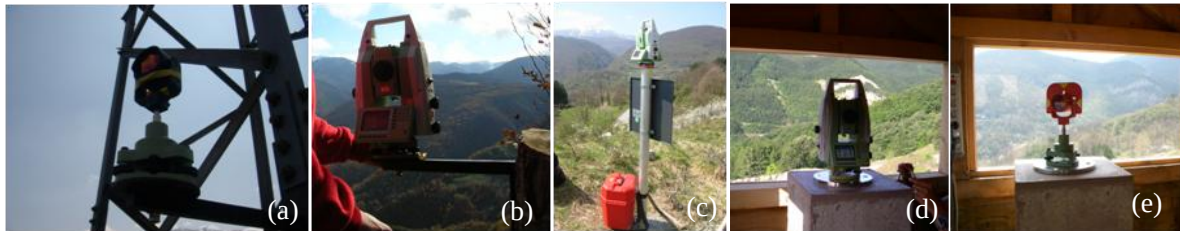


Figura 4.5: Stazione totale e prismi sui punti di riferimento (a) RIF-tral, (b) RIF4, (c) RIF1, (d) ed (e) STA.

Per calcolare queste correzioni è necessario disporre di informazioni relative all'atmosfera stessa (temperatura, pressione e umidità relativa): a tale scopo è stata installata una centralina meteorologica in prossimità della postazione di misura del sistema in continuo, e ci si è avvalsi di centraline meteorologiche portatili per ottenere le stesse informazioni in corrispondenza dei vari punti della rete. Queste centraline portatili sono state collocate in prossimità dello strumento, in posizione non soleggiata e non esposta al vento, ad almeno 1 m di altezza.

Per ogni postazione di misura sono stati realizzati due set di misure, uno registrando le osservazioni in condizioni atmosferiche standard (13°C, 1013.3 mbar, 60% di umidità relativa), per applicare le correzioni atmosferiche in post-processing, ed uno inserendo nello strumento i valori locali di pressione, umidità e temperatura atmosferiche, in modo che le osservazioni di distanza corretta venissero fornite direttamente come output. Sono poi state confrontate le diverse osservazioni di distanza:

- osservazioni non corrette;
- osservazioni corrette dallo strumento;
- osservazioni corrette in post-processing secondo le formule 4.2 e 4.3.

Per il confronto delle coordinate nel tempo ogni rete di osservazioni è stata compensata (software Starnet v 6.0.36) impostando ogni volta gli stessi parametri (stessa tipologia di osservazioni e in ugual numero, stessa pre-analisi, stessi pesi assegnati alle singole misure, ecc). Dal momento che le correzioni atmosferiche vengono applicate proporzionalmente alla distanza (formula 4.1), come atteso, le deviazioni standard derivanti da ogni elaborazioni sono confrontabili.

La monumentazione del punto RIF4 è stata cambiata durante il periodo considerato, per cui i dati inerenti questo punto sono consistenti per ogni singola campagna, ma non lo sono per il confronto nel tempo, per cui non sono stati utilizzati per il confronto. Inoltre RIF4, proprio per questo problema, non è stato utilizzato come stazione per il calcolo della rete, ma è stato usato solo come punto osservato da

altre postazioni. Il sistema di riferimento locale è stato centrato nello strumento, mentre l'orientamento dell'angolo orizzontale è stato individuato nella direzione STA-RIF1. I valori atmosferici di pressione, temperatura e umidità relativa misurati in ogni campagna sono riportati in Tabella 4.2.

	26/04/2010			29/10/2010		
ID	T (°C)	P (mbar)	U (%)	T (°C)	P (mbar)	U (%)
RIF1	27	933	40	22	913	53
RIF Tral	21	933	56	18	911	61
STA	23	933	37	16	912	68

Tabella 4.2: Temperatura, pressione e umidità relative atmosferiche misurate durante le campagne periodiche con stazione totale in prossimità delle stazioni della rete.

Di seguito verranno illustrati i test condotti il cui nome viene assegnato secondo questo criterio: la prima lettera identifica il tipo di informazione (C = Coordinate, D = Distanze); il primo numero identifica il numero della campagna (0 = prima campagna, 1 = seconda campagna); il secondo numero identifica il tipo di data set (0 = misure non corrette, 1 = correzione in post processing, 2 correzione strumentale). Quindi, C10 identifica delle coordinate, relative alla seconda campagna (29/10/2010), per misure non corrette.

Test 1. Confronti tra distanze: approcci differenti per le correzioni

Il primo test condotto riguarda il confronto di due diversi metodi per il calcolo delle correzioni atmosferiche. Con il primo metodo, le correzioni vengono calcolate in post-processing e poi applicate alle misure di distanza, mentre con il secondo metodo si prevede l'utilizzo delle correzioni determinate direttamente dallo strumento.

Station ID-Point ID	D0 meas (m)	D1 form (m)	D2 instr (m)	Δ D1-D0 (mm)	Δ D2-D0 (mm)	Δ D2-D1 (mm)
RIF1- RIF tral	1097.223	1097.264	1097.267	41	44	3
RIF1-STA	269.591	269.601	269.601	10	10	0
STA-RIF1	269.590	269.598	269.600	8	10	2
STA-RIF tral	958.864	958.894	958.900	30	36	6
STA-RIF4	438.246	438.260	438.263	14	17	3
RIF tral-STA	958.864	958.897	958.892	33	28	-5
RIF tral-RIF4	1158.852	1158.892	1158.886	40	34	-6
RIF tral-RIF1	1097.222	1097.260	1097.265	38	43	5

Tabella 4.3: Distanza inclinata NON corretta (D0), distanza inclinata corretta in post-processing (D1), distanza inclinata corretta dallo strumento (D2); correzioni atmosferiche, espresse in ppm (mm): Δ D1-D0 Δ D2-D0, Δ D2-D1 (29/10/2010).

In Tabella 4.3 sono riportate le distanze inclinate, grezze (NON corrette, D0), corrette in post processing (D1) e corrette dallo strumento (D2) e le loro differenze in riferimento alla campagna del 29/10/2010. L'entità delle correzioni è simile, anche se quelle applicate dallo strumento sono lievemente superiori rispetto a quelle calcolate in post processing. Naturalmente, maggiore è la distanza percorsa, maggiore è

la correzione. Le formule scelte per il calcolo delle correzioni in post processing, sembrano essere una buona soluzione per la definizione dell'algoritmo di correzione delle osservazioni in continuo.

Comunque, nonostante la lieve differenza riscontrata tra i due modelli, per distanze di circa 1 km, alla temperatura atmosferica di 20°C, con pressione di 913 mbar e con umidità relativa del 50%, la correzione da apportare alle misure è di circa 4 cm, cioè 40 ppm atmosferiche.

Test 2: Compensazione di rete

Dal primo test condotto l'entità delle correzioni atmosferiche sembra essere significativa e sembra che con la correzione atmosferica aumenti l'accuratezza delle misure. Questo, però, deve essere confermato in relazione alla precisione del metodo di misura adottato, valutabile attraverso la compensazione di rete delle osservazioni.

Il secondo test condotto, infatti, riguarda il confronto delle coordinate compensate, corrette e non corrette, per la campagna del 29/10/2010. In Tabella 4.4, Tabella 4.5, Tabella 4.6 sono riportate le coordinate compensate e le relative deviazioni standard, rispettivamente delle coordinate calcolate con distanze inclinate non corrette, con distanze inclinate corrette in post-processing e con distanze inclinate corrette dallo strumento. In Tabella 4.7 sono riportati i confronti tra le diverse compensazioni, con riferimento ai valori di deviazione standard dell'elaborazione senza correzioni atmosferiche. Non viene calcolata la propagazione dell'errore, dal momento che le deviazioni standard risultanti dalle tre elaborazioni sono praticamente uguali, come auspicabile.

C10: Coordinate NON corrette						
Point ID	N (m)	E (m)	El (m)	$\sigma (N) (m)$	$\sigma (E) (m)$	$\sigma (El) (m)$
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	269.252	0.000	-13.583	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-394.551	873.585	-24.395	0.012	0.008	0.025
RIF4	-326.088	-277.127	94.465	0.009	0.009	0.021

Tabella 4.4: Coordinate non corrette (29/10/2010).

C11: Coordinate CORRETTE in "Post-processing"						
Point ID	N (m)	E (m)	El (m)	$\sigma (N) (m)$	$\sigma (E) (m)$	$\sigma (El) (m)$
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	269.261	0.000	-13.583	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-394.568	873.612	-24.396	0.012	0.008	0.025
RIF4	-326.093	-277.128	94.462	0.009	0.009	0.021

Tabella 4.5: Coordinate corrette in post-processing (29/10/2010).

La variazione di coordinate è nulla sulle coordinate della postazione STA (quella dello strumento in postazione permanente) e per la coordinata Est di RIF1, poiché per queste sono stati posti dei vincoli: centro del sistema di riferimento e bearing (orientamento) con angolo 0° nella direzione STA-RIF1.

Come risultato principale si ottiene che:

- la differenza tra le coordinate calcolate applicando i due metodi per il calcolo delle correzioni atmosferiche non è significativa, in quanto entro la precisione del metodo;
- la correzione apportata dalle correzioni atmosferiche risulta essere significativa nella maggior parte dei casi, rispetto alla “non” correzione.

Quindi, l’apporto di correzioni atmosferiche alle misure dell’EDM sembra essere utile all’incremento dell’accuratezza delle osservazioni e tali correzioni sono tanto più significative quanto più le distanze in gioco aumentano.

C12: Coordinate CORRETTE dallo strumento						
Point ID	N (m)	E (m)	El (m)	σ (N) (m)	σ (E) (m)	σ (El) (m)
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	269.262	0.000	-13.583	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-394.560	873.617	-24.376	0.012	0.008	0.025
RIF4	-326.106	-277.139	94.464	0.009	0.009	0.021

Tabella 4.6: Coordinate corrette dallo strumento (29/10/2010).

ID	Δ C10-C11			Δ C10-C12			Δ C12-C11			C10: coord NON corrette		
	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔEl (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔEl (m)	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔEl (m)	σ (N) (m)	σ (E) (m)	σ (El) (m)
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	-0.008	0.000	0.000	-0.011	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.000	0.006	0.000	0.009
RIF tral	0.017	-0.028	0.001	0.009	-0.032	-0.019	-0.008	-0.005	-0.020	0.012	0.008	0.025
RIF4	0.005	0.001	0.003	0.017	0.012	0.001	0.013	0.011	-0.002	0.009	0.009	0.021

Tabella 4.7: Confronto tra le coordinate compensate (29/10/2010).

Test 3: Controllo nel tempo: confronto di coordinate

Il terzo test condotto riguarda il confronto delle coordinate dei punti di riferimento nel tempo. Tale confronto è significativo se i punti sono stabili: questo è stato dimostrato grazie a controlli di stabilità realizzati attraverso campagne periodiche con strumentazione GNSS contestuali a quelle realizzate con la stazione totale.

Anche in questo caso, come in quello precedente, le deviazioni standard delle coordinate sono consistenti tra le diverse elaborazioni (con correzioni o senza) e nel tempo (campagne del 26/04/2010 e del 29/10/10), per cui si è scelto arbitrariamente di usare come riferimento per i confronti le deviazioni standard delle coordinate non corrette della campagna del 29/10/10. Per le correzioni atmosferiche si è scelto di applicare il modello in post processing a entrambi i data set di misura. Dal momento che le deviazioni standard delle coordinate sono costanti nel tempo, sembra che non siano stati commessi errori grossolani nella realizzazione delle campagne di misura e che il modello atmosferico applicato sia

valido. In Tabella 4.8 e in Tabella 4.9 sono riportate le coordinate compensate non corrette e le coordinate compensate corrette (post processing) della campagna del 26/04/2010.

C00: Coordinate NON corrette						
Point ID	N (m)	E (m)	El (m)	σ (N) (m)	σ (E) (m)	σ (El) (m)
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	269.246	0.000	-13.611	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-394.555	873.583	-24.407	0.012	0.008	0.025

Tabella 4.8: Coordinate non corrette (26/04/2010).

In Tabella 4.10 è illustrato il confronto nel tempo tra le coordinate corrette in post-processing e le coordinate non corrette. I risultati non sono molto significativi, perché le differenze sono dell'ordine della precisione del metodo utilizzato. Si può affermare che i punti sono stabili, con riferimento alla precisione delle coordinate, e che ancora una volta, che le correzioni atmosferiche vengano applicate con successo.

C01: Coordinate corrette in "Post-processing"						
Point ID	N (m)	E (m)	El (m)	σ (N) (m)	σ (E) (m)	σ (El) (m)
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	269.255	0.000	-13.611	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-394.568	873.610	-24.407	0.012	0.008	0.025

Tabella 4.9: Coordinate corrette in post processing (26/04/2010).

ID	Δ C10-C00			Δ C11-C01			C10: coord NON corrette		
	Δ N (m)	Δ E (m)	Δ El (m)	Δ N (m)	Δ E (m)	Δ El (m)	σ (N) (m)	σ (E) (m)	σ (El) (m)
STA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
RIF1	-0.006	0.000	-0.028	-0.006	0.000	-0.028	0.006	0.000	0.009
RIF tral	-0.004	-0.002	-0.012	0.000	-0.002	-0.011	0.012	0.008	0.025

Tabella 4.10: Confronto tra coordinate compensate delle campagne del 29/10/2010 e del 26/04/2010.

Misure in continuo: applicazione delle correzioni atmosferiche alle osservazioni di distanza inclinata

Dopo questi primi test sulle misure periodiche, si è applicato il modello atmosferico di correzione delle misure dell'EDM (post-processing) anche a un set di misure acquisito in continuo, per il periodo di osservazione concomitante alla campagna di acquisizione GB-InSAR. Dall'applicazione delle correzioni atmosferiche in continuo è emerso un incremento dell'accuratezza, data dalla correzione in sé, sia della precisione, determinato dalla riduzione della variabilità delle osservazioni. Quindi si può affermare che il

modello di correzione atmosferica per le osservazioni di distanza inclinata è stato applicato con successo e che è significativo applicarlo per aumentare precisione e accuratezza del sistema di misura.

I grafici in Figura 4.6 e in allegato 3 riportano, per il periodo di circa un mese di osservazione, le distanze inclinate dei prismi del settore G1 della frana, non corrette (distanze originali misurate), corrette tramite correzioni atmosferiche, le rispettive linee di tendenza lineari e la temperatura misurata in prossimità dello strumento. Emerge che le correzioni atmosferiche riducono la variabilità delle osservazioni di distanza inclinata, rendendo più leggibili gli andamenti temporali delle osservazioni. Vi è un aumento della precisione delle osservazioni, insieme a un aumento dell'accuratezza delle stesse. Per valori di temperatura inferiori ai 13°C, vi è una correzione negativa del valore di distanza, che la riduce. Mentre per valori di temperatura superiori ai 13°C il comportamento è opposto: la correzione della distanza è positiva, che significa che la distanza corretta aumenta.

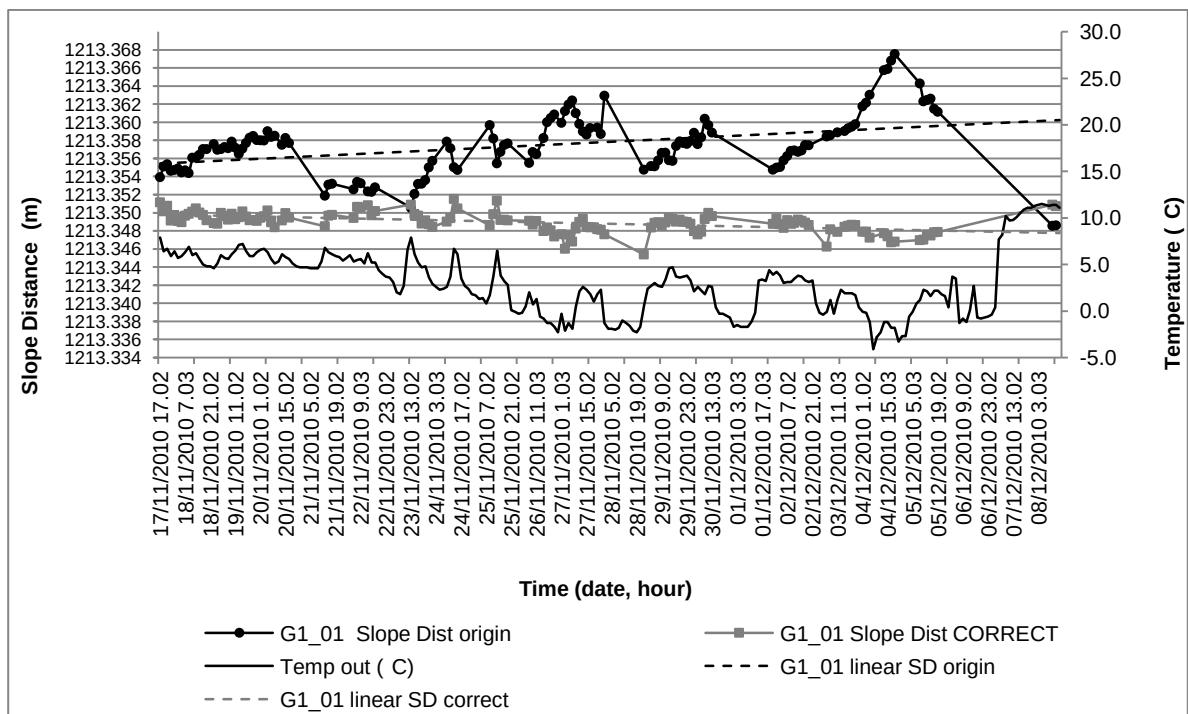


Figura 4.6: Grafico di distanza inclinata originale (Slope Dist origin), distanza inclinata corretta (Slope Dist CORRECT) e loro linee di tendenza lineari, e grafico di temperatura.

L'andamento temporale delle misure di distanza corretta è comunque un po' rumoroso: i parametri ambientali sono misurati solo in corrispondenza dello strumento, ma le condizioni atmosferiche sono variabili attraverso il percorso elettro-ottico di misura e pertanto una certa indeterminazione è ragionevole che rimanga.

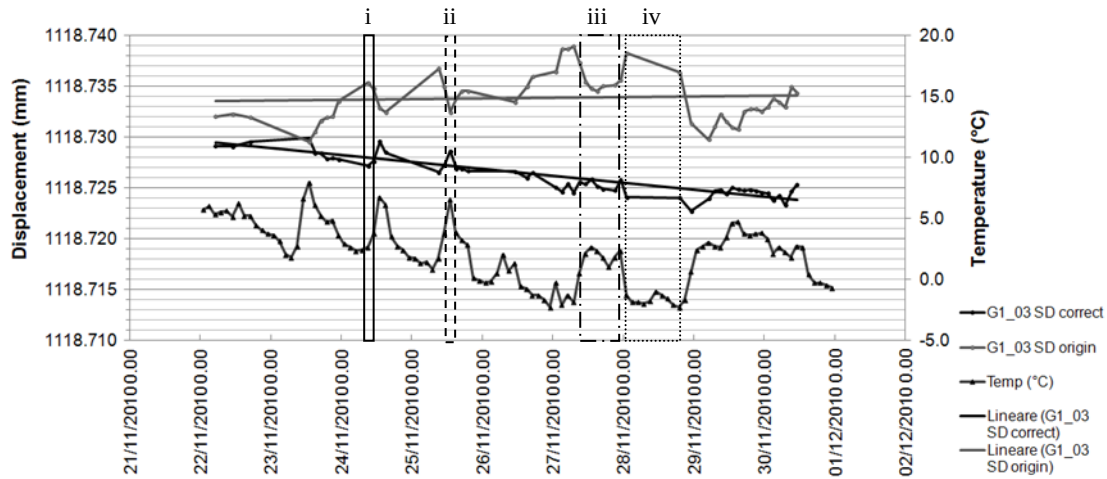


Figura 4.7: Dettaglio dell'andamento temporale della distanza inclinata (corretta e non corretta) del prisma G1_03 e andamento della temperatura.

In Figura 4.7 è possibile osservare come a picchi di abbassamento della temperatura corrispondano picchi di incremento di distanza inclinata originale (area i) e a picchi di innalzamento di temperatura corrisponda una riduzione della distanza inclinata (area ii), che potrebbe essere erroneamente interpretata come uno spostamento (verso lo strumento) del prisma. In queste stesse aree è possibile notare evidenti picchi nella distanza inclinata corretta, che dimostrano come permanga un lieve rumore. Le stesse considerazioni possono essere fatte per le aree iii) e iv), cui corrispondono rispettivamente innalzamenti e abbassamenti prolungati della temperatura atmosferica.

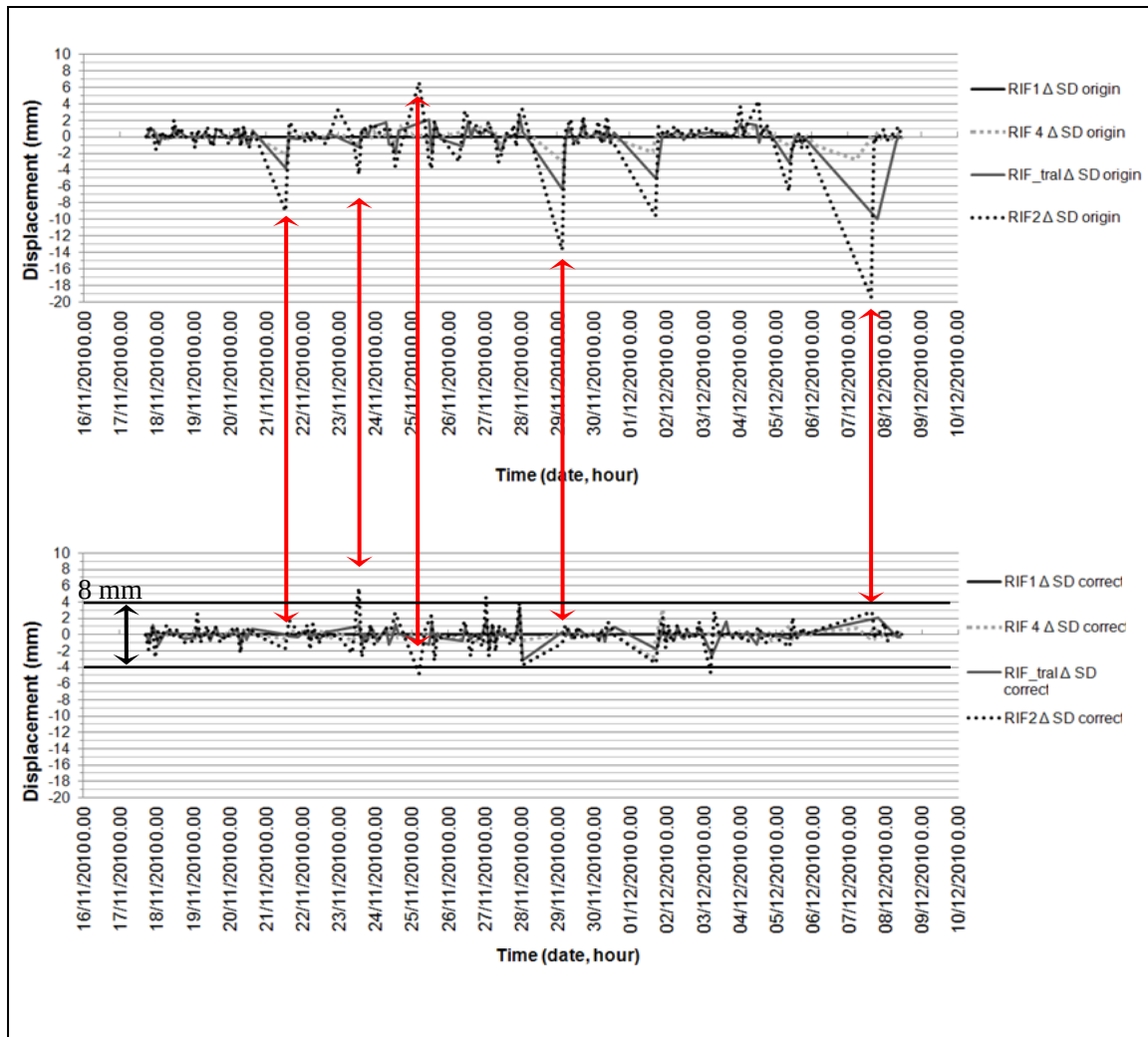


Figura 4.8: Variazione relativa di distanza inclinata, NON corretta (in alto) e CORRETTA (in basso), per alcuni prismi di riferimento (RIF1, RIF4, RIF tral, RIF2).

Gli effetti delle correzioni atmosferiche possono essere visti anche sui prismi di riferimento, in particolare osservando la variabilità delle osservazioni di distanza inclinata relativa nel tempo sui prismi stabili (Figura 4.8). I picchi più rilevanti vengono ridotti notevolmente attraverso le correzioni atmosferiche, anche se si nota un certo errore residuo che comporta un'inversione del picco, dovuto probabilmente al modello e ai dati utilizzati per definire la modellizzazione. Per questo set di osservazioni, i picchi più consistenti sono relativi alle misure più lunghe di distanza. Considerando che $SD_{RIF1} \approx 270$ m, $SD_{RIF4} \approx 440$ m, $SD_{RIF\ tral} \approx 960$ m, $SD_{RIF2} \approx 1800$ m, RIF2 e RIF tral presentano, infatti le variazioni maggiori. Sulla base di questi grafici, quindi per le condizioni operative del periodo considerato (17/11/10- 07/12/10), lavorando nell'ipotesi di distribuzione normalizzata delle misure, in condizioni cautelative (per distanze di 1.8 km), la variazione della distanza inclinata corretta, che risente di errori di misura e del residuo della correzione atmosferica, si attesta intorno ± 4 mm. Su misure di distanza, la precisione dichiarata per lo strumento è $1\text{ mm} + 1\text{ ppm}$, che a 3 km equivale a 3 mm. Possiamo quindi considerare cautelativamente 4 mm come valore di precisione (ripetibilità) delle misure

nel periodo considerato. Questo valore sarà tenuto come riferimento per il confronto con i risultati derivati dalla campagna di monitoraggio GB-InSAR.

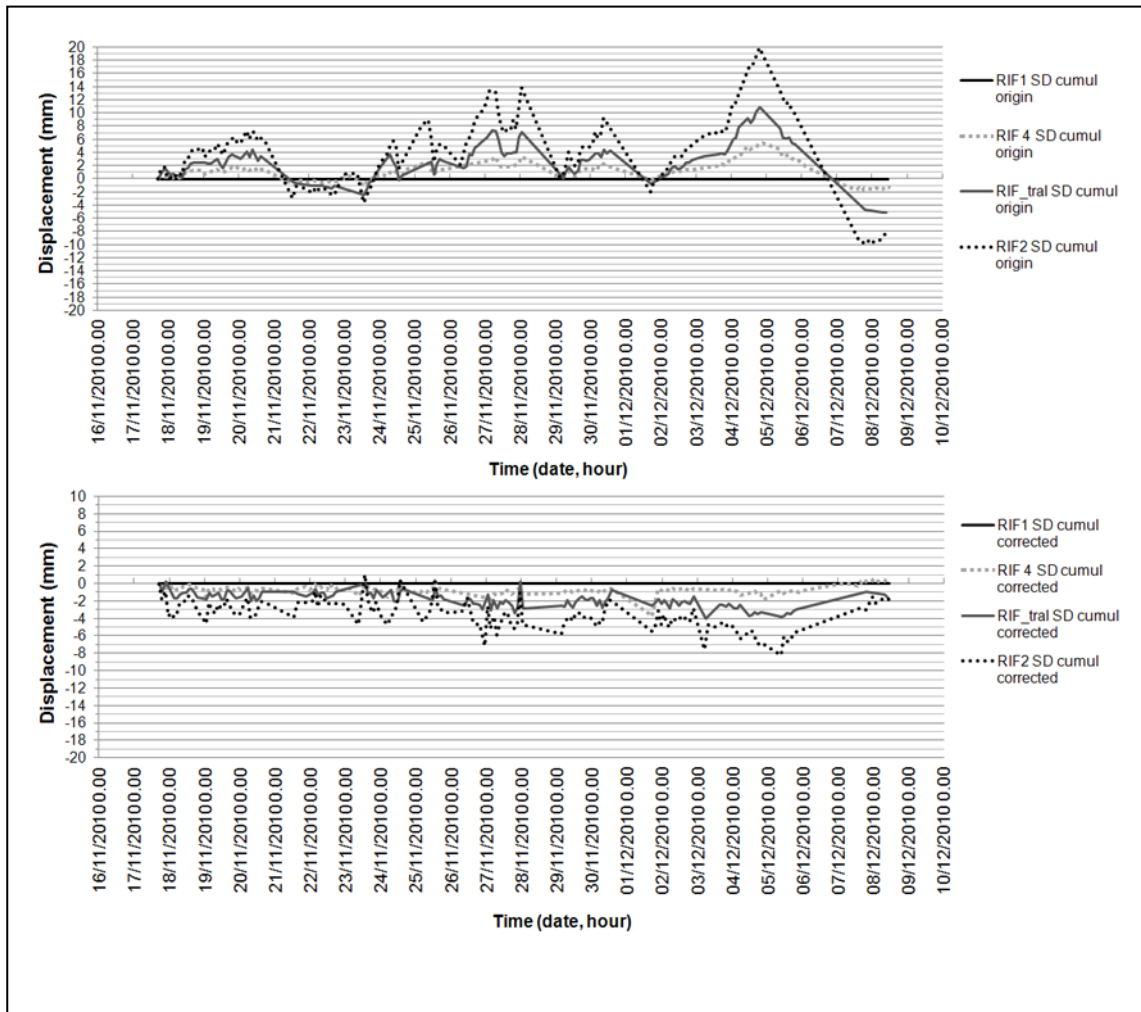


Figura 4.9: Spostamento cumulato di distanza inclinata relativa, NON corretta (in alto) e CORRETTA (in basso), per alcuni prismi di riferimento (RIF1, RIF4, RIF tral, RIF2).

I grafici in Figura 4.9 riassumono per alcuni prismi di riferimento, quanto graficato in allegato 3, per ogni singolo prisma del settore G1 riportando i valori cumulati di distanza inclinata relativa. Gli spostamenti cumulati di distanza inclinata, passando da osservazioni non corrette a corrette assumono un significato differente: se insieme alla distanza inclinata corretta dei prismi di riferimento che sono stabili per quanto verificato con rilievo GNSS vengono graficate anche le distanze inclinate corrette dei prismi di monitoraggio (Figura 4.10) è possibile notare un trend di spostamento per questi ultimi. Grazie alle correzioni atmosferiche, che migliorano precisione e accuratezza delle misure, è possibile discriminare piccoli movimenti da rumore delle misure.

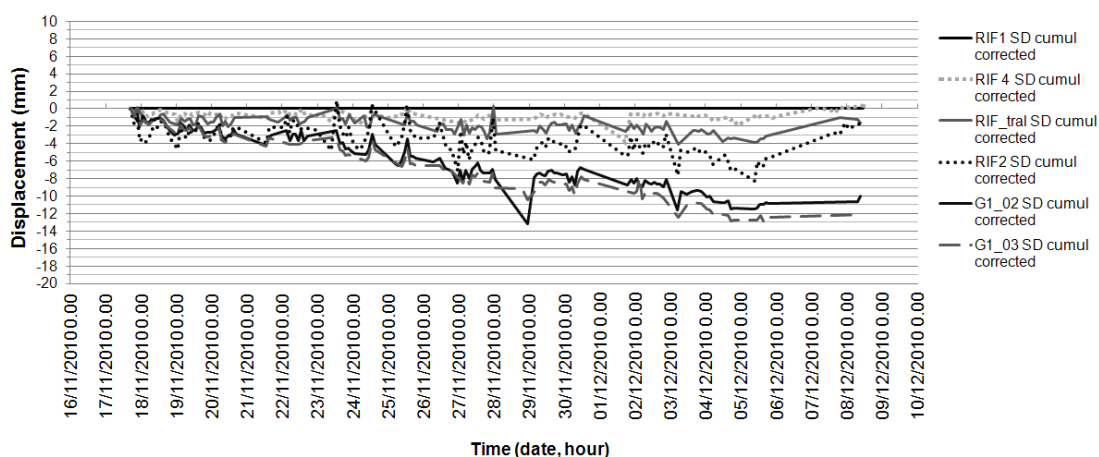


Figura 4.10: Spostamento cumulato di distanza inclinata (relativa) CORRETTA per alcuni prismi di riferimento e alcuni punti di monitoraggio del settore G1.

4.2.4 Rilievi LiDAR terrestri e aviotrasportati e loro integrazione per la determinazione di DTM ad alta risoluzione

Per un'analisi pseudo-spazialmente continua della morfologia del versante in frana, in località Piagneto, sono stati realizzati ad Aprile 2010, un rilievo ALS ed uno TLS; poi a partire da Aprile 2010 sono state realizzate campagne di misura periodiche con TLS con strumentazione very long range.

Il rilievo LiDAR aviotrasportato è stato eseguito da GEOTECHNOS (Pesaro) e processato dal CNR-IRPI di Torino (Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica). Il rilievo è stato eseguito utilizzando un sensore ALS-60 (Leica Geosystems) montato su un elicottero, con contestuale acquisizione di immagini fotografiche (fotocamera digitale RCD 105, Leica Geosystems) successivamente elaborate a ortofoto. La densità di punti media del dato filtrato è di 4-5 punti/m². Il rilievo è stato georeferenziato nel sistema ETRF2000. Le nuvole di punti sono state poi proiettate nel sistema UTM-ETRF2000 per poter gestire il DTM derivato dalla nuvola di punti in un GIS dell'area; le ortofoto sono state ortorettificate nello stesso sistema di riferimento e ricampionate con una dimensione del pixel di 10 cm (mentre le immagini grezze presentavano una risoluzione dai 10 ai 25 cm) (Parmeggiani, 2011)

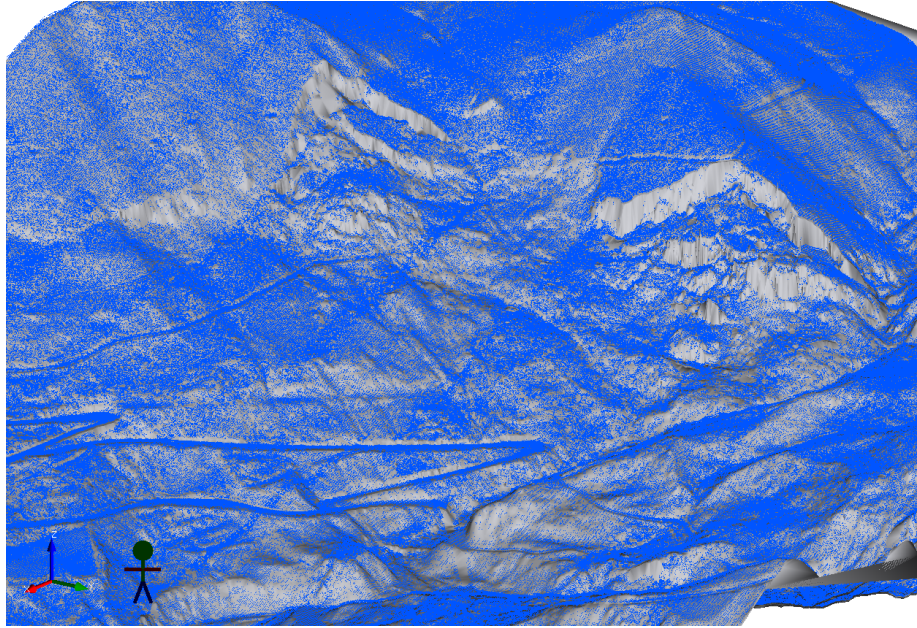


Figura 4.11: Nuvola di punti ALS (blu) sovrapposta al DTM (TIN mesh) derivato dalla nuvola stessa (grigio).

Il primo rilievo TLS è stato realizzato con lo strumento Riegl LPM-321 (Tabella 4.11), in grado acquisire fino a 6 km di distanza. I rilievi successivi sono stati eseguiti sempre nei mesi primaverili e autunnali per facilitare le operazioni di acquisizione sulle zone vegetate. Le campagne laser scanner terrestre sono state realizzate acquisendo il versante in frana da “Cava Riva Rossa”, posizionando lo strumento in prossimità della postazione della stazione totale e del radar interferometrico terrestre. Questa è stata un’esigenza, in quanto non esistono altri punti di osservazione che permettono di visualizzare tutto il versante, anche se sono state fatte scansioni da altri punti per raffittire le nuvole acquisite da “Cava Riva Rossa”.

LPM-321	Descrizione
Portata massima	6 km
Accuratezza (distanza)	25 mm a 50 m (test) 20 ppm in distanza
Precisione	15 mm
Divergenza del raggio laser	0.8 mrad (circa 80 mm a 100 m di distanza)
Velocità di acquisizione	da 10 punti/s a 1000 punti/s
Angoli di scansione	360° in orizzontale - 130° in verticale
Passo angolare	0.018° (0.02g)
Risoluzione nella misura angolare	0.009° (0.01g)
Lunghezza d’onda del laser	NIR (<i>Near InfraRed</i>)
Software di gestione	Riscan Pro

Tabella 4.11: Caratteristiche dello strumento Riegl LPM321.

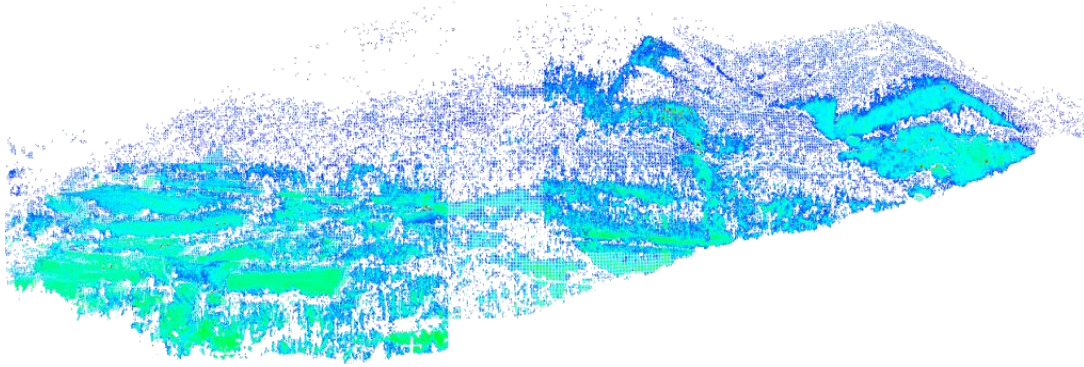


Figura 4.12: Nuvola di punti TLS (Aprile 2010).

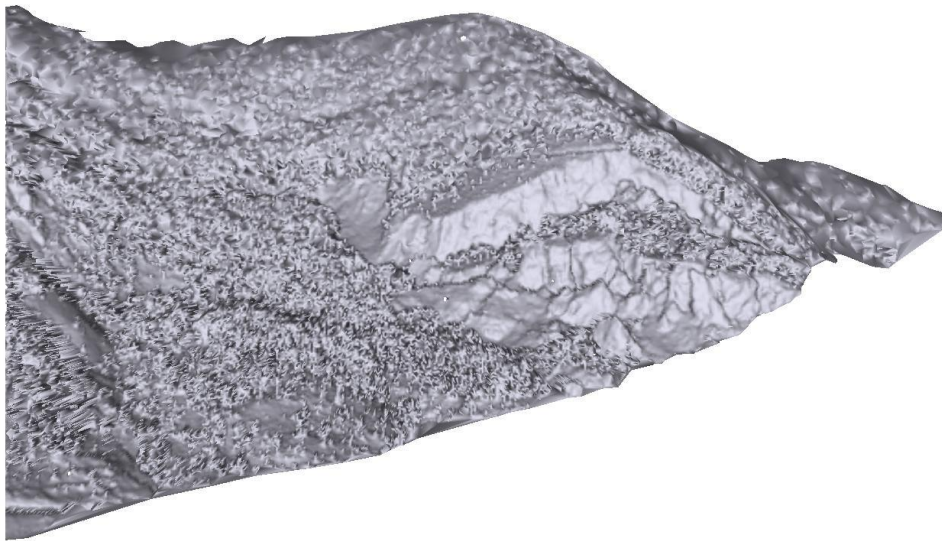


Figura 4.13: DTM (TIN mesh) derivato da nuvola di punti del TLS non filtrata (Aprile 2010).

Ad Aprile 2010, durante il rilievo TLS, sono state realizzate diverse scansioni che sono state acquisite con diverse risoluzioni: i settori G1 e G2, sono stati acquisiti con il minimo passo angolare pari a 0.018° ($0.02g$), mentre una scansione complessiva del versante, con una visione d'insieme dei tre settori, è stata rilevata con un passo maggiore, pari a 0.045° ($0.05g$). Il passo angolare di 0.018° comporta una risoluzione di scansione di circa 35-40 cm e lo spot laser incidente sul terreno ha un'ampiezza di circa 80 cm alla distanza media del versante in oggetto (1.2 km). Sono poi state eseguite operazioni di filtraggio delle nuvole di punti per l'eliminazione degli errori di acquisizione (outliers e gross errors), del rumore presente e della vegetazione.

Come è possibile notare in Figura 4.11, il rilievo ALS fornisce una descrizione dettagliata del versante, ma in particolare nelle zone del settore G1, la densità dei punti acquisiti diminuisce, con conseguente perdita di dettaglio nella definizione della morfologia delle pareti verticali.

Osservando la nuvola di punti del rilievo TLS (Figura 4.12 e Figura 4.13), invece, si nota che proprio le aree del settore G1 di cui il rilievo ALS forniva meno informazioni sono ben descritte.

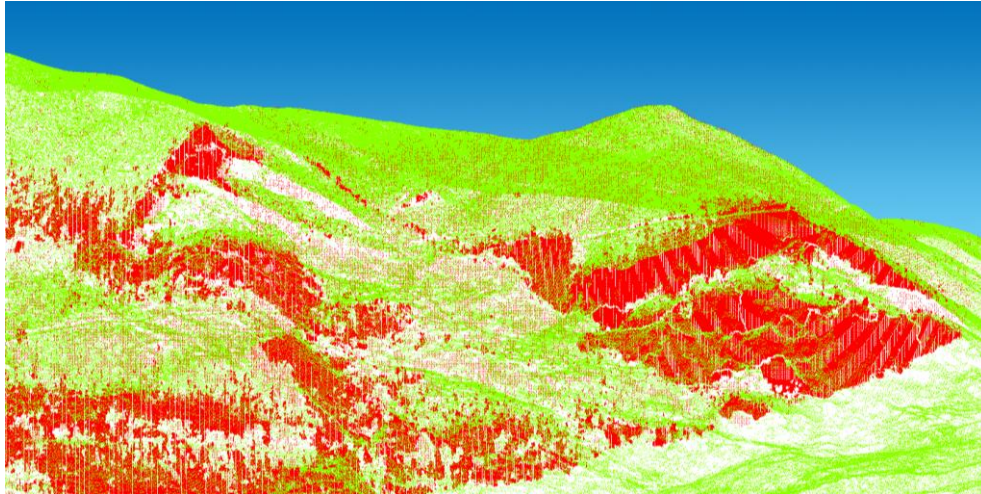


Figura 4.14: Nuvola di punti integrata (ALS e TLS).

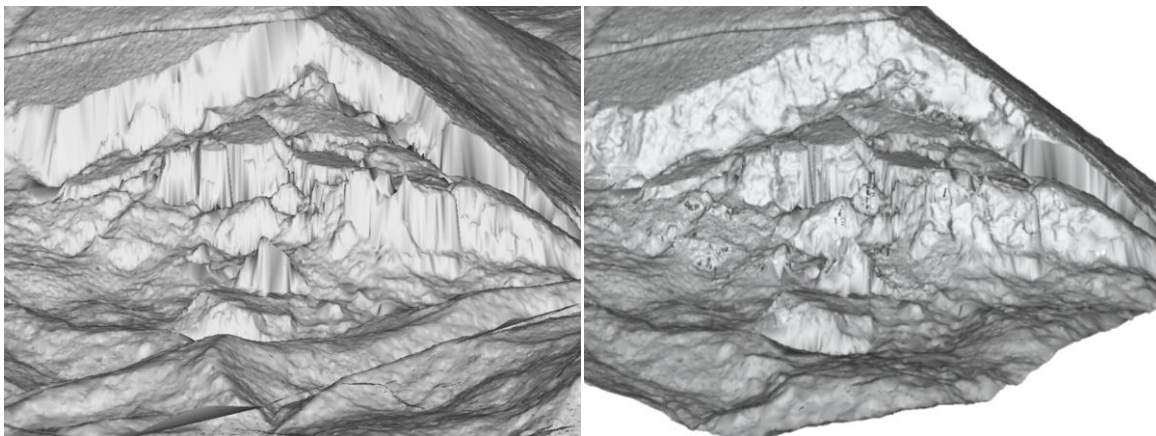


Figura 4.15: Sinistra, DTM (TIN mesh) derivato da nuvola di punti ALS. Destra, DTM (TIN mesh) derivato dall'integrazione delle nuvole ALS e TLS.

Le nuvole ALS e TLS sono quindi state integrate (Figura 4.14) con lo scopo di ottenere una descrizione del versante che fosse il più fedele possibile. L'integrazione è stata realizzata prima con punti di controllo (GCP) e successivamente raffinata con l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point), con il software JRC Reconstructor (Besl e McKay, 1992; Glenn et al., 2006; Guarnieri e Vettore, 2007; Lichti e Gordon, 2004; Zhang, 1994).

In Figura 4.15 si nota come il DTM (TIN -Triangular Irregular Network- mesh) creato a partire dalla nuvola del rilievo ALS descriva con minor dettaglio le pareti rocciose verticali rispetto al DTM (TIN mesh) derivato dalla nuvola integrata.

4.2.5 Sistema GB-InSAR, integrazione e confronto con il sistema topografico

Per il sito di Collagna, la tecnica GB-InSAR, come già descritto nel capitolo precedente è stata applicata per un monitoraggio continuo in tempo reale del settore di frana G1 (Figura 4.16). L'installazione dello strumento è stata predisposta su monumentazione permanente con sistema a centramento forzato, per un eventuale successivo riposizionamento dello strumento per il monitoraggio periodico.

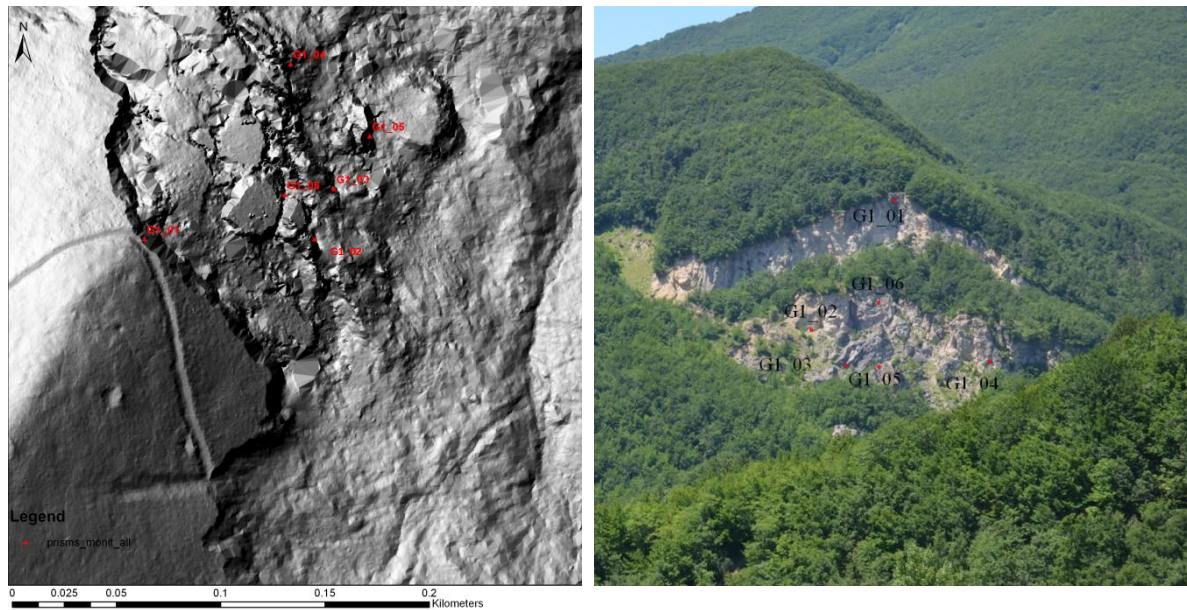


Figura 4.16: Localizzazione della posizione dei prismi del settore G1. A sinistra: Shaded relief del rilievo ALS (Aprile 2010). A destra: fotografia frontale del versante (Giugno 2011).

La tecnica GB-InSAR è stata applicata per il monitoraggio di pareti verticali di roccia caratterizzate da movimenti lenti (cm/mese o inferiori). I parametri di acquisizione e le caratteristiche dell'installazione sono riportati nella scheda monografica del sito, al capitolo 2.

Il processing è stato impostato sfruttando la tecnica PS, con soglia di coerenza 0.9 con differenti frequenze temporali di campionamento delle immagini e diversi parametri di elaborazione:

- frequenza di campionamento di circa 7 minuti (utilizzo di tutte le immagini acquisite) con Block Size (BS) = 35 e Result Update Time (RUT) = 1 (TEST: all);
- frequenza di campionamento 1 ora (utilizzo di immagini distanziate temporalmente di 1 ora), con:
 - block size = 35 e result update time = 1 (TEST: 1h_35+1);
 - block size = 50 e result update time = 1 (TEST 1h_50+1).

Per la riproiezione delle immagini SAR è stato utilizzato un DTM ricavato dall'integrazione ALS e TLS, in formato di grigliato con passo della griglia di 1 m.

I risultati di spostamento dei prismi della stazione totale e dei PS derivati dalla tecnica GB-InSAR sono stati raccolti in un GIS 2D, nel sistema cartografico UTM ETRF2000 32 N. In Figura 4.17 si riportano le mappe di spostamento LoS (pixel 1 m) relative alle varie soluzioni, con la posizione dei prismi del sistema di monitoraggio topografico. Nel TEST all, gli spostamenti appaiono di entità maggiore rispetto ai test in cui la frequenza di campionamento delle immagini è ridotta rispetto alla frequenza massima.

Il confronto quantitativo puntuale degli spostamenti è stato realizzato sulla base delle time series di spostamento LoS e di distanza inclinata corretta dei prismi (con correzioni atmosferiche) (Figura 4.18, Figura 4.19, Tabella 4.12, Figura 4.20, Figura 4.21 e allegato 4).

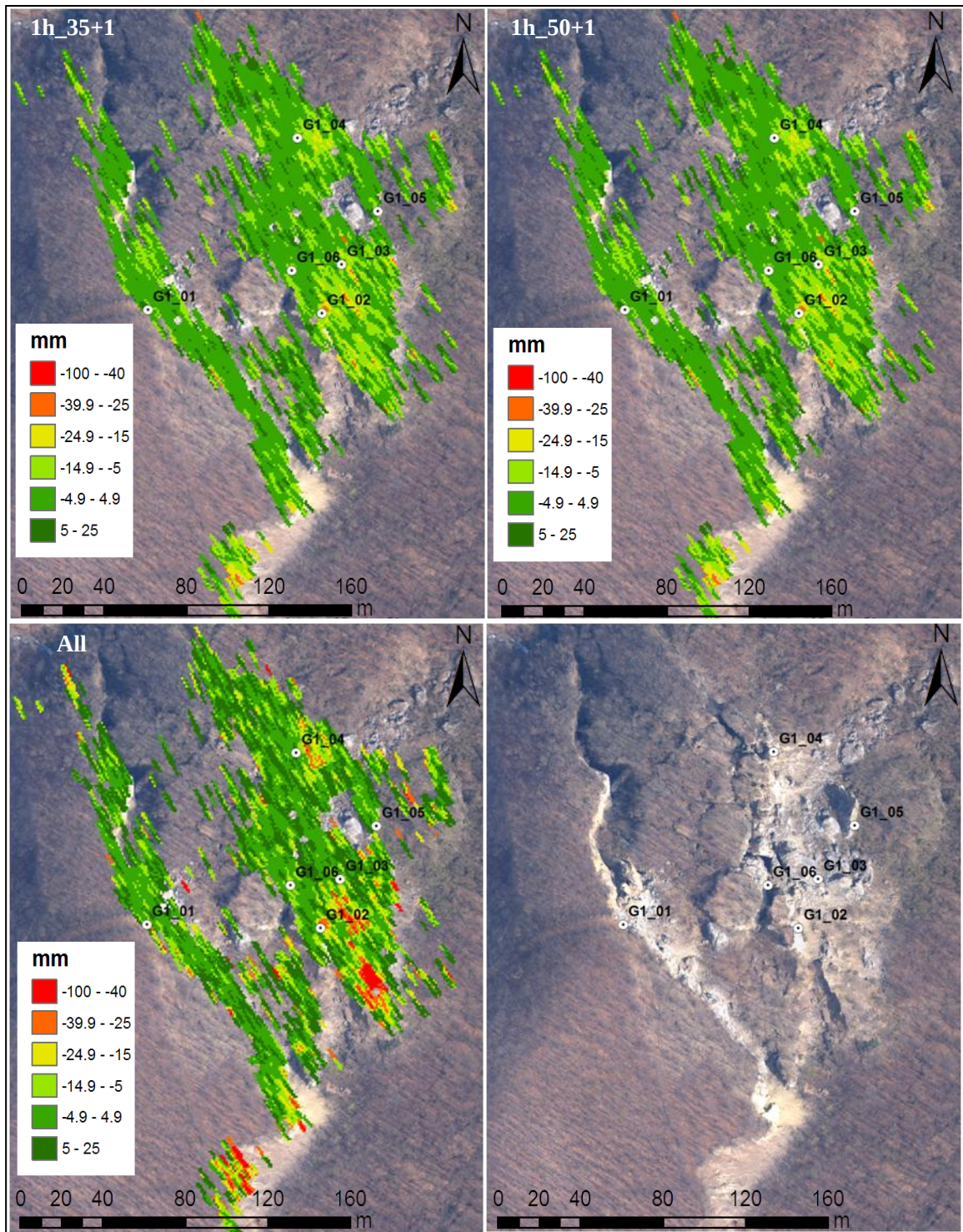


Figura 4.17: DTM 1 m, mappe di spostamento e posizione dei prismi.

Per spostamenti piccoli, come quelli che caratterizzano la frana di Collagna, trarre conclusioni dal confronto quantitativo delle tecniche impiegate è abbastanza complesso. Si considera una precisione, in termini di ripetibilità, $\sigma = 4$ mm, calcolata come descritto nel paragrafo inerente il sistema di monitoraggio topografico, per le misure di distanza inclinata corretta, nel periodo di osservazione 17/11/10 – 7/12/10. Il prisma G1_01, nella precisione del metodo di misura della stazione totale può

essere considerato fermo (Figura 4.18 e Figura 4.19). I risultati derivanti dalle elaborazioni GB-InSAR, anche con i diversi approcci di data processing lo confermano (PS_G1_01).

	Stazione totale Spostamento cumulato (Distanza Inclinata) (mm)	GB-InSAR Spostamento LoS (mm)		
		TEST all	TEST 1h_35+1	TEST 1h_50+1
PS_G1_01	0	2	1	-1
PS_G1_02	-11	-34	-11	-10
PS_G1_03	-12	-1	-4	1
PS_G1_04	-3	-5	-9	-2
PS_G1_05	-12	-8	3	0
PS_G1_06	-4	-9	-11	-10

Tabella 4.12: Confronto tra spostamento cumulato in valore di distanza inclinata corretta - SD- (stazione totale) e LoS ricavato tramite differenti strategie di elaborazione con tecnica GB-InSAR, per i PS in corrispondenza dei prismi del settore di frana G1.

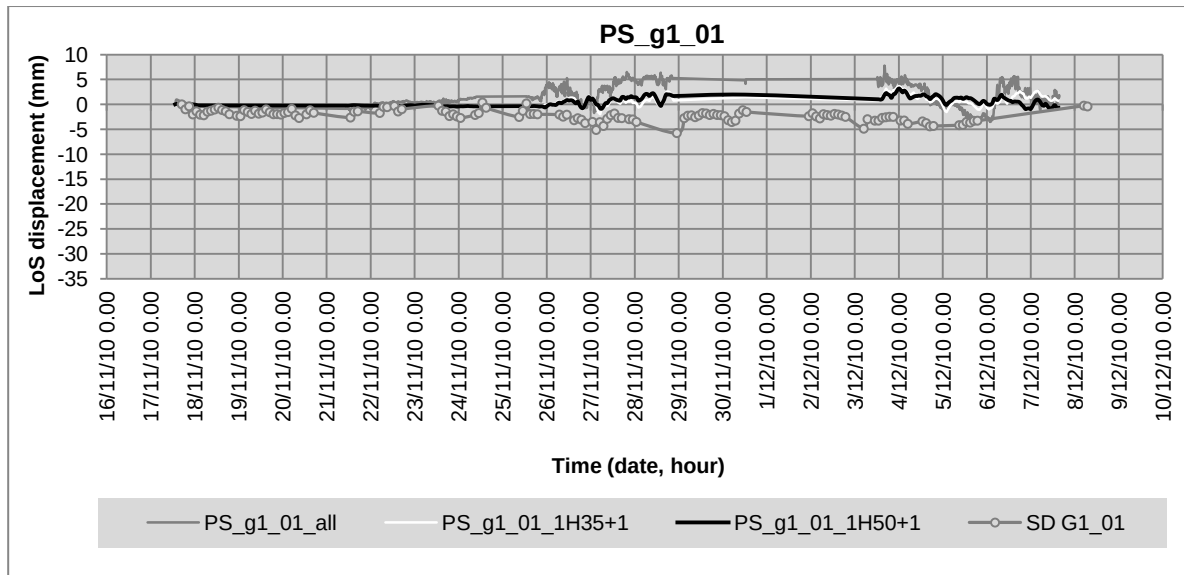


Figura 4.18: Confronto tra time series di spostamento LoS e spostamento cumulato di distanza inclinata per il PS_G1_01.

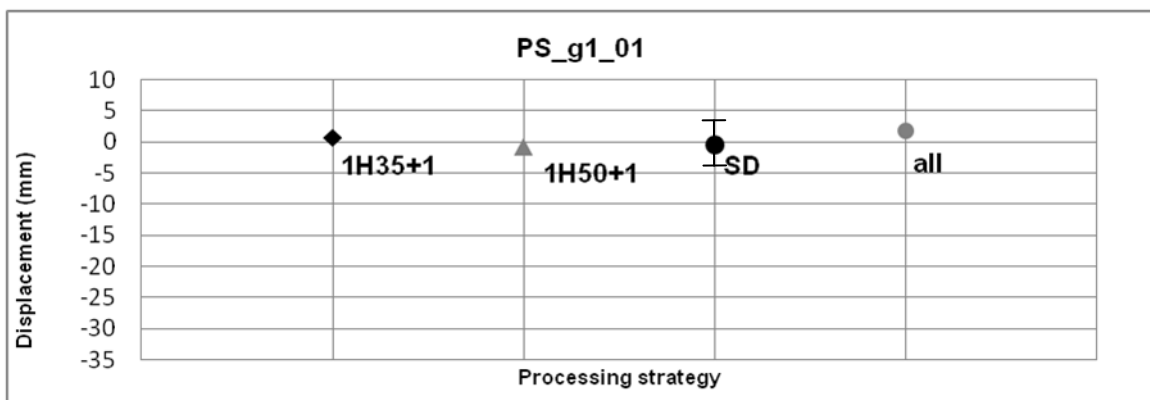


Figura 4.19: Spostamento cumulato (mm) del PS_G1_01. Confronto tra spostamento cumulato in valore di distanza inclinata corretta - SD- (stazione totale) e LoS ricavato tramite differenti strategie di elaborazione con tecnica GB-InSAR.

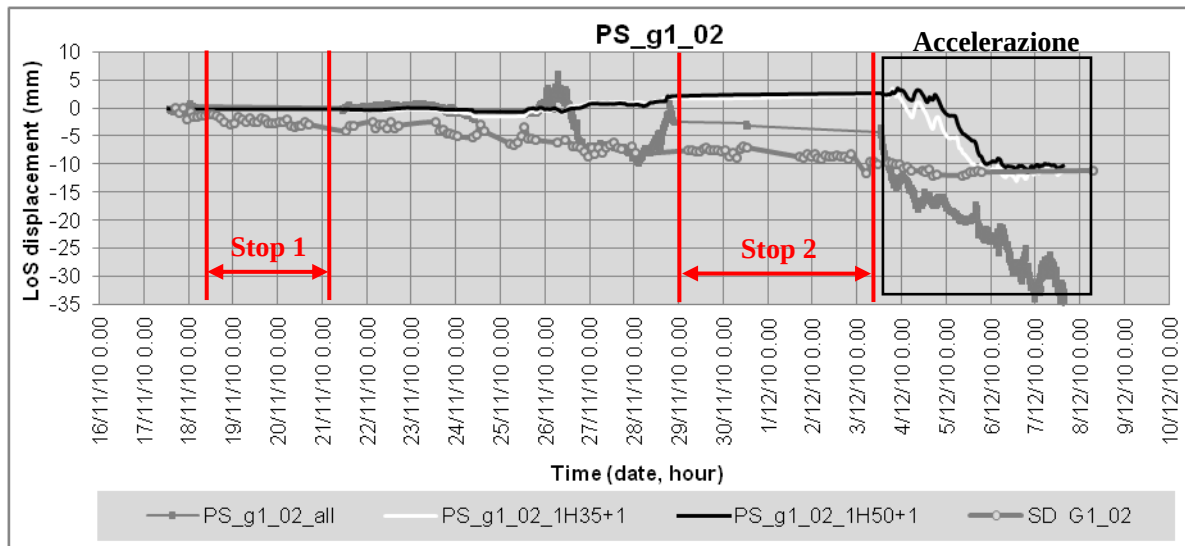


Figura 4.20: Confronto tra time series di spostamento LoS e spostamento cumulato di distanza inclinata per il PS_G1_02.

Per gli altri prismi, è più complesso trarre conclusioni, specialmente a causa dell'assenza di informazioni GB-InSAR per periodi abbastanza prolungati. In questi periodi di "stop" dello strumento, probabilmente, si assiste all'effetto della decorrelazione temporale per alcune zone della frana, come per esempio quella in corrispondenza del prisma G1_02 (Figura 4.20 e Figura 4.21). Infatti, il prisma G1_02 mostra un certo trend lineare di spostamento, nel periodo di osservazione, ma con la precisione delle misure della stazione totale, con questo tasso di movimento, non è possibile osservare variazioni repentine di velocità dovute a riattivazioni del fenomeno. Questa potenzialità, però è propria della tecnica GB-InSAR, per la sua precisione intrinseca. Infatti, le time series di spostamento del PS_G1_02 presentano andamento simile a quella del prisma fino al 26/11/10, poi iniziano a differenziarsi; durante il periodo più prolungato di assenza di osservazioni (29/11/10 – 3/12/10) sembra che si sia verificata un'accelerazione del movimento, rilevata nel PS_G1_02 dal 3/12/10, in tutte le elaborazioni, ma non osservabile per il prisma.

I risultati di spostamento cumulato dei test di elaborazione GB-InSAR effettuati con diversa frequenza temporale di campionamento delle immagini hanno prodotto risultati quantitativamente differenti tra di loro, se si osserva il risultato nel complesso (Figura 4.21). Se però si presta più attenzione alle serie temporali (Figura 4.20) si nota che dal 3/12/10, la tecnica GB-InSAR ha registrato un'accelerazione che in qualche modo emerge dai risultati. Quantificare il movimento registrato e calcolare il corretto spostamento cumulato nel tempo, però non è semplice, proprio a causa dell'assenza di osservazioni GB-InSAR. Il problema relativo al confronto degli spostamenti derivato dalle diverse elaborazioni GB-InSAR deriva dal fatto che la soluzione di spostamento calcolata tra il 29/11 e il 3/12 è differente e fornisce un "differente punto di partenza" in riferimento al quale sommare gli spostamenti cumulati calcolati successivamente.

Per quantificare il movimento effettivamente registrato per il PS_G1_02 e per punti con comportamento analogo, una soluzione potrebbe essere di suddividere la serie temporale di acquisizioni in due parti e analizzarle separatamente. In questo modo, per le prime acquisizioni (fino al 29/11) un sottocampionamento delle immagini potrebbe aumentare la precisione del metodo, dato che gli spostamenti rilevati sono di piccola entità. Nel secondo periodo (dal 3/12), invece, potrebbe essere utilizzata l'elaborazione con massima frequenza di campionamento delle immagini per non sottostimare gli spostamenti. In questo modo si scorpora il problema e si fanno analisi separate delle varie serie di acquisizioni.

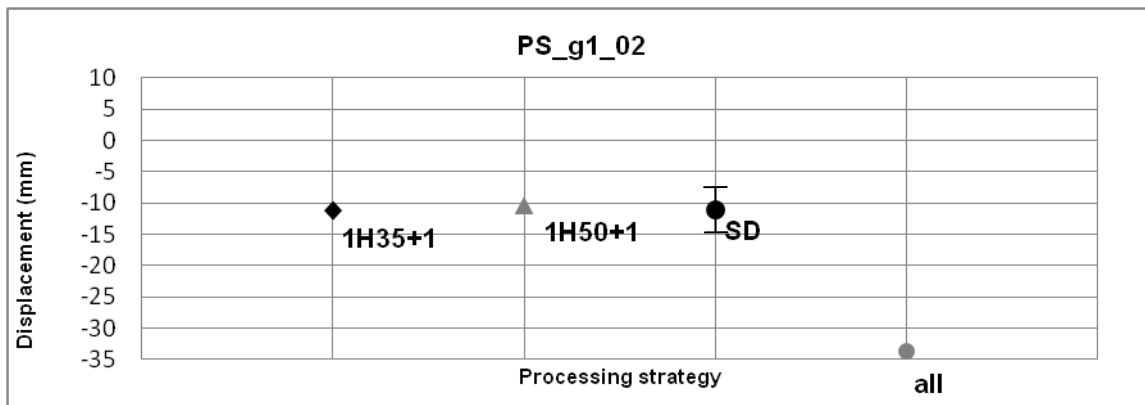


Figura 4.21: Spostamento cumulato (mm) del PS_G1_02. Confronto tra spostamento cumulato in valore di distanza inclinata corretta - SD- (stazione totale) e LoS ricavato tramite differenti strategie di elaborazione con tecnica GB-InSAR.

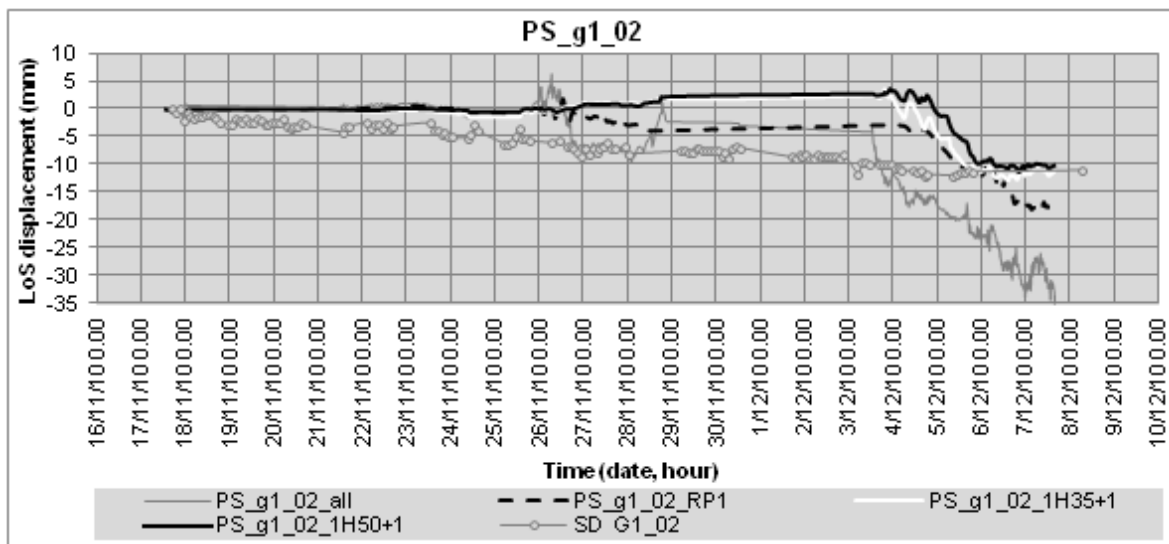


Figura 4.22: Confronto tra time series di spostamento LoS e spostamento cumulato di distanza inclinata (SD) per il PS_G1_02.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di applicare un'analisi di tipo periodico (riaggancio di serie temporali discontinue) alle acquisizioni separate temporalmente e poi unire le time series di spostamento della prima serie di acquisizioni con la seconda. I primi tentativi in merito non hanno portato a risultati

soddisfacenti, ma l'obiettivo è di approfondire l'analisi in futuro. Infatti (Figura 4.22), in uno dei primi test di applicazione del Repeat Pass Tool (RP1 nel grafico) il risultato non è apparso soddisfacente.

4.3 Validazione in caso di movimenti moderati (cm/giorno)

La Frana di Valoria (Frassinoro, Modena) è una frana di notevole estensione, che a seguito di un'importante riattivazione avvenuta nel 2001, è oggetto di monitoraggio. Dal 2007, oltre alla strumentazione geotecnica sono stati impiegati strumenti topografici (GNSS e stazione totale) per un più completo monitoraggio del fenomeno, sia in modalità periodica che continua (Bertacchini et al., 2010; Bertacchini et al., 2011b).

Dato il rischio connesso ad infrastrutture (un ponte che attraversa una strada ad elevata percorrenza e un metanodotto), ad abitazioni limitrofe all'area di evidenza del fenomeno e al Torrente Dolo (piede della frana), sono state utilizzate molteplici strumentazioni e tecniche diversificate per ottenere una conoscenza più approfondita del fenomeno. Nel 2009, a seguito dell'ennesimo fenomeno di riattivazione che ha interessato tutto il corpo di frana è stata condotta una campagna test per il monitoraggio near real time con tecnica GB-InSAR (Corsini et al., 2012).

L'obiettivo fondamentale del lavoro è stato quello di valutare l'efficacia operativa della tecnica come strumento per il monitoraggio di movimenti veloci (fino a m/giorno), con terreno molto umido e in condizioni ambientali molto variabili. Il confronto con i dati della stazione totale ha fornito una validazione quantitativa degli spostamenti, per verificare che a causa della decorrelazione temporale la tecnica GB-InSAR non li sottostimasse. Anche in questo caso, come per la Frana di Collagna, il sistema di monitoraggio topografico tramite stazione totale è stato considerato come riferimento. Sono state fatte considerazioni in merito a precisione e accuratezza delle due tecniche in condizioni operative. E' stata valutata l'opportunità di applicare le correzioni atmosferiche alle osservazioni di distanza inclinata della stazione totale, ma considerata l'entità dei movimenti rilevati, l'applicazione di tali correzioni non avrebbe inciso significativamente, per cui non sono state applicate.

La variabilità dei risultati in funzione dell'elaborazione e della selezione dei dati, che, come emerso in precedenza rende il metodo preciso al centimetro, non influisce significativamente sulla determinazione di movimenti veloci. Ciò che influisce è l'accuratezza poiché a causa della decorrelazione temporale i movimenti potrebbero essere sottostimati: sfruttando la massima frequenza di campionamento delle immagini (una ogni 5-10 minuti), questo problema è facilmente superabile, se i tassi di movimento non sono superiori a quelli misurabili dallo strumento (circa 4 mm tra due acquisizioni successive). Come già osservato per l'integrazione delle diverse tecniche per la Frana di Collagna, si conferma che la registrazione/georeferenziazione delle informazioni in un unico sistema di riferimento è di fondamentale importanza per il confronto puntuale dei risultati.

4.3.1 Il caso di studio

La frana di Valoria è una frana complessa localizzata nell'Appennino settentrionale (Figura 4.23). Si trova nella parte alta del Bacino del Fiume Secchia, in Emilia Romagna. La frana si estende da circa

SAR interferometrico terrestre per il monitoraggio di versanti instabili: analisi di limiti e potenzialità con riferimento a casi di studio

1400 m a circa 520 m di quota, per una lunghezza di oltre 3.5 km e un'ampiezza variabile tra 1 km e 200 m, per un'area complessiva di più di 1.6 km² (Corsini et al., 2007; Ronchetti et al., 2007; Sterzai et al., 2010).

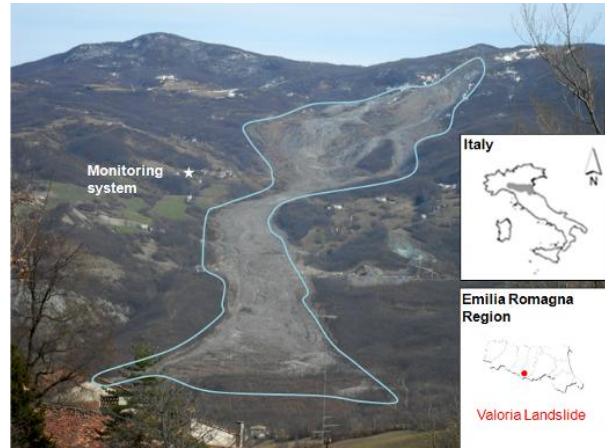


Figura 4.23: Localizzazione e immagine della Frana di Valoria (Frassinoro, Modena).

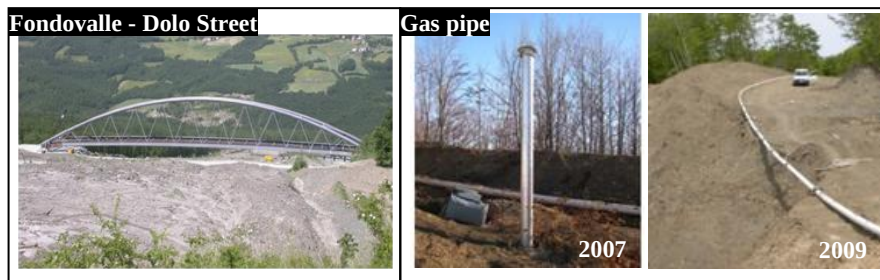


Figura 4.24: Elementi di criticità.

È importante conoscere il comportamento della frana per ridurre il fattore di rischio legato ad alcuni elementi di criticità (Figura 4.24). La frana è attraversata da una strada ad alta percorrenza, su cui è stato costruito un ponte per ovviare alle frequenti interruzioni provocate dalla frana. Nella parte di coronamento un metanodotto è stato progressivamente scalzato dall'arretramento della frana. Al piede culmina nel Torrente Dolo, che a causa di un'occlusione potrebbe esondare, danneggiando gli abitati del fondovalle. Inoltre, ai confini della frana sono presenti diverse abitazioni che potrebbero essere danneggiate da un allargamento del fenomeno. Tutti questi elementi di criticità sono caratterizzati da un alto potenziale di danneggiamento, ma data la difficoltà nel prevenire certi eventi a causa dei complessi fenomeni di riattivazione idro-meccanici che li caratterizzano, per preservare vite umane e eccessive perdite economiche, è stato predisposto un sistema di monitoraggio topografico in grado di funzionare come alert system (Corsini et al., 2006; Corsini et al., 2009). Il sistema di monitoraggio è costituito da sistemi GNSS e da una stazione totale in grado di misurare gli spostamenti in ogni settore della frana.

4.3.2 Il sistema di monitoraggio topografico

Data la complessità del fenomeno, prima dell'installazione definitiva di tutto il sistema, sono state realizzate campagne periodiche di misura sia tramite stazione totale che con sistemi GNSS da cui potessero emergere alcune specificità del fenomeno più interessanti da monitorare.

Le caratteristiche del sistema di monitoraggio (Bertacchini et al., 2011b) sono riportate in Tabella 4.13 e la localizzazione della postazione master di misura (Figura 4.25), installata ad Are Vecchie, e dei punti di monitoraggio sono raffigurate in Figura 4.26. Il sistema di monitoraggio è controllato da remoto grazie a una connessione GPRS con la quale è possibile scaricare i dati e visualizzarli direttamente sul pc in ufficio e controllare lo stato del sistema. L'installazione della strumentazione e dei punti di controllo è avvenuta in questo modo. Ad Are Vecchie, i dispositivi a centramento forzato per antenna GNSS e basetta della stazione totale sono stati costruiti così:

- 1) per la stazione totale, un pilastrino di cemento armato, di altezza 1.6 m e diametro 0.5 m, fondato nel terreno per circa 1 m;
- 2) per l'antenna GNSS un palo cavo di alluminio lungo 3.5 m è stato infisso nel terreno per 1.5 m, e poi è stato collegato con una platea di cemento armato al pilastrino della stazione totale.



Figura 4.25: Master area (Are Vecchie). Da sinistra: antenna GNSS con antenna W-LAN, apparati di controllo, clinometro bi-direzionale e stazione totale.

I prismi di riferimento, quelli di monitoraggio e i punti di controllo GPS sono stati installati con modalità differenti a seconda dello scopo per cui sono stati concepiti.

I punti GPS in frana (Figura 4.27 c) sono costituiti, analogamente alla postazione master, da pali di alluminio di 3 m di lunghezza infissi nel terreno per circa 1.5 m, dotati di un dispositivo a centramento forzato per l'antenna. I prismi, invece, hanno tutti lo stesso elemento riflettente, ma installato su montature diverse e su supporti differenti. Le montature utilizzate sono di due tipi, quella classica topografica (Figura 4.27 a) o quella speciale per il monitoraggio (Figura 4.27 b), in funzione del loro utilizzo. Le montature classiche sono state utilizzate per due prismi di riferimento (R1 e R2) installati su supporti con dispositivo a centramento forzato, con possibilità di interscambio con l'antenna GNSS per un controllo di stabilità nel tempo e per la determinazione delle coordinate del punto anche nel sistema di riferimento ETRF2000. Gli altri prismi, invece, grazie alla predisposizione appositamente concepita,

sono stati installati direttamente sulle case o su tondini di ferro lunghi 2 m, infissi nel terreno per circa 1 m.

Stazione totale	
Modello	Leica TCA 2003
Maximum operating distance	2000 m
Accuratezza angolare.	0.5'' (0,15 mgon)
Accuratezza in distanza	1 mm + 1 ppm / 3.0 s
Target	41 prismi: 35 di monitoraggio and 6 di controllo
Acquisizioni	ogni 3 ore
GNSS	
Master Station	1 Leica GMX902 GG (L1,L2) a doppi a frequenza, antenna Leica AX1202GG, alimentazione da corrente di rete (220 V), con batteria tampone
Rover	3 Leica GMX901 GG (L1, 12 CH.,1Hz), alimentazione con pannello solare e batteria tampone
Data Transmission Link	Continuous data streaming via GMX902 WLAN
Clinometro bi-direzionale	
Modello	Leica Nivel 210
Risoluzione	0.001 mrad
Accuratezza	± 0.0047 mrad
Sensore di temperatura	si
Intervallo di campionamento	1 minuto
Collocazione	Sul pilastro della stazione totale ad 1 m di altezza
Master area control unit	
Integrazione TS-GNSS	Sw Geomos e sw GNSS Spider, connessione diretta al sistema di acquisizione
Power Supply	220 V CA con batteria tampone 12 A
Remote Data Transmission	Connessione con modem GPRS
Controllo della posizione	Analisi delle lunghe serie temporali GPS

Tabella 4.13: Parametri tecnici del sistema integrato di monitoraggio GNSS-TS.

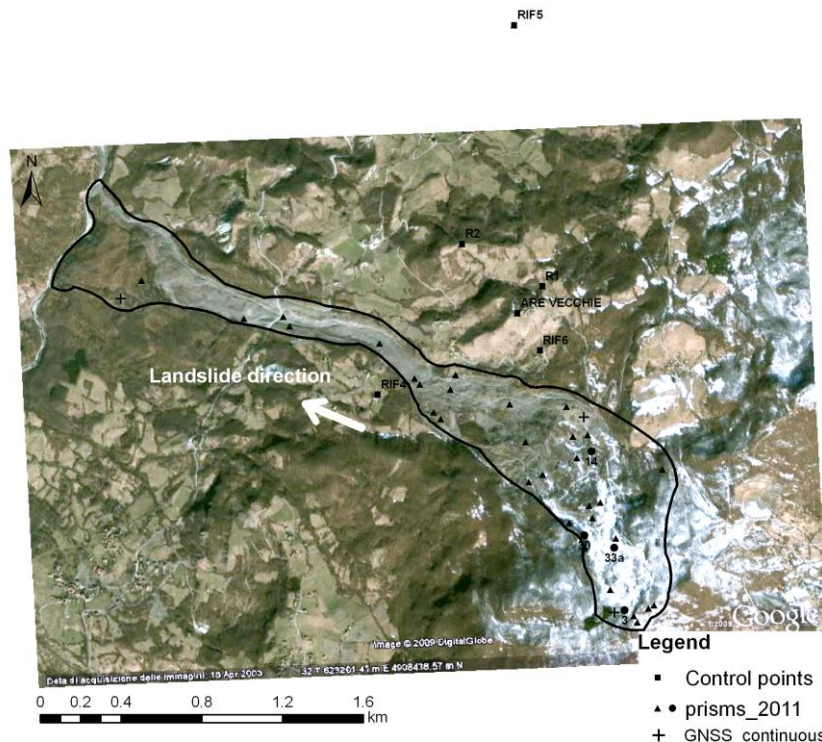


Figura 4.26: Localizzazione (Novembre 2011) dei punti di monitoraggio (prismi e rover GPS), dei punti di riferimento della stazione totale e della master area (Are Vecchie).

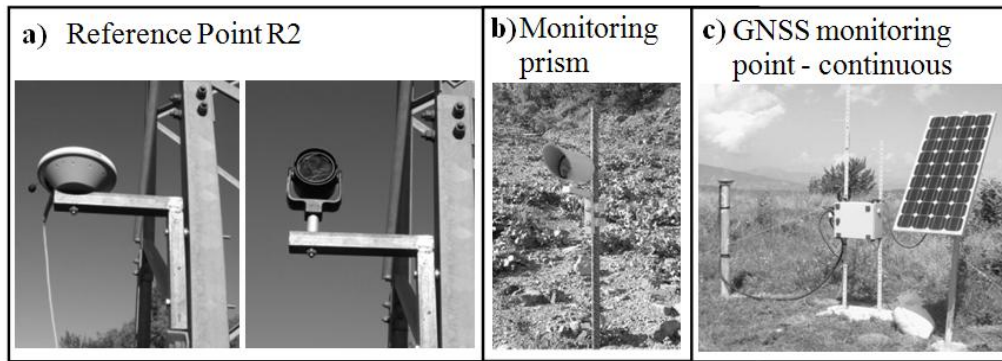


Figura 4.27: Esempi di monumentazioni.

I punti di riferimento della stazione totale (esterni alla frana) sono necessari come controllo, per orientare il sistema di riferimento locale della stazione totale e per il calcolo di correzioni geometriche da applicare alle osservazioni di distanza inclinata della stazione totale. Questo tipo di correzione può essere applicata in alternativa alle correzioni atmosferiche quando gli obiettivi di precisione e accuratezza sono dell'ordine di qualche centimetro. E' quindi necessario controllare la stabilità nel tempo dei punti di riferimento per evitare di introdurre errori di orientamento e di calcolo delle correzioni geometriche. Per la Frana di Valoria, data l'entità dei movimenti, non si è ritenuto indispensabile installare una centralina meteorologica in prossimità dello strumento per applicare correzioni atmosferiche alle misure in continuo; si è accettato di avere un sistema un po' meno preciso e accurato, ma comunque efficace nella determinazione di spostamenti di m/giorno nei periodi di maggiore attività. Per applicare le correzioni geometriche, i punti di riferimento vengono misurati ad un certo istante (t_0 , per esempio) con la stazione totale; le coordinate derivate dalle osservazioni a t_0 , vengono poi utilizzate come riferimento per il confronto con le osservazioni agli istanti t_1 , t_2 , ecc; sulla base di questi confronti vengono determinati i valori di ppm geometrica da applicare proporzionalmente a tutte le osservazioni di distanza agli istanti t_1 , t_2 , ecc. di tutti i prismi.

In Figura 4.28 è possibile vedere come ci sia, infatti, un comportamento stagionale nell'andamento della distanza inclinata dei prismi di riferimento (stabili con precisione sub-centimetrica, come da controlli GNSS) che si ripete annualmente. Per realizzare questi grafici sono state considerate le osservazioni di distanza inclinata su alcuni prismi di riferimento (R1, R2, Rif4 and Rif5), per un periodo di circa 3 anni. Le variazioni aumentano, all'aumentare della distanza (Rif5). Le distanze tra prisma e strumento aumentano progressivamente da circa 180 m per R1 a circa 1430 m per Rif5, passando da R1, a R2, a Rif4 e a Rif5. La variabilità annuale sulla misura di distanza inclinata è nell'ordine di qualche centimetro, ma non può essere trascurata se si desidera un sistema con precisione del centimetro o sub-centimetrica. Su periodi di tempo più contenuti le variazioni diminuiscono, ma non sempre sono trascurabili in funzione dell'oggetto da monitorare, come osservato per la Frana di Collagna.

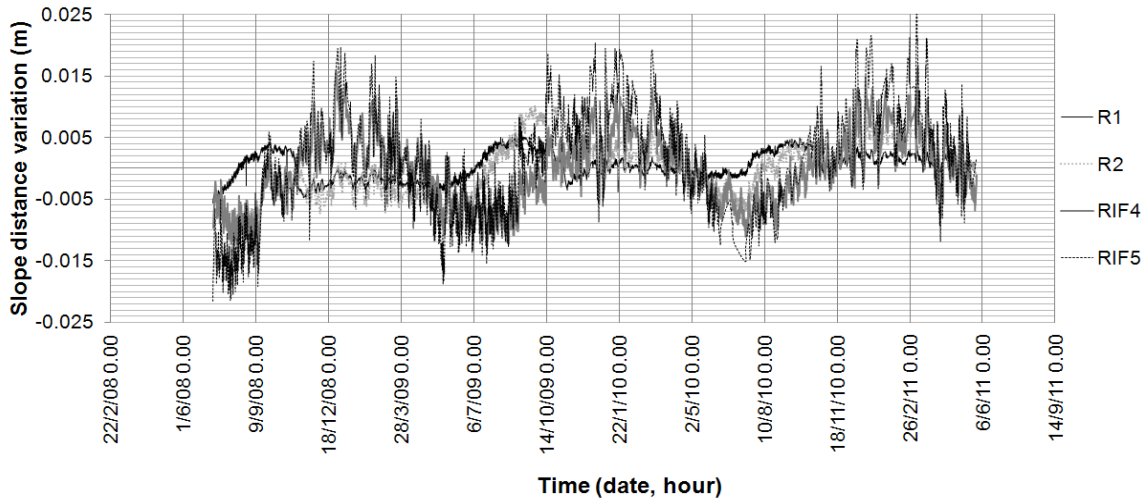


Figura 4.28: Variazione della distanza inclinata (m) di alcuni punti di riferimento.

Alcune aree hanno registrato spostamenti veramente significativi anche nel periodo in cui è stato installato il GB-InSAR.

Osservando i grafici di Figura 4.29 è possibile osservare che alcuni prismi hanno raggiunto velocità di m/giorno, come i prismi 14 e 33a. Questo significa che precisioni qualche centimetro del sistema di monitoraggio sono ampiamente tollerabili. Per prismi con velocità inferiori (cm/mese o cm/giorno), come i prismi 3 e 30 (Figura 4.30) è più efficace un monitoraggio sul lungo periodo che sul breve: le time series risultano rumorose, proprio per effetto delle variazioni atmosferiche (Figura 4.30). Per variazioni più consistenti (Figura 4.29) le rumorosità determinate da effetti atmosferici tendono a scomparire.

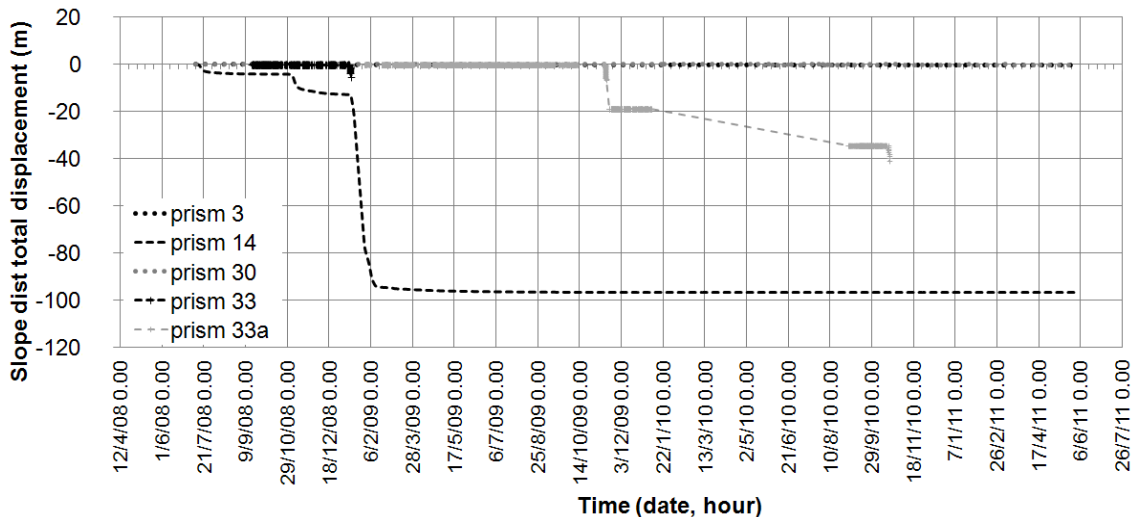


Figura 4.29: Spostamento cumulato nella direzione della distanza inclinata di alcuni prismi della zona di coronamento.

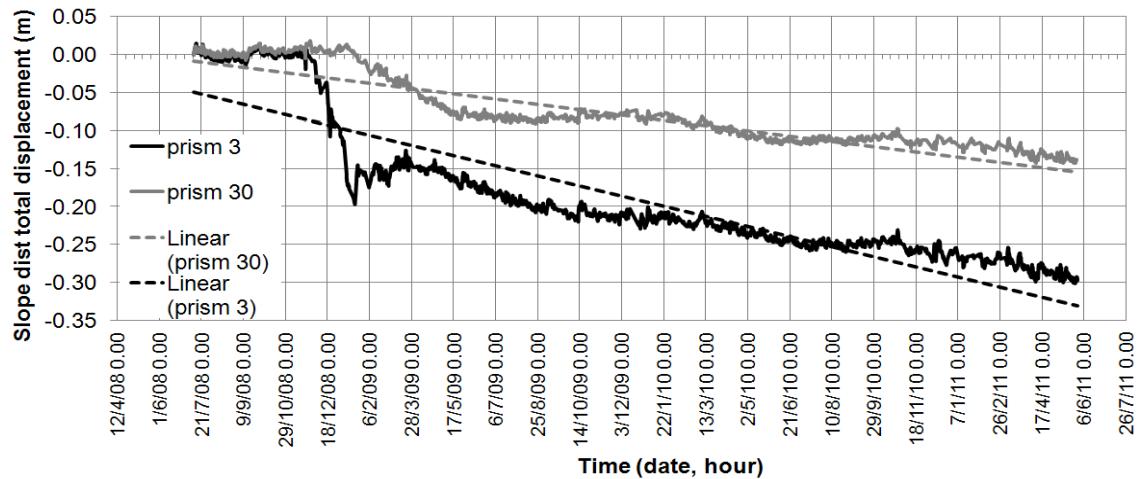


Figura 4.30: *Spostamento cumulato nella direzione della distanza inclinata dei prismi 3 e 30 della zona di coronamento.*

4.3.3 Sistema GB-InSAR, integrazione e confronto con il sistema topografico

La campagna di misura è stata pensata per verificare le capacità di monitoraggio in tempo reale di movimenti veloci della tecnica GB-InSAR. La campagna di monitoraggio tramite GB-InSAR è stata condotta con lo strumento IBIS-L (di IDS- Ingegneria dei Sistemi, Pisa, Italia) per lo studio dell'area di coronamento della frana. Le caratteristiche principali dello strumento e i parametri di acquisizione sono elencati nella scheda monografica del sito riportata nel paragrafo 2.4. Lo strumento è stato posizionato ad Are Vecchie, in prossimità del pilastro della stazione totale, rivolto verso la parte alta della frana (Figura 4.31) ed è stato lasciato in acquisizione per 24 ore (23-24 Febbraio 2009), in uno dei periodi di maggior attività della frana registrati dal 2008 (Figura 4.32) immediatamente dopo una riattivazione, ma già in una fase di decelerazione.

L'installazione è stata condotta in modo speditivo monumentando lo strumento su un supporto temporaneo e sono stati usati database liberi (SRTM -Shuttle Radar Topography Mission- e Google Earth) per creare un GIS dell'area e per ottenere un DTM utile a proiettare le mappe di spostamento SAR su un supporto 2D georeferenziato (UTM ETRF2000 32N). La mappa di base del GIS è stata acquisita da piattaforma Google Earth e georeferenziata attraverso le coordinate di pochi punti noti (Bertacchini et al., 2007; Bertacchini e Capra, 2010; Baiocchi et al., 2006; Toutin, 2004a; Toutin 2004b) mentre il modello tridimensionale del terreno riproiettato e ricampionato con passo 5 m, è stato ricavato dal DTM SRTM (grigliato con passo 90 m). Gli aspetti legati all'accuratezza e alla precisione della georeferenziazione delle informazioni sono stati un po' trascurati, concentrando maggiormente l'attenzione sulla capacità di monitoraggio di movimenti veloci, anche se rimangono di cruciale importanza nell'integrazione dei risultati delle diverse tecniche.



Figura 4.31: IBIS-L, puntamento verso il coronamento della frana.

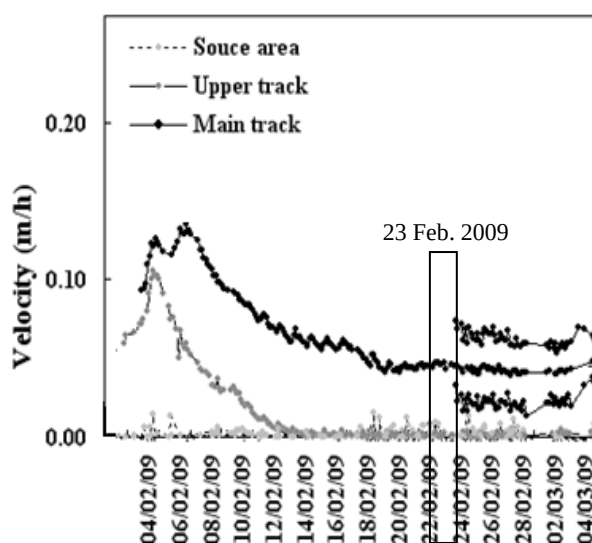


Figura 4.32: Velocità dei prismi nel periodo di Febbraio 2009 (Corsini et al., 2012).

L'elaborazione è stata eseguita sfruttando la tecnica PS, definendo il set di calibrazione secondo il criterio di coerenza: sono stati scelti punti con coerenza ≥ 0.65 , utilizzando un data set di immagini costituito dalle prime 30 immagini acquisite. Sono stati ottenuti circa 365'000 punti dei circa 700'000 dell'area, con una buona copertura spaziale dell'area da monitorare. Si è scelto il block size = 40 e il result update time = 1.

Una mappa di spostamenti LoS è visualizzata come raster map 2D georeferenziata in Figura 4.33, dove sono anche rappresentati i prismi della stazione totale presenti nell'area e alcuni PS significativi di cui sono state estratte le time series di spostamento. Il massimo spostamento cumulato (LoS) in 24 ore, dell'ordine dei 40 cm, è uno spostamento negativo discendente lungo il versante, in avvicinamento al sensore. In Figura 4.34 e in Figura 4.35 sono riportate alcune time series di spostamento LoS di alcuni punti significativi. Considerati i movimenti registrati, movimenti di diversi ordini di grandezza sono stati riportati in grafici differenti, perché la loro rappresentazione fosse significativa. Per i punti "più lenti", come g3 e g31 il grafico di spostamento risulta più rumoroso rispetto a prismi "più veloci" come g18, g20, g15, g16 o g37, ma ugualmente significativo. E' possibile distinguere in modo abbastanza chiaro

PS in movimento da PS fermi. I PS g12 e g20, infatti, hanno time series di spostamento prossime a zero, con un grafico che non presenta rumorosità evidenti.

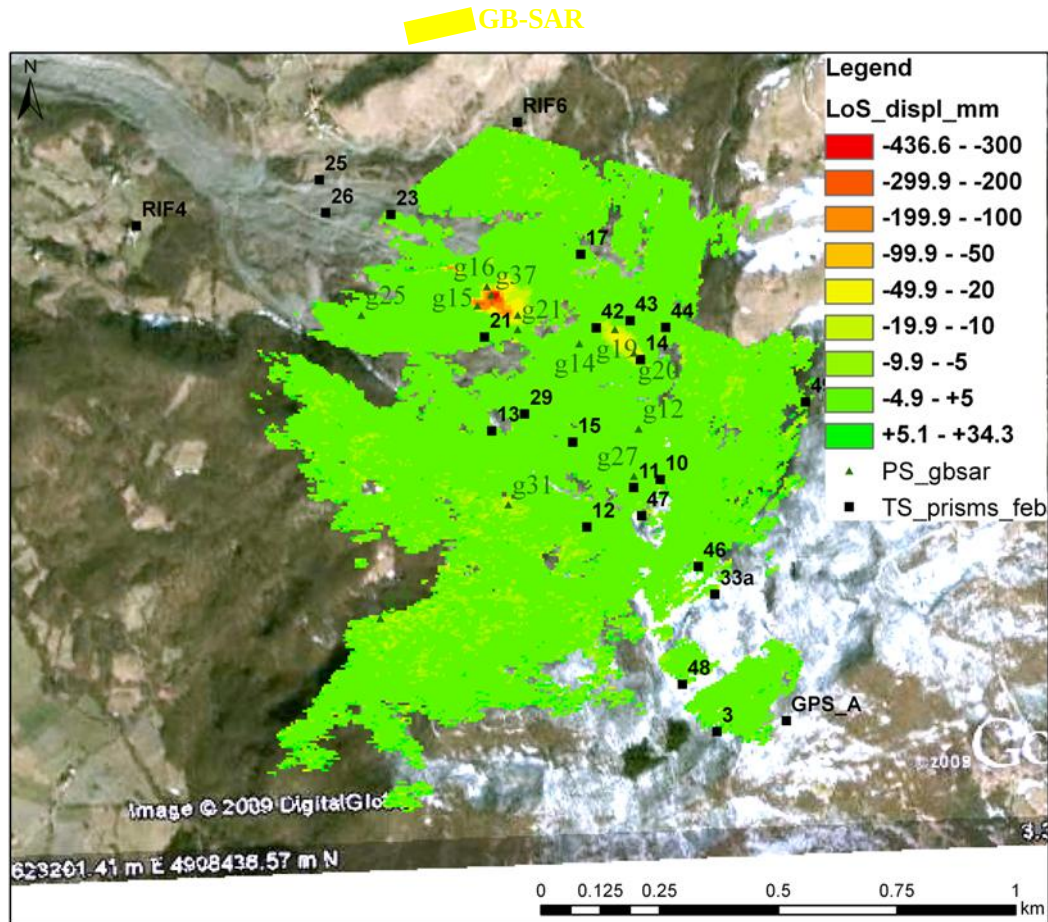


Figura 4.33: Mappa di spostamento LoS, posizione dei prismi e di alcuni PS significativi (23 Feb. 2009).

La campagna GB-InSAR è stata di successo, in quanto ha rilevato con una buona continuità spaziale la scena, individuando due aree di movimento significative, rappresentate con colori caldi (dal giallo al rosso in Figura 4.33); l'effetto "sale e pepe" tipico di fenomeni non ben rappresentati si limita alla zona Sud-Ovest della scena, che è un'area con vegetazione sparsa, in cui nonostante questo effetto "sale e pepe" si sono registrati movimenti inferiori al centimetro per il periodo di osservazione. Naturalmente, questi movimenti, non considerati significativi su questo lasso temporale.

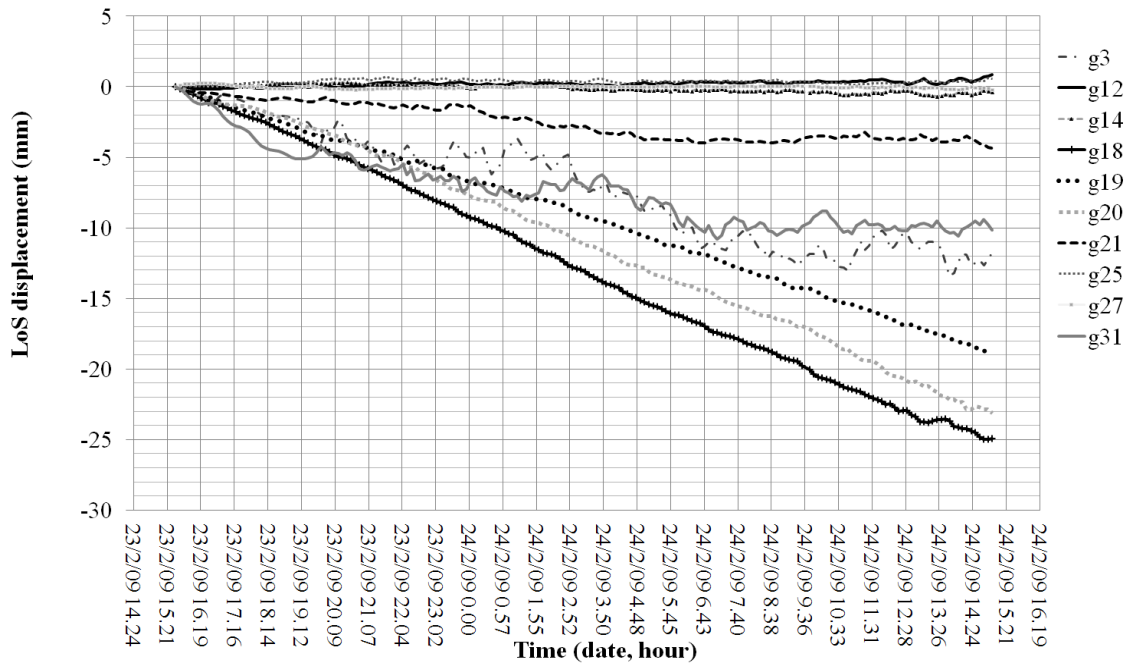


Figura 4.34: Spostamento LoS (< 30 mm) di alcuni PS.

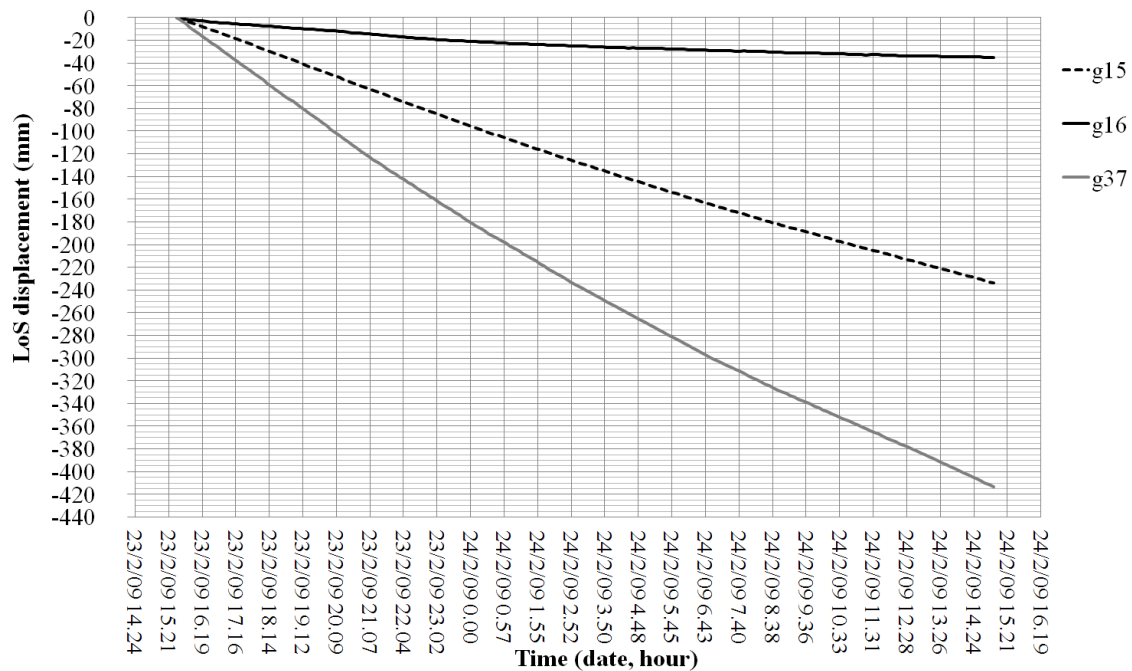


Figura 4.35: LoS displacement (> 30 mm) di alcuni PS.

I risultati di spostamento derivati dalla stazione totale e dalla tecnica GB-InSAR possono essere confrontati quantitativamente grazie alla significatività degli spostamenti rilevati rispetto alla precisione dei due metodi di misura (per entrambi centimetrica nel periodo considerato).

La riproiezione speditiva delle mappe di spostamento del GB-InSAR con un DTM non aggiornato e con passo della griglia di 90 m (il ricampionamento a 5 m agevola solamente l'operazione di riproiezione) e

l'assenza di corner reflector fa sì che permanga un certo grado di indeterminazione nella georeferenziazione dei risultati. Questa indeterminazione è trascurabile se confrontata con la dimensione del pixel GB-InSAR (0.5 m x 4.4 m, a 1 km di distanza, più piccolo per distanze inferiori, più grande per distanze superiori) e in relazione al tipo di oggetto osservato. Oltre a questa indeterminazione nella collocazione dei pixel delle immagini GB-InSAR, si deve considerare che la tecnica GB-SAR rileva informazioni di area, mediando le informazioni registrate. La stazione totale, invece, fornisce valori puntuali che si riferiscono alla posizione del centro del prisma. Proprio per questo è molto importante georeferenziare nel modo adeguato i risultati. Comunque, nonostante questo, il confronto tra le due tecniche sembra essere significativo (Figura 4.36). Le serie temporali di spostamento cumulato di distanza inclinata e LoS dei prismi 13 e 14 e dei corrispondenti PS non presentano rumorosità evidenti e sono tutte prossime allo spostamento nullo. Uno spostamento significativo, invece si è riscontrato per il prisma 21 e il corrispondente PS, con uno spostamento di quasi 2 cm in un giorno. Purtroppo, nelle zone di maggiore movimento non è stato possibile fare un confronto quantitativo tra ATS e GB-InSAR a causa dell'assenza di prismi. Il massimo spostamento LoS rilevato è di 430 mm, in 24 ore. Questo significa che considerando una velocità costante, con un'acquisizione ogni 8 minuti circa, non dovrebbe essersi verificata decorrelazione temporale. Il massimo spostamento rilevabile, infatti, con 180 acquisizioni ogni 8 minuti circa è approssimativamente di 800 mm.

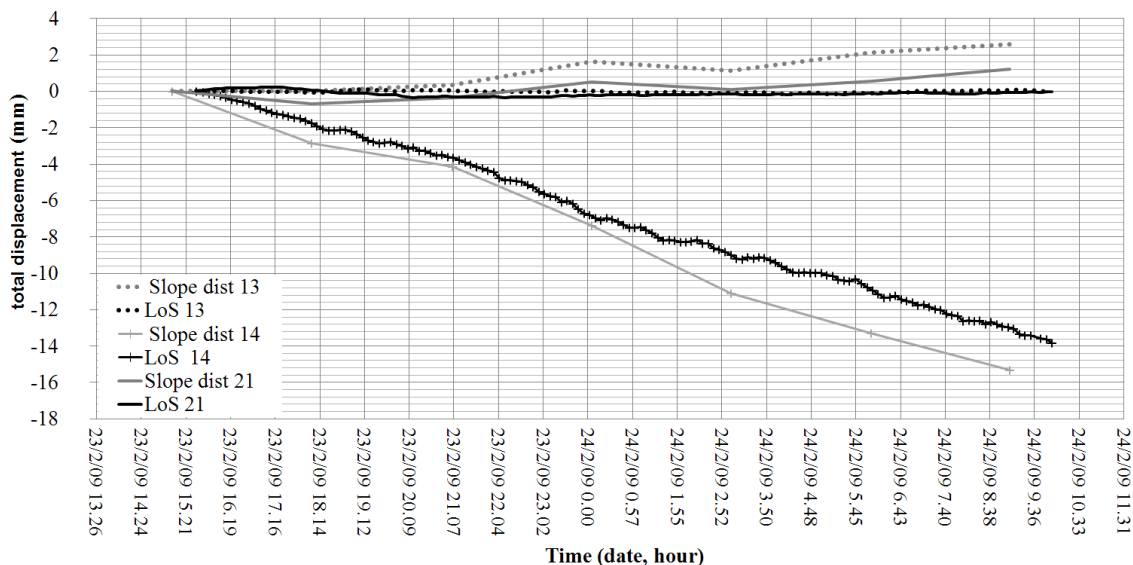


Figura 4.36: Spostamento cumulato di distanza inclinata per i prismi 13, 14 e 21 e spostamento LoS dei corrispondenti PS.

Inoltre, con GB-InSAR è stato possibile determinare quali aree fossero in rapida evoluzione, laddove stazione totale o GNSS nulla avrebbero potuto. GB-InSAR e stazione totale ben si integrano come tecniche di monitoraggio in near real time. Il GB-InSAR è una tecnica efficace anche senza punti di controllo a terra. Con suolo scarsamente vegetato come in questo caso, ha fornito informazioni di spostamento anche in aree in cui i prismi sarebbero stati difficilmente o assolutamente non posizionabili (difficile accesso, perdita del prisma per l'entità dei movimenti). I prismi, invece, integrano la mancanza

di dato in aree non illuminate dal GB-SAR per il suo limitato campo di osservazione o dove si ha perdita di coerenza a causa di vegetazione: per questo GB-InSAR e stazione totale possono considerarsi complementari.

Capitolo 5. Discussioni e conclusioni

L'utilizzo della tecnica GB-InSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) per lo studio di versanti instabili quale strumento di supporto alle fasi di attenzione e sorveglianza che scattano a seguito di periodi di piovosità cumulata accentuata è efficace, in quanto è possibile discriminare zone stabili da zone in movimento, anche se i risultati risentono del tipo di elaborazione applicato. Questo significa che, anche se la tecnica può nominalmente raggiungere precisioni sub-millimetriche, in condizioni operative come quelle che si presentano per applicazioni di monitoraggio di versanti instabili, si possono raggiungere precisioni del centimetro o di qualche centimetro, in relazione alle caratteristiche dell'oggetto monitorato.

I test condotti hanno prodotto risultati soddisfacenti, ma rimangono molti problemi aperti come georeferenziazione dei risultati, generazione di accurate mappe di spostamento 3D, incremento di precisione e accuratezza, riaggancio di campagne successive di acquisizione, ecc.

Le applicazioni GB-InSAR funzionano abbastanza bene quando i movimenti coinvolti sono lenti o moderatamente veloci (cm/giorno e m/giorno) e se la copertura vegetativa dell'area o l'umidità del terreno consentono comunque di raggiungere buoni livelli di coerenza sia spaziale che temporale. Quando i movimenti sono molto lenti (mm/mese) allora gli effetti atmosferici residui rischiano di essere di un ordine di grandezza superiore rispetto ai movimenti da osservare, per cui l'analisi dei dati si complica un po' e non sempre porta a risultati significativi in termini quantitativi.

Considerando la mutua influenza delle variabili in gioco (coerenza spazio-temporale, qualità delle acquisizioni, distanza di osservazione, interazione con l'atmosfera, ...), di cui gli effetti sono estremamente variabili, le sperimentazioni condotte potrebbero essere ulteriormente estese con l'intento di individuare un approccio metodologico in grado di condurre a risultati ancora più precisi ed accurati, che presentano un buon grado di ripetibilità.

L'*acquisizione* delle osservazioni costituisce una fase delicata del rilievo e della campagna di monitoraggio, che determina la qualità delle osservazioni stesse: stabilità della monumentazione e corretto puntamento delle antenne possono ottimizzare la qualità delle immagini grezze, agevolando le successive elaborazioni. Annullando i problemi di stabilità o di puntamento, è più facile selezionare le

immagini di qualità e discriminare eventuali anomalie in fase e in ampiezza, che comunque sono difficili da identificare e possono inficiare il risultato finale. Per applicazioni GB-InSAR, come per ogni tipo di sistema di monitoraggio topografico è fondamentale predisporre un *controllo di stabilità della postazione* di misura nel tempo.

Gli aspetti critici che influenzano la buona riuscita di una campagna di monitoraggio sono molteplici e intrinsecamente legati: interazione dell'osservabile con l'atmosfera, coerenza spazio-temporale, focalizzazione, elaborazione delle osservazioni e criteri di selezione dei punti coerenti, ecc.

Se si attua una buona strategia di *selezione dei punti* per le elaborazioni, il risultato finale sarà sicuramente più significativo di quello prodotto da scelte non debitamente ponderate. La scelta delle soglie di coerenza o di dispersione di ampiezza attraverso cui selezionare i punti sono arbitrarie, ma devono garantire buona continuità spaziale delle informazioni e buona qualità dei punti in termini di segnale di risposta (coerenza temporale, intensità del segnale). Se la scena osservata è costituita principalmente da rocce o da abitazioni la risposta dei materiali garantisce, in genere, un buon livello di coerenza, ma se il versante è caratterizzato da coperture vegetative e terreno sciolto e umido, il valore di coerenza tende ad abbassarsi, arrivando persino ad annullarsi. La *continuità spaziale* nella distribuzione dei punti selezionati è funzione anche della localizzazione delle *aree geologicamente stabili* sulla scena: si deve garantire una sufficiente continuità spaziale tra aree in movimento e relativamente stabili per favorire la discriminazione della fase per la stima degli spostamenti. Se le aree geologicamente stabili non sono uniformemente distribuite sulla scena o se il numero di punti che le caratterizza non è adeguato, i risultati di spostamento possono non essere significativi o esserlo solo su alcune zone. In questo caso, conviene suddividere l'area di interesse in sottoaree e analizzare i movimenti differenziali in modo relativo. Spesso, può capitare che in alcune aree della scena permangano *effetti residui dell'atmosfera* legati ad artefatti atmosferici e non di rado, anche se non facilmente individuabili ed identificabili sussistono relazioni tra ciclo di insolazione (temperatura) e andamento dello spostamento.

Il requisito di continuità spaziale nella distribuzione dei punti è tanto più importante quanto più lo sono precisione e accuratezza dei risultati. Per movimenti molto lenti, movimenti moderati o se sussistono variazioni differenziali locali di spostamento, la continuità spaziale agevola srotolamento della fase e stima della componente atmosferica.

Dal confronto di diversi approcci di elaborazione e di selezione dei dati è emerso che l'elaborazione di dati GB-InSAR per applicazioni di monitoraggio di versanti instabili non è semplice e immediata. Potenzialmente, la tecnica può essere molto precisa (millimetro o sub millimetro), ma *condizioni operative* come quelle tipiche del monitoraggio di versanti instabili portano a una riduzione della precisione del metodo a valori centimetrici.

La *frequenza di campionamento temporale* delle immagini è importante in funzione dei movimenti da rilevare. Riducendo la frequenza temporale di campionamento delle immagini rispetto alla frequenza massima (una immagine ogni 5-10 minuti) si rischia di sottostimare gli spostamenti a causa della

decorrelazione temporale che si può avere tra due immagini successive. Con movimenti dell'ordine di grandezza del mm/mese, con frequenza di campionamento di un'immagine/ora non si incorre in questo problema che si presenta quando tra due osservazioni successive lo spostamento è maggiore di circa 4 mm (valore valido per la banda Ku). Per movimenti molto lenti, ridurre la frequenza temporale delle immagini consente di ridurre il rumore residuo, discriminando eventuali spostamenti. Per movimenti lenti o moderati, non conviene sottocampionare le immagini, sfruttando il massimo rate di acquisizione. Nell'elaborazione con tecnica PS (Permanent Scatterers), un parametro che influisce sulla discriminazione in fase di componente atmosferica e noise è il Block Size (BS), cioè il numero di immagini da considerare per discriminare la fase. Questo parametro è da considerare nel modo appropriato quando si sceglie di lavorare con frequenza massima di campionamento delle immagini o con un sottocampionamento. Con un BS = 50, con una immagine ogni 10 minuti, la stima viene calcolata su un intervallo di 8 ore; con una immagine per ora, si media su circa due giorni di osservazione.

La tecnica GB-InSAR ben si presta ad applicazioni *real-time per l'allerta*, ma è bene valutare in modo adeguato gli obiettivi, la durata del periodo di osservazione, l'entità dei movimenti da rilevare, la distanza operativa, la copertura del suolo, ecc. prima di effettuare l'installazione; inoltre le elaborazioni devono essere impostate nel miglior modo possibile (definizione del set di calibrazione, numero di immagini da elaborare per la stima della componente atmosferica della fase, ecc.) perché i risultati siano significativi. Per come si articolano le fasi di installazione dello strumento, di impostazioni del software di acquisizione e di pre-analisi delle immagini in poche ore è possibile rendere operativo lo strumento e ottenere risultati di spostamento. Per le applicazioni in tempo reale, l'approccio PS è più indicato rispetto alla selezione dei GCP (Ground Control Point) grazie all'approccio statistico più robusto che la caratterizza. La tecnica con selezione dei punti di controllo per il phase unwrapping e per la stima dell'atmosfera, è più indicata per la post-elaborazione perché in grado di fornire un'analisi più approfondita delle fasi del processing, se guidata da un operatore esperto.

Per applicazioni in tempo reale, la creazione di mappe 2D o 3D di spostamento può essere un aspetto importante al pari della quantificazione degli spostamenti. Perciò, in funzione del tipo di oggetto da monitorare, è bene predisporre il giusto supporto tridimensionale per la riproiezione dei risultati. Per aree estese e con morfologie non troppo complesse è possibile avvalersi di modelli digitali del terreno o delle superfici derivati da archivi liberi di immagini satellitari, come ASTER DEM (ASTER Digital Elevation Model) o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Se, invece, i versanti presentano pareti sub-verticali o edifici, rilievi TLS (Terrestrial Laser Scanner) possono essere la soluzione ottimale, grazie alla portata di misura di strumenti laser scanner very-long range (fino a 6 km) e alla loro capacità di fornire in poco tempo una fedele informazione tridimensionale dell'area monitorata.

La tecnica GB-InSAR è efficace come tecnica di monitoraggio, ma data la variabilità dei risultati di spostamento che ne derivano variando la strategia di elaborazione e di selezione dei punti, necessita di

essere *validata quantitativamente*, con *integrazione e confronto* con altri sistemi di monitoraggio, come ad esempio sistemi topografici operanti in continuo con stazione totale automatizzata.

Per integrare diverse tecniche di misura il primo problema che si deve affrontare è quello della *trasformazione tra sistemi di riferimento*. Ogni strumento lavora nel proprio sistema di riferimento, infatti, la stazione totale acquisisce in un sistema polare facilmente riconducibile ad un sistema cartesiano ortogonale, il GB-InSAR registra le osservazioni in immagini bidimensionali con geometria polare, i sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) operano in un sistema di riferimento globale, ecc. Uno dei mezzi più utilizzati per integrare i risultati, specialmente per analisi territoriali, è il *GIS (Geographic Information System)*. Questo sistema informativo, però, lavora principalmente con sistemi di riferimento cartografici bidimensionali, mentre le osservazioni misurate riguardano scenari tridimensionali. Quando si lavora in un sistema GIS 2D, in primo luogo si deve affrontare il problema di una precisa ed accurata georeferenziazione. Il secondo problema che si deve affrontare è quello del passaggio da *rappresentazione tridimensionale (3D)* a bidimensionale (2D) specialmente per morfologie complesse, per versanti con pendenze molto alte o per abitazioni e centri abitati: le informazioni relative al versante o alle pareti degli edifici vengono riproiettate su un piano, per cui si può perdere parte dell'informazione misurata. Per il futuro si prevede di approfondire lo studio di GIS 3D e l'utilizzo di DTM/DSM (Digital Terrain Model/Digital Surface Model) ad alta risoluzione derivati da tecnologia laser scanner (terrestre e aviotrasportata), sia in formato di grigliato (passo della griglia < 2 m) che in formato TIN (Triangular Irregular Network) mesh, per fornire una descrizione più dettagliata dei risultati GB-InSAR e agevolarne l'integrazione con altri sistemi e l'interpretazione dei risultati. Inoltre, si prevede di sperimentare l'utilizzo di corner reflector per la georeferenziazione dei dati GB-InSAR.

Un altro aspetto importante dell'integrazione tra tecniche differenti riguarda *precisione e accuratezza* dei metodi, in particolare se ci si focalizza sulla validazione quantitativa dei risultati. I risultati sono confrontabili qualora gli spostamenti siano significativi rispetto alla loro precisione e accuratezza. I risultati di spostamento LoS GB-InSAR sono stati confrontati con i valori di distanza inclinata misurati da stazioni totali automatizzate operanti in continuo come sistemi di monitoraggio. Precisione e accuratezza operative di stazione totale e GB-InSAR sono estremamente sensibili all'interazione dell'osservabile con l'atmosfera. Quindi, in particolar modo nel confronto quantitativo di movimenti molto lenti (mm/mese) è fondamentale cercare di ottimizzare le prestazioni delle due tecniche, per discriminare piccoli spostamenti da rumore residuo. Per la tecnica GB-InSAR la stima dell'atmosfera è uno step fondamentale dell'elaborazione dei dati, anche se per lo studio dei versanti instabili è ancora abbastanza critica. Le applicazioni SAR terrestri, infatti, discendono da quelle satellitari per cui il "problema dell'atmosfera" è noto. Per la stazione totale, invece, la tematica è aperta e abbastanza attuale. Solo stazioni totali automatizzate di ultima generazione, infatti, sono in grado di acquisire informazioni anche a qualche chilometro di distanza. L'osservabile "trasportata" dall'onda elettromagnetica che interagisce con l'atmosfera, subisce variazioni rispetto alla condizione imperturbata tanto più consistenti quanto più la distanza aumenta. L'interazione onda-atmosfera può essere modellata per apportare le giuste correzioni (*correzioni atmosferiche*) alle variazioni prodotte, ma il comportamento di questi

sistemi di acquisizione a distanze di oltre 1 km non è del tutto noto, per cui la modellazione è ancora in fase sperimentale. È stato applicato un modello di correzione atmosferica alle osservazioni in continuo dell'elettrodistanziometro della stazione totale che ha permesso di incrementare precisione e accuratezza delle misure di distanza inclinata. Per il confronto di movimenti lenti o moderatamente veloci (cm/settimana o m/giorno) non è indispensabile applicare correzioni atmosferiche alle misure di distanza dell'elettrodistanziometro. In genere sono sufficienti le cosiddette correzioni geometriche, meno precise ed accurate delle correzioni atmosferiche, ma comunque efficaci. Il valore di correzione da apportare alle misure di distanza viene calcolato considerando fisse le misure di distanza di punti di riferimento esterni al corpo di frana. Tanto più le misure di riferimento sono precise e accurate, tanto migliori saranno i risultati. Nel valutare precisione e accuratezza del metodo di misura di sistemi di monitoraggio in continuo, non si può prescindere da *analisi di stabilità della postazione di misura* e dei punti di controllo esterni al corpo di frana per evitare di introdurre errori sistematici che possono portare ad una interpretazione errata del fenomeno.

La validazione quantitativa della tecnica GB-InSAR con stazione totale è stata fatta confrontando i risultati di spostamento cumulato LoS, con i valori cumulati di distanza inclinata misurati dall'elettrodistanziometro della stazione totale nello stesso periodo. Quindi sono stati fatti confronti di spostamenti relativi, ipotizzando che osservazioni GB-InSAR LoS e distanza inclinata fossero confrontabili poiché misurate praticamente dallo stesso punto.

Per validare quantitativamente i risultati della tecnica GB-InSAR con stazione totale, i due sistemi di monitoraggio sono stati integrati e sono emerse considerazioni interessanti: a livello quantitativo i risultati sono confortanti e le due tecniche possono essere in un certo senso complementari.

- Le due tecniche ben si integrano a livello quantitativo, laddove si ha sovrapposizione di osservazioni (PS e prismi), sia per la determinazione di movimenti moderati che di movimenti estremamente lenti. In questo ultimo caso, però, è necessario apportare correzioni atmosferiche alle misure dell'EDM (elettrodistanziometro) della stazione totale per rendere significativa la misura rispetto alla precisione e all'accuratezza del metodo. Inoltre, la tecnica GB-InSAR è potenzialmente più precisa rispetto alla stazione totale, ed è in grado di cogliere riattivazioni del fenomeno di instabilità che la stazione totale non è in grado di rilevare.
- Il GB-SAR rileva informazioni di area, registrandole in un pixel con dimensione che varia in funzione della distanza angolare dalla direzione di puntamento del sensore, mentre la stazione totale fornisce valori puntuali che si riferiscono alla posizione del centro del prisma.
- La sovrapposizione delle informazioni di PS e prismi è fattibile a condizione che la georeferenziazione/registrazione delle informazioni sia precisa e accurata; il confronto è significativo se non si registrano spostamenti differenziali localizzati all'interno di uno stesso PS, corrispondente al prisma.

- Il confronto quantitativo degli spostamenti è significativo se per il dato GB-SAR non si ha decorrelazione temporale tra due acquisizioni successive, problema in cui si può incorrere se, ad esempio si verificano periodi di black out della strumentazione.
- La tecnica GB-InSAR è meno robusta e ripetibile rispetto alla stazione totale.
- La tecnica GB-InSAR fornisce dati pseudo-spazialmente continui anche senza materializzazioni di target sul corpo di frana, per aree difficilmente accessibili, in cui stazione totale o sistemi GNSS hanno un limite operativo, poiché le monumentazioni di prismi e antenne non possono essere fisicamente realizzate oppure possono essere perse a causa dell'evoluzione del fenomeno.
- La tecnica GB-InSAR è in grado di operare a distanze operative nominali di 4 km, mentre la stazione totale può arrivare al massimo a 3 km. Però, mentre la stazione totale, limitatamente alle osservazioni di prismi (per distanze superiori a 300-400 m, altrimenti anche la stazione totale può lavorare senza prisma) può lavorare a 360° sul piano orizzontale, il GB-SAR è estremamente direzionale. Quindi, non sempre con un unico strumento GB-SAR si è in grado di monitorare un versante instabile in tutte le sue parti.
- Il dato pseudo-spazialmente continuo del GB-InSAR, anche se con una certa variabilità dei risultati, fornisce indicazioni di movimento/stabilità di tutta l'area osservata, se le caratteristiche della scena consentono di avere valori buoni di coerenza e di risposta dei materiali, mentre la stazione totale fornisce informazioni solo dove si hanno i prismi (oltre i 300-400 m).
- Per aree vegetate in cui il segnale radar non è sufficientemente coerente, si possono installare Corner Reflector cioè elementi artificiali in grado di garantire risposta coerente nel tempo. Oppure, si possono integrare GB-SAR e stazione totale, installando proprio in queste aree dei prismi di monitoraggio. La scelta dipende dall'estensione dell'area.

Un tema interessante da sviluppare inerente le elaborazioni dei dati GB-InSAR, è quello delle applicazioni di *monitoraggio discontinuo* (riaggancio di serie di acquisizioni discontinue a livello temporale). Per versanti instabili caratterizzati da cinematica estremamente lenta si può pensare a un vero e proprio monitoraggio periodico tramite tecnica GB-InSAR. Però, questo tipo di processing del dato, pensato anche per stimare il movimento “non misurato”, potrebbe essere utile anche nel collegare tra loro osservazioni discontinue la cui discontinuità è dovuta a temporanei black out della strumentazione durante campagne di monitoraggio continuo. Questo è il caso della Frana di Collagna, per cui si hanno periodi frequenti di interruzione delle acquisizioni causati da problemi di alimentazione elettrica.

Bibliografia

- Abellàn A., Vilaplana J. M. e Martínez J. (2006). *Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nùria (Eastern Pyrenees, Spain)*. Engineering Geology, 88: pp 136–148. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.012.
- Alba M. e Scaioni M. (2007). *Comparison of Techniques for Terrestrial Laser Scanning Data Georeferencing Applied to 3-D Modelling of Cultural Heritage*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (on CD-ROM).
- Antonello G., Casagli N., Farina P., Leva D., Nico G., Sieber A. J. e Tarchi, D. (2004). *Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements*. In Landslides, 1: pp 21 – 28.
- Baiocchi V., Betti B., Carrion D., Giannone F. e Tornatore F. (2006). *Orthorectification of a satellite EROS A1 Milan Image by GPS RTK control and check points: different models comparison*. Bollettino SIFET (Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia), 4: pp. 79-93.
- Barla G., Antonili F., Barla M., Mensi E. e Piovano G. (2010). *Monitoring of the Beauregard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques*. In Engineering geology, 116: pp 218-235.
- Bernardini G., Pasquale G. D., Bicci A., Marra M., Coppi F. e Ricci P. (2007a). *Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests*. In Proc. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07).
- Bernardini G., Pasquale G. D., Gallino N. e Gentile C. (2007b). *Microwave interferometer for ambient vibration measurement on civil engineering structures: 2. Application to full-scale bridges*. In Proc. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07).
- Bertacchini E., Capra A. e Dubbini M. (2007). *Ortorettifica di immagini satellitari IKONOS attraverso il modello DLT*. Atti conferenza nazionale SIFET 2007. Arezzo, Italy 27-29 Giugno 2007.
- Bertacchini E., Capitani A., Capra A., Castagnetti C., Corsini A., Dubbini M. e Ronchetti F. (2009). *Integrated surveying system for landslide monitoring, Valoria Landslide (Apennines of Modena, Italy)*. In Proceeding of XXIII FIG international congress, Eilat, Israel 3-6 May 2009. ISBN 978-87-90907-73-0.

- Bertacchini E. e Capra A. (2010). *Map updating and coastline control with very high resolution satellite images: application to Molise and Puglia coasts (Italy)*. Italian Journal of Remote Sensing, 42 (2): pp 103-115.
- Bertacchini E., Castagnetti C., Capra A., Dubbini M. e Boni E. (2010). *Monitoraggio "near real time" di rischio frane: un GIS per la gestione dell'emergenza*. Atti Conferenza Nazionale ASITA 2010. Brescia, Italy 9-12 November 2010.
- Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C. e Corsini A. (2011a). *Atmospheric corrections for topographic monitoring systems in landslides*. Atti XXV FIG working week 2011. Marrakech, Marocco, 18-22 Maggio 2011, ISBN 978-87-90907-92-1.
- Bertacchini E., Castagnetti C., Capra A., Rivola R. e Corsini A. (2011b). *Rilievi integrati per il monitoraggio e la gestione dell'instabilità dei versanti*. In Geomatica - le radici del futuro (tributo a Sergio Dequal & Riccardo Galetto) edited by Ambrogio Manzino and Anna Spalla, 89-98, Italy, Edizioni SIFET, ISBN 88-901939-6-4.
- Besl P. J. e McKay N. D. (1992). *A Method for registration of 3D shapes*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2): pp. 239-256.
- Bezoari G., Monti C. e Selvini A. (2002). *Topografia Generale con Elementi di Geodesia*. Edizioni Utet, Torino.
- Bitelli G., Dubbini M. e Zanutta A. (2004). *Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslide Bodies*. XXth ISPRS Congress: Proceedings of Commission V, pp. 246-251.
- Blikra L. H. (2008). *The Åknes rockslide; monitoring, threshold values and early-warning*. Landslides and Engineered Slopes From the Past to the Future. Vols 1, 2: pp 1-6.
- Borgatti L., Corsini A., Barbieri M., Sartini G., Truffelli G., Caputo G. e Puglisi C. (2006). *Large reactivated landslides in weak rock masses: a case study from the Northern Appennines (Italy)*. In Landslides, 3: 115-214.
- Bonaccorso A., Bonforte A., Gambino S., Mattia M., Guglielmino F., Puglisi G. e Boschi E. (2009). *Insight on recent Stromboli eruption inferred from terrestrial and satellite ground deformation measurements*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 182: pp 172-181.
- Bozzano F., Cipriani I., Mazzanti P. e Prestininzi A. (2011). *Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring*. In Natural Hazards, 59 (3): pp 1377-1396. DOI: 10.1007/s11069-011-9840-6.
- Cantoni R., Vassena G. e Lanzi C. (2002). *Integrazione tra Laser Scanning e metodologie di rilievo tradizionali nella ricostruzione 3D*. In: Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA, 5-9 Novembre, Perugia.
- Carrara M., Cardinali R., Detti F., Guzzetti V., Pasqui P. e Reichenbach P. (1991). *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surf. Proc. Land. 16 (5): pp 427-445.
- CECW-EE (Corps of Engineers Directorate of Civil Works) (2002), EM 1110-2-1009 Engineering and Design - Structural Deformation Surveying, Engineer manuals United States.

- Çengel Y. A. (1998). *Termodinamica e trasmissione del calore*. Milano Italy, McGraw-Hill.
- Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M., Rivola R. e Corsini A. (2011). *Integrating LIDAR and terrestrial laser scanning for a detailed description of landslides geomorphology*. Proceedings of EGU General Assembly 2011, 3-8 April 2011. Vol. 13, EGU2011-8512.
- Catani F., Farina P., Moretti S., Nico G. e Strozzi T. (2005). *On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements*. *Geomorphology*, 66: pp 119-131. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.012.
- Casagli N., Tibaldi A., Merri A., Del Ventisette C., Apuani C., Guerri L., Fortuny-Guasch J. e Tarchi D. (2009). *Deformation of Stromboli Volcano (Italy) during the 2007 eruption revealed by radar interferometry, numerical modelling and structural geological field data*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182: pp 182-200.
- Casagli N., Catani F., del Ventisette C. e Luzi G. (2010). *Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry*. In *landslides 7*: pp 291-301. DOI 10.1007/s 10346-010-0215-y.
- Castañeda C., Gutiérrez, Manunta M. e Galve J. P. (2009). *DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence and landslides, Ebro River, Spain*. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: pp 1562–1574.
- Chambers J., Hobbs P., Pennington C., Jones L., Dixon N., Spriggs M., Haslam E., Meldrum P., Foster C. e Jenkins G. (2010). *Integrated LiDAR, geophysical and geotechnical monitoring of an active inland landslide, UK*. *Geophysical Research Abstracts Vol. 12*, EGU2010-5244.
- Corsini A., Borgatti L., Pellegrini M., Ronchetti F., con la collaborazione di Boghi A., Campagnoli I., Caputo G., Gatti A., Leuratti E., Lucente C., Truffelli G. e Sartini G. (2005). *Monitoraggio di grandi frane riattivate e sospese nella valle del Fiume Secchia (Appennino settentrionale)*. *Giornale di Geologia Applicata*, 2: pp 35-44.
- Corsini A., Farina P., Antonello G., Barbieri M., Casagli N., Coren F., Guerri L., Ronchetti F., Sterzai P. e Tarchi D. (2006). *Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection*. In *International Journal of Remote Sensing*: 27, 2351 - 2369.
- Corsini A., Borgatti L., Coren F. e Vellico M. (2007). *Use of multitemporal airborne lidar surveys to analyse post-failure behaviour of earth slides*. *Canadian J. Remote Sens.*, 33(2): pp 116–120. DOI: 10.5589/m07-015.
- Corsini A., Borgatti L., Cervi F., Dahne A., Ronchetti F. e Sterzai P. (2009). *Estimating mass-wasting processes in active earth slides – earth flows with time-series of High-Resolution DEMs from photogrammetry and airborne LiDAR*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: pp 433–439. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/433/2009/.
- Corsini A., Cervi F., Ciccarese G., Iannaccone J. P., Ronchetti F., Bertacchini E., Capra A., Berti M., Brancaleoni E., Mora P., Pancioli V., Gallucci A., Gozza G., Monni A., Generali M., Pizziolo M., Caputo G., Truffelli G., Manzi V., Ghiselli F., Guida M., Minardi G., Lucente C. C., Bernardi A. e Bernini A. (2010). *Surveillance of landslides risk areas with ground-based interferometric SAR for*

- Civil protection in Emilia Romagna (Italy)*. In Proceedings of 'Mountain Risks: Bringing Science to Society' conference, J.-P. Malet, T. Glade, N. Casagli (Eds). CERG Editions, Strasbourg, ISBN 2-95183317-1-5, pp 283-290.
- Corsini A., Berti M., Monni A., Pizziolo M., Cervi F., Ciccarese G., Ronchetti F., Bertacchini E., Capra A., Gallucci A., Generali M., Gozza G., Pancioli V., Pignone S., e Truffelli G. (2011a). *Rapid assessment of landslide activity in Emilia Romagna using GB-InSAR short surveys*. In Atti 2nd World Landslide Forum, Roma 3-7 Ottobre 2011. In press.
- Corsini A., Ronchetti F., Bertacchini E., Bonacini F., Calicetti P., Capra A., Castagnetti C., Piantelli E., Caputo G. e Truffelli G. (2011b). *Large-scale slope instability affecting SS63 near the Cerreto Pass (northern Apennines, Italy)*. Atti di The Second World Landslide Forum, Roma, 3-7 October 2011. In press.
- Corsini A., Daehne A. e Bertacchini E. (2012). *GB-InSAR survey of the Valoria earthflow during the 2009 reactivation (Northern Apennines, Italy)*. Atti 11th International & 2nd North American Symposium on Landslides, June 3 to 8, 2012 - Banff, Alberta, Canada. In Press.
- Costantini, M. e Rosen, P.A. (1999). *A generalized phase unwrapping approach for sparse data*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings, IEEE 1999 International, 1: pp 267-269. ISBN: 0-7803-5207-6. DOI: 10.1109/IGARSS.1999.773467.
- Cosser E., Roberts G. W., Meng X. e Dodson A. H. (2003). *Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station*. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.
- Cruden D.M. e Varnes D. J. (1996). *Landslides types and processes*. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C., pp 36–75.
- Davidson G.W. e Bamler R. (1999). *Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37 (1): pp 163 – 174. ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/36.739150.
- Delacourt C., Raucoules D., Le Mouélic S., Carnec C., Feurer D., Allemand P. e Cruchet M. (2009). *Observation of a Large Landslide on La Reunion Island Using Differential Sar Interferometry (JERS and Radarsat) and Correlation of Optical (Spot5 and Aerial) Images*. Sensors, 9 (1): pp 616-630. DOI: 10.3390/s90100616.
- Delaunay B. (1934). *Sur la sphère vide*. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk, 7: pp 793–800.
- Duffy M. A., Hill C., Whitaker C., Chrzanowski A., Lutes J., e Bastin G. (2001). *An automated and integrated monitoring program for diamond valley lake in california*. Atti 10th FIG Intl. Symp. On Deformation Measurements, Orange, CA, 19-22 marzo 2001.
- Ferretti A., Prati C. e Rocca F. (2001). *Permanent scatterers in SAR interferometry*. In IEEE Trans. Geosci. Remote Sens: 39 (1), pp 8–20.

- Fraser C.S. (2000). *High-resolution satellite imagery: a review of metric aspects*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens., 33: pp 452– 459.
- Fraser C. S., Hanley H. B. e Yamakawa T. (2001). *Geopositioning Accuracy of Ikonos Imagery: Indications from Two Dimensional Transformations*. The Photogrammetric Record, 17: pp 317 – 329.
- Fraser C. S., Hanley H. B. e Yamakawa T. (2002). *Three Dimensional Geo-positioning accuracy of Ikonos Imagery*. The Photogrammetric Record, 17: pp 465-479.
- Glenn N.F., Streutker D.R., Chadwick D.J., Tahckray G.D. e Dorsch S.J. (2006). *Analysis of LIDAR-derived topography information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity*. Geomorphology, 73:pp 131-148. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.006.
- Gaffet S., Guglielmi Y., Cappa F, Pambrun C., Monfret T. e Amitrano D. (2010). *Use of the simultaneous seismic, GPS and meteorological monitoring for the characterization of a large unstable mountain slope in the southern French Alps*. Geophys. J. Int., 182: pp 1395–1410.
- Guarnieri A. e Vettore A. (2007). *Tecniche di registrazione*. Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio. G. Tucci, F. Sacerdote Editori; ed. Alinea, Firenze 2007.
- Hanssen R. F. (2001). *Radar Interferometry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Henderson I.H.C., Lauknes T.R., Osmundsen P.T., Dehls J., Larsen Y. e Redfield T.F. (2011). *A structural, geomorphological and InSAR study of an active rock slope failure development*. Geological Society, London, Special Publications January, 1: pp 185-199. DOI: 10.1144/SP351.10.
- Herrera G., Fernandez-Merodo J. A., Mulas J., Luzi G. e Monserrat O. (2009). *A landslide forecasting model using ground based SAR data: the Portalet case study*. Engineering Geology, 105: pp 220-230.
- Iannini L., Monti Guarnieri A. e Giudici D. (2009). *Atmospheric phase screen in ground based radar: statistics and compensation*. Fringe 2009 workshop: advances in the science and application of SAR interferometry, 30th November–4th December 2009, Frascati, Rome, Italy.
- Iannini L. e Monti Guarnieri A. (2011). *Atmospheric Phase Screen in Ground-Based Radar: Statistics and Compensation*. In Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE 8: pp 537 – 541. DOI 10.1109/LGRS.2010.2090647.
- Jungner A. (2009). *Ground-Based Synthetic Aperture Radar Data Processing for Deformation Measurement*. Master's of Science Thesis in Geodesy No. 3116. TRITA-GIT EX 09-11. Division of Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden (may 2009).
- Kampes B. e Usai S. (1999). *Doris: The Delft object-oriented radar interferometric software*. In Proc. 2nd Int. Symp. Operationalization of Remote Sensing.
- Kraus K. e Pfeifer N. (2001). *Advanced DTM generation from LiDAR data*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information science, 34: pp 23-30.
- Lauknes T. R., Piyush Shanker A., Dehls J. F., Zebker H. A., Henderson I. H. C. e Larsen Y. (2010). *Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods*. Remote Sensing of Environment, 114(9): pp 2097-2109.

- Leva D., Nico G., Tarchi D., Fortuny J. e Sieber A. J. (2003). *Temporal analysis of a landslide by means of a ground based SAR interferometer*. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, 41: pp 745-752.
- Lichti D.D. e Gordon S.J. (2004). *Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording*. Proceedings of FIG Working Week. ISBN: 87-90907-30-2.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Guidi G., Moia F. e Atzeni C. (2004). *Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 42, no. 11:2454–2466, Nov. 2004.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Macaluso G., Galgaro A. e Azteni C. (2006). *Advances in ground based microwave interferometry for landslide survey: a case study*. International Journal of remote sensing, 27: pp 2331-2350.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Macaluso G., Tamburini A. e Azteni C. (2007). *Monitoring of an Alpine Glacier by means of a Ground Based SAR interferometry*. IEEE letters on Geoscience and remote sensing, 4: pp 495-499.
- Luzi G., Noferini L., Mecatti D., Macaluso G., Pieraccini M., Azteni C., Schaffhauser A., Fromm R. e Nagler T. (2009). *Using a Ground-Based SAR Interferometer and a Terrestrial Laser Scanner to monitor a Snow-Covered slope: result from an experimental data collection in Tyrol (Austria)*. IEEE transactions on geosciences and remote sensing, 47: pp 382-393.
- Luzi G., Monserrat O., Crosetto M., Copons R. e Altimir J. (2010). *Ground-Based SAR Interferometry applied to landslide monitoring in mountainous areas*. In Proceedings of Mountain Risks: Bringing Science to Society conference, J.-P. Malet, T. Glade, N. Casagli (Eds). CERIG Editions, Strasbourg, ISBN 2-95183317-1-5.
- Lingua A., Piatti D. e Rinaudo F. (2008). *Remote monitoring of a landslide using an integration of GB-INSAR and LIDAR techniques*. In International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information science: Vol. XXXVII/B1, 361 - 366. ISSN: 1682-1750.
- Manzi V., Leuratti E., Lucente C., Medda E., Guerra M. e Corsini A. (2004). *Historical and recent hydrogeological instability in the Monte Modino: Valoria, Tolara and Lezza Nuova landslide reactivations (Dolo-Dragone valleys, Modena Appennines, Italy)*. GeoActa, 3: pp 1-13.
- Marini J. W. e Murray C.W. Jr. (1973). *Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees*. Greenbelt Maryland, Goddard space flight centre.
- Marambio A., Pucci B., Jugner A., Núñez M. e Buill F. (2009). *Terrestrial Laser Scanner, Terrestrial Synthetic Aperture Radar and Topographic Data: An Integration Proposal*. In Proc. 8th International Geomatics Week, Barcelona.
- Martinez-Vazquez A., Fortuny-Guasch J. e Gruber U. (2005). *Monitoring of the snow cover with a ground based synthetic aperture radar*. Proceeding of EARSeL, 4: pp 171-178.

- Mazzanti P. e Brunetti A. (2010). *Assessing rockfall susceptibility by terrestrial SAR interferometry*. In: Malet JP, Glade T, Casagli N (eds) *Proceedings of the mountain risks international conference*, Florence, Italy, 24–26 November 2010, pp 109–114.
- Monserrat O. e Crosetto M. (2008). *Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63: pp 142–154.
- Moss J.L., McGuire W.J. e Page D.(1999). *Ground deformation monitoring of a potential landslide at La Palma, Canary Islands*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 94: pp. 251–265.
- Nico G., Leva D., Antonello G. e Tarchi D. (2004). *Ground-Based SAR interferometry for terrain mapping: theory and sensitivity analysis*. *IEEE transactions on geosciences and remote sensing*, 42 (6): pp 1344-1350.
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Luzi G. e Atzeni A. (2005). *Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground-based SAR interferometry*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 7, pp. 1459–1471.
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Atzeni C., Mantovani M., Marcato G., Pasuto A., Silvano S. e Tagliavini F. (2007). *Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide*. In *Engineering Geology*: 95, 88 - 98.
- Noferini L., Takayama T., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Luzi G. e Atzeni C. (2008). *Analysis of Ground-Based SAR Data With Diverse Temporal Baselines*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (1): pp 1614 – 1623. ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916216.
- Nordvik T. e Nyrnes E. (2009). *Statistical analysis of surface displacements – an example from the Åknes rockslide, western Norway*. *Natural Hazards And Earth System Science*, 9(3): pp 713-724.
- Oppikofer T., Jaboyedoff M., Blikra L., Derron M.H. e Metzger R. (2009). *Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning*. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(3): pp 1003–1019.
- Parmeggiani E. (2011). *Integrazione di dati lidar aviotrasportati e terrestri per la produzione di dtm: applicazione alla frana di Collagna (RE)*. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria per la sostenibilità ambientale. Università di Modena e Reggio Emilia.
- Pieraccini M., Casagli N., Luzi G., Tarchi D., Mecatti D., Noferini L. e Atzeni C. (2002). *Landslide Monitoring by ground-based radar interferometry: a field test in Valdarno (Italy)*. *International Journal of remote sensing*, 24: pp 1385-1391.
- Pieraccini M., Noferini L., Mecatti D., Atzeni C., Teza G., Galgaro A. e Zaltron N. (2006a). *Integration of Radar Interferometry and Laser Scanning for Remote Monitoring of an Urban Site Built on a Sliding Slope*. In *IEEE transactions on geosciences and remote sensing*: 44 (9), 2335 - 2342.
- Pieraccini M., Noferini L., Mecatti D., Macaluso G., Atzeni C., Teza G., Galgaro, A. e Zaltron N. (2006b). *Radar interferometry and laser scanning for monitoring the stability of an alpine urban site*. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 44 (9): pp 2335-2342.

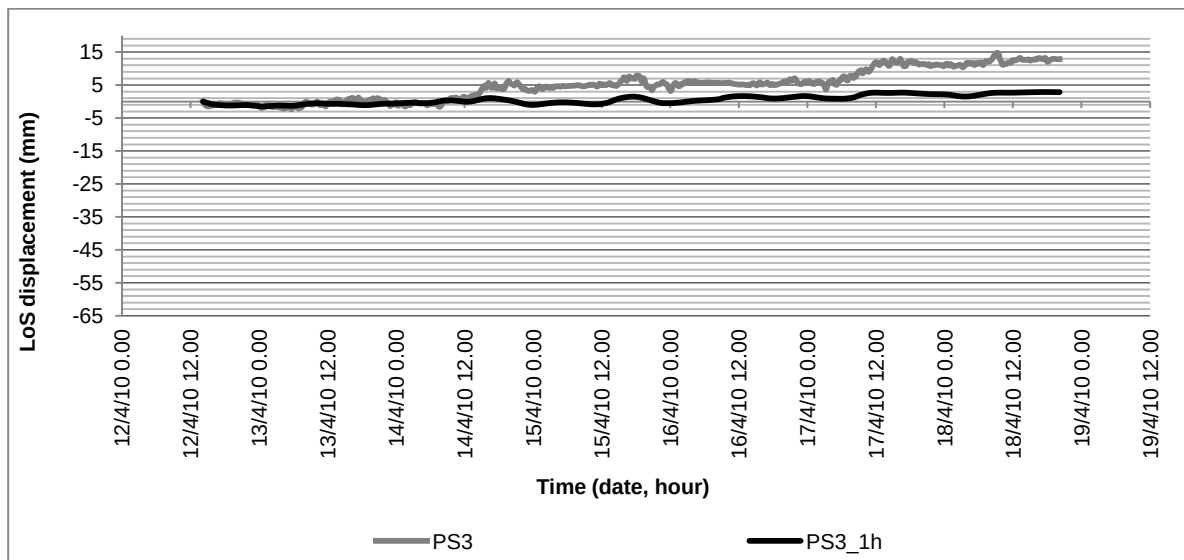
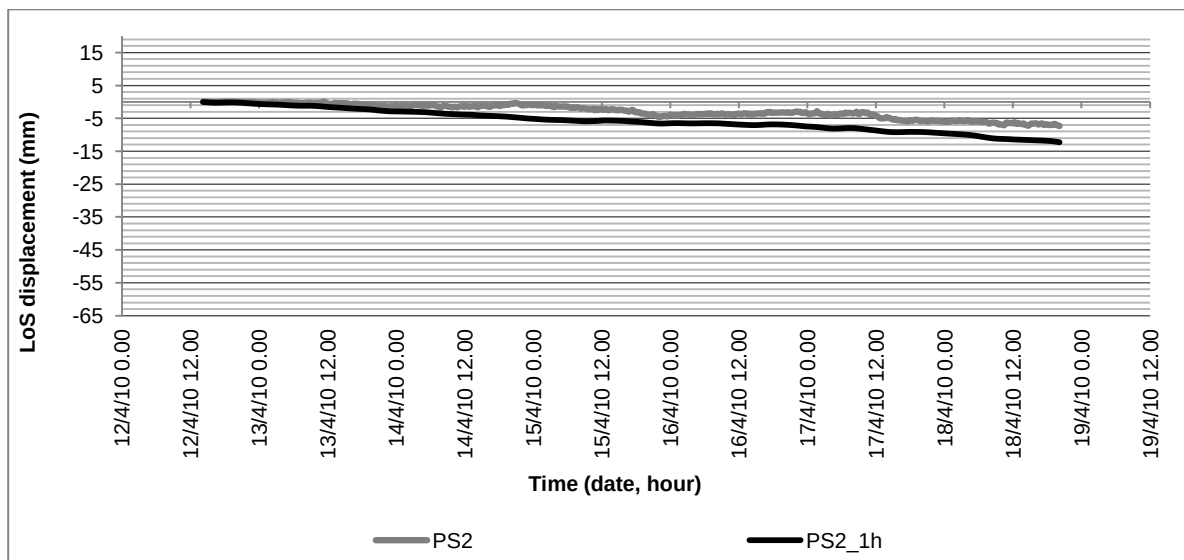
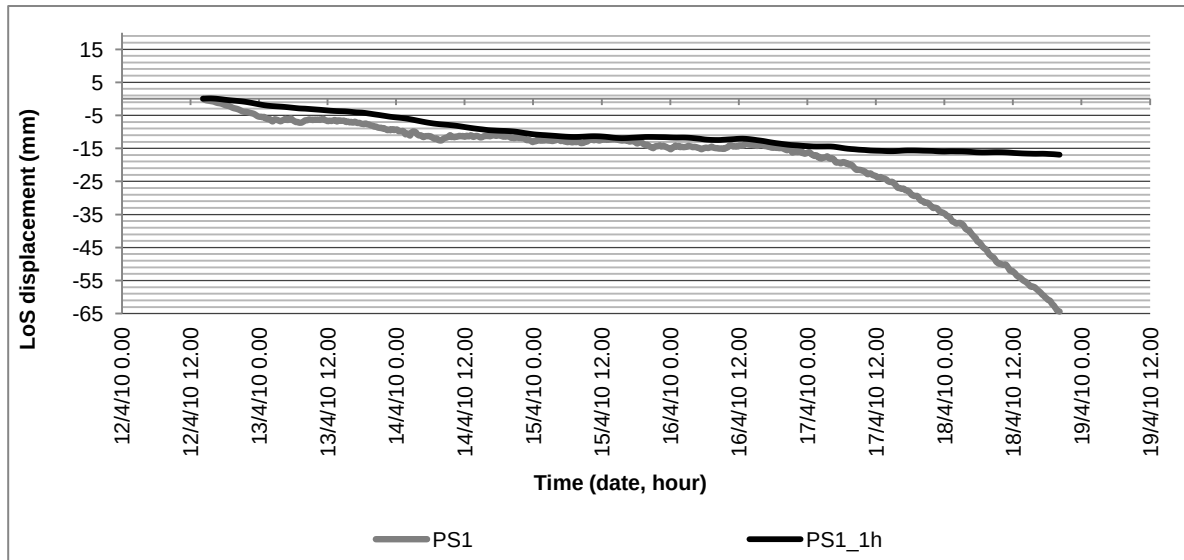
- Pipia L., Aguasca A., Fabregas X., Mallorqui J.J. e Lopez-Martinez C. (2005). *Temporal decorrelation in polarimetric differential interferometry using a ground-based SAR sensor*. IEEE International Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, pp 4108 – 4111. ISBN: 0-7803-9050-4. DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1525818.
- Pipia L., Fabregas X., Aguasca A. e Mallorqui J. (2006). *A comparison of different techniques for atmospheric artefact compensation in GBSAR differential acquisitions*. In IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '06. DOI 10.1109/IGARSS.2006.958.
- Pipia L., Fabregas X., Aguasca A., Lopez-Martinez C., Mallorqui J. e Mora O. (2007). *A subsidence monitoring Project using polarimetric GB-SAR sensor*. The 3rd Int. Workshop POLinSAR 2007, Frascati, Italia, 22-26 Gennaio 2007.
- Pipia L., Fabregas X., Aguasca A. e Lopez-Martinez C. (2008). *Atmospheric artifact compensation in ground-based DInSAR applications*. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 5(1). pp.88 – 92.
- Prati C., Giani M. e Leuratti N. (1990). *Sar interferometry: a 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values informations*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. IGARSS '90, pp 2043 – 2046. DOI: 10.1109/IGARSS.1990.688929
- Puglisi G., Aloisi M., Bonaccorso A., Bonforte A., Cantarero M., Campisi O., Falzone G. e Mattia M. (2004) *The early-warning integrated geodetic system to monitor the Sciara del Fuoco (Stromboli) volcanic landslide*. Geophys Res Abstr 6:04276.
- Puglisi G., Bonaccorso T. A., Mattia M., Aloisi M., Bonforte A., Campisi O., Cantarero M., Falzone G., Puglisi B. e Rossi M. (2005). *New integrated geodetic monitoring system at Stromboli volcano (Italy)*. Engineering Geology, 79 (1–2): pp 13–31.
- Ronchetti F., Borgatti L., Cervi F., Lucente C., Veneziano M. e Corsini A. (2007). *The Valoria landslide reactivation in 2005–2006 (Northern Apennines, Italy)*. In Landslides: 4, 189 - 195.
- Rüeger J.M. (1990). *Electronic Distance Measurement, An Introduction*. pp 266, Springer Verlag.
- Sansosti E., Casu F., Manzo M. e Lanari R. (2010). *Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis*. Geophys. Res. Lett., 37, L20305. DOI:10.1029/2010GL044379.
- Skolnik M. I., editor (1990). *Radar Handbook*. McGraw-Hill Professional, New York, 2nd edition.
- Sterzai P., Vellico M., Berti M., Coren F., Corsini A., Rosi A., Mora P., Zambonelli F. e Ronchetti F. (2010). *LiDAR and hyperspectral data integration for landslide monitoring: The Test Case Of Valoria Landslide*. Italian Journal of Remote Sensing, 42 (3): pp 89-99.
- Strozzi T., Farina P., Corsini A., Ambrosi C., Thüning M., Zilger J., Wiesmann A., Wegmüller U. e Werner C. (2005). *Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry*. Landslides (Springer) 2 (3): pp 193 – 201.
- Tarchi D., Rudolf H., Luzi G., Chiarantini L., Coppo P e Sieber A. J. (1999). *SAR interferometry for structural change detection: a demonstration test on dam*. Proceedings on IGARSS'99, pp 1522-1524.

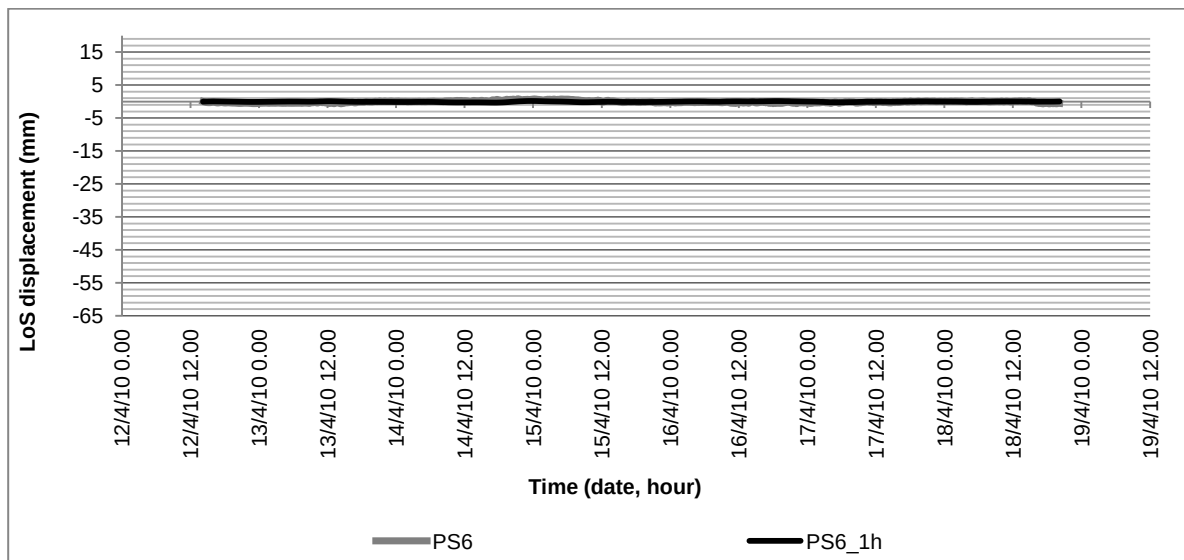
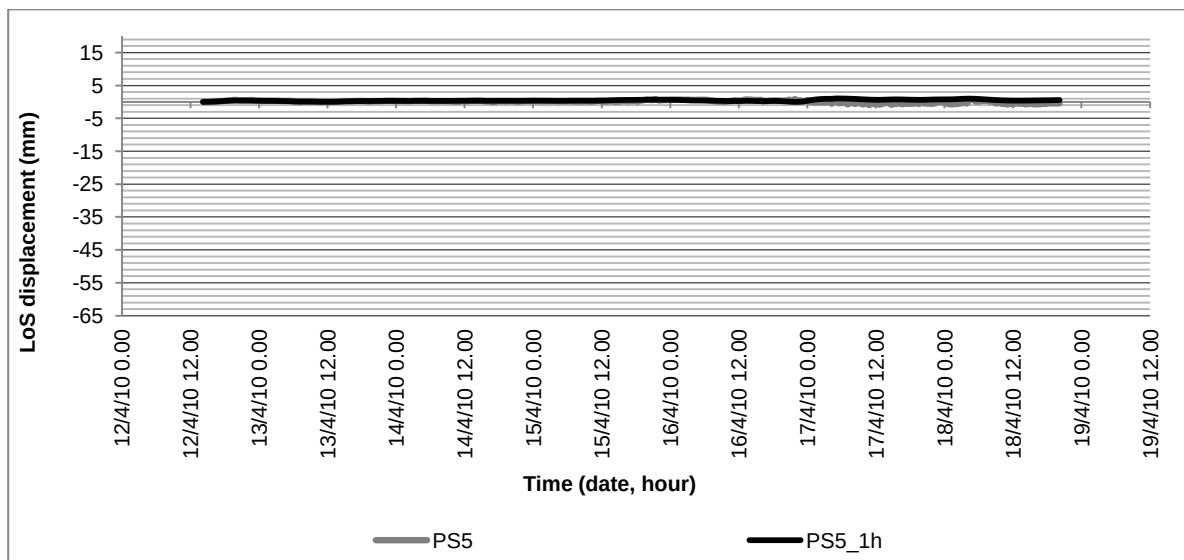
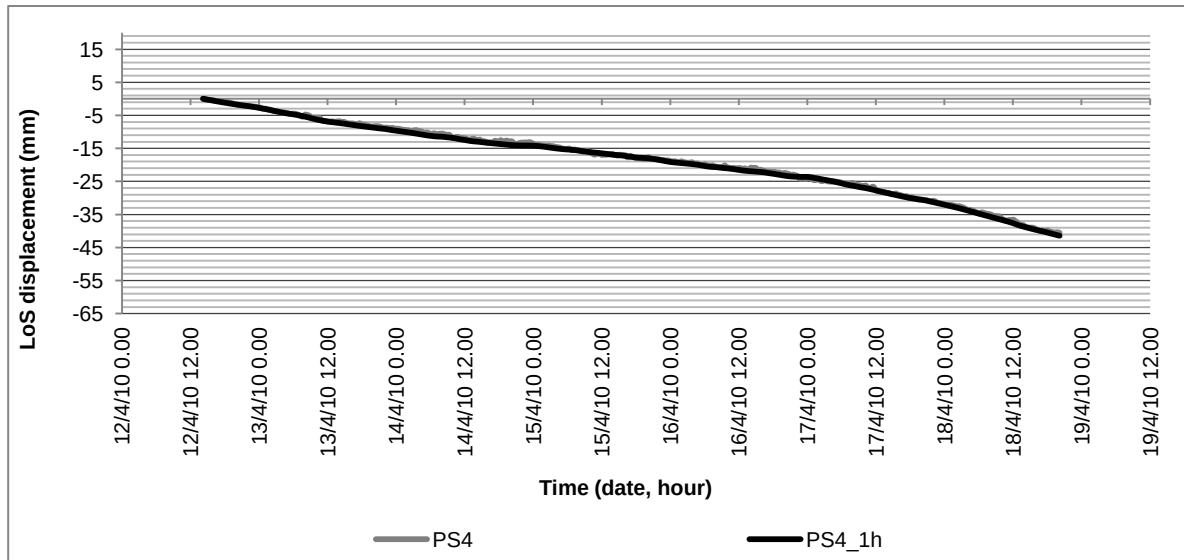
- Tarchi D., Leva D. e Sieber A. (2000). *SAR interferometric techniques from Ground Based System for the monitoring of landslides*. IGARSS 2000 conference, 24-28 Luglio 2000, Honolulu, Hawaii, USA.
- Tarchi D., Casagli N., Fanti R., Leva D. D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M. e Silvano S. (2003a). *Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy*. In *Engineering Geology*: 68, pp 15 - 30.
- Tarchi D., Casagli N., Moretti S., Leva D. e Sieber A.J. (2003b). *Monitoring landslide displacements by using ground-based radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps*. *J. Geophys. Res.* 108(B8-2387): pp 101–114.
- Tarchi D., Casagli N., Fortuny-Guash F., Guerri L., Antonello G. e Leva D. (2009). *Ground Deformation From Ground-Based SAR Interferometry. Learning from Stromboli and its 2002–03 eruptive crisis*, Geophysical Monograph.
- Teza G., Galgaro A., Zaltron N. e Genevois R. (2007). *Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach*. *International Journal of Remote Sensing*, 28(16): pp 3425–3446.
- Toutin T. (2004a). *Geometric processing of remote sensing images: model, algorithms and methods (review paper)*. *ISPRS International Journal of Remote sensing*, 25: pp 1893- 1924.
- Toutin T. (2004b) – *GCP requirement for high resolution satellite mapping*. *Proceedings of ISPRS Congress*, 35: pp 836-839.
- Watson G.A. (2006). *Computing Helmert transformations*. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 197: 387-394. DOI: 10.1016/j.cam.2005.06.047.
- Xu W. e Cumming I. (1999). *A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (1): pp 124 – 134. ISSN: 0196-2892. DOI: 10.1109/36.739143.
- Zhang Z. (1994). *Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces*. *International Journal of Computer Vision*, 13: pp 119-152. DOI: 10.1007/BF01427149.
- Zebker H. A. e J. Villasenor J. (1992). *Decorrelation in interferometric radar echoes*. In *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*: 30 (5), 950 - 959.
- (<http://www.idsgeoradar.com>)

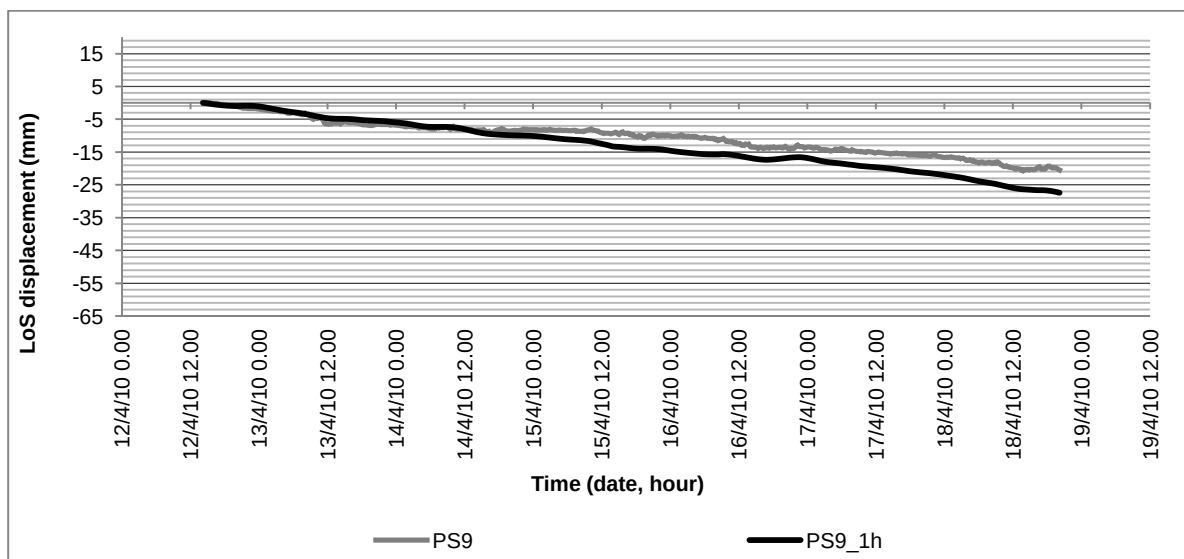
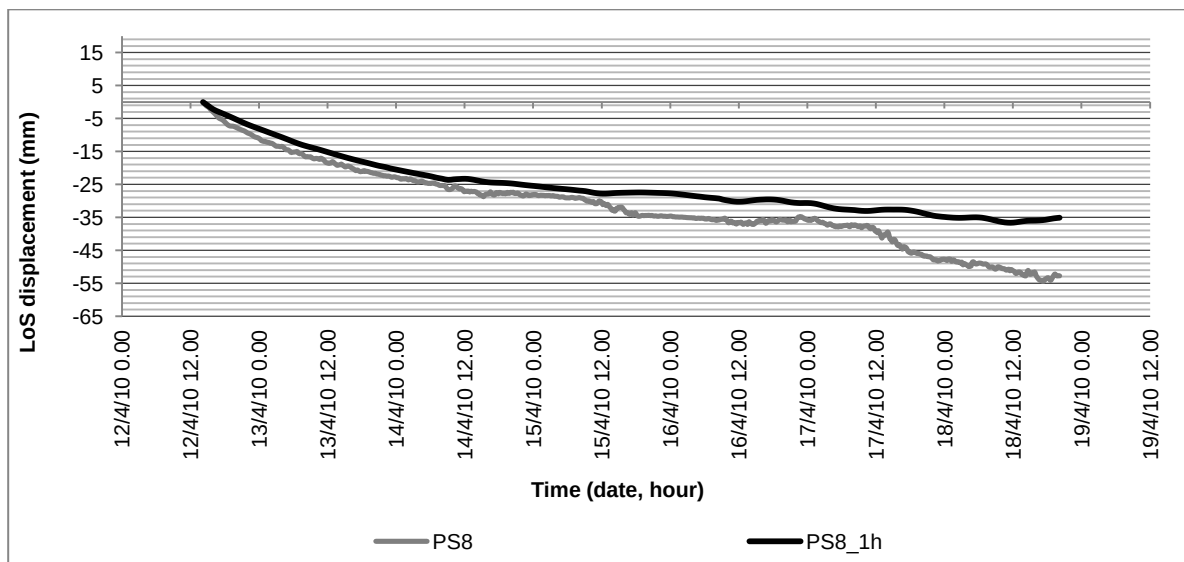
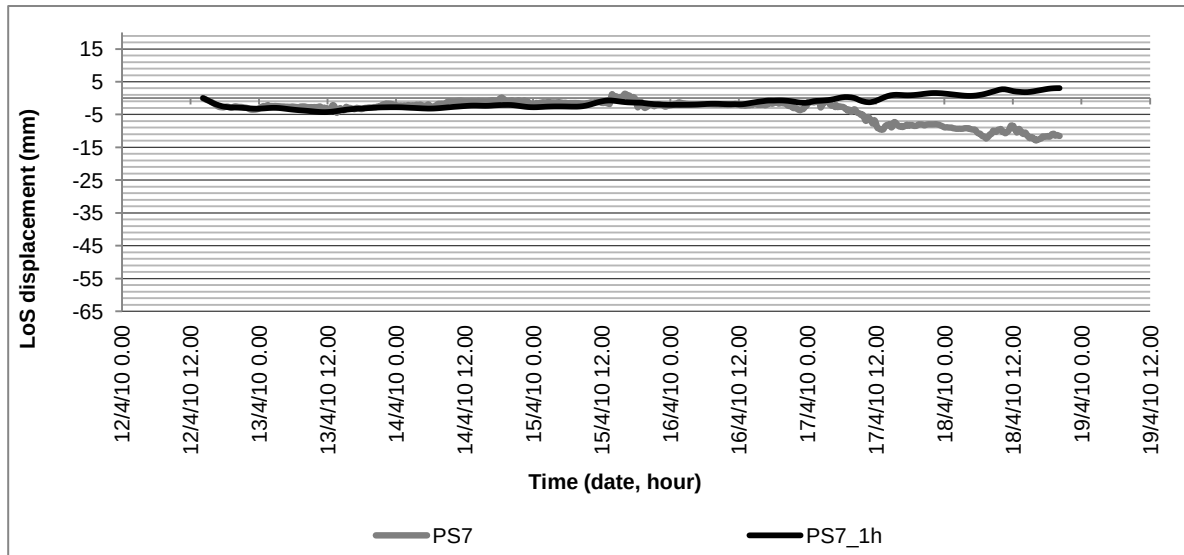
Allegato 1. Selezione dati per la determinazione di movimenti lenti (cm/settimana) in una singola campagna di monitoraggio: confronto tra serie temporali di spostamento

I grafici riportati nel seguito rappresentano le time series di spostamento LoS derivate da diversi approcci di elaborazione dei dati GB-InSAR:

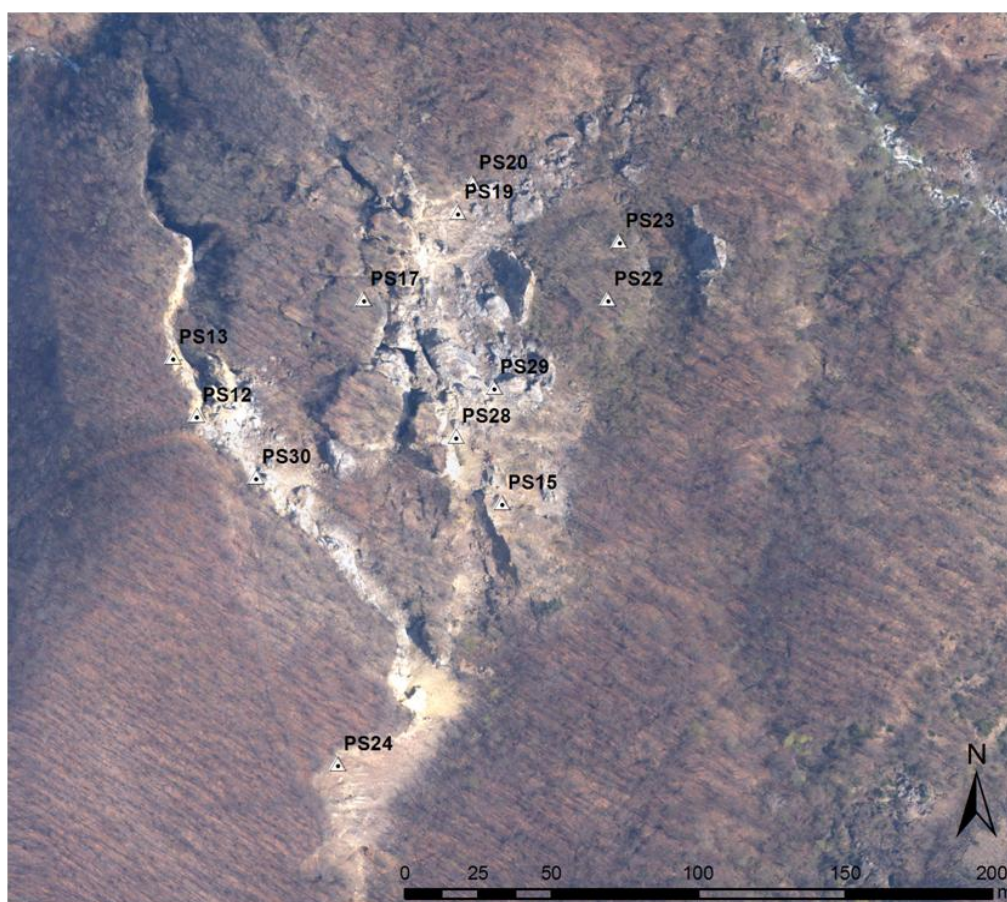
- tutte le immagini: BS = 40, RUT = 1;
- 1H_35+1: BS = 35, RUT = 1, una immagine per ora;







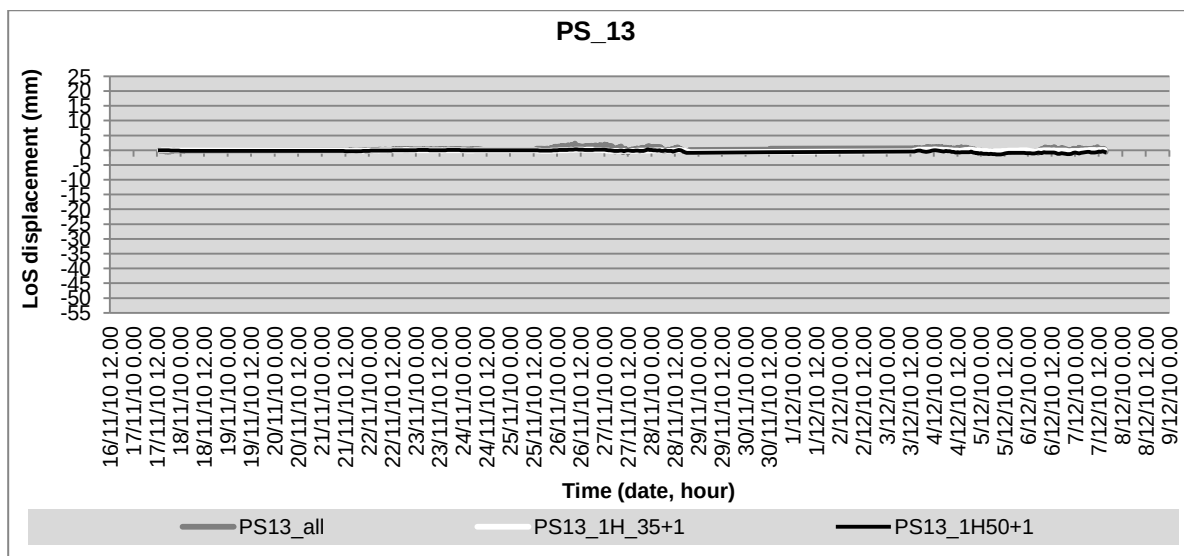
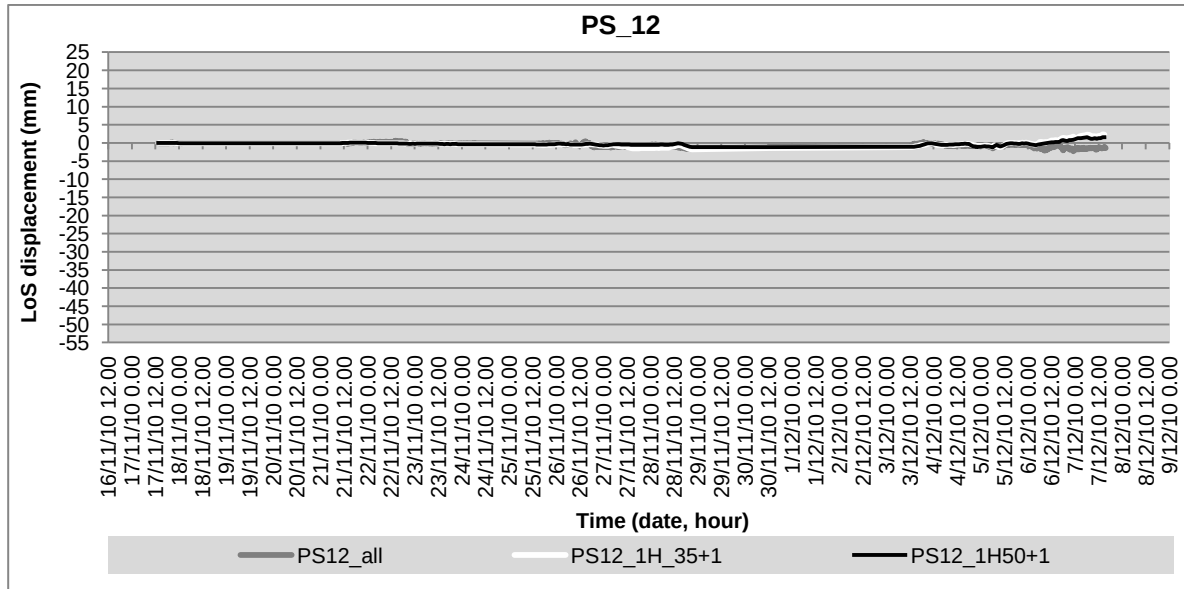
Allegato 2. Selezione dati per la determinazione di movimenti molto lenti (mm/mese) in una singola campagna di monitoraggio: confronto tra serie temporali di spostamento

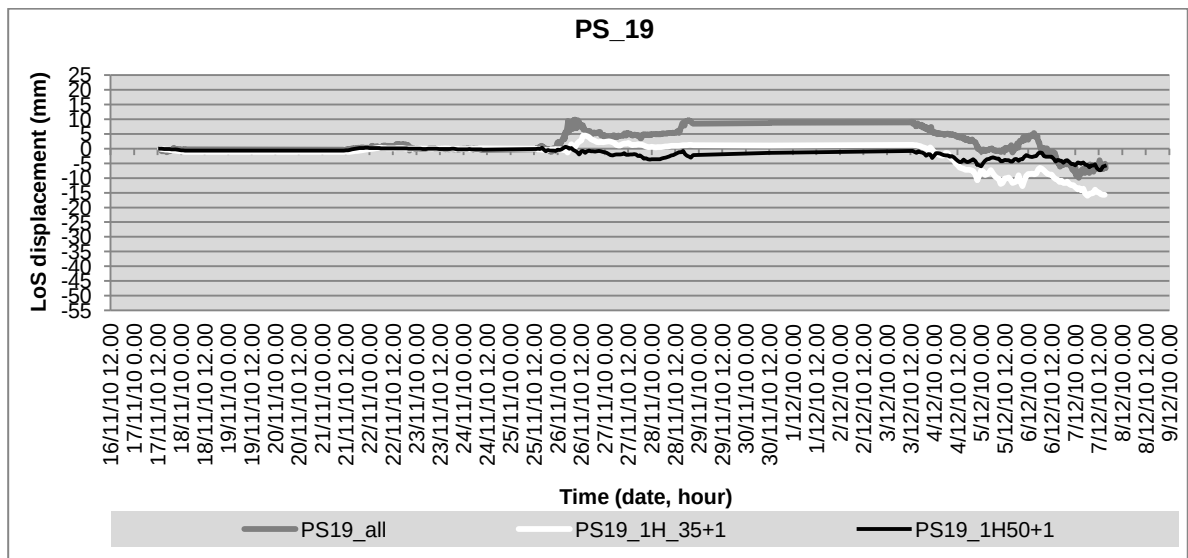
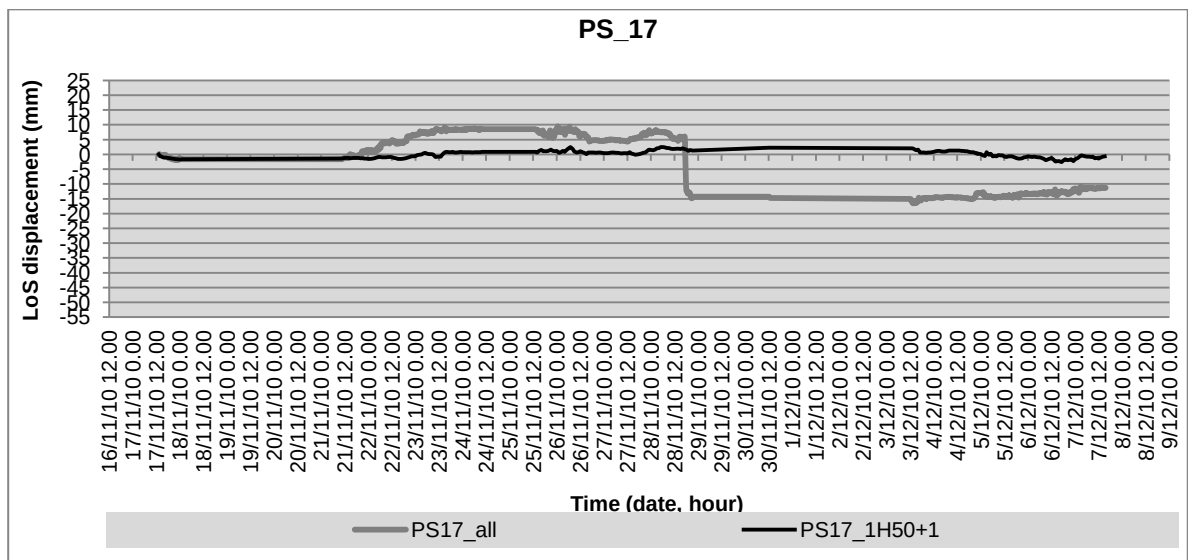
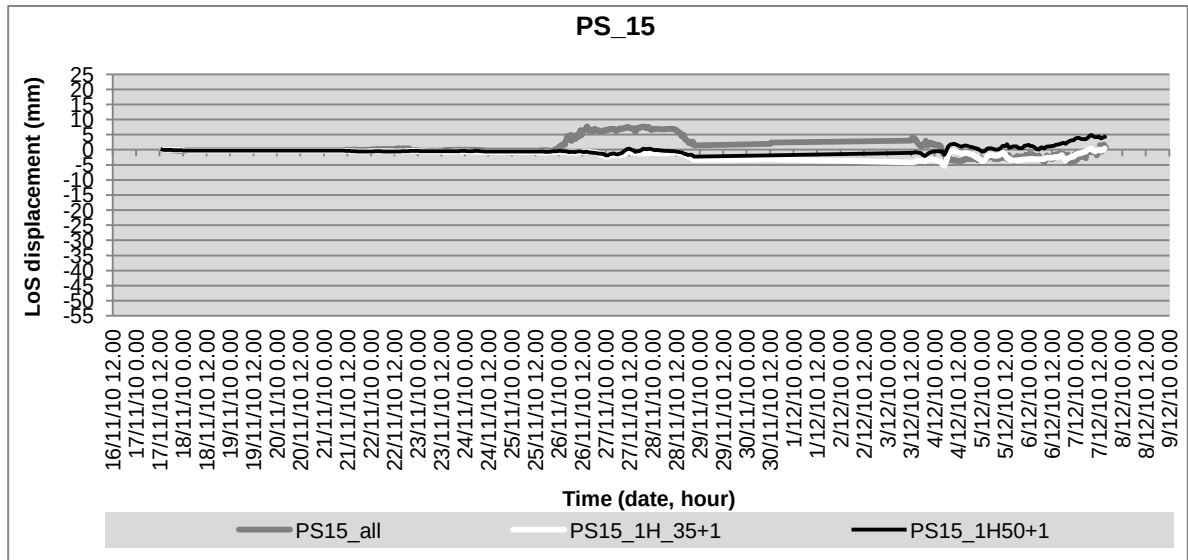


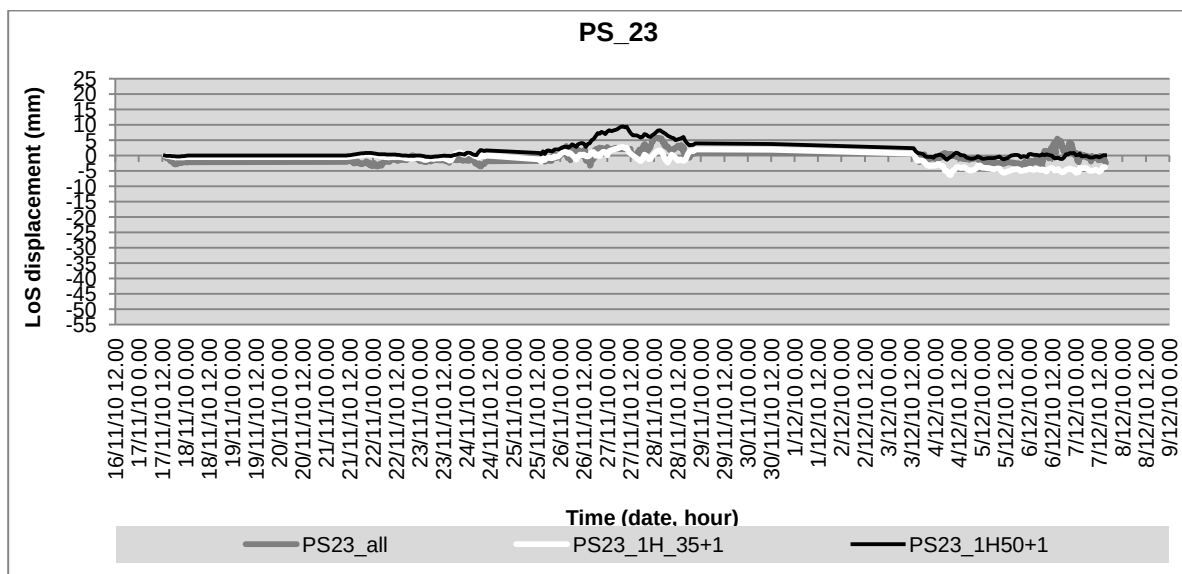
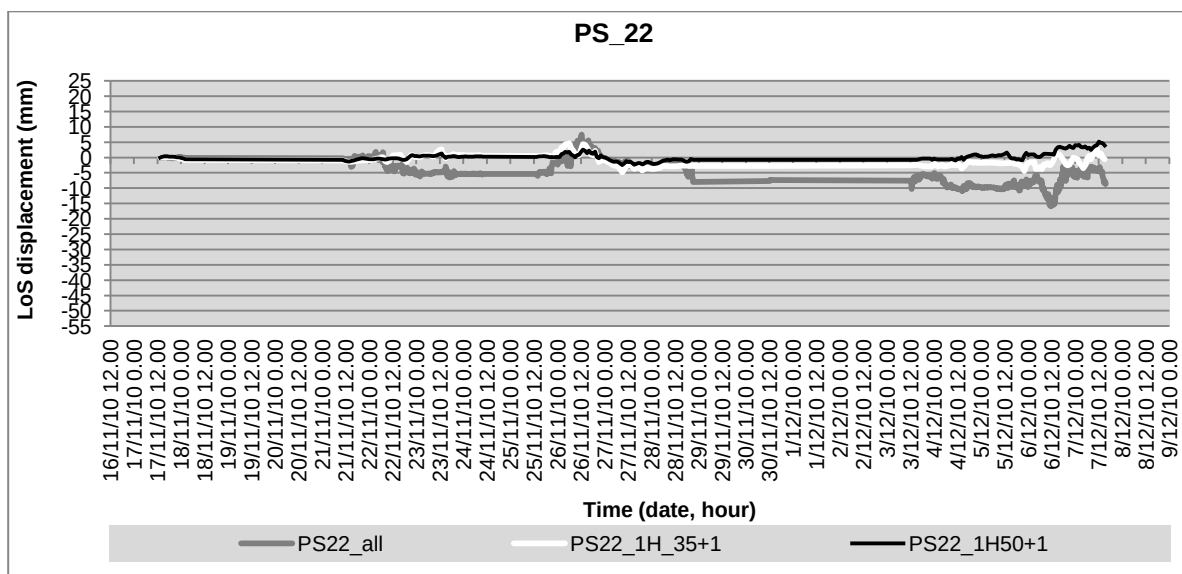
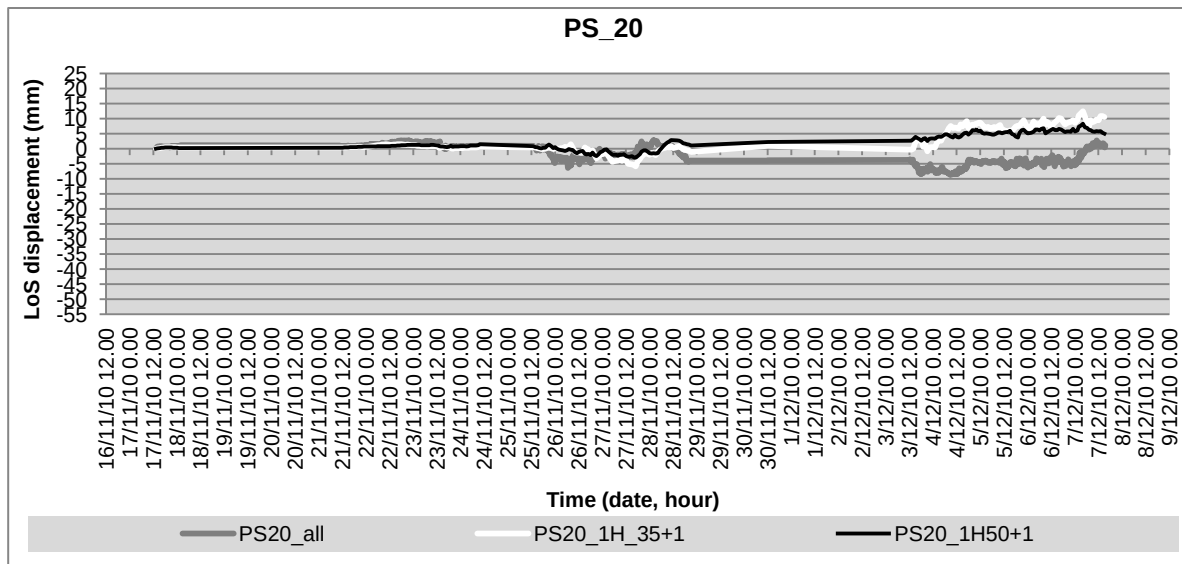
Localizzazione di PS di cui sono state estratte serie temporali di spostamento LoS

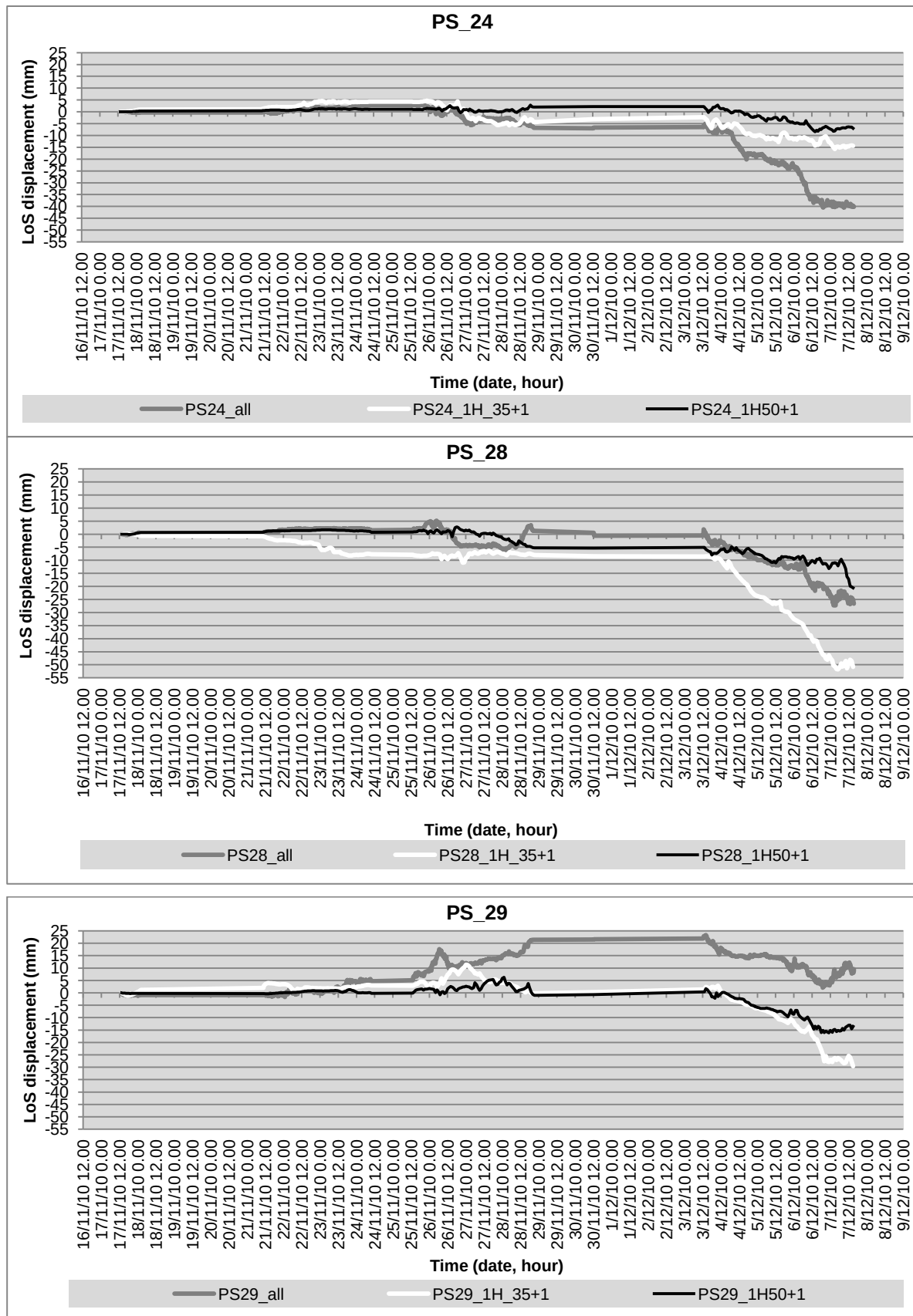
I grafici riportati nel seguito rappresentano lo spostamento LoS derivato da diversi approcci di elaborazione dei dati GB-InSAR:

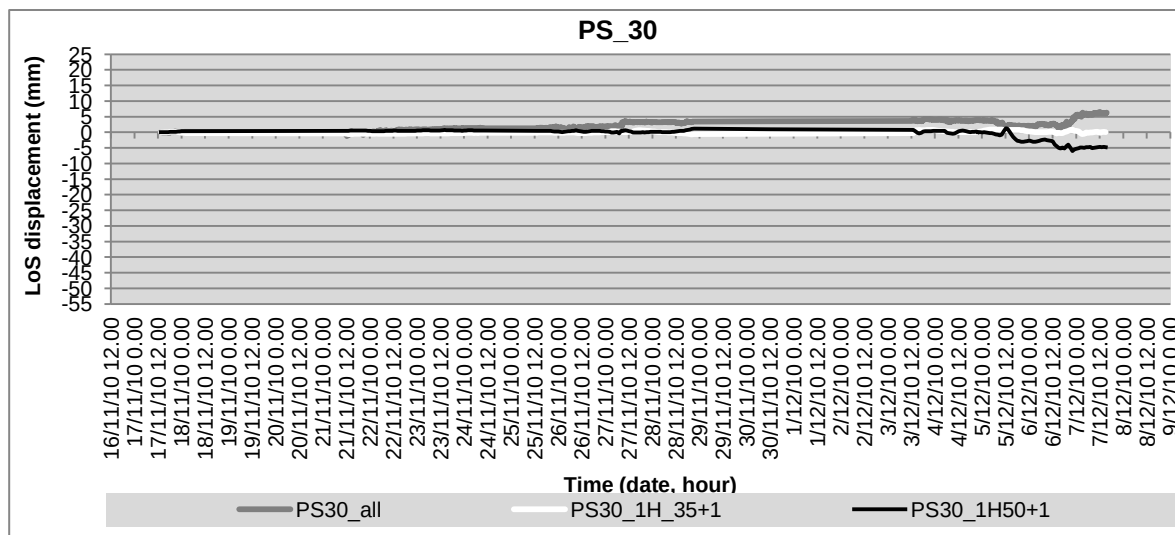
- All: 35, RUT = 1, tutte le immagini (TEST all);
- 1H_35+1: BS = 35, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_35+1);
- 1H_50+1: BS = 50, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_50+1).



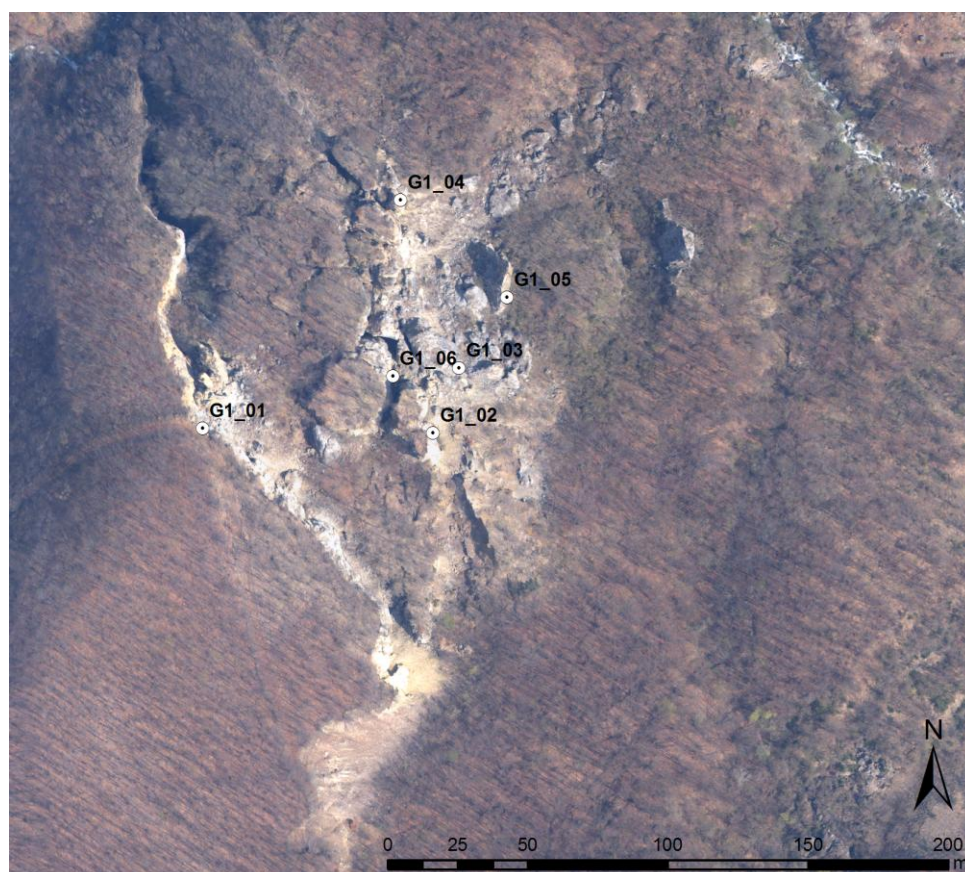








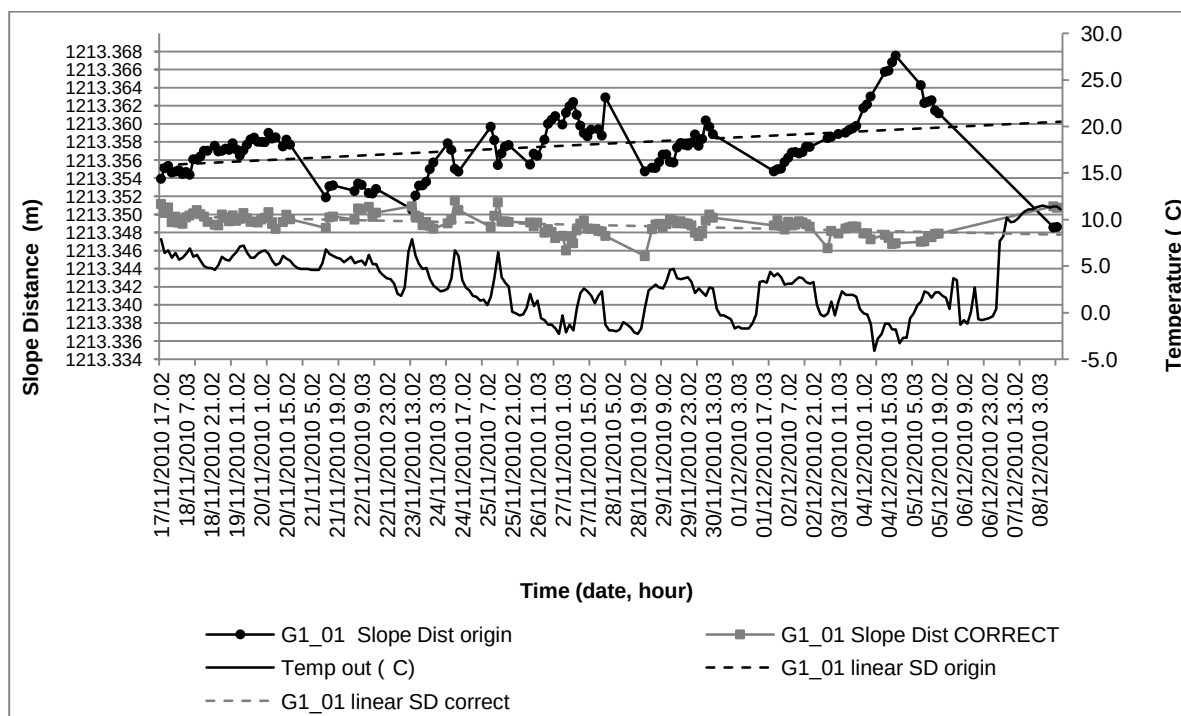
Allegato 3. Serie temporali di distanza inclinata misurata e distanza inclinata corretta con correzioni atmosferiche



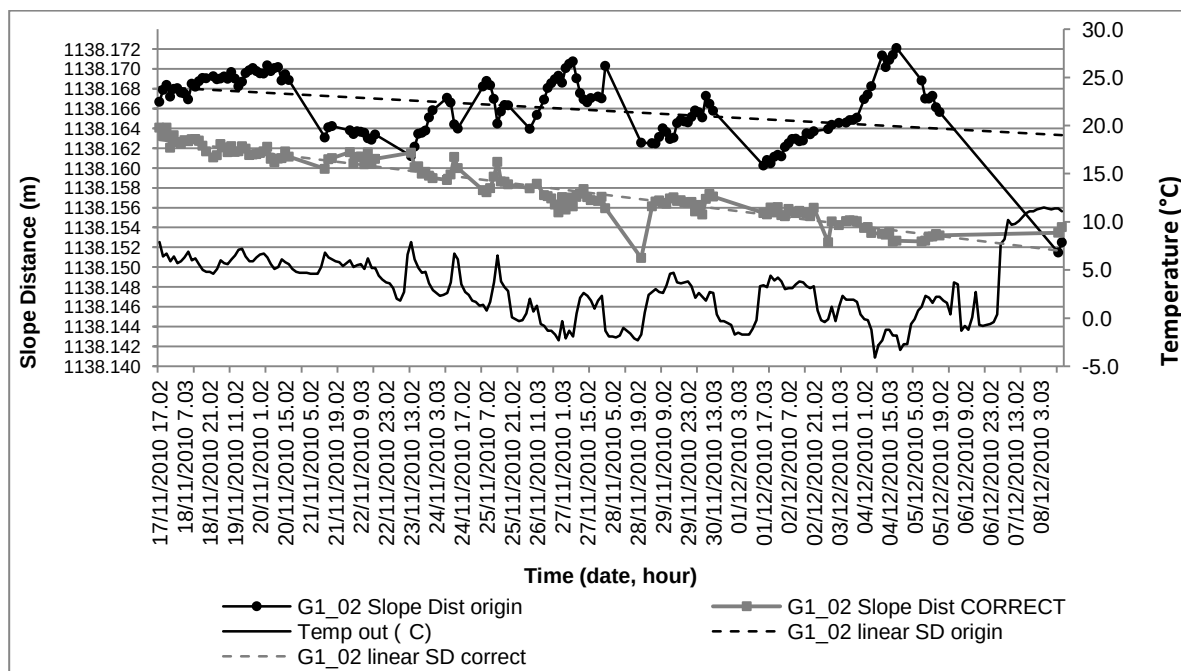
Posizione dei prismi su mappa georeferenziata in UTM ETRF2000

I grafici riportati nel seguito rappresentano la distanza inclinata (SD) originale e corretta tramite correzioni atmosferiche, in metri, derivata dalle misure dell'elettrodistanziometro della stazione totale e rispettiva linea di tendenza lineare. Nello stesso grafico sono riportati anche i valori di temperatura (°C) registrati contestualmente alle acquisizioni della stazione totale.

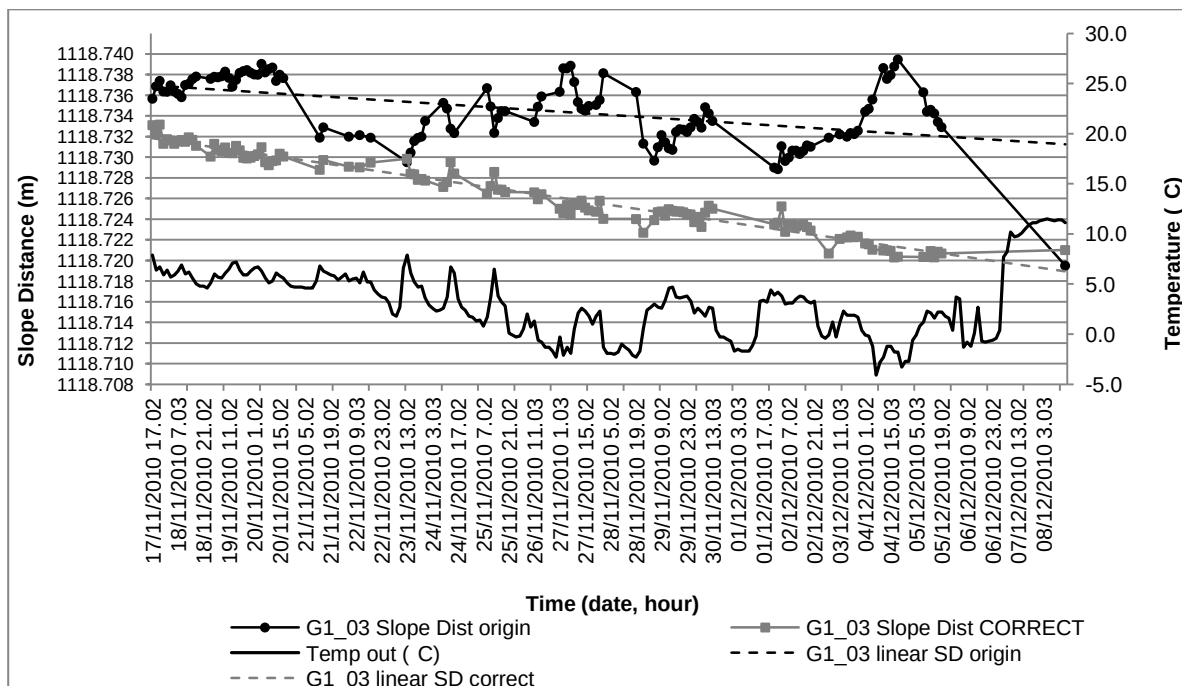
Prisma G1_01



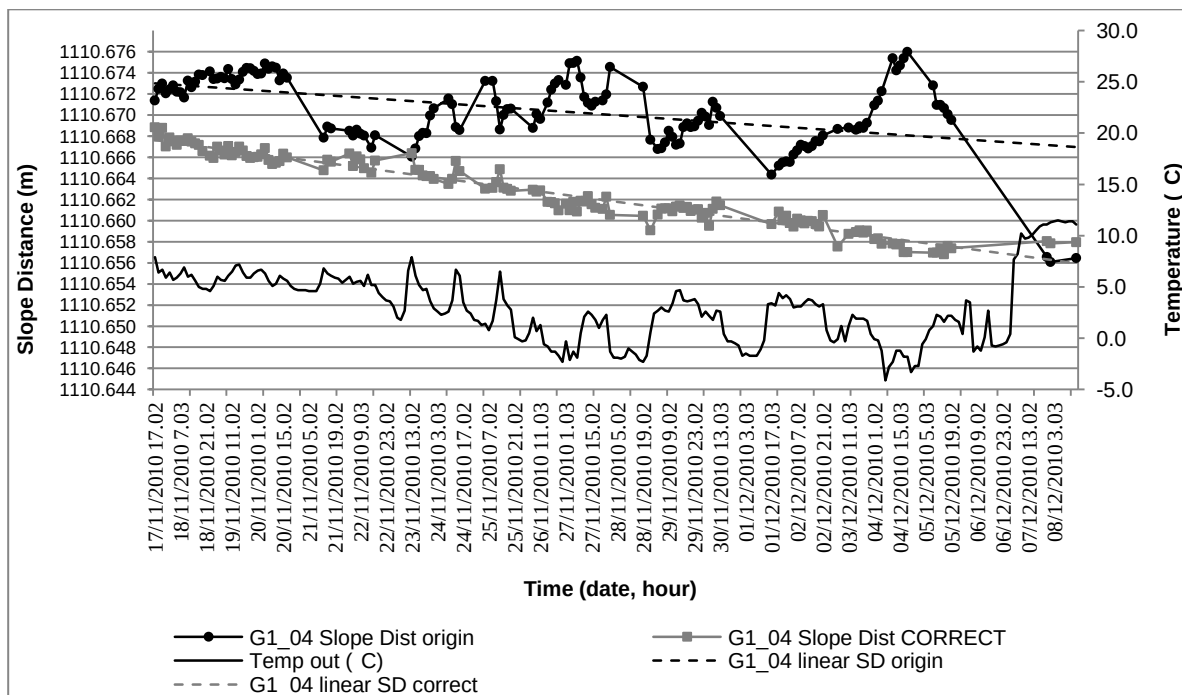
Prisma G1_02



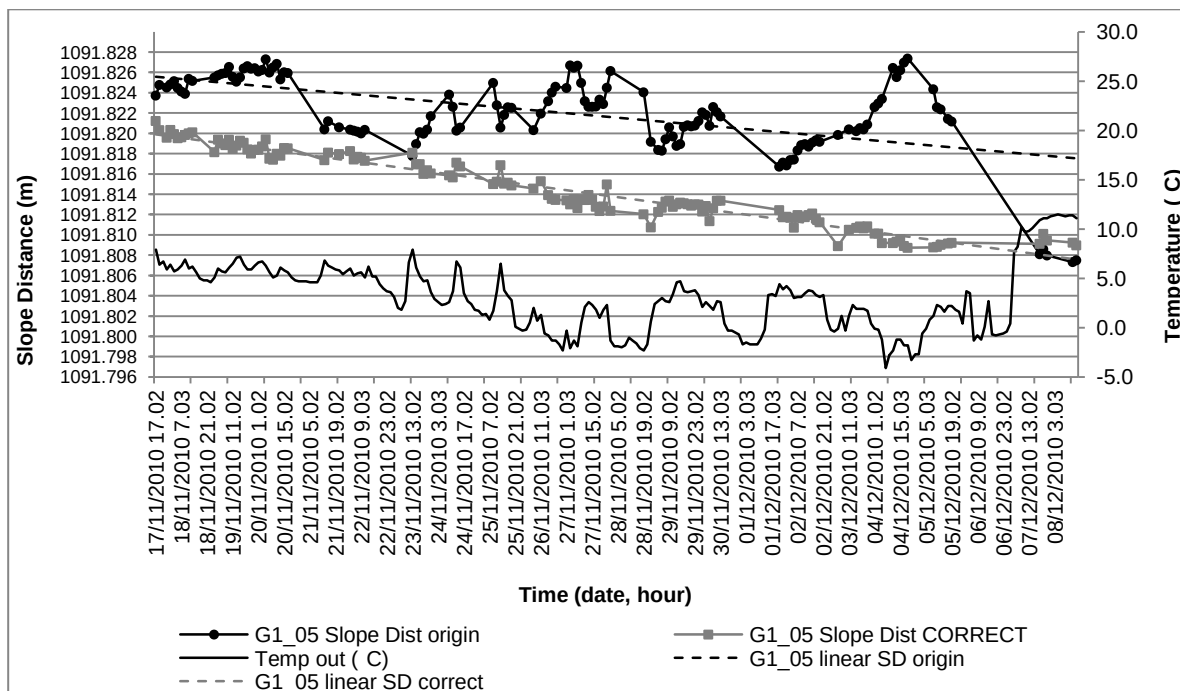
Prisma G1_03



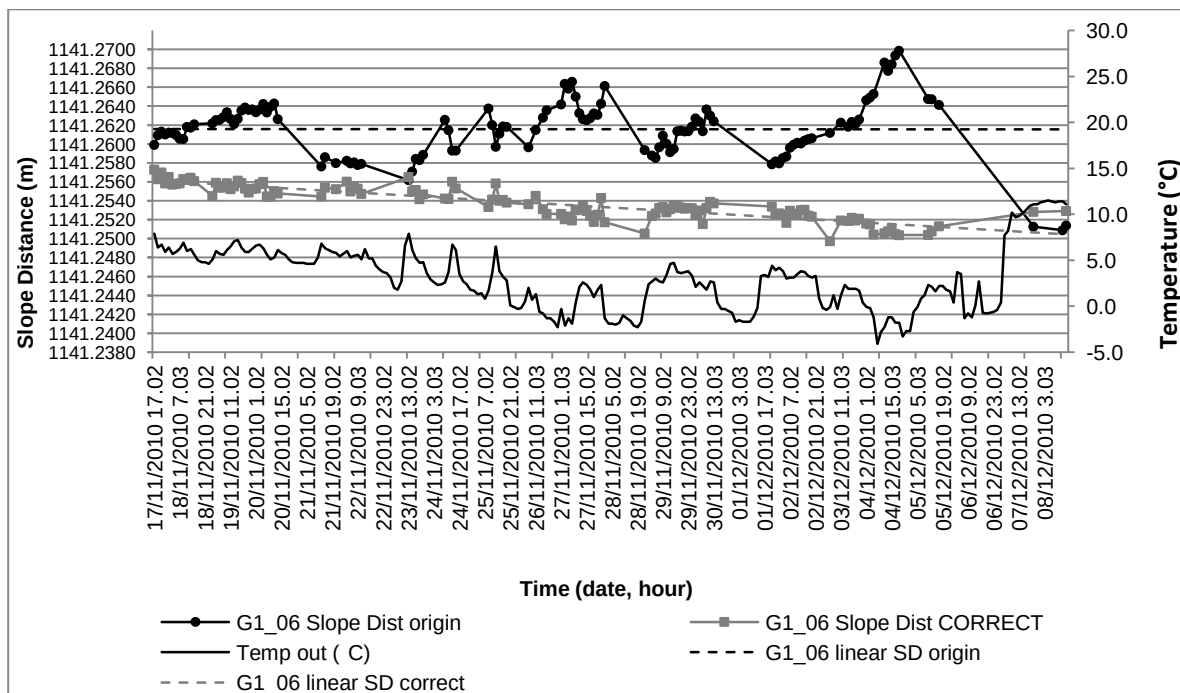
Prisma G1_04



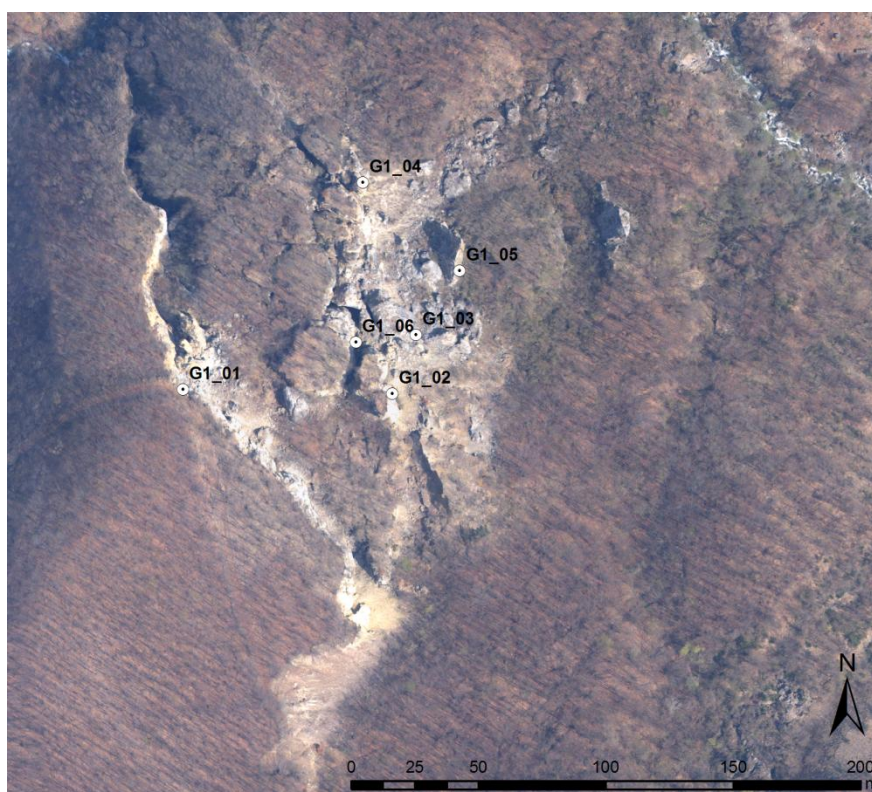
Prisma G1_05



Prisma G1_06



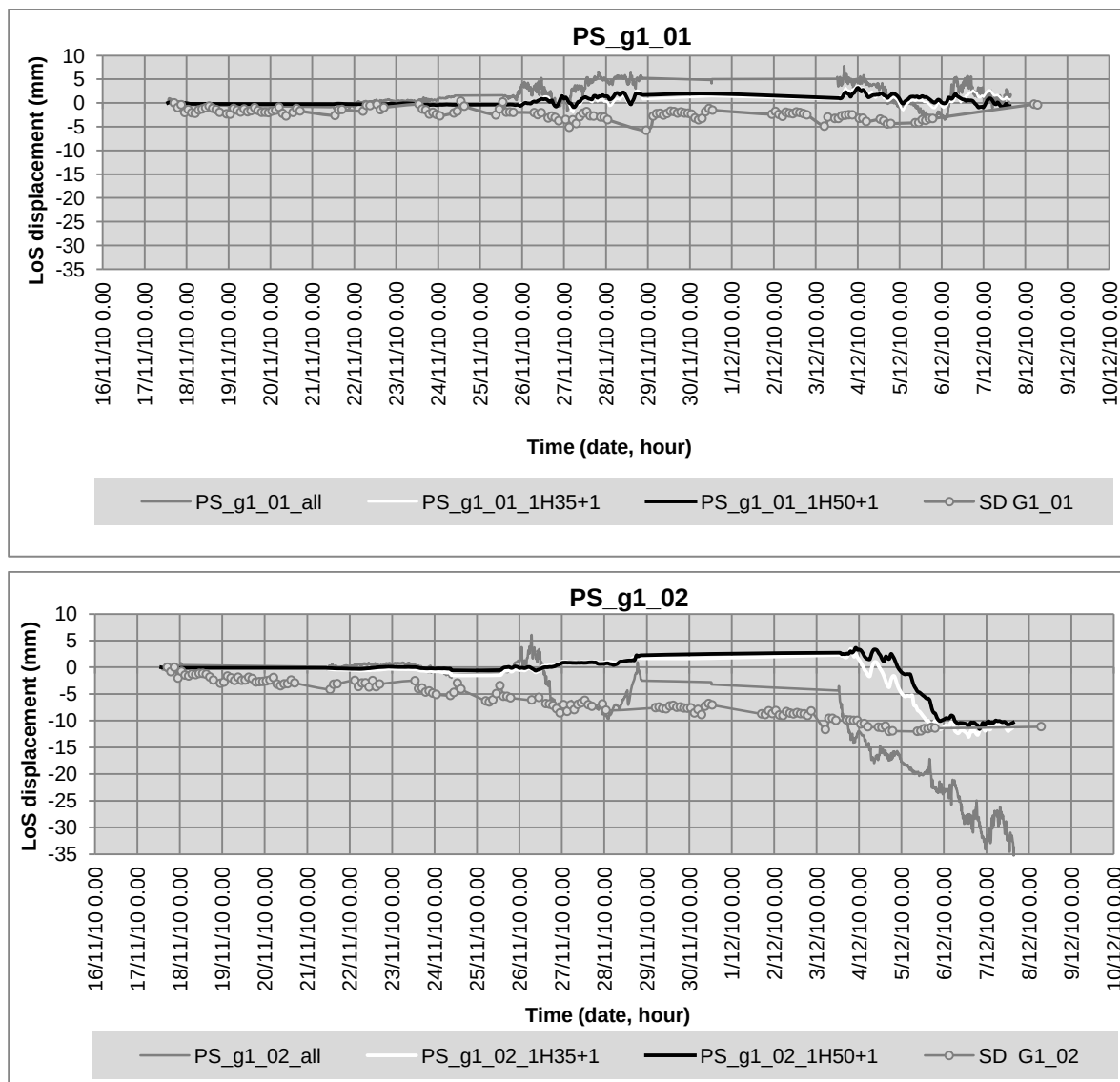
Allegato 4. Confronto quantitativo tra GB-InSAR e stazione totale per la determinazione di movimenti molto lenti (cm/mese)

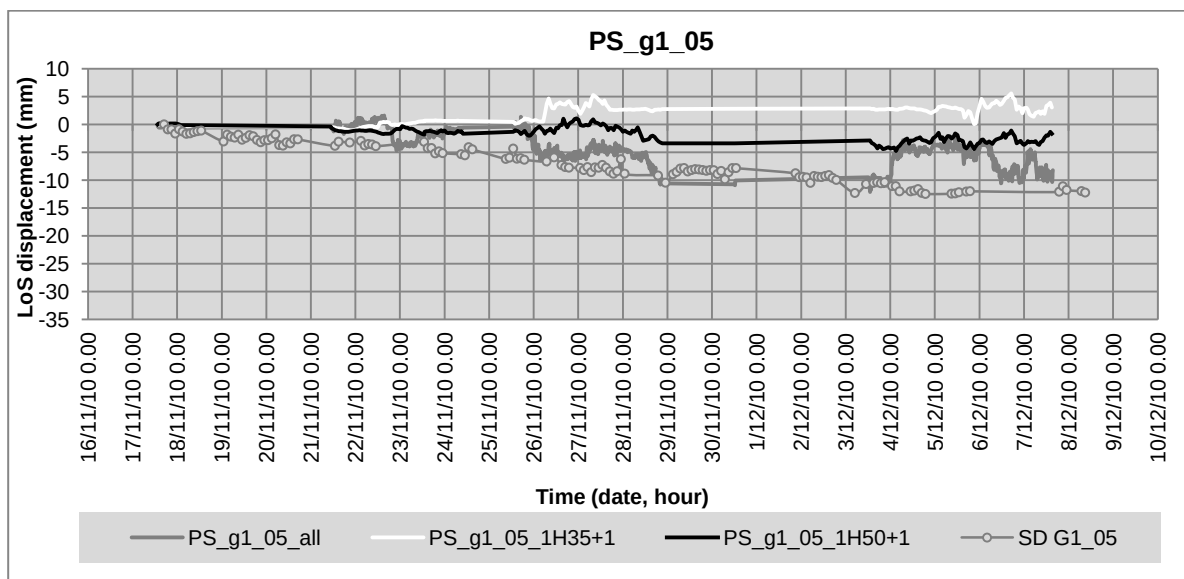
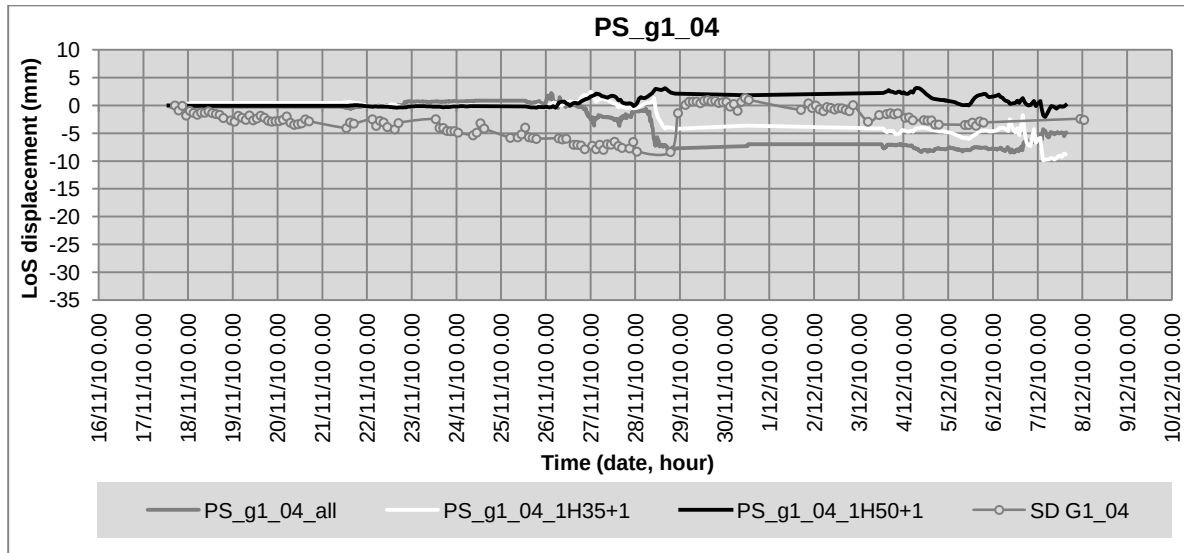
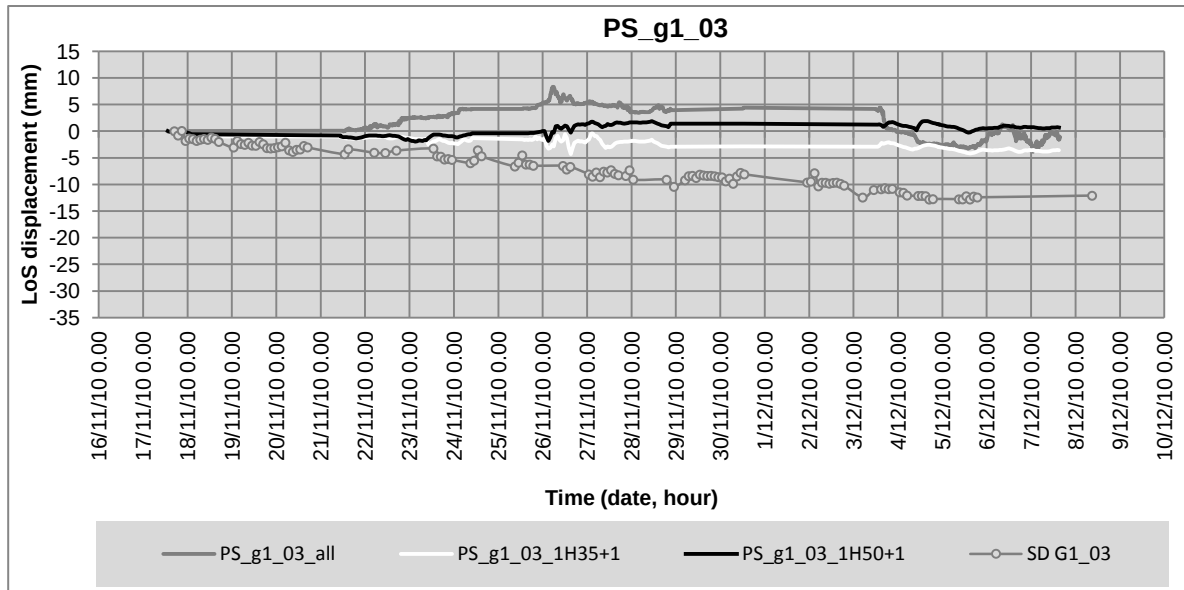


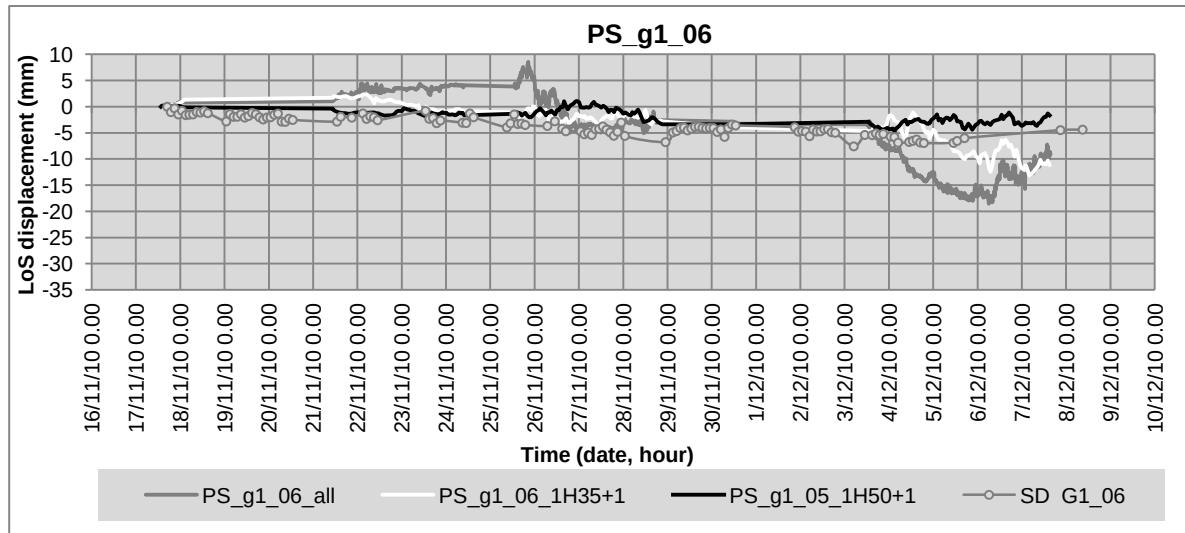
Posizione dei prismi (dei corrispondenti PS) su mappa geoerferenziata in UTM ETRF2000

I grafici riportati nel seguito riportano l'andamento nel tempo dello spostamento cumulato di distanza inclinata (SD) corretta (con correzioni atmosferiche) dei prismi del settore G1 della frana a confronto con lo spostamento LoS derivato da diversi approcci di elaborazione dei dati GB-InSAR dei corrispondenti PS:

- All: 35, RUT = 1, tutte le immagini (TEST all);
- 1H_35+1: BS = 35, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_35+1);
- 1H_50+1: BS = 50, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_50+1).

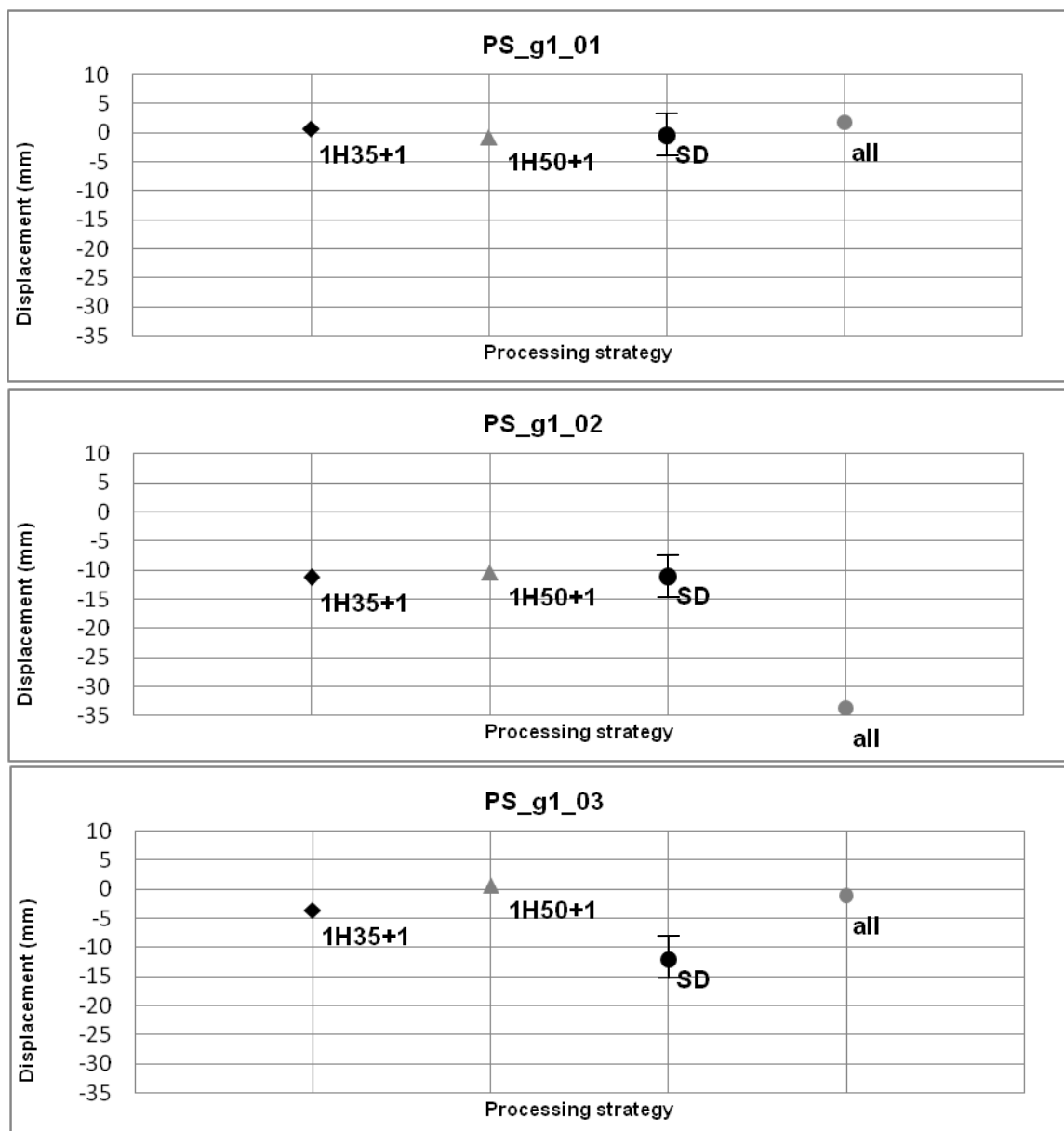


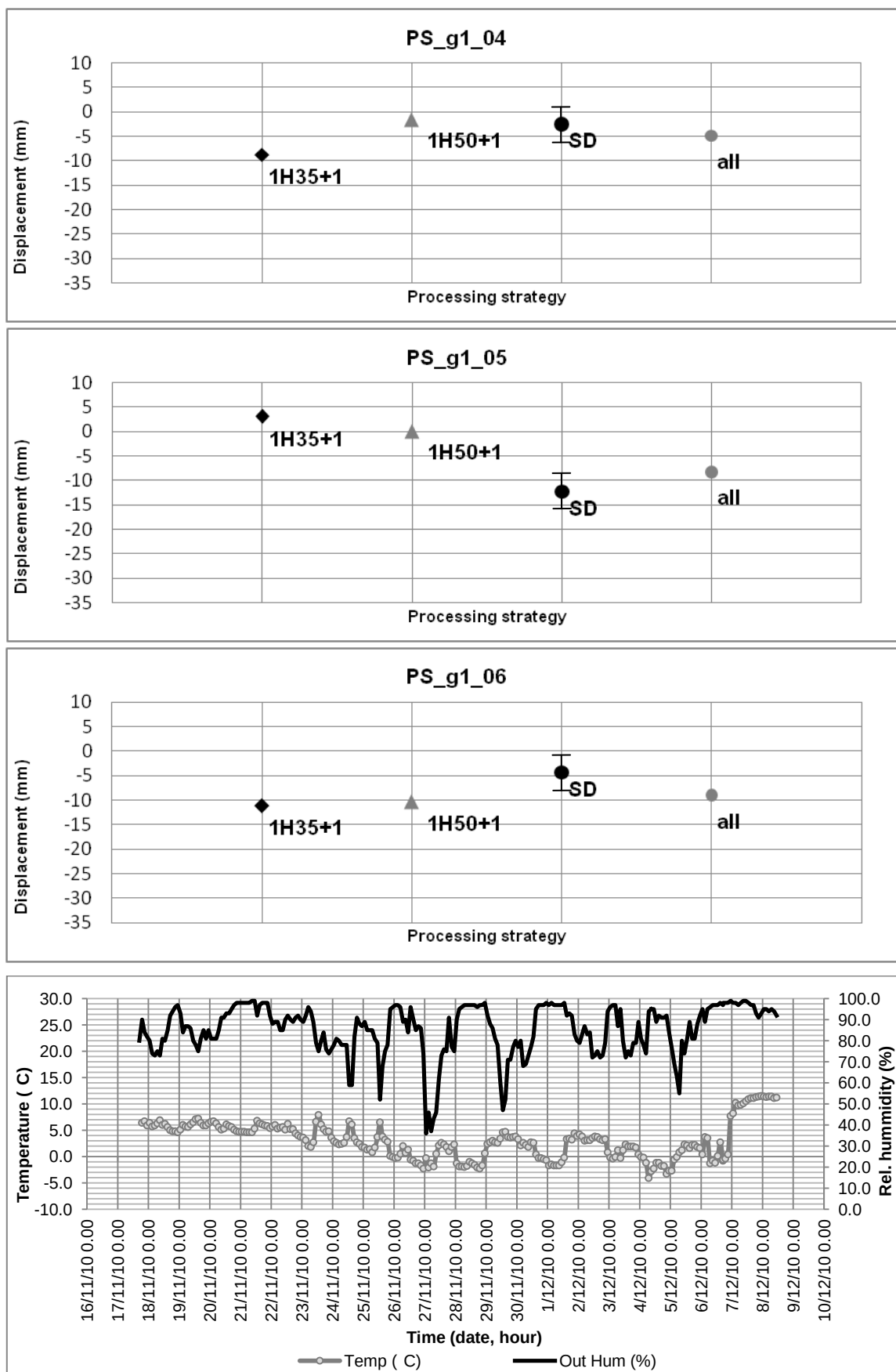




I grafici riportati nel seguito riportano il valore dello spostamento cumulato di distanza inclinata (SD) corretta (con correzioni atmosferiche) dei prismi del settore G1 della frana a confronto con il valore di spostamento LoS derivato da diversi approcci di elaborazione dei dati GB-InSAR dei corrispondenti PS, al termine della campagna di acquisizione:

- All: 35, RUT = 1, tutte le immagini (TEST all);
- 1H_35+1: BS = 35, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_35+1);
- 1H_50+1: BS = 50, RUT = 1, 1 immagine per ora (TEST 1h_50+1).





Ringraziamenti

I momenti più importanti della mia vita, come il matrimonio o la nascita del mio secondo figlio, sono sempre stati accompagnati dalla stesura di una tesi, quella di laurea specialistica e quella di dottorato. Per questo sono momenti particolarmente intensi e ricchi e valgono ancor di più i ringraziamenti che voglio esprimere.

Il primo grande ringraziamento non può che essere per Giacomo, che da sempre mi ha sostenuto, aiutato e accompagnato nel mio percorso di crescita personale, culturale e scientifico. Un grandissimo grazie a lui che mi ha sopportato e che si è fatto in quattro, per far sì che tutto questo potesse accadere, in particolare quando sono stata in Spagna per 3 mesi e lui si è occupato della casa e di Beatrice.

Un grazie ai miei genitori, che nonostante non lo abbiano mai dimostrato, hanno sempre creduto in me e in questa scelta di dedicarmi alla ricerca.

Un grazie immenso a Cristina, la mia compagna di avventure e di sventure. Abbiamo affrontato insieme missioni in luoghi sperduti e personaggi alquanto singolari; abbiamo fatto campagne di misura al freddo e nella neve, ma in cui ci siamo sempre divertite, cercando di cogliere gli aspetti più buffi delle diverse situazioni, anche se a volte di buffo non c'era proprio nulla...; ci siamo consigliate e aiutate nei momenti più difficili. Poter lavorare con un'amica al fianco rende tutto un po' più facile! Grazie Geomatics' angel!

Un grazie a Marco, che anche dopo il suo trasferimento a Bologna, non manca mai di insegnarmi qualcosa e di farmi divertire con la sua simpatia!

Un grazie al Prof. Capra, che nonostante i mille impegni accumulatisi nel tempo, è sempre il nostro paladino! Forza Dai-Rector!

Un grazie immenso ad Alle Cors, che con le sue idee esplosive mi ha sempre stimolato nella ricerca di nuovi obiettivi e che con la sua "pazienza" ha sempre sopportato i miei discorsi su...precisione e accuratezza!

Un grazie a Checco, alle campagne di misura nella neve e alle gite in Defender!

Un grazie a tutti coloro che hanno fatto parte del Lab. Di Geomatica e che ancora ne fanno parte, come Isabella e Riccardo (in arte D'Artagnan), con cui ho condiviso rilievi e avventure, in notturna sul ponteggio della Ghirlandina, nel Fiume Reno con gli stivaloni da pescatore, a Burnum in mezzo al nulla o sull'Appennino Settentrionale, tra fango e...frane!

Un grazie anche a tutti quelli che ho conosciuto al DiMEC, che tra poco non sarà più tale, in particolare a quelli che mi hanno aiutato a risolvere piccoli e grandi problemi informatici, Yuri, o tecnico-meccanici, Marco e Enrico, o di spedizione-ricezione strumenti, Nadia e Maria Grazia!