



“Le possibilità non hanno confini”



## **Validazione di sistemi di monitoraggio satellitari e terrestri per deformazioni del suolo**

**Deliverable  
D.4.03**

**Linee guida per l'uso delle tecniche satellitari e terrestri nel monitoraggio della stabilità geomorfologica, completate da SWOT analysis e schema-tipo di capitolato per il monitoraggio integrato**

**Data: 02.2015**

Il progetto SloMove é cofinanziato dall' Interreg IV Italia-Svizzera, Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale per l' Unione Europea.

[www.SloMove.eu](http://www.SloMove.eu)



## Ringraziamenti

Lo studio necessario a questa pubblicazione è stato reso possibile attraverso:

- Cofinanziamento del Programma Interreg IV Obiettivo Cooperazione Territoriale Europea Italia-Svizzera 2007-2013, Convenzione ID n. 27384220
- Cofinanziamento della Provincia Autonoma di Bolzano
- Cofinanziamento dell'Accademia Europea di Bolzano - EURAC
- Cofinanziamento del WSL -Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

### Contatti:

#### **Partner Principale (Amministrazione)**

Ufficio Geologia e Prove Materiali, Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige

Via Val d'Ega 48

I-39053 Cardano (BZ)

#### **Responsabile**

Claudia Strada

Tel +39 0471 361564

Fax +39 0471 361512

E-Mail: [claudia.strada@provinz.bz.it](mailto:claudia.strada@provinz.bz.it)

#### **Coordinatore Scientifico**

Istituto per il Telerilevamento Applicato, Accademia Europea di Bolano EURAC

Viale Druso, 1

I-39100 Bolzano (BZ)

Giulia Chinellato

Tel +39 0471 055 396

Tel +39 0471 055387

Fax +39 0471 055389

E-Mail: [giulia.chinellato@eurac.edu](mailto:giulia.chinellato@eurac.edu)

I dati e le informazioni in questo documento del progetto SloMove riflettono solo opinioni e idee dei soli autori. L'Autorità di Gestione e le Istituzioni partner del progetto non sono responsabili per alcun tipo di utilizzo che può essere fatto delle informazioni qui contenute.

## **Il progetto SloMove**

SloMove nasce dall'esigenza di raccordare il potenziale tecnologico oggi disponibile per il monitoraggio ordinario delle situazioni di instabilità dei versanti con le procedure alla base della regolamentazione e la pianificazione territoriale. Questa esigenza è particolarmente sensibile in aree di montagna transfrontaliere, che condividono la salvaguardia di importanti corridoi infrastrutturali, strategici per un ambito di popolazione più vasto di quella direttamente interessata dai fenomeni di pericolo.

### **Obiettivi Generali**

- Valutare i benefici e i limiti delle tecniche di interferometria radar su base satellitare per il monitoraggio delle deformazioni del suolo in alta montagna.
- Ottimizzare le procedure di monitoraggio usando i dati rilevati a terra per validare ed integrare i risultati delle applicazioni interferometriche.
- Consolidare il know-how dei tecnici sulle applicazioni ordinarie di elaborazione dei dati SAR e di rilievo a terra a supporto del monitoraggio di fenomeni di instabilità geomorfologica.

### **Obiettivi Specifici**

- Creare un percorso di formazione sulle particolari tecniche di elaborazione dei dati radar telerilevati e sull'implementazione di sistemi di monitoraggio che integrino tecnologie satellitari e terrestri.
- Testare su aree note l'integrazione del quadro conoscitivo disponibile con i dati derivati dal monitoraggio integrato.
- Condividere un protocollo sui metodi di monitoraggio ordinario (ai fini della pianificazione e della prevenzione), tenendo conto dei fattori limitanti e delle necessità che si possono presentare nei diversi contesti territoriali delle aree esaminate e più in generale nella regione alpina.
- Divulgare le metodologie per il monitoraggio e la conseguente gestione precoce del rischio,, realizzando linee guida e documenti utili sia ai tecnici delle pubbliche amministrazioni sia agli uffici di consulenza privati, al fine di garantire un efficace flusso di informazioni fra la fase del monitoraggio e quella della pianificazione.

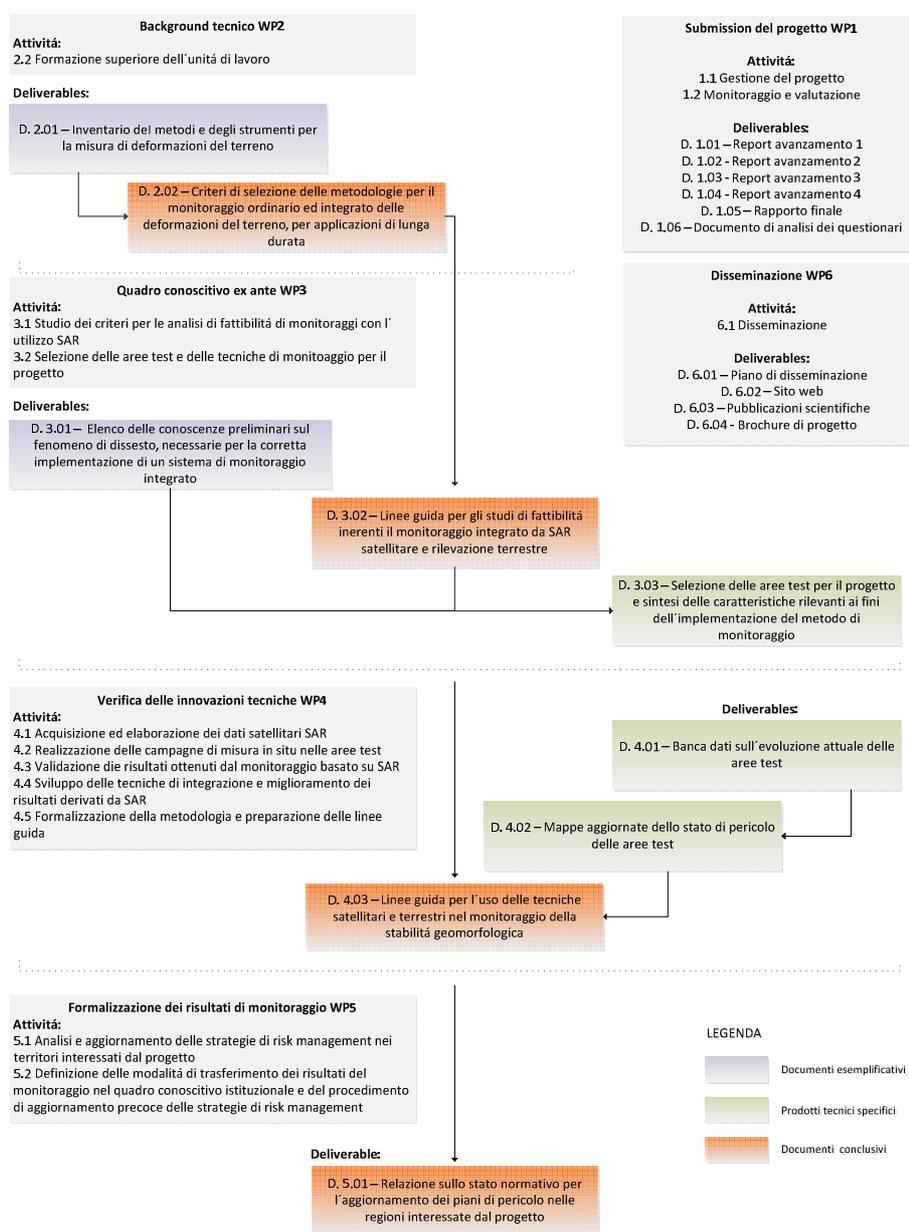
## **Metodologie**

- Multi-interferometria SAR satellitare
- Tele-laser scanner terrestre
- GPS differenziale
- Analisi partecipata dei risultati fra tecnici e amministratori

## Documentazione

Il progetto è costituito da 4 pacchetti di lavoro tecnici-operativi, più l'attività di gestione e di disseminazione.

I risultati di tali attività sono documentati in 4 rapporti di avanzamento intermedio e da un rapporto finale. I prodotti principali della ricerca, delle sperimentazioni e delle innovazioni metodologiche sono raccolti in 4 documenti o linee di guida di valenza generale, 2 documenti esemplificativi oltre che una banca dati e mappe aggiornate, specifici per le aree di test. La relazione tra i diversi documenti è rappresentata nel diagramma di flusso sottostante.



## Partners e Autori

### Italia

#### Lead Partner

Ufficio Geologia e Prove Materiali

Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige

- Volkmar Mair
- Claudia Strada
- David Mosna

#### Partner 1

Istituto per il Telerilevamento Applicato

Accademia Europea di Bolzano EURAC

- Giulia Chinellato

### Svizzera

#### Partner 2

WSL -Institut für Schnee- und Lawinenforschung

SLF

- Marcia Phillips
- Robert Kenner

#### Partner 3

Abenis A.G. Ingenieure und Planer

- Andreas Zischg

## Indice

1.	Premessa .....	9
1.1	Raccolta ed elaborazione dati.....	10
2.	Monitoraggio con GNSS differenziale .....	12
2.1	Stima dell'Errore e della Precisione delle misure.....	13
2.2	Risultati ottenuti.....	15
3.	Monitoraggio con Laser Scanner da terra .....	19
3.1	Rilevamento dei dati .....	19
3.2	Elaborazione dei dati .....	19
3.3	Analisi della precisione .....	20
3.4	Risultati.....	21
4.	Monitoraggio con la multi-interferometria.....	26
4.1	Processamento delle immagini .....	27
4.2	Risultati delle elaborazioni dei dati SAR.....	29
5.	Confronto ed integrazione .....	31
5.1	Proiezione di un generico vettore spostamento lungo la Linea di Vista (LoS) del satellite .....	32
5.1.1	Proiezione di uno spostamento generico lungo la LoS .....	32
5.1.2	Calcolo del vettore unitario LoS .....	33
5.1.3	Calcolo della proiezione scalare s.....	34
6.	Confronto tra TLS e GNSS.....	36
6.1	Rideterminazione dei dati TLS in funzione delle misure GNSS .....	36
6.1.1	Risultati della rideterminazione del dato TLS.....	40
6.2	Confronto tra i risultati GNSS e TLS.....	41
6.2.1	Periodo 2012-2013 .....	41
6.3.1	Periodo 2013-2014.....	43
7	Confronto tra dati SAR e GNSS.....	45
8.	Assimilazione ed integrazione GNSS e TLS.....	48
9.	SWOT analysis .....	51
9.1	Monitoraggio con GNSS .....	51
9.2	Monitoraggio con TLS.....	52
9.3	Processamento dati SAR con algoritmo SBAS.....	53
9.4	Tecnologie integrate.....	54

10. Outlook e conclusioni ..... 55  
Bibliografia..... 57

## 1. Premessa

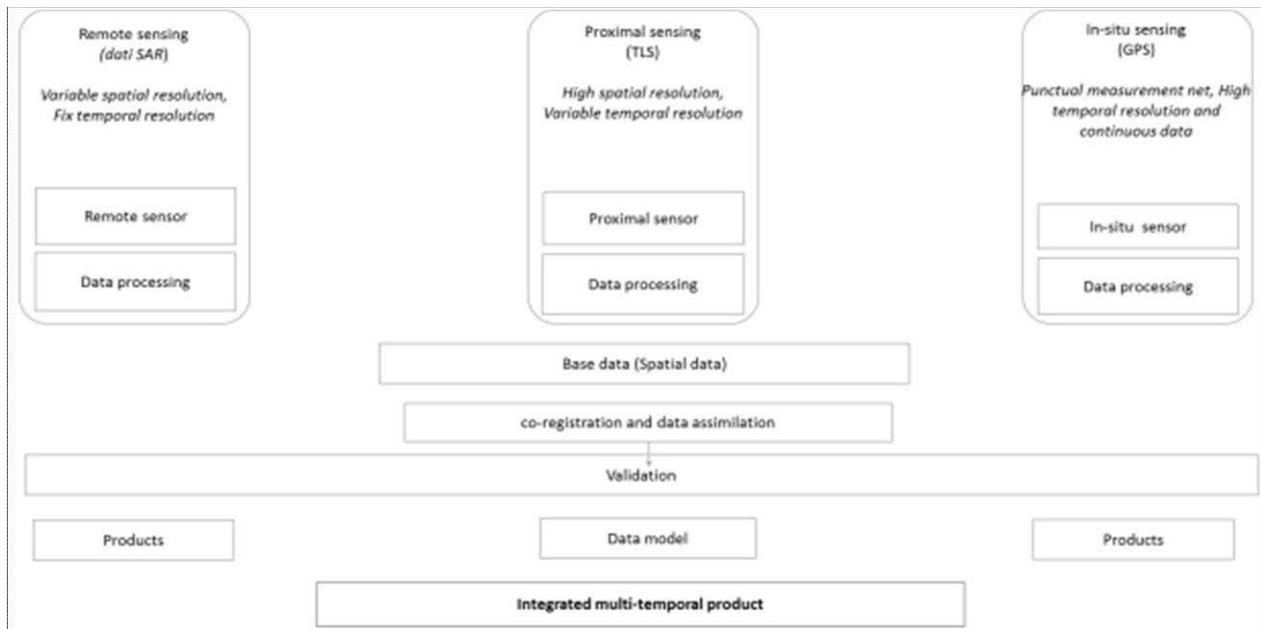
Nel presente documento si descrivono i risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati delle campagne di misura a terra 2012 e 2013-4 e dal processamento delle immagini Cosmo SkyMed dell'estate 2012 e 2013. Il presente documento segue quanto riportato nel **Deliverable 3.02**.

Qui di seguito una tabella con un sunto delle campagne di misure eseguite nelle due aree test nel periodo 2012-2014 e le immagini Cosmo acquisite nell'ambito del progetto.

	TLS		GNSS		DInSAR	
	Ursina	Steinschlag- spitze	Ursina	Steinschlag- spitze	Steinschlag- spitze	Ursina
<b>2012</b>	18.09.	02.10.	18.09.	02-03.10.	11.06.2012 14.08.2012 30.08.2012 15.09.2012 17.10.2012	21.07.2012 06.08.2012 22.08.2012 07.09.2012 23.09.2012
<b>2013</b>	29.08.	13.08.	24-25.07. 29.08. 23.09.	02/04.07. 12-14.08. 19-20.09.	14.06.2013 30.06.2013 16.07.2013 01.08.2013 30.08.2013 02.09.2013 01.10.2013	24.07.2013 09.08.2013 22.08.2013 25.08.2013 07.09.2013 10.09.2013 14.09.2013 09.10.2013
<b>2014</b>	15.09.	02.09.	09.07.14;  18-  19.08.14;  30.09.14	01/03.07.2014;  04/06.08.14;  02.09.14		15.07.2014 23.07.2014 16.08.2014 25.08.2014 28.08.2014 13.09.2014 29.09.2014 03.10.2014 12.10.2014

I prodotti delle singole tecnologie sono stati elaborati separatamente ed i risultati comparati tra loro, eventualmente corretti ed integrati. Nei capitoli successivi saranno presentati i metodi con i quali si è SloMove

proceduto a valutare la precisione, procedere alla correzione delle misure di campagna e rendere possibile un confronto ed una assimilazione affidabile dei risultati stessi.



## 1.1 Raccolta ed elaborazione dati

Le campagne di misura sono state alla base dello sviluppo del progetto. Come già descritto nei deliverable pregressi, ogni tecnica di indagine è caratterizzata da limiti applicativi che sono funzione della natura del processo sottoposto a studio e di fattori di tipo ambientale e tecnico-tecnologico. In particolare nel Deliverable 3.02 sono stati già affrontati tutti i fattori che supportano l'impiego di una tecnologia di misura rispetto ad un'altra anche in relazione alla sua applicabilità in un determinato ambito. In un contesto alpino, dove lo sviluppo urbanistico raggiunge alte quote, si aggiunge anche la difficoltà nell'accedere al sito di monitoraggio in condizioni di sicurezza.

Le misure effettuate con l'impiego di strumentazione in-situ, come il GNSS differenziale, o prossimali (proximal sensing), come il laser scanner da terra (TLS), hanno dimostrato appunto come in determinate condizioni ambientali sia fondamentale poter usufruire di dati da remoto. L'accessibilità al sito e le condizioni meteo-climatiche, nel caso del progetto SloMove, sono stati sicuramente fattori non trascurabili.

I dati da remoto, come i dati provenienti dalla multi-interferometria, nonostante i limiti di utilizzo (vedi cap. 4.1 D. 3.02), presentano il vantaggio non paragonabile con nessun'altra tecnologia, di fornire un elevato numero di informazioni su vaste aree, senza dover accedere al sito stesso. Tuttavia, nonostante la tecnica sia ormai ampiamente impiegata in alcuni settori (urbanistico, protezione civile in post-disastro ecc.), il suo utilizzo efficace ed efficiente nel monitoraggio di dissesti di frana in un contesto montano non è ancora stato sviluppato adeguatamente.

Il progetto SloMove ha fondato il suo obiettivo proprio nella comprensione dei limiti del dato multi-interferometrico mirando a valorizzarne le potenzialità.

## 2. Monitoraggio con GNSS differenziale

La procedura di misura denominata GNSS (Global Navigation Satellite System) differenziale, come ampiamente descritto nel **Deliverable 3.02**, permette di determinare la posizione di un punto di coordinate incognite rispetto a un punto di riferimento noto. Il vettore tridimensionale tra il punto di riferimento (“base station”) e il ricevitore posto sul punto ignoto (“rover”) è chiamato “baseline”. Al fine di determinare le tre componenti vettoriali tridimensionali in modalità “*double differences relative positioning procedure*”, è necessario impiegare almeno 2 ricevitori e rilevare il segnale di almeno 4 satelliti. Il controllo della ripetibilità fra le stime di posizione di uno stesso punto ottenute tramite l’elaborazione di due o più basi per lo stesso punto incognito permette di identificare la presenza di errori significativi tramite una rete che presenti buona ridondanza (Biagi, 2009). L’accuratezza nella stima della baseline dipende dalla lunghezza e dalla durata della misura; maggiore è la durata della misura, migliore è l’accuratezza nella stima del vettore baseline lungo le 3 componenti, dovuto all’aumento di ridondanza delle misure con il tempo:

(eq. 2.1)

$$N = 2T (L-1) \quad (\text{Biagi, 2009}).$$

*N= numero di osservazioni alle differenze doppie (numero di stime della posizione del punto ignoto)*

*T= tempo della misura*

*L= numero di satelliti*

L’accuratezza dipende inoltre dalle differenti condizioni atmosferiche all’estremità della baseline e da errori di tipo strumentale, di elaborazione dei dati ed umani.

La rete geodetica locale materializzata nelle due aree test (**Deliverable 3.03**) consiste in 18 punti di misura e 2 base station per il sito italiano, e di 14 punti e 2 base station per il sito svizzero (Fig. 2.1).

Le “base station” sono state installate, solidamente ai riflettori artificiali (D 3.02 cap. 3) per il monitoraggio SAR, in aree stabili esternamente alle zone affette dal fenomeno studiato.

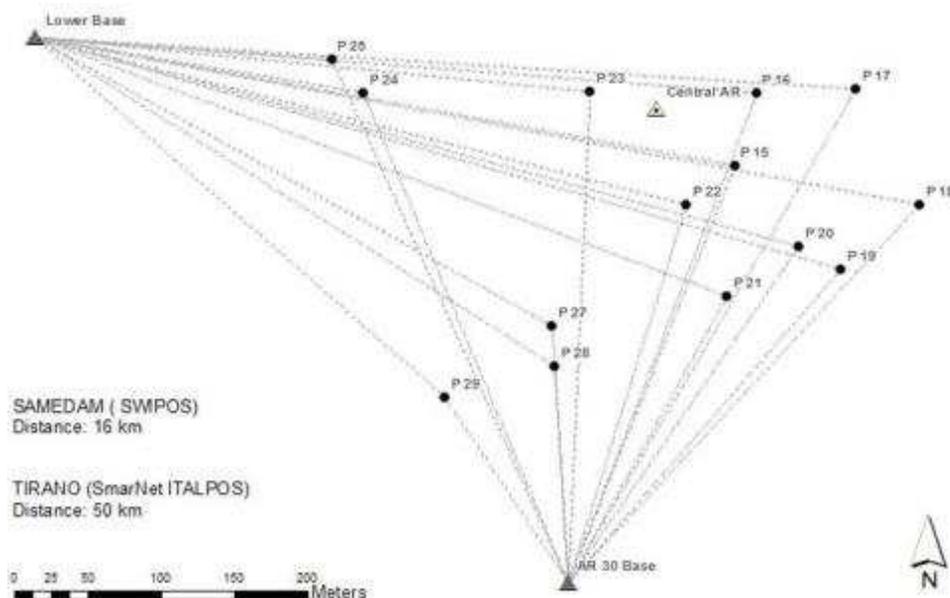


Fig. 2.1 - Rete geodetica materializzata nell'area svizzera. "Base station", "rover" e stazioni permanenti.

Le campagne di misura sono state condotte durante la stagione estiva per un totale di 7 misure per ciascuna area test (1 nel 2012, 3 nel 2013 e 3 nel 2014).

Le misure sono state condotte utilizzando 3 ricevitori doppia frequenza (2 sensori Viva GS10 e Leica GS530), 2 dei quali tenuti fissi durante ogni campagna ed il terzo impiegato come rover per effettuare le misure sui punti della rete geodetica. La durata di ogni misura è stata di 30 minuti (modalità statico-rapida, D 3.02) per dare maggiore ridondanza alle misure ed ottenendo così una più accurata stima della baseline (eq.2.1). La ridondanza delle misure indica la differenza tra il numero delle osservazioni (misure condotte) e il numero dei parametri incogniti ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  per ogni punto). Durante le misure è stata posta attenzione a i) impostare i corretti parametri (come ad esempio il centro di fase dell'antenna); ii) controllare l'inclinazione e l'orientazione dei benchmark; iii) controllare il parametro PDOP (D 3.02 Cap. 2.2), che indica la qualità delle osservazioni in funzione della geometria dei satelliti in quel momento (il valore PDOP deve essere inferiore a 4).

## 2.1 Stima dell'Errore e della Precisione delle misure

Il processamento dei dati GNSS è stato condotto dall'Università La Sapienza di Roma e dal Politecnico di Como mediante il programma Leica Geo Office Software della Leica Geosystems. Sono state calcolate le baseline tra i punti "rover" e le "base station" ed è stata ottenuta una stima delle coordinate relative dei punti. Al fine di riferire la rete locale nel sistema di riferimento globale, le

“base station” sono state collegate a stazioni di riferimento permanenti appartenenti alla rete geodetica della Provincia di Bolzano (STPOS), Svizzera (SWIPOS) e della Leica (SmartNet ITALPOS).

Il confronto tra le baseline delle due “base station” permette di identificare grandi errori nelle stime mentre errori casuali dei singoli punti possono essere minimizzati attraverso la compensazione della rete GNSS: con il metodo del “vincolo di uguale baricentro”, dato dalla media delle posizioni delle “base station”, è possibile calcolare gli errori tra le campagne di misura e valutare la precisione dei risultati. Questa ipotesi si applica poiché le “base station” sono ferme in quanto ubicate in punti stabili. Il metodo prevede di calcolare il baricentro alla 1° campagna e di confrontarlo con quello delle campagne successive, cioè si calcola la differenza tra il baricentro della prima misura e i baricentri successivi. La differenza dovrebbe essere uguale a zero ma, per errori di calcolo, misura ecc., si ottiene una differenza che si applica, sottraendola, alle coordinate stimate di tutti i punti della rete, ragionando sempre in termini di componenti separate dE, dN e dUp.

Considerando le misure condotte nel 2012 e nel 2013, si è ritenuto che le misure effettuate nel luglio 2013 potessero rappresentare la campagna di riferimento sulla base della quale stimare eventuali errori sia nelle campagne successive sia in quelle precedenti.

	REFERENCES	Est (m)	Nord (m)	Up (m)		REFERENCES	Est (m)	Nord (m)	Up (m)	
Luglio 2013	AR 30 Base	571133,988	5149541,593	2857,518	Luglio 2013	AR 30 Base	571133,988	5149541,593	2857,518	
	Lower Base	570765,272	5149916,012	2699,261		Lower Base	570765,272	5149916,012	2699,261	
	baricentro	570949,630	5149728,803	2778,389		baricentro	570949,630	5149728,803	2778,389	
Agosto 2013		Est (m)	Nord (m)	Up (m)	Settembre 2013		Est (m)	Nord (m)	Up (m)	
	AR 30 Base	571133,984	5149541,592	2857,531		AR 30 Base	571133,984	5149541,596	2857,573	
	Lower Base	570765,268	5149916,007	2699,275		Lower Base	570765,279	5149916,012	2699,310	
	baricentro	570949,626	5149728,799	2778,403		baricentro	570949,632	5149728,804	2778,442	
diff(Lug-Ago) <sub>baricentro</sub>		metri	-0,004	-0,003	0,014	diff(Lug-Sett) <sub>baricentro</sub>		0,002	0,002	0,053

Calcolo del vincolo di baricentro

Il baricentro è la media delle coordinate delle base station per ogni campagna di misura. Applicando il “vincolo di uguale baricentro” si sono ottenute differenze dell’ordine di qualche mm. I valori ottenuti sono stati sottratti alle coordinate dei punti delle campagne di agosto (diff(Lug-Ago)<sub>baricentro</sub>) e settembre 2013 (diff(Lug-Sett)<sub>baricentro</sub>). Lo stesso calcolo è stato effettuato per correggere la misura “0” di giugno 2013 e la misura di settembre 2012. Si sono ottenute così le coordinate corrette per le misure 2012 e 2013.

L’**indice di precisione** rappresenta la dispersione (deviazione standard) calcolata sulle coordinate delle “base station” corrette (compresa luglio 2013), senza considerare i punti “rover”. I risultati indicano una precisione dE di 3-4 cm (Est), dN 0.9 cm (Nord) e di 2 cm sulla dUp (quota).

Le prossime analisi considereranno anche le misure del 2014 e si tenterà di migliorare la stima degli errori e della precisione considerando anche il baricentro tra le “base station” e i punti “rover” a diversi istanti della stessa campagna di misura.

## 2.2 Risultati ottenuti

I dati GNSS corretti sono stati plottati in forma grafica. Alcuni punti sono stati monitorati solo a partire dal 2013, mentre in altri si sono rilevati alcuni errori di misura tali da impedire il loro utilizzo. Essendo l’obiettivo del progetto l’analisi della metodologie di acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei dati in riferimento anche alle altre tecnologie, nel presente paragrafo saranno presentati solo alcuni esempi di output finali per le campagne GNSS.

Nel primo grafico (Grafico n. 2.2.1) è riportato l’andamento del vettore spostamento cumulato dal 2012 al 2014, per tutti i punti della rete geodetica locale materializzata a Schafberg, area test svizzera del progetto. Non si dispongono dei dati acquisiti dalla stazione geodetica permanente ubicata in prossimità del corner centrale; per questo punto i dati si riferiscono solo al periodo 2012-2013. Gli spostamenti maggiori sono rilevati dal rock glacier Ursina I: in particolare dal punto n. 23, ubicato sul fronte della lingua centrale, che rileva uno spostamento complessivo 2012-2014 superiore ai 50 cm. I punti n. 15 e n. 22, anch’essi appartenenti all’Ursina I, mostrano spostamenti complessivi considerevoli (tra i 20-25 cm/anno).

Generalmente i benchmark localizzati ai margini o al fronte dei rock glacier, come anche il punto n. 29 (15 cm/anno) dell’Ursina III e il punto n. 19 (ca. 14 cm/anno), mostrano spostamenti maggiori, legati anche ad una variazione di quota rilevante. Tuttavia si suppone che l’area che rappresenta la lingua centrale dell’Ursina I sia affetta da deformazioni ancora più rilevanti, come indicato dal trend degli spostamenti mostrato dalla stazione permanente (punto AR centrale) ma riferito solo al periodo 2012-2013.

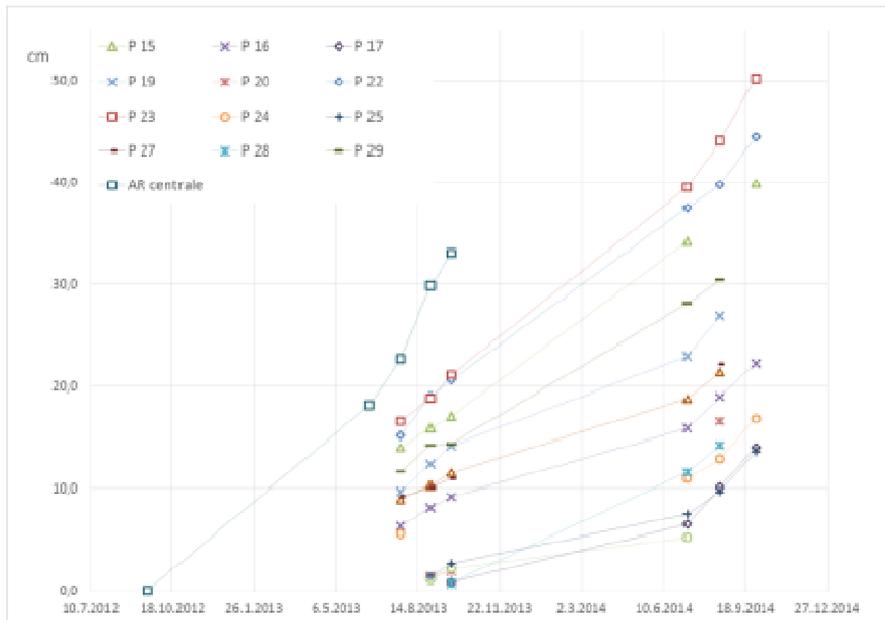


Grafico 2.2.1- Spostamenti totali cumulati 2012-2014 (cm)

Dall'analisi del grafico 2.2.2 si possono evidenziare, pur considerando il limitato numero di misure effettuate durante la stagione estiva, alcune differenze nella distribuzione dei campi di velocità. Nell'estate del 2013, in prossimità della misura centrale condotta in agosto, si rileva una accelerazione di quasi tutti i punti (escluso il punto n. 27) rispetto alla misura precedente del luglio 2013; in particolare si evidenzia il picco di velocità raggiunto dal punto AR centrale (ca. 7 cm/mese). Nell'estate 2014 il trend delle velocità, sempre riferito al periodo di misura, presenta un andamento più lineare, senza mostrare accelerazioni nei mesi estivi più rappresentativi (luglio e agosto) né durante il mese di settembre (l'ultima misura è stata condotta il 30 settembre 2014). Tuttavia i range di velocità del 2014 sono mediamente più elevati per tutti i punti se paragonati al 2013.

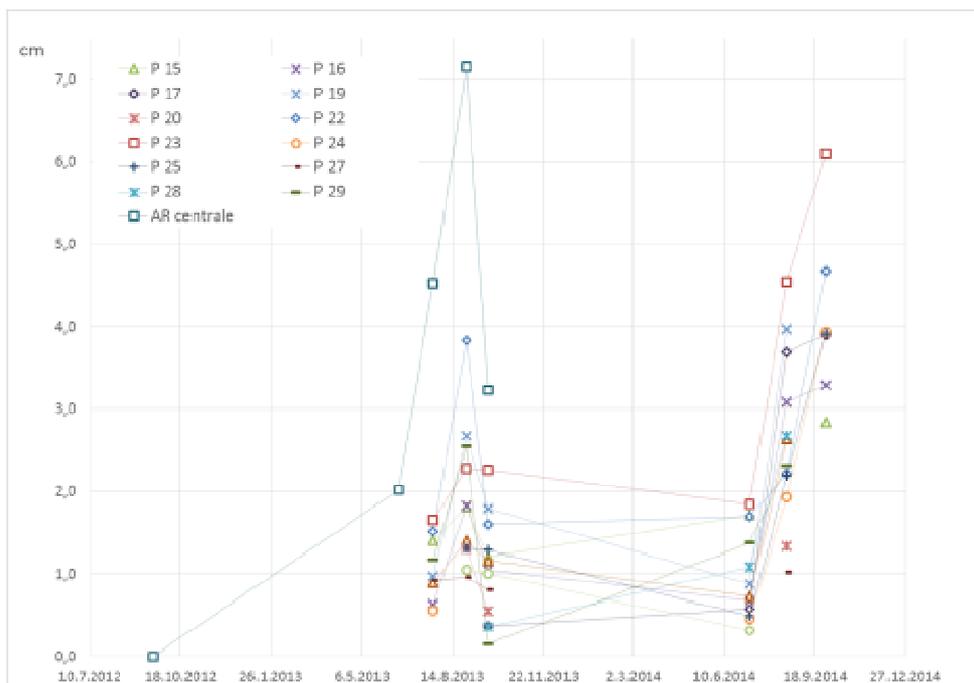


Grafico 2.2 – Andamento della velocità rispetto alla misura precedente (cm/anno)

In particolare si nota l'“attivazione” di alcuni punti che in precedenza non avevano presentato deformazioni rilevanti: i punti n.24 e n. 25, ubicati in prossimità del fronte del rock glacier Ursina II presentano nel 2014 un modulo deformativo paragonabile a quello delle aree di maggiore attività note fino a quel momento, rappresentate dai punti n. 22 e n. 23. Considerando che l'Ursina II rappresenta la sorgente principale di alimentazione del debris flow che interessa l'abitato di Pontresina, i dati acquisiti possono essere di supporto nella pianificazione di interventi di protezione. Le differenze rilevate tra i due anni sono da ricondurre alle particolari condizioni meteo-climatiche del 2014: consistenti nevicate si sono protratte fino alla tarda primavera, con la permanenza al suolo della neve fino ad estate inoltrata; alte temperature invernali e basse temperature estive, completamente anomale rispetto alle rispettive stagioni, hanno sicuramente contribuito al diverso comportamento evolutivo dei rock glaciers.

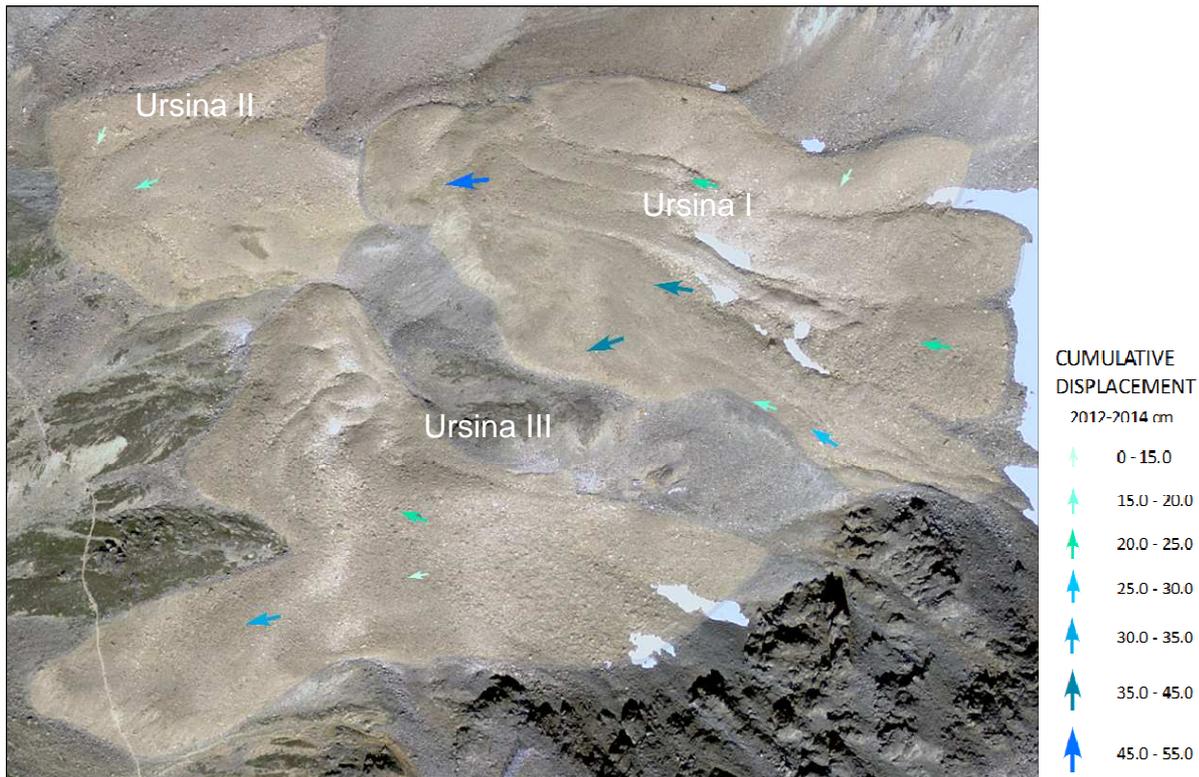


Fig. 2.2.1 - Carta degli spostamenti cumulati 2012-2014

In Fig. 2.2.1 è riportata una mappa di distribuzione degli spostamenti cumulati nel periodo 2012-2014: complessivamente la porzione sud-orientale del rock glacier Ursina I presenta un maggiore stato di attivazione, non solo marginalmente dove l'acclività è più elevata, ma anche nelle porzioni centrali. L'analisi condotta permette di identificare aree a maggiore spostamento e a differenziare punti aventi valori di deformazione orizzontale maggiore rispetto agli spostamenti verticali e viceversa. Questo è stato effettuato correlando i dati di campagna con i tratti morfologici tipici dei rock glacier e distinguendo i settori di alimentazione, spostamento ed accumulo. Il confronto e la validazione delle informazioni ottenute con le altre tecnologie è stato effettuato in parte in ambiente GIS.

### 3. Monitoraggio con Laser Scanner da terra

#### 3.1 Rilevamento dei dati

Dal 2012 sono state eseguite misurazioni annuali con laser scanner terrestre (TLS) in entrambe le aree di monitoraggio. Le misurazioni nel 2012 sono state effettuate con il laser scanner Riegl "LPM321", le altre misurazioni con il laser scanner Riegl "VZ6000". Per informazioni e per maggiori dettagli sulle differenze consultare il sito web [www.riegl.com](http://www.riegl.com). Tutte le misurazioni sono state eseguite da una singola posizione per sito di misurazione: Presso il sito di misurazione Foura da l'amd Ursina è stata utilizzata una piattaforma di misurazione fissa, mentre alla Punta delle Frane è stato utilizzato uno stativo posizionato sulla roccia stabile. La risoluzione di tutte le scansioni è risultata inferiore a 10 cm. Le nuvole di punti risultanti dalle misurazioni con laser scanner sono state georeferenziate mediante punti di controllo riflettenti al suolo che sono stati integrati nel quadro generale di riferimento di tutti i metodi di misurazione utilizzati nello studio. Nei casi di georeferenziazione palesemente errata, è stato eseguito l'allineamento parziale o totale dei dati delle scansioni ricorrendo all'algoritmo "Iterative Closest Point" (ICP). Si tratta di una procedura in cui utilizzando il metodo della trasformazione di Helmert viene ridotta a un minimo la distanza tra i punti di due nuvole di punti, avvicinando così punti quanto più possibile tra loro. In questi casi, tra le tre misurazioni georeferenziate tramite punti di controllo al suolo, è stata tenuta in considerazione quella ritenuta più verosimile e i dati delle altre misurazioni, ove necessario, sono stati adattati a questi dati di riferimento.

#### 3.2. Elaborazione dei dati

Le nuvole di punti multitemporali ottenute sono state trasformate in modelli del terreno rasterizzati. Le differenze di questi terreni rasterizzati mostrano variazioni plano-altimetriche in un punto del sistema di coordinate; queste variazioni sono diverse dalle variazioni plano-altimetriche di un punto superficiale. Quest'ultimo può spostarsi nel sistema di coordinate subendo quindi una variazione plano-altimetrica diversa da quella misurata da un determinato punto di coordinate specifico precedentemente definito. Gli eventuali spostamenti della posizione della superficie sono stati analizzati con l'ausilio di una struttura della superficie grezza. In una prima fase, tale struttura è stata resa visibile mediante un cd. filtro high pass nel set di dati rasterizzato e successivamente gli schemi di questa struttura delle superficie sono stati correlati per piccole aree parziali di due griglie di punti.

In questo modo sono stati calcolati i vettori di spostamento per ogni area parziale; la relativa somma ha portato ad un campo vettoriale bidimensionale relativo allo spostamento del terreno orizzontale. Mentre questi vettori di spostamento orizzontale descrivono le variazioni relative alla posizione dei punti in superficie, le differenze evidenziate nella griglia mostrano, come già anticipato, le variazioni piano-altimetriche presso un punto di coordinate. Per poter attribuire un valore per l'altezza a ogni vettore di spostamento orizzontale, tra il rilievo  $t_1$  e  $t_2$ , è stato utilizzato il valore piano-altimetrico, prima dello spostamento della posizione, ricavandolo dal modello del terreno per  $t_1$  e sottraendolo dall'altezza del punto dopo lo spostamento orizzontale relativo al modello del terreno di  $t_2$ . La differenza tra i valori piano-altimetrici costituisce la componente relativa all'altezza del rispettivo vettore di traslazione (Fig. 3.2.1).

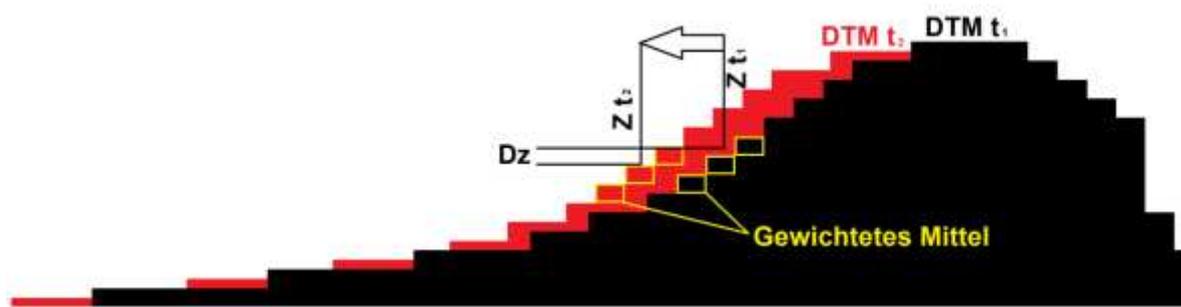


Fig. 3.2.1: Rappresentazione schematica del calcolo della componente piano-altimetrica di un moto traslatorio.

### 3.3 Analisi della precisione

La precisione dei vettori 3D ottenuti dipende innanzitutto dalla consistenza del campo vettoriale stesso. Se gli spostamenti sono inferiori alla soglia di significatività del rilievo, il campo vettoriale è caotico.. Ove ci fossero degli errori su ampia scala, in parti di superficie stabili si otterrebbe un campo vettoriale omogeneo e pertanto poco plausibile. Sulla base di queste valutazioni, la soglia di significatività dei rilievi può essere fissata a 2-3cm. Questa stima è congrua, tenendo conto delle differenze tra i rilievi con TLS e con GNSS. Le differenze in tutte tre le componenti direzionali erano inferiori a 3cm. Questa analisi, tuttavia, riguarda solo il set di dati relativo al periodo 2013-14 che è stato rilevato con lo stesso scanner. Nel 2012 i rilievi sono stati eseguiti con un altro apparecchio, il che ha condotto, in parte, a significative differenze, soprattutto per quanto attiene ai piani di campagna. Abbiamo ricondotto questo risultato alla diversa divergenza degli impulsi laser. Nei rilievi in direzione di un orizzonte, l'apparecchio "LPM321", grazie alla maggiore "potenza", è stato in grado di rilevare oggetti anche nelle fasce periferiche dell'impulso laser, al contrario di quanto è avvenuto

col modello "VZ6000" dalla potenza significativamente inferiore. Di conseguenza, in questo tipo di orizzonti di misurazione - solitamente piani di campagna - si sono verificati errori di rilievo relativamente ampi.

### 3.4 Risultati

In entrambi i siti di rilievo sono stati osservati significativi movimenti di massa.

Per quanto attiene al creep del permafrost a Foura da l'Amd, è stato possibile classificare tre singoli rock glacier. La Figura 3.4.1 mostra la suddivisione semplificata delle tre strutture che sono caratterizzate da dinamiche differenti. Per una facile distinzione, i tre rock glacier sono stati denominati Ursina I-III. Gli spostamenti da cui sono interessati i tre rock glacier sono descritti qui di seguito. Figura 3.4.2 mostra il creep dei rock glacier tra il 2013 e il 2014 nonché le differenze dei modelli del terreno tra il 2013 e il 2014.



Fig. 3.4.1: Classificazione semplificata del creep del permafrost dei tre blocchi a Foura da l'amd Ursina. (Vista aerea: Swisstopo DV 033594).

La parte del rock glacier Ursina I in sinistra orografica forma una scarpata in cui si verificano i fenomeni di creep più intensi di tutta l'area, con un ordine di grandezza di 30 cm nel periodo di misurazione 2012/13 e di 40 centimetri tra 2013/14. Il fenomeno ha causato anche deformazioni del materiale roccioso (rigonfiamento nella parte inferiore, assestamento nella parte superiore) e frane con un volume di circa  $20\text{m}^2$ . Si notano chiaramente le fratture di trazione all'estremità superiore del pendio che confermano la presenza del movimento.

Per Ursina II, nel periodo di monitoraggio è stato rilevato un creep relativamente omogeneo di 3-7 cm. Anche qui, i valori più elevati sono stati registrati nel periodo 2013/14.

Per quanto riguarda la parte superiore del rock glacier Ursina III (5), nel periodo 2012/13 è stato misurato un creep di ca. 3 cm. Nel periodo 2013/14, proprio come per gli altri rock glacier, anche per Ursina III il fenomeno ha subito un'accelerazione raggiungendo un valore pari a 5 cm. Nella parte inferiore il rock glacier si biforca in due estremità. Il braccio in destra orografica, come si vede nella vista aerea nella Figura 3.4.3, riempie un avvallamento nel terreno che si sviluppa verso nord. In questo modo il rock glacier ha creato una barriera naturale, per cui adesso la sua attività è molto ridotta. Il braccio in sinistra orografica del rock glacier Ursina III nel 2013/14 si è spostato in avanti di 10 cm.

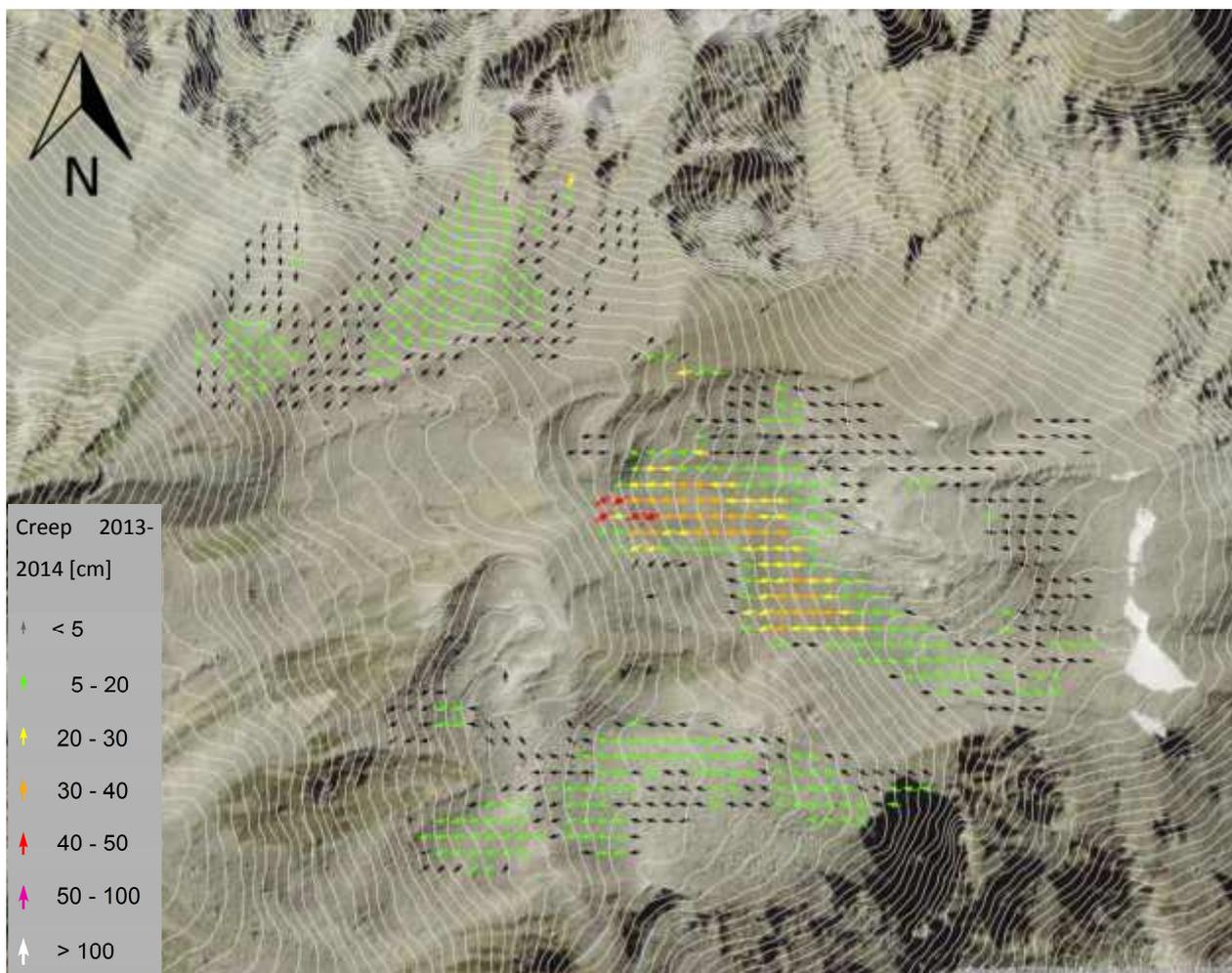


Fig. 3.4.2: Classificazione semplificata del creep del permafrost dei tre blocchi a Foura da l'amd Ursina. (Vista aerea: Swisstopo DV 033594).

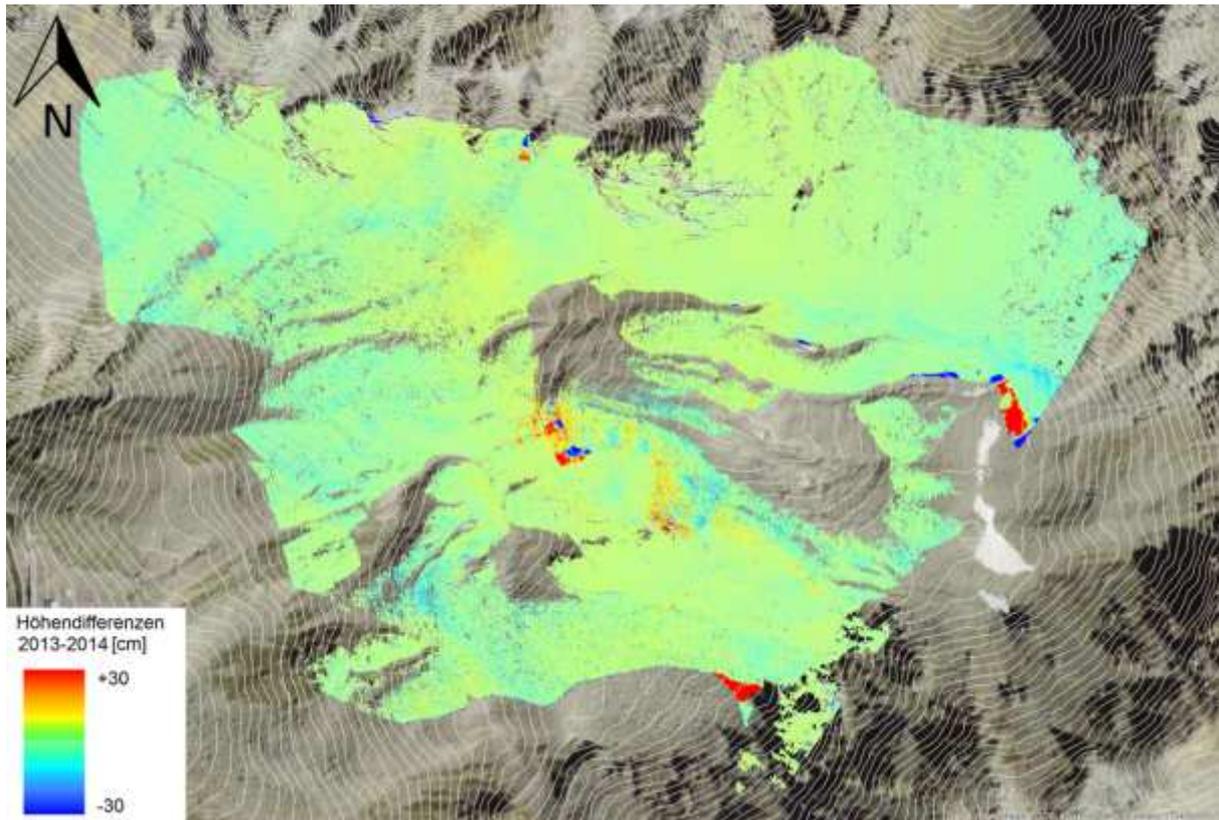


Fig. 3.4.3: Velocità di creep (sopra) e modifica plano-altimetrica (sotto) dell'attuale periodo di monitoraggi 2013-2014

Presso il punto di misurazione Steinschlagspitze, a causa dei suddetti errori, è stato possibile rilevare movimenti significativi solo tra le misurazioni eseguite con il "VZ6000". Questi si limitano a un'area limitata a nord della Steinschlagspitze (Figura 3.4.4). Qui troviamo un rock glacier che si muove di solo pochi centimetri all'anno. È stato rilevato un cedimento di una lingua del rock glacier che era evidente perfino nel confronto 2012/13, set di dati che presentava diversi vizi.

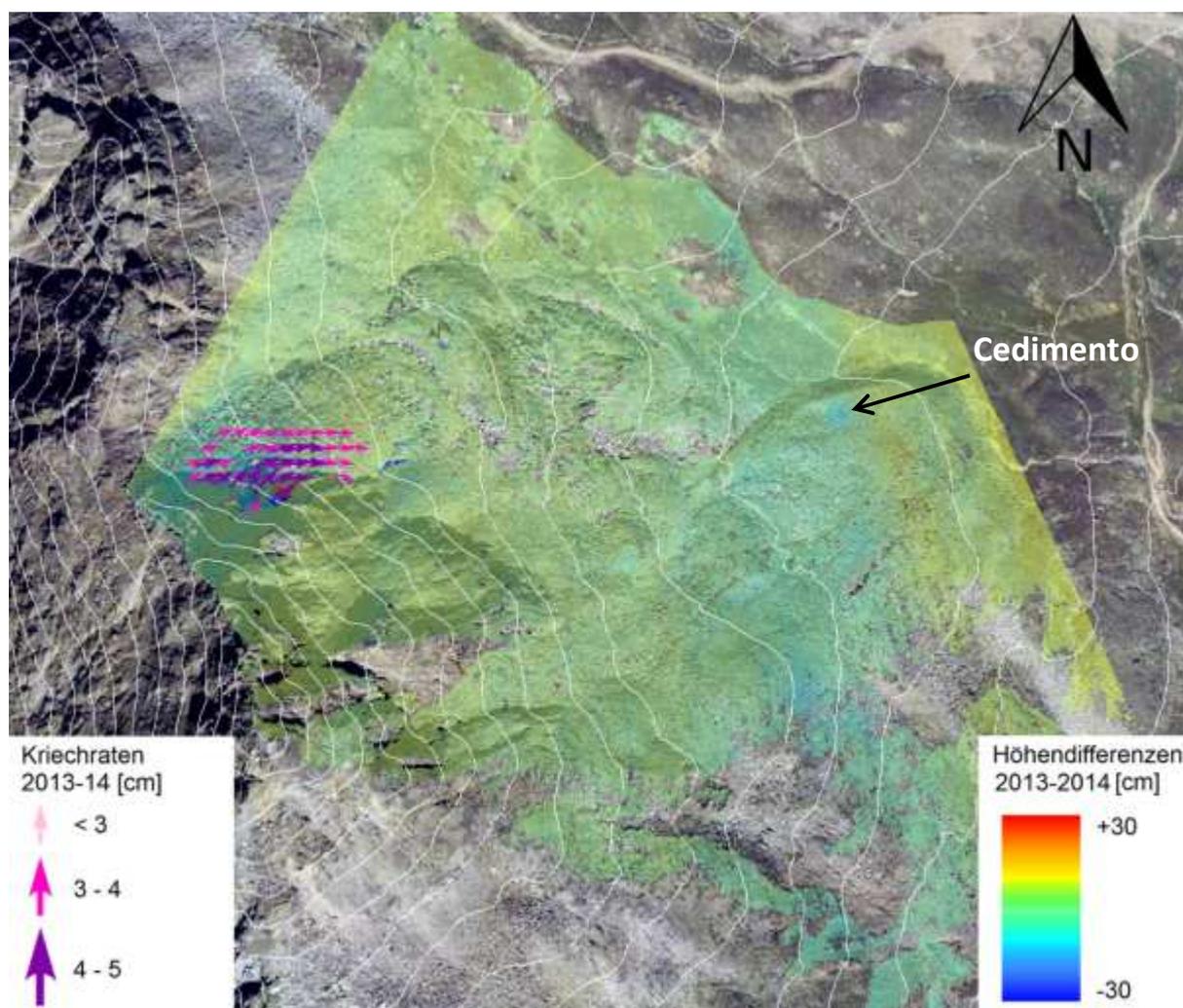


Figura 3.4.4: Variazioni rilevate presso il punto di misurazione Steinschlagspitze tra il 2013 e il 2014.

## 4. Monitoraggio con la multi-interferometria

L'utilizzo di dati satellitari SAR (Synthetic Aperture Radar) rappresenta un'opportunità rilevante sia per le possibilità di ottenere mappe di deformazione sinottiche, sia per la possibilità di operare in aree difficilmente raggiungibili. Le tecniche multi-interferometriche basate sull'interferometria differenziale SAR (DInSAR), che utilizzano tali dati per fornire serie storiche di deformazione di punti a terra e stime della velocità media degli spostamenti nella direzione di vista del satellite, sono state utilizzate con profitto in molte applicazioni, ma sono ancora un argomento di ricerca in aree quali quelle selezionate per il progetto SloMove. Ciò è dovuto alla presenza sia di forti pendenze dei versanti che di copertura nevosa in lunghi periodi dell'anno. Il primo di questi due aspetti influisce per il fatto che i sensori SAR devono avere una visione laterale e non nadirale per poter distinguere bersagli diversi in modo non ambiguo, il secondo agisce sulla decorrelazione temporale della scena che può rendere impossibile ricavare la serie storica delle deformazioni. Il presente paragrafo fa riferimento a quanto precedentemente riportato nel **D.3.02, Capitolo 2.1** per quanto riguarda la descrizione particolareggiata della tecnica interferometrica.

Dato questo insieme di considerazioni, per le due aree è stata fatta un'analisi preliminare dei possibili angoli di vista delle acquisizioni satellitari in modo da scegliere modalità di acquisizione compatibili con le aree selezionate in Val Senales e a Schafberg; inoltre si è scelto di concentrare le acquisizioni satellitari nei periodi di assenza di copertura nevosa. Quest'ultima scelta richiede la selezione di un satellite che permetta di acquisire un elevato numero di dati in un periodo limitato di tempo, in quanto per poter applicare le tecniche multi-interferometriche efficacemente occorrono ragionevolmente almeno 20 immagini SAR (Colesanti et al., 2003). Tale considerazione ha portato a scegliere i dati della costellazione COSMO-SkyMed promossa dall'Agenzia Spaziale Italiana e dal Ministero della Difesa, costituita da quattro satelliti, ognuno dei quali avente un periodo di ripetizione di 16 giorni. In particolare sono stati selezionati dati in modalità stripmap HIMAGE con 3 metri di risoluzione nominale (vedi tabella 1).

	Modalità acquisizione	Beam	Center Scene Off-Nadir Angle [degrees]
Senales	H4-04	Ascending	29,09
Schafberg	H4-05	Descending	30,62

*Tabella 1. Caratteristiche dei dati COSMO-SkyMed selezionati per il progetto SloMove*

## 4.1 Processamento delle immagini

di Giovanni Cuzzo

Fra i possibili algoritmi multi-interferometrici disponibili ci si è indirizzati sulla tecnica SBAS (Small Baseline Subset) sviluppata dal CNR-IREA di Napoli (Lanari et al., 2004). Questa è una tecnica che permette un'analisi distribuita dell'area in esame, il che ben si adatta alle aree test del progetto SloMove, che presentano scarsa o assente vegetazione (e quindi una buona correlazione spaziale dell'area) e presenza di rocce che possono fungere da riflettori naturali. Inoltre, tale scelta ha reso possibile l'inizio di una collaborazione con il CNR-IREA che è stato incaricato di svolgere le elaborazioni e di fornire una formazione di base al personale partecipante al progetto.

La pianificazione delle acquisizioni è cominciata per il periodo estivo dell'anno 2013 con l'obiettivo di ottenere una periodicità di acquisizione dei dati di 8 giorni. Purtroppo la bassa priorità dei progetti di ricerca rispetto ad altre applicazioni ha fatto sì che solo un numero molto limitato dei dati pianificati sia stato effettivamente acquisito e utilizzato nel progetto. Per superare questo problema si è fatto il tentativo di integrare i dati pianificati negli anni 2013 e 2014 con i dati di archivio disponibili nel 2012. Nella tabella 2 sono riassunti tutti i dati acquisiti sui due siti per il progetto SloMove. Si noti che per il 2014 non sono state acquisite immagini su Senales in quanto nei primi due mesi del periodo estivo 2014, per motivi di priorità, sono state rigettate tutte le acquisizioni pianificate e il restante periodo, presumibilmente libero da copertura nevosa, non risultava sufficiente a raggiungere un numero di dati adeguato agli algoritmi multi-interferometrici. Di conseguenza dopo questi due mesi sono state annullate le successive acquisizioni già pianificate per evitare costi superflui.

	2012	2013	2014
Schafberg	5	8	9
Senales	5	7	-

Tabella 2. Numero di dati COSMO-SkyMed acquisiti per il progetto SloMove

La maggiore criticità del dataset in esame è legata all'esiguo numero di scene SAR a disposizione. Un'analisi DInSAR avanzata con le accuratezze descritte in letteratura (Casu et al., 2006) richiede almeno 25 immagini, acquisite con una certa regolarità temporale. In questo caso le immagini sono state tutte raccolte nei periodi estivi dei diversi anni. Questa distribuzione delle acquisizioni ha portato ad avere interferogrammi con baseline temporali di diversi mesi (corrispondenti agli interferogrammi tra un anno e il successivo), che risultano essere particolarmente critici a causa della

decorrelazione temporale. D'altra parte, eseguire analisi stagionali relative a singoli anni ha presentato il problema di dover eseguire elaborazioni con meno di 10 scene.

A queste forti criticità del dataset va aggiunto il problema del filtraggio degli effetti atmosferici. La rimozione di questo segnale avviene utilizzando filtri spaziali e temporali con finestre diverse, basati sulla considerazione che la parte del segnale influenzata dall'atmosfera è in genere molto variabile tra le varie acquisizioni e che, di conseguenza, un numero maggiore di dati acquisiti con regolarità permette di isolare in modo più efficace questa componente. Nel caso in esame, il ridotto numero e la particolare distribuzione delle scene SAR non consente un'accurata rimozione degli effetti atmosferici.

Infine, il fenomeno deformativo in esame (movimenti temporalmente veloci, caratterizzati da significative accelerazioni, e molto localizzati nello spazio) è, in generale, al limite del campo di applicazione della tecnica DInSAR e risulta essere ancora più critico nel caso particolare, sempre a causa della distribuzione delle acquisizioni SAR. Da un punto di vista puramente teorico, questo tipo di fenomeni richiede, perché possano essere opportunamente misurati, un'alta ripetizione nelle acquisizioni SAR (1 scena ogni 8 giorni come stabilito in fase di pianificazione delle acquisizioni) in modo tale da riuscire a identificare correttamente anche le componenti non lineari del segnale temporale.

Nonostante le criticità sopra evidenziate, si è comunque lavorato con il dataset a disposizione; è stata applicata la tecnica Small Baseline Subset (SBAS) a bassa risoluzione spaziale (che risente in modo meno critico dei problemi descritti per il dataset disponibile), la quale genera mappe di velocità e serie storiche di deformazione con una risoluzione spaziale, nel caso in esame, di circa 30 m. Come già detto, non è stato assolutamente possibile ricavare misure affidabili relative agli spostamenti invernali (da novembre fino a giugno).

## 4.2 Risultati delle elaborazioni dei dati SAR

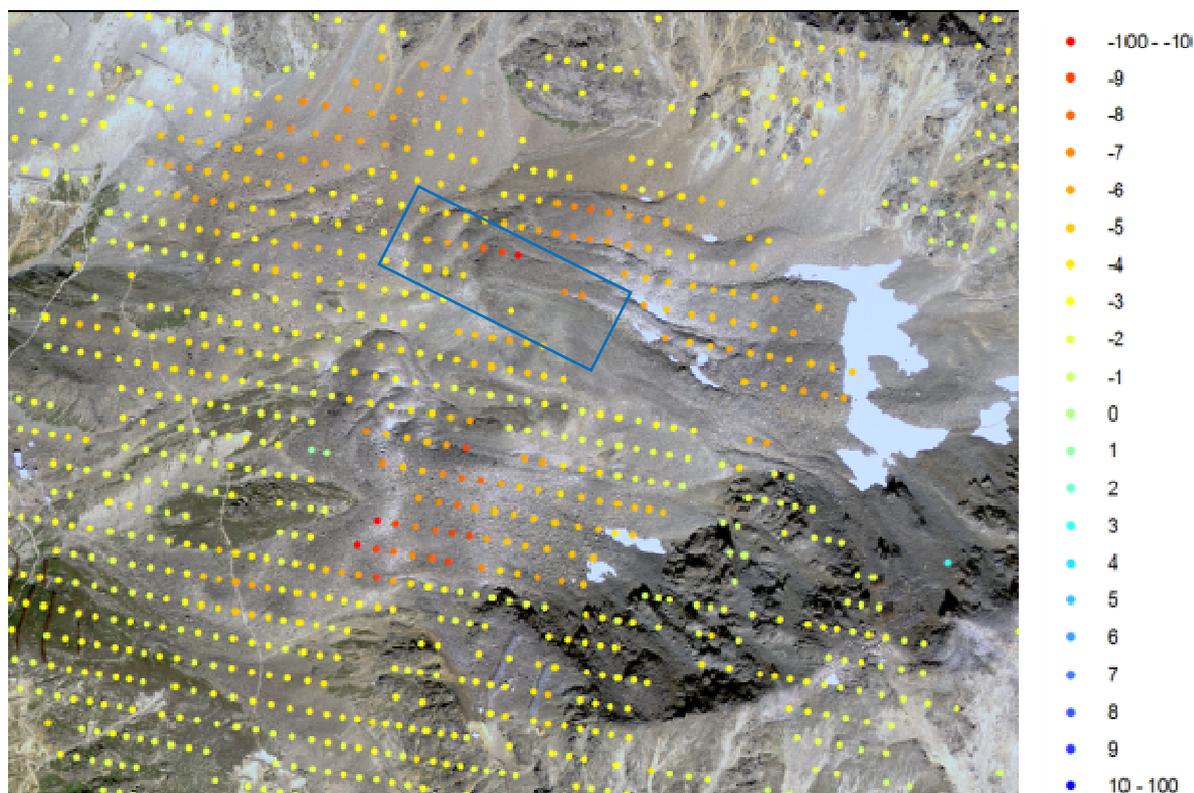


Fig. 4.2.1: risultato processamento immagini SAR 2013, velocità mm/anno. Nel riquadro blu si mette in evidenza un'area priva di dati SAR, dovuta probabilmente ad elevate velocità di deformazione.

Nelle Figure 4.2.1-2 sono riportati i risultati del processamento delle immagini Cosmo dell'estate 2013. Nell'immagine in Fig. 4.2.1, tramite una semplice analisi visiva, si individuano le aree a maggiore deformazione (colore rosso dei punti). Inoltre, supportando l'analisi con le maschere di distorsione prospettica (Deliverable 3.02), si possono valutare qualitativamente i dati ed individuare le zone dove l'assenza di informazioni è riconducibile a perdita di coerenza del dato o ad altri fattori. L'assenza di informazione dovuta a perdita di coerenza dell'informazione è riconducibile, nel presente caso, ad elevate velocità di deformazione e ad un numero limitato di immagini elaborate (vedi Cap. 4).

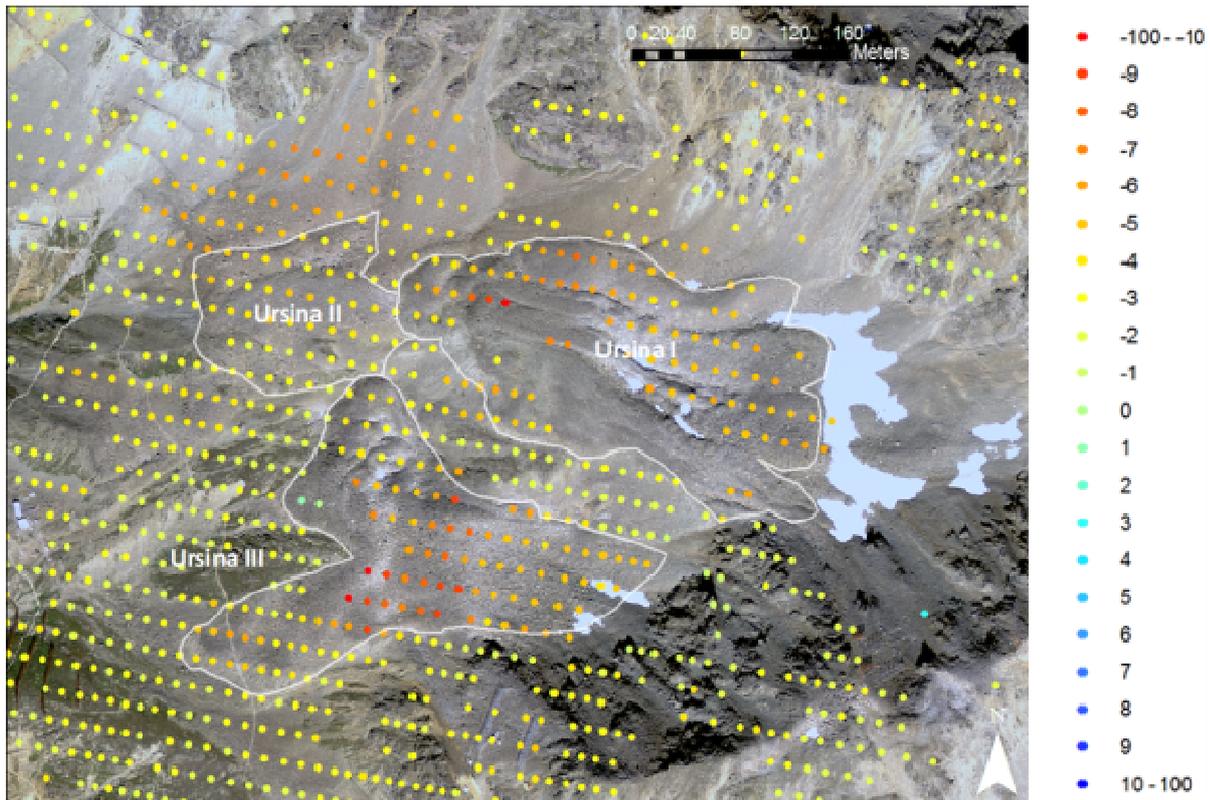


Fig. 4.2.2. – Risultato processamento dati SAR estate 2013 e perimetro rock glacier Ursina

In Figura 4.2.2 sono stati aggiunti alla mappa i limiti perimetrali dei rock glaciers Ursina: sulla base dei dati GNSS e TLS precedentemente descritti, si può affermare che la distribuzione spaziale dei campi di deformazione dei dati SAR è perfettamente coerente e compatibile con quanto rilevato dalle due tecnologie impiegate.

## 5. Confronto ed integrazione

La possibilità di disporre per uno stesso fenomeno di dati derivanti da tecniche di monitoraggio differenti per risoluzione, precisione ed accuratezza, e tipologia stessa di informazione, come la dimensione di riferimento del vettore spostamento, permette:

- a) Di ottenere un modello molto più dettagliato ed accurato del processo in studio;
- b) Di poter validare le informazioni a disposizione e comprendere meglio la significatività del dato ottenuto dalle differenti tecniche;
- c) Di poter **integrare** le tecniche di misura:
  1. Per ottenere, in riferimento ad un determinato periodo di tempo, un multi-prodotto integrato più rappresentativo del fenomeno stesso;
  2. Per impiegare, nello studio di un fenomeno deformativo del terreno, la tecnica di monitoraggio più idonea in una precisa fase evolutiva del fenomeno stesso; per poter integrare tutti i dati disponibili, anche non contemporanei, per ottenere serie storiche continue di deformazione.
  3. In riferimento al punto n. 2, per proporre sistemi di monitoraggio gestibili a lungo termine e sostenibili economicamente.

Il **confronto, o comparazione**, di informazioni provenienti dall'impiego di tecniche di monitoraggio differenti in una stessa area, implica l'analisi dei risultati ottenuti singolarmente al fine di rilevare differenze e similitudini. Nello studio di un fenomeno spesso si comparano dati provenienti da tecniche di misura che forniscono informazioni differenti, come quando si confrontano dati da remoto con dati puntuali in sito. Il concetto di **integrazione** implica non solo un confronto tra dati, e una validazione reciproca, ma anche una assimilazione delle diverse informazioni allo scopo di ottenere un unico prodotto finale.

In entrambi i casi, che si parli di confronto o di integrazione, è significativo disporre di dati ben georeferenziati e riconducibili alla stessa dimensione spaziale.

## 5.1 Proiezione di un generico vettore spostamento lungo la Linea di Vista (LoS) del satellite

Con l'obiettivo di comparare, validare ed integrare i risultati delle misure i dati devono essere riferiti alla medesima dimensione.

Data l'impossibilità di ricondurre alle 3 dimensioni un dato monodimensionale come il dato SAR, nel quale le indicazioni di spostamento sono riferite alla direzione di vista del satellite (Line of Sight), i dati GNSS e TLS sono stati riproiettati lungo la LoS. Qui di seguito si descrive il metodo impiegato per riproiettare lungo la LoS i dati GNSS e TLS.

### 5.1.1 Proiezione di uno spostamento generico lungo la LoS

di Mattia Callegari

Dati due vettori  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ , e  $\alpha$  l'angolo tra  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  (Fig. 5.1.1.1), la proiezione scalare  $s$  di  $\mathbf{a}$  su  $\mathbf{b}$  è data da:

$$|a| \cos \theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{b}|} = \alpha \cdot \hat{\mathbf{b}}$$

dove l'operatore  $\cdot$  indica il prodotto scalare,  $|\mathbf{a}|$  e  $|\mathbf{b}|$  sono la lunghezza di  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  rispettivamente, e  $\hat{\mathbf{b}}$  è il vettore unitario nella direzione di  $\mathbf{b}$ .

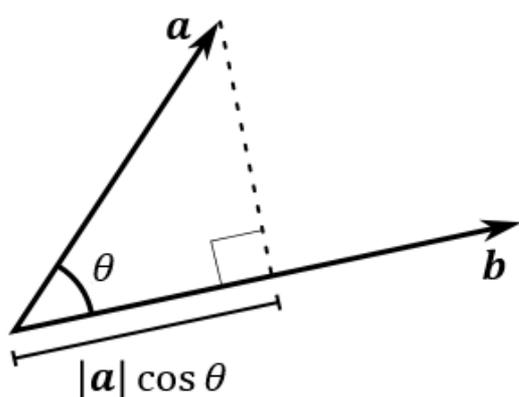


Fig. 5.1.1.1 - Rappresentazione grafica della proiezione del vettore  $\mathbf{a}$  su  $\mathbf{b}$

Nel caso della proiezione di uno spostamento generico lungo la linea di vista (LoS) del satellite, in accordo con (1), abbiamo che il vettore  $\mathbf{a}$  è il vettore che definisce lo spostamento generico e  $\hat{\mathbf{b}}$  è il versore corrispondente alla direzione di LoS con verso positivo dalla posizione del satellite verso terra.

### 5.1.2 Calcolo del vettore unitario LoS

Identificata con  $\kappa$  l'inclinazione dalla direzione  $z$ , e con  $\varphi$  l'angolo di azimut misurato dall'asse  $x$  cartesiano (in modo che l'asse  $y$  sia  $\varphi = +90^\circ$ ) il versore  $\hat{b} = (b_x, b_y, b_z)$  può essere scritto usando le coordinate sferiche  $(r, \kappa, \varphi)$ , si veda Fig. 5.1.2.1 :

$$\begin{cases} b_x = r \sin \kappa \cos \varphi \\ b_y = r \sin \kappa \sin \varphi \\ b_z = r \cos \kappa \end{cases} \quad (2)$$

$r$  è uguale a 1 dato che  $\hat{b}$  è un vettore unitario. L'angolo  $\kappa$  è uguale a  $\pi - \theta_1$  dove  $\theta_1$  è l'angolo di vista del satellite. L'angolo  $\varphi$  è uguale a  $-\gamma$  per la configurazione ascendente right-looking (o discendente left-looking), e uguale a  $\pi - \gamma$  per una configurazione discendente right-looking (o ascendente left-looking).  $\gamma$  è l'angolo di orbita misurato rispetto al nord (asse  $y$ ) verso est (cosicché l'est, asse  $x$ , sia  $\gamma = +90^\circ$ ). Quindi, sostituendo in (2), per una configurazione right-looking (o discendente left-looking), otteniamo:

$$\begin{cases} b_x = \sin \theta_1 \cos \gamma \\ b_y = -\sin \theta_1 \sin \gamma \\ b_z = -\cos \theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

Per una configurazione discendente right-looking:

$$\begin{cases} b_x = -\sin \theta_1 \cos \gamma \\ b_y = \sin \theta_1 \sin \gamma \\ b_z = -\cos \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

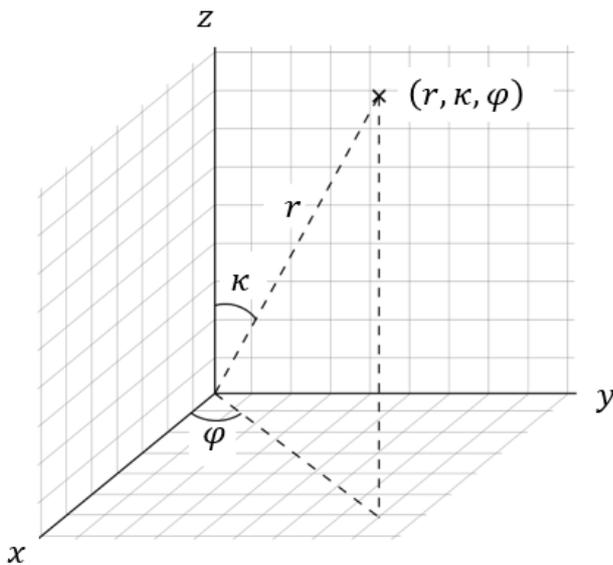


Fig. 5.1.2.2 - Rappresentazione delle coordinate sferiche  $(r, \kappa, \varphi)$  nello spazio cartesiano  $x, y, z$  con l'origine al satellite

### 5.1.3 Calcolo della proiezione scalare $s$

La proiezione  $s$  di un generico vettore spostamento  $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$  può essere dunque calcolata usando (1). In particolare per le due configurazioni orbitali:

- 1) Per la configurazione ascendente right-looking (o discendente left-looking):

$$s = d_x \sin \vartheta_l \cos \gamma - d_y \sin \vartheta_l \sin \gamma - d_z \cos \vartheta_l$$

- 2) Per una configurazione discendente right-looking (o ascendente left-looking):

$$s = -d_x \sin \vartheta_l \cos \gamma + d_y \sin \vartheta_l \sin \gamma - d_z \cos \vartheta_l$$

In riferimento a Fig. 5.1.2.2, per entrambe le equazioni si considera che i valori positivi risultanti dalla proiezione indichino uno spostamento concorde con l'azimut della linea di vista, mentre quelli negativi indichino spostamenti nella direzione opposta. **Per la comparazione con i prodotti standard della multi-interferometria tutti i segni delle equazioni sopra descritte devono essere invertiti.**

Per una migliore riproiezione dei dati GNSS e TLS lungo la LoS, si è valutato per ogni punto a terra l'angolo di vista  $\vartheta_l'$ . Questa operazione necessita di informazioni reperibili su internet (come H del satellite) e sui report di consegna dei dati satellitari (come l'angolo di vista al near range e rispettive coordinate). I calcoli di riproiezione sono stati condotti in ambiente Excel.

Il calcolo dell'angolo  $\vartheta_l'$  presuppone che siano noti:

- angolo di vista al near range  $\theta_n$ ;

- coordinate  $x_{near}$  e  $y_{near}$ ;
- H, altezza di orbita del satellite;
- coordinate del punto a terra  $(x_p, y_p)$  nel quale si vuole calcolare il  $\vartheta_i'$ .

Dove:

$$\vartheta_i' = \text{Arctan} ((a+b)/H)$$

$$a = (\text{Tan}(\theta_n) * H)$$

$$b = (y_p - (m * x_p) - q) / \sqrt{1 + m^2}$$

$$m = \text{Tan}(\theta_n)$$

$$q = y_{near} - (m * x_{near})$$

## 6. Confronto tra TLS e GNSS

Nel presente capitolo si affronta il confronto effettuato tra i dati TLS e GNSS. L'analisi è stata condotta partendo dal presupposto che la tecnica GNSS differenziale rappresenti la misura di "riferimento", in quanto caratterizzata da maggiore precisione nelle tre dimensioni. Infatti i dati GNSS e TLS forniscono informazioni del vettore spostamento lungo le 3 componenti  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e per questo motivo possono essere confrontati direttamente; il dato GNSS è tuttavia riferito ad un "punto", mentre il dato TLS rappresenta il valore medio di un'area.

### 6.1 Rideterminazione dei dati TLS in funzione delle misure GNSS

*di Marcello Pettita*

In questo capitolo si analizzeranno alcuni metodi per confrontare i dati raccolti nell'area test svizzera:

1. Misure GNSS differenziali in post-processing: sono state eseguite 4 rilevazioni su 16 punti GNSS alle seguenti date: 18/9/2012; 24/7/2013, 29/8/2013, 23/9/2013
2. TLS: tramite Terrestrial Laser Scanner (TLS) sono state effettuate 2 campagne di misure, una nell'agosto 2012 e l'altra nell'agosto 2013.

La rideterminazione del dato TLS implica una nuova stima del dato stesso in funzione dell'informazione ottenuta dalle misure GNSS. L'obiettivo è tentare di ottenere informazioni tra di loro comparabili nel modo più attendibile possibile.

Si parte dall'ipotesi che i dati GNSS acquisiti in modalità differenziale in post-elaborazione rappresentino una misura più accurata, e che le misure del campo di spostamento ( $\vec{I}_{GPS}$ ) e di velocità ( $\vec{V}_{GPS}$ ) del singolo punto monitorato siano state condotte con maggiore frequenza rispetto alle singole misure annuali del TLS. Lo scopo è di impiegare le misure puntuali del GNSS per correggere e migliorare la nuvola di dati di spostamento ( $\vec{I}_{TLS}$ ) e di velocità ( $\vec{V}_{TLS}$ ) del TLS. I vettori spostamento ( $\vec{I}_{TLS}$ ) sono calcolati come la distanza euclidea tra due vettori posizione a due differenti istanti temporali. Analogamente i vettori velocità ( $\vec{V}_{TLS}$ ) sono stati calcolati come il rapporto tra il vettore spostamento ed il tempo intercorso tra i due intervalli di misura, producendo quindi come risultato una velocità media per l'intero periodo in considerazione (che è per ambo i casi 1 anno).

Come prima analisi si selezionano i punti GNSS che si trovano all'interno del dominio del TLS e si escludono tutti quei punti ubicati esternamente a questo dominio, in quanto troppo lontani da punti

TLS. Si deve inoltre considerare che ogni punto TLS è rappresentativo di un'area quadrangolare di

circa 10 m di lato. La selezione dei punti TLS da confrontare con i dati GNSS (o viceversa) ha seguito 2 metodi paralleli:

- Metodo 1: si è selezionato il punto TLS più vicino al punto GNSS secondo la norma euclidea.
- Metodo 2: si sono selezionati tutti i punti TLS presenti in un intorno di raggio  $\rho_{GNSS}$  del punto di monitoraggio GNSS e il loro valore è stato mediato con media semplice.

I risultati dei due metodi per i vettori spostamento ( $\vec{T}_{GNSS}$ ) e ( $\vec{T}_{TLS}$ ) sono presentati in **figura 5.1.1 1a** per il **metodo 1** e in **figura 5.1.1 1b** per il **metodo 2**. In **figura 5.1.1 1c** (metodo 1) e **figura 5.1.1 1d** (metodo 2) sono raffigurati i grafici di dispersione (per verificare la corrispondenza tra due set di  $d$  comparabili) per le velocità medie ( $\vec{V}_{GNSS}$ ) e ( $\vec{V}_{TLS}$ ). Nelle figure viene inoltre mostrata la retta di correlazione lineare (retta di fit, in blu scuro) tra le osservazioni e l'intervallo di confidenza del 95% (intervallo di valori plausibili per quel parametro), l'area ombreggiata in viola, del fit stesso.

Al fine di avere una misura oggettiva della bontà dell'ipotesi di linearità, del fit e dell'incertezza associata alla misura, in tabella 6.1.1 sono riportati i valori del coefficiente di correlazione lineare (due variabili sono in correlazione lineare quando la dipendenza di una dall'altra può esprimersi con buona approssimazione mediante una legge lineare, ossia mediante l'equazione di una retta, per l'appunto  $y = bx + a$ ), l'errore quadratico medio, lo  $R^2$ , i risultati dell'F test e i valori dei coefficienti del fit.

Si può osservare come l'effetto dell'utilizzo di più punti in un intorno del GNSS diminuisca in maniera significativa l'incertezza, aumentando la significatività della relazione lineare e lasciando solo due punti fuori dall'intervallo di confidenza. Da un punto di vista metodologico, l'utilizzo della media ha lo scopo di eliminare e attenuare l'errore associato alla misura TLS. Va infatti ricordato che l'errore sulla media è funzione dell'inverso della radice del numero di punti e che di conseguenza l'effetto cumulato sulla propagazione dell'errore è quello di diminuire di un fattore  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  l'incertezza sulla media stessa. Da un punto di vista fisico permette di evitare che singoli errori di misura si ripercuotano negativamente sulla stima della relazione lineare. Si deve infine notare che, con l'esclusione dei valori di intercetta e di RMSE, gli altri valori, poiché non dipendenti dalla scala del sistema e dal suo valore assoluto, sono uguali ai vettori spostamento e a quelli di velocità, essendo questi ultimi una combinazione lineare (media aritmetica) dei primi.

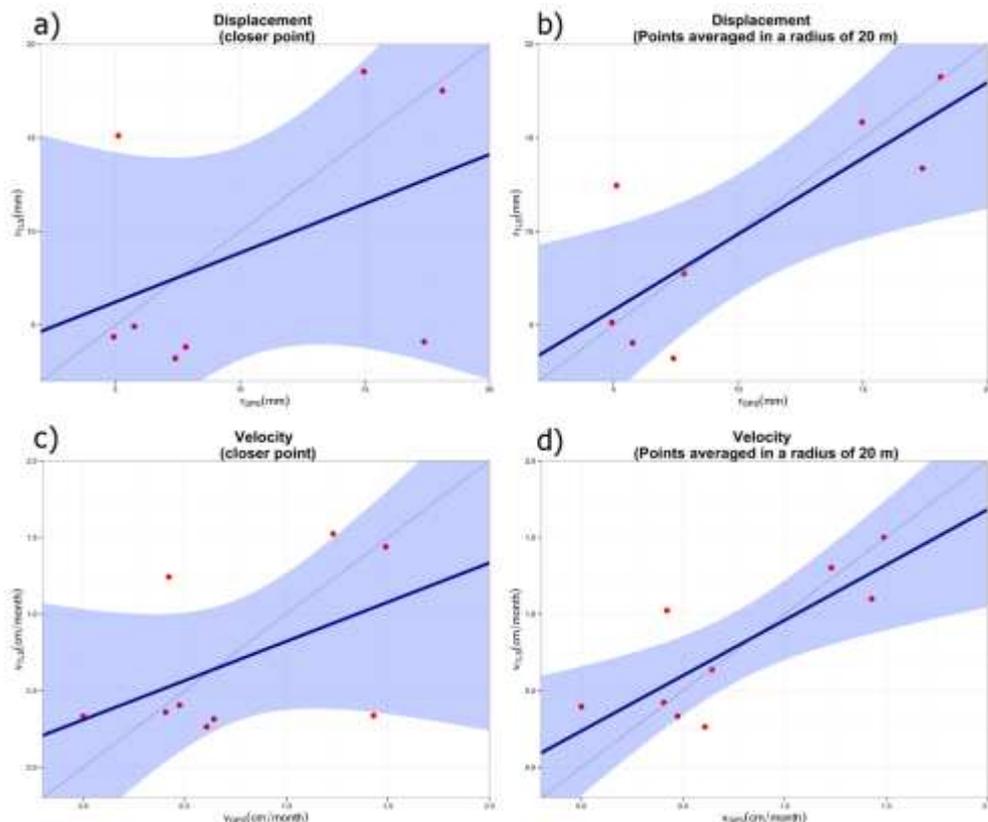
	COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	RMSE	INTERCETTA	COEFF. ANGOLARE	R <sup>2</sup>	F TEST (P<5%)
SPOSTAMENTO (CASO 1)	<b>0.49</b>	<b>0.51</b>	<b>3.77</b>	<b>0.51</b>	<b>0.24</b>	<b>NO P&lt;0.18</b>
SPOSTAMENTO (CASO 2)	<b>0.81</b>	<b>0.29</b>	<b>2.89</b>	<b>0.72</b>	<b>0.65</b>	<b>SI P&lt;0.01</b>
VELOCITÀ (CASO 1)	<b>0.49</b>	<b>6.15</b>	<b>0.31</b>	<b>0.51</b>	<b>0.24</b>	<b>NO P&lt;0.18</b>
VELOCITÀ (CASO 2)	<b>0.81</b>	<b>3.52</b>	<b>0.24</b>	<b>0.72</b>	<b>0.65</b>	<b>SI P&lt;0.01</b>

*Tabella 6.1.1- Risultati della regressione lineare tra spostamenti e velocità GNSS e TLS per i due metodi (punto più vicino – media dei punti in un intorno). Si vede come l'utilizzo della media dei punti in un certo intorno (righe 2 e 4) fornisca risultati più significativi statisticamente, come mostrato dall'incremento del coefficiente di correlazione, dell'R2 e della significatività del test f.*

Per verificare e misurare la bontà dell'ipotesi lineare fatta, si è proceduto con una cross-validazione utilizzando questo modello. Per la validazione si è proceduto nel seguente modo:

1. Si sono considerati i dati di origine ottenuti con le medie all'interno di un intorno del GNSS (metodo 2)
2. Si sono ripetuti 8 test lineari escludendo ogni volta uno degli 8 punti GNSS utilizzati
3. Si è confrontato il valore del punto GNSS escluso con la sua predizione ottenuta dal fit

Tipica validazione in statistica (Grafici 6.1.2): i risultati del test di cross-validazione sia per i vettori spostamento che per i vettori velocità mostrano che i punti che già inizialmente si trovavano all'esterno dell'intervallo di confidenza, sono quelli che influenzano negativamente il fit lineare e che quindi presentano un comportamento non lineare.



Grafici. 6.1.2: Scatter plot per i diversi metodi: a) Scatter plot tra i vettori spostamento del GNSS ( $assex$ ) e il TLS ( $assey$ ) considerando solo il punto TLS più vicino al ricevitore GNSS. b) Scatter plot tra i vettori spostamento del GNSS ( $assex$ ) e il TLS ( $assey$ ) considerando tutti i punti TLS in un intorno del ricevitore GNSS di 20m c) Scatter plot tra i vettori spostamento del GNSS ( $assex$ ) e il TLS ( $assey$ ) considerando tutti i punti TLS in un intorno del ricevitore GNSS di 20m. d) Scatter plot tra i vettori spostamento del GNSS ( $assex$ ) e il TLS ( $assey$ ) considerando tutti i punti TLS in un intorno del ricevitore GNSS di 20m. Per tutti i grafici la retta in blu è il fit lineare, quella in grigio è la bisettrice degli assi e l'area in celeste è l'intervallo di confidenza del fit (0.95)

Concludendo, al fine di ottenere un dato TLS corretto sulla base delle misure puntuali GNSS, è necessario partire dalla formula utilizzata per la regressione lineare:

$$\begin{cases} \vec{r}_{TLS} = \alpha \vec{r}_{GPS} + \beta \\ \vec{v}_{TLS} = \phi \vec{v}_{GPS} + \chi \end{cases}$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono rispettivamente il coefficiente angolare e l'intercetta per  $\vec{r}_{GPS}$  e  $\phi$  e  $\chi$  lo sono per  $\vec{v}_{GPS}$ . Invertendo poi i termini si ottiene:

$$\begin{cases} \vec{r}_{GPS} = \frac{1}{\alpha} (\vec{r}_{TLS} - \beta) \\ \vec{v}_{GPS} = \frac{1}{\phi} (\vec{v}_{TLS} - \chi) \end{cases}$$

dove con l'apice si intendono i vettori spostamento e velocità corretti secondo il modello lineare.

### 6.1.1 Risultati della rideterminazione del dato TLS

In Figura 6.1.1.1 si riportano i risultati della rideterminazione del dato TLS per l'area test svizzera.

La correzione del dato è avvenuta considerando i parametri di intercetta e coefficiente angolare indicati nel campo SPOSTAMENTO (Caso 2) della Tabella 4.1 e che presenta un più alto coefficiente di correlazione (0.81). Per la determinazione dei nuovi vettori TLS si è lavorato in ambiente Excel e i dati sono stati riportati su un GIS.

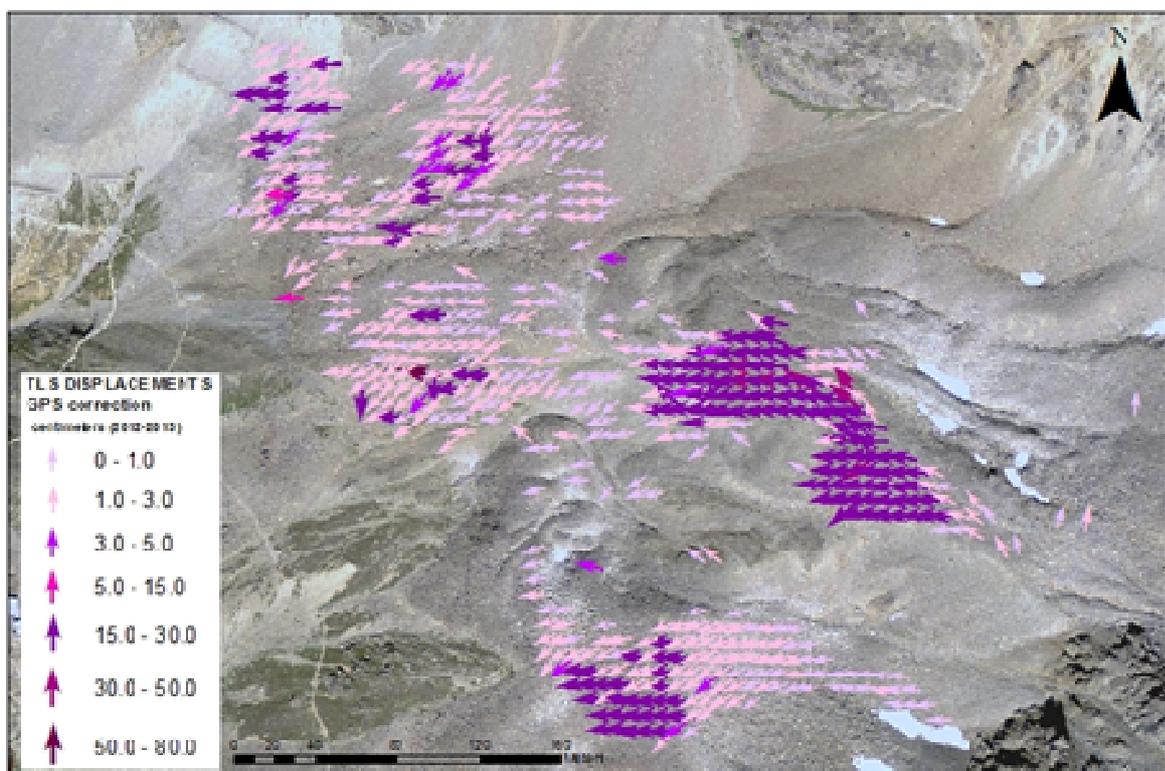


Fig. 6.1.1.1 - Risultato della rideterminazione del dato TLS

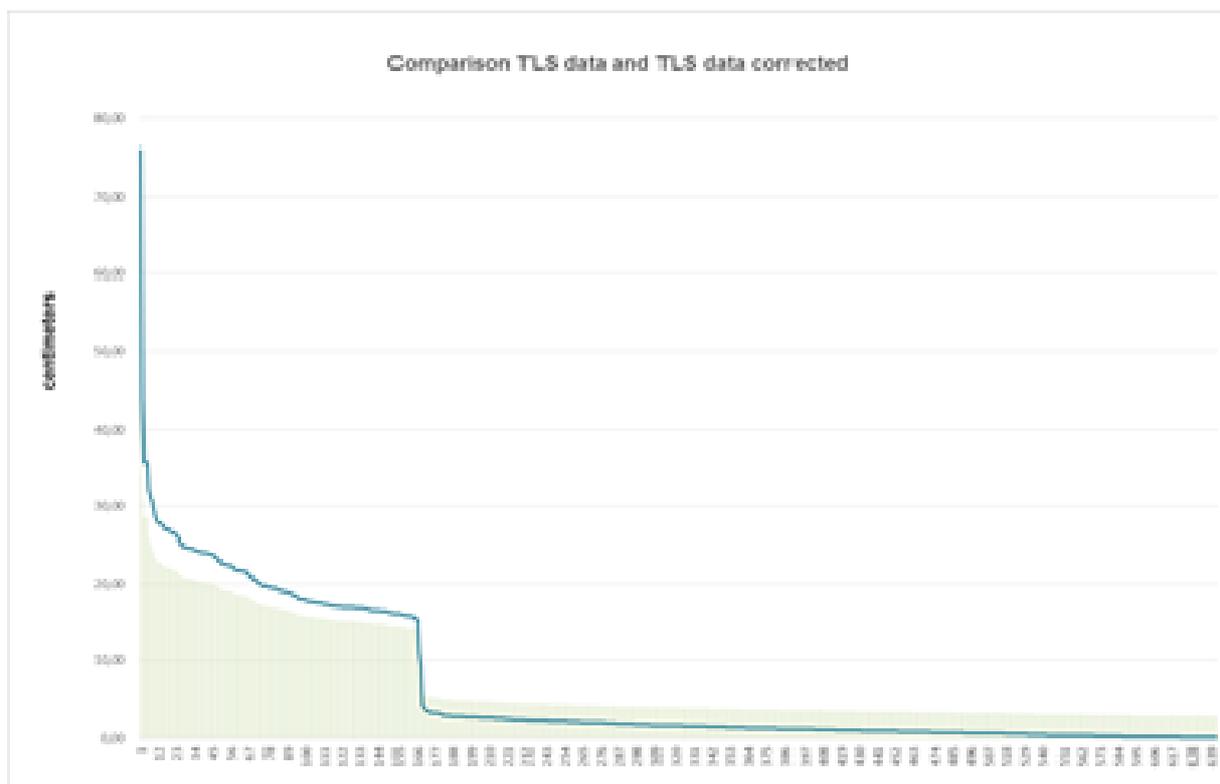


Grafico 6.1.1.2 - Il rapporto tra i vettori spostamento originali (grigio) e corretti (linea e blu) è rappresentato nel Grafico 5.1.2.2.

La rideterminazione del dato TLS non ha implicato una modifica nella distribuzione dei campi di deformazione come definiti e rilevati dal dato originale. L'elaborazione statistica effettuata ha portato, tramite una correlazione lineare, ad un "adeguamento" del dato TLS rispetto a quanto rilevato dal dato GNSS. Questa tecnica presenta grandi vantaggi nel momento in cui i dati TLS siano affetti da errori consistenti nella stima degli spostamenti. Nell'ambito del progetto, grazie anche ad un buon processamento dei dati sia TLS che GNSS, è risultato più significativo impiegare i dati nella loro integrità. Nel capitolo successivo infatti sarà presentato il confronto tra i dati non modificati TLS e GNSS.

## 6.2 Confronto tra i risultati GNSS e TLS

Nel presente capitolo si riporta il **confronto** eseguito tra i risultati delle misure GNSS e TLS nei periodi 2012-2013 e 2013-2014.

### 6.2.1 Periodo 2012-2013

In Fig. 6.2.1.1 si visualizza la sovrapposizione dei risultati 2012-2013 per entrambe le tecniche. In generale i range di velocità rilevati appaiono coerenti, come pure la distribuzione dei campi di SloMove

velocità. Le differenze (Fig. 6.2.1.2), dell'ordine del decimetro nella componente orizzontale dello spostamento, ed in quota (lungo la componente  $z$ ), con differenze centimetriche, non sono da attribuire ad errori nell'elaborazione o nell'acquisizione dei dati, ma sono attribuibili alle caratteristiche di acquisizione delle informazioni proprie di ogni tecnologia.

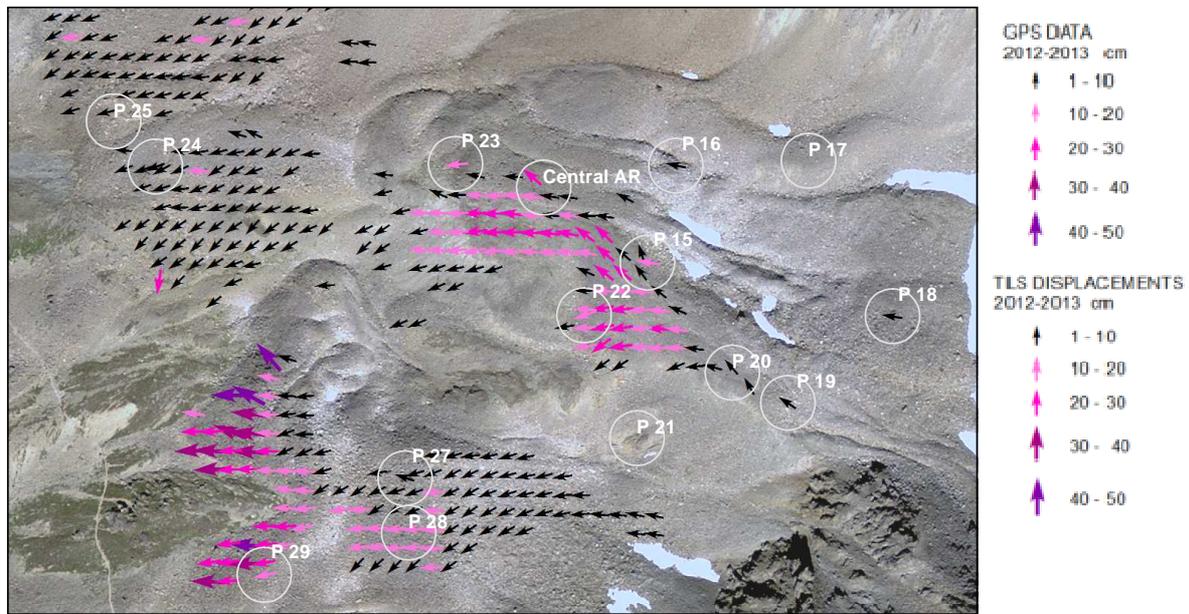


Fig. 6.2.1.1 – Confronto spostamento 2D GNSS e TLS – 2012/2013

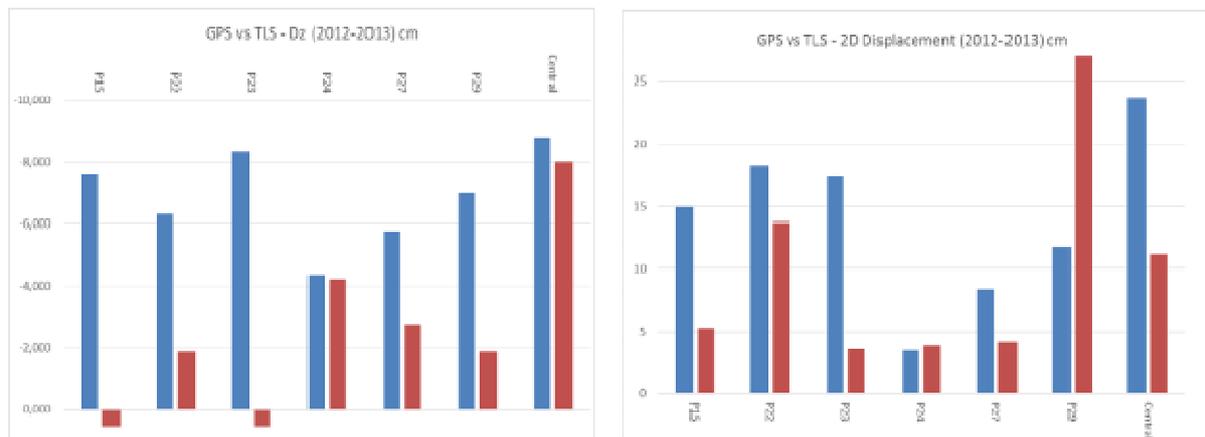


Fig. 6.2.1.2 – Confronto ( $s_x$ ) tra la componente  $\Delta z$  e ( $s_x$ ) tra il vettore spostamento 2D, rilevati dal GPS e dal TLS nel periodo 2012. In rosso il dato GNSS ed in blu il dato TLS

La proprietà puntuale del dato GNSS, molto accurata ma talvolta poco rappresentativa del complesso sistema in studio, viene messa a confronto con una informazione mediata e rappresentativa di un'area. Come descritto nel **Capitolo 3.2**, il processamento del dato TLS è stato condotto in modo da ottenere una informazione comparabile, il più possibile in modo attendibile, con il dato GNSS. La

proprietà spaziale del dato TLS fornisce dati meno accurati ma più rappresentativi del sistema in esame, fornendo informazioni anche in aree non coperte dal dato GNSS.

### 6.3.1 Periodo 2013-2014

Nel periodo 2013-2014, quello che si nota è l'assenza di informazioni TLS su aree rilevate nel periodo 2012-2013; questo è possibilmente dovuto a problemi di visibilità o perdita di coerenza tra le due scansioni. In particolare si fa riferimento alla porzione orientale del rock glacier Ursina III e del rock glacier Ursina II, coperte dai dati TLS 2012-2013.

Tuttavia, per le restanti aree, nel confronto che segue (Figure 6.3.1.1 - 2) i risultati GNSS e TLS risultano compatibili nei range di spostamento 2D e delle variazioni in quota.

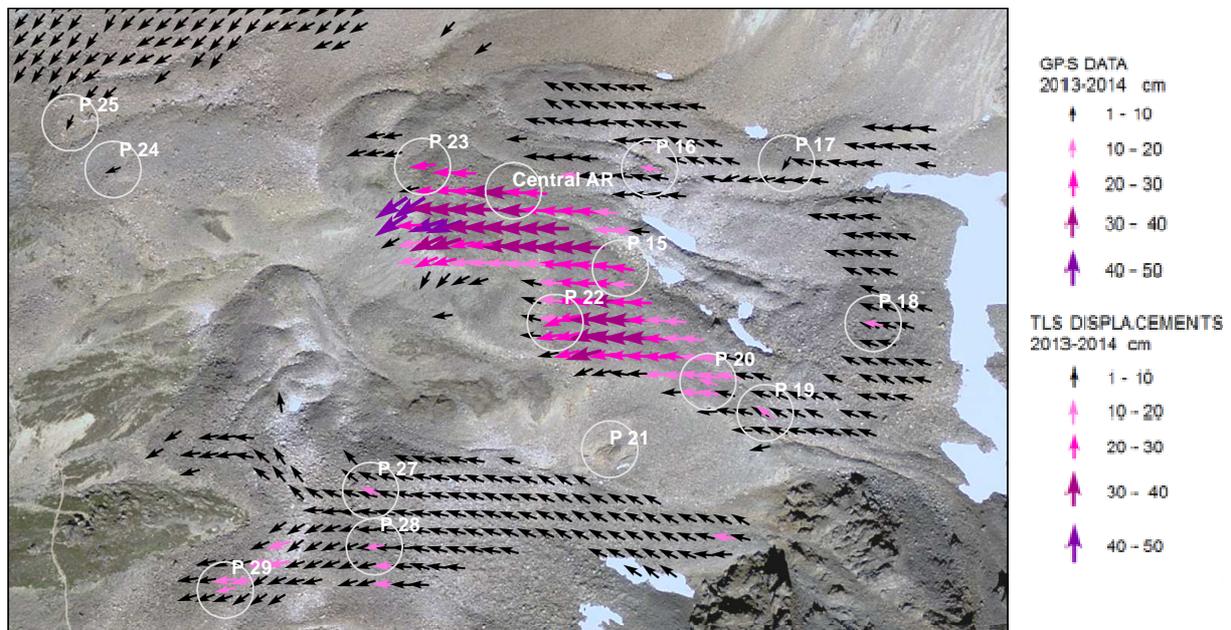


Fig. 6.3.1.1 – Confronto spostamento 2D GNSS e TLS – 2013/2014

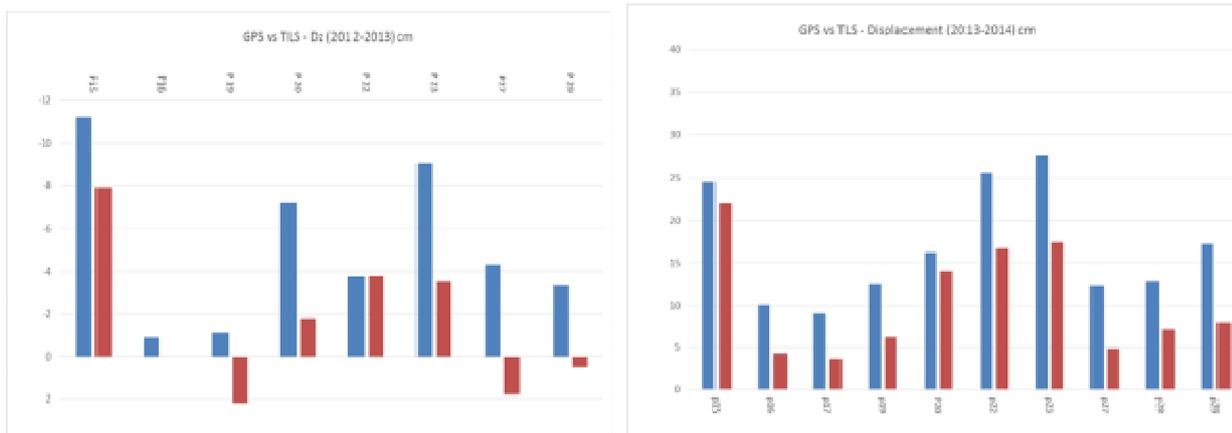


Fig. 6.3.1.2- – Confronto (sx) tra la compoennte  $\Delta z$  e (dx) tra il vettore spostamento 2D, rilevati dal GPS e dal TLS nel periodo 2012. In rosso il dato GNSS ed in blu il dato TLS

Come già accennato nei paragrafi precedenti, le differenze rilevate dalle due misure sono riconducibili alle proprietà intrinseche delle tecniche GNSS e TLS: in particolare, l'analisi della componente  $\Delta z$  mette in evidenza come il GNSS, nella sua accuratezza, rappresenti talvolta il comportamento del singolo blocco, che può ruotare ed alzarsi per effetto della spinta deformativa del sistema in studio.

## 7 Confronto tra dati SAR e GNSS

Per una analisi qualitativa del dato SAR si è proceduto ad un confronto con i risultati delle misure GNSS riferite allo stesso periodo delle immagini processate (estate 2013). I dati GNSS sono stati opportunamente riproiettati lungo la linea vista del satellite (Cap.5.1).

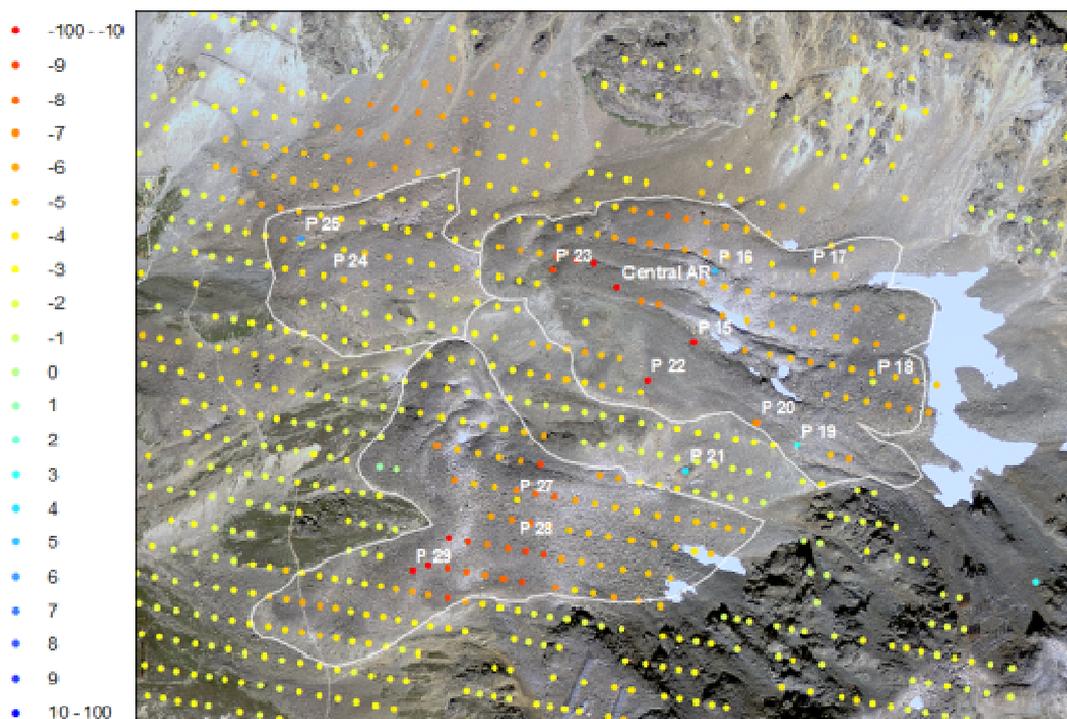


Fig. 7.1 Confronto GNSS - SAR

In Figura 7.1 è ben visibile come, esclusi alcuni casi, i campi di velocità del dato GNSS e SAR coincidano.

In modo più dettagliato nel grafico in Fig. 7.2, si è proceduto al confronto tra velocità medie annuali (cm/anno) delle misure GNSS proiettate lungo la LoS del satellite e gruppi di punti SAR, ubicati all'interno di un buffer di raggio 15 metri con centro il punto GNSS stesso.

Quello che si nota è che i) spostamenti verticali rilevati dai dati GNSS (punti n. 16, 19, 21 e 25) non sono rilevati dal dato SAR, dato che l'informazione, simile per il TLS, è il risultato di valori medi in un'area con risoluzione a terra di 30 m; ii) che nelle zone all'intorno dei punti GNSS aventi maggiori velocità di deformazione i punti SAR sottostimano la velocità e nel peggiore dei casi la perdita di coerenza porta all'assenza di dati.

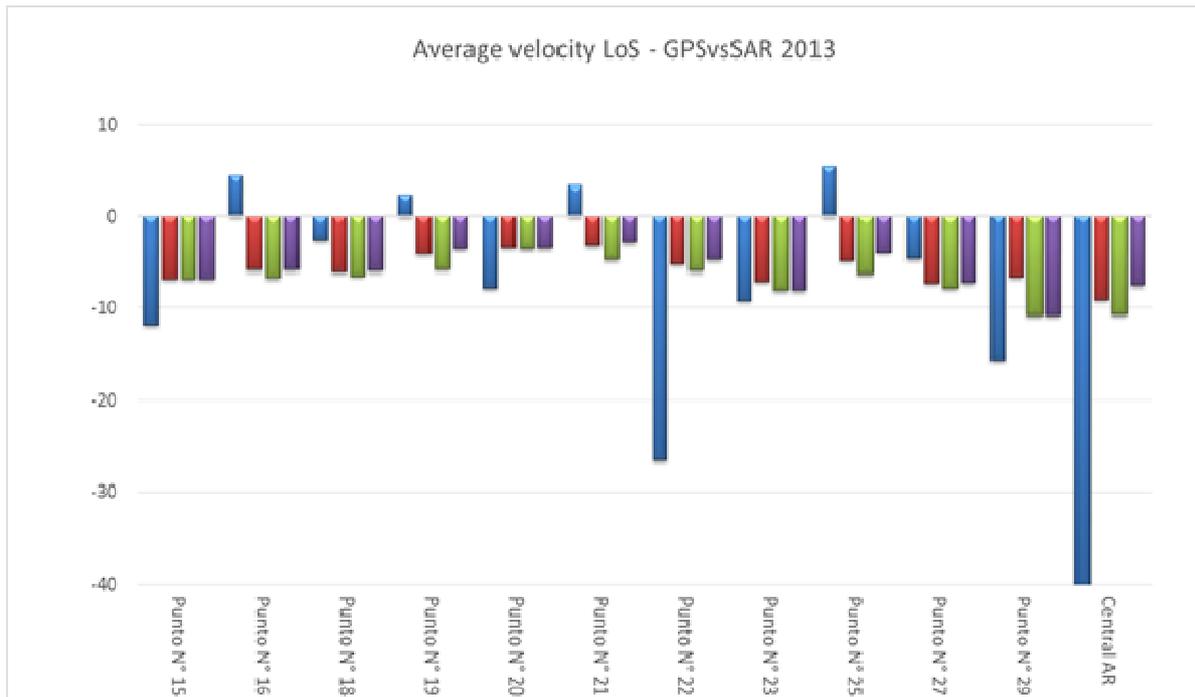
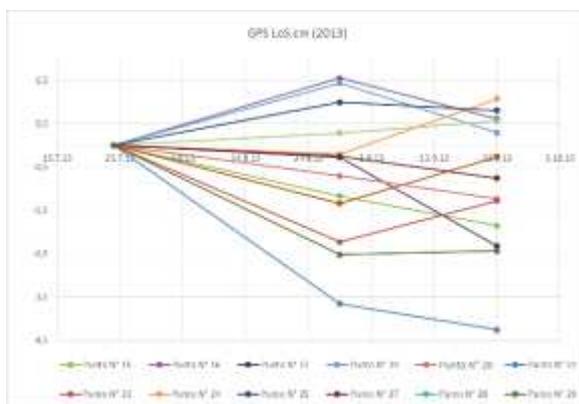


Fig. 7.2 – confronto tra velocità medie annuali (cm/anno) delle misure GNSS proiettate lungo la LoS del satellite e gruppi di punti SAR, ubicati all'interno di un buffer di raggio 15 metri con centro il punto GNSS stesso. Nel grafico le colonne blu rappresentano i dati GNSS lungo la LoS, in rosso è rappresentato il valore medio delle velocità dei punti SAR nel buffer, in verde il valore massimo di velocità tra i punti SAR nel buffer ed in viola la velocità del punto SAR più prossimo al punto GNSS.

Le informazioni principali che si ricavano dall'analisi dei grafici in Fig. 7.3 sono i) che il picco di accelerazione rilevato dai punti GNSS ad agosto 2013, e menzionato nel Cap 2.2 non viene rilevato dai dati SAR, che tuttavia mostrano una decelerazione durante le prime settimane di settembre, concorde con i dati GNSS; ii) che fino ad ottobre inoltrato i rock glaciers sono soggetti a deformazioni che si protraggono probabilmente per una buona parte dell'autunno, anche dopo la prima nevicata.



a)



b)

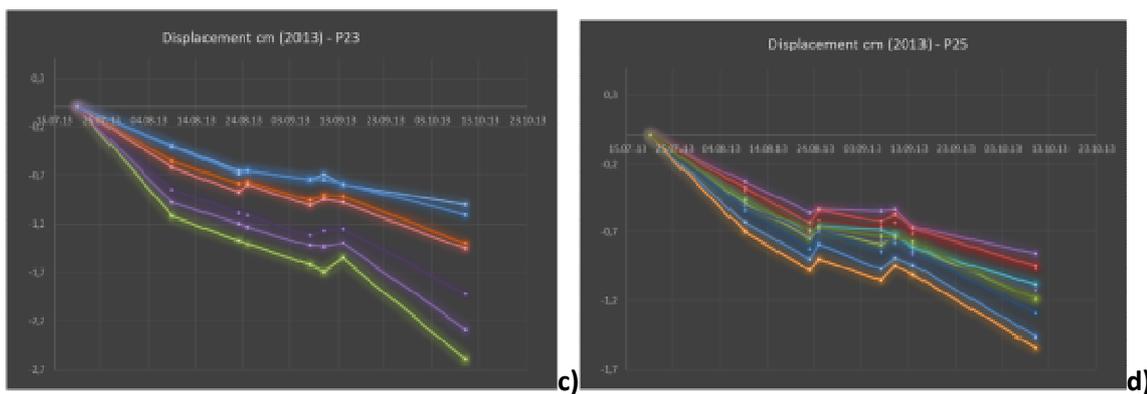


Fig. 7.3 – a) spostamento (cm) dei dati GNSS lungo la LoS; b), c), e d) serie storiche dei punti SAR all'intorno (buffer  $r=15m$ ) del punto GNSS (ex. P29, P23 e P25, ubicati rispettivamente nell'Ursina III, I e II).

## 8. Assimilazione ed integrazione GNSS e TLS

*di Marcello Pettita*

Nel progetto SloMove si è sviluppata una nuova tecnica per integrare tutte le sorgenti di dati disponibili ed ottenere una stima totale delle velocità e degli spostamenti sulle aree di interesse.

Poiché i dati disponibili - GPS, Telelaserscanner, InSAR - hanno una natura differente e le incertezze associate alle singole misure sono diverse, per creare una nuova variabile che integrasse tutte le misure si sono utilizzate tecniche di assimilazione usate in altre discipline come la meteorologia e la fisica dell'atmosfera. Tali tecniche prendono il nome di "data assimilation", ovvero assimilazione dei dati. Una descrizione generale dell'argomento si può trovare in diversi libri ed articoli. In questo testo si è seguita la notazione usata da Kalnay (2003), ma una descrizione completa si può trovare anche in Daley (1991), Ghill e Malanotte-Rizzoli (1991) e Talagrand (1997). In generale il problema trattato nell'assimilazione dei dati è quello di partire da una serie di osservazioni della medesima grandezza fisica con errori diversi e creare un nuovo campo che descriva la variabile in oggetto tenendo conto della variabilità delle diverse misure e degli errori associati. Per ricavare questo nuovo campo si impone che l'errore associato alla variabile sia minimizzato. Metodi come il filtro di Kalman, l'interpolazione ottimale, il 3DVar e il 4DVar permettono di calcolare ed ottenere la migliore approssimazione della variabile dato un certo numero di osservazioni. In questo progetto si sono considerate le variabili spostamento ( $r$ ) e velocità ( $v$ ) misurate e ricavate dai diversi metodi sopra elencati. Al fine di integrarle si è deciso di utilizzare il metodo del 3DVar per variabili non correlate.

In generale lo scopo è quello di trovare il campo di analisi ottimale della variabile  $x_a$  dato un campo di riferimento (detto di background)  $x_b$ , disponibile su un grigliato regolare, ed un certo numero  $n$  di osservazioni puntuali  $y_o$  localizzate all'interno del dominio in punti spazializzati in maniera irregolare. Nel nostro caso si è generalizzato il concetto applicando il metodo a più variabili (tre: GPS, TLS e InSAR) regolarmente spazializzate sulla medesima griglia. In generale è possibile esprimere il campo di analisi come una combinazione lineare dei campi sorgente con coefficienti che dipendono dallo spazio e dagli errori dei singoli campi. Tale soluzione, analiticamente formulabile, è funzione anche delle matrici di covarianza degli errori associati ai campi GPS, TLS e InSAR. Tenere conto della covarianza degli errori però complica drasticamente il problema sia da un punto di vista concettuale (è necessario stabilire la covarianza delle diverse incertezze) sia da un punto di vista computazionale (è necessario invertire matrici che possono essere di dimensione elevata). Per tale motivo si è deciso di trascurare la covarianza degli errori e considerare esclusivamente la varianza puntuale e la sua

combinazione lineare, assumendo quindi l'ipotesi di non correlazione spaziale delle incertezze. Tale ipotesi è nel nostro caso assolutamente accettabile poiché se una correlazione spaziale tra gli errori esiste, è di ordine sicuramente superiore rispetto all'errore stesso della misura.

Partendo da tali ipotesi è possibile esprimere la variabile del nuovo campo come:

$$r_a = \frac{\frac{1}{\sigma_{GPS}^2} r_{GPS} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} r_{TLS} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2} r_{SAR}}{\frac{1}{\sigma_{GPS}^2} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2}}$$

Analogamente a quanto sopra è possibile calcolare anche l'incertezza associata al campo assimilato che può essere espressa nel nostro caso come:

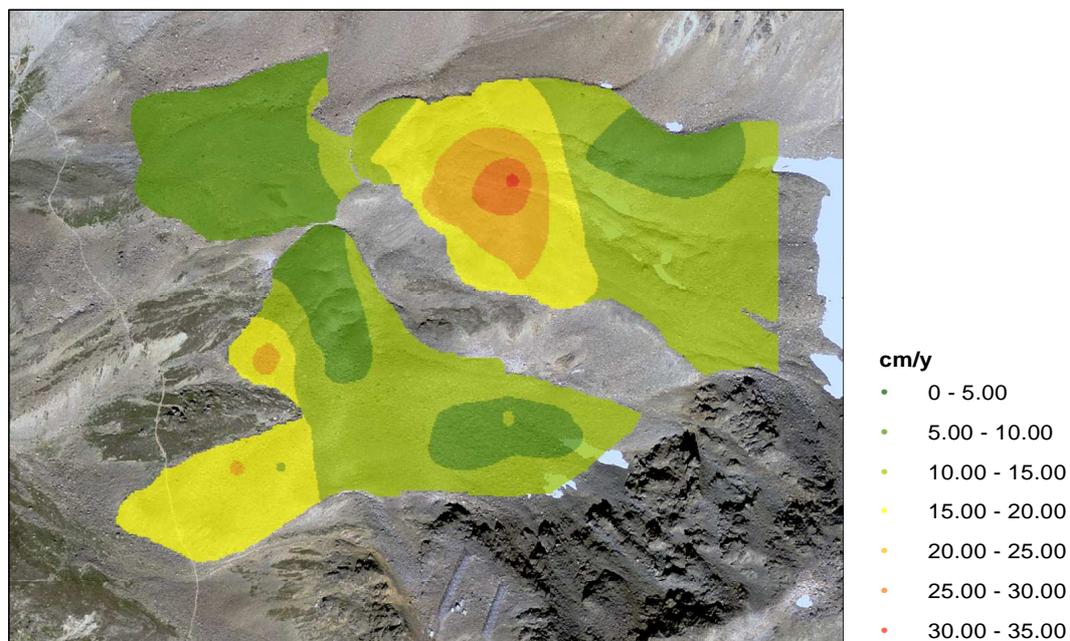
$$\frac{1}{\sigma_a^2} = \frac{1}{\sigma_{GPS}^2} + \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{SAR}^2}$$

Al fine di ottenere il nuovo campo assimilato si è proceduto a ricavare dei campi spazialmente regolari a partire dalle osservazioni puntuali disponibili. Tramite metodologie di interpolazione spaziale basate sull'inverso della distanza si sono ottenuti tre campi (uno per ogni tipo di osservabile, GPS, TLS e InSAR) regolarmente spazializzati su una griglia. Analogamente gli errori sono stati spazializzati propagando l'errore secondo il metodo dell'inverso della distanza e si sono prodotti i campi di incertezza regolarmente spazializzati. I tre campi sono poi stati assimilati seguendo il metodo precedentemente esposto. Il metodo qui proposto permette di superare una serie di problemi che sono ben noti nel monitoraggio delle frane:

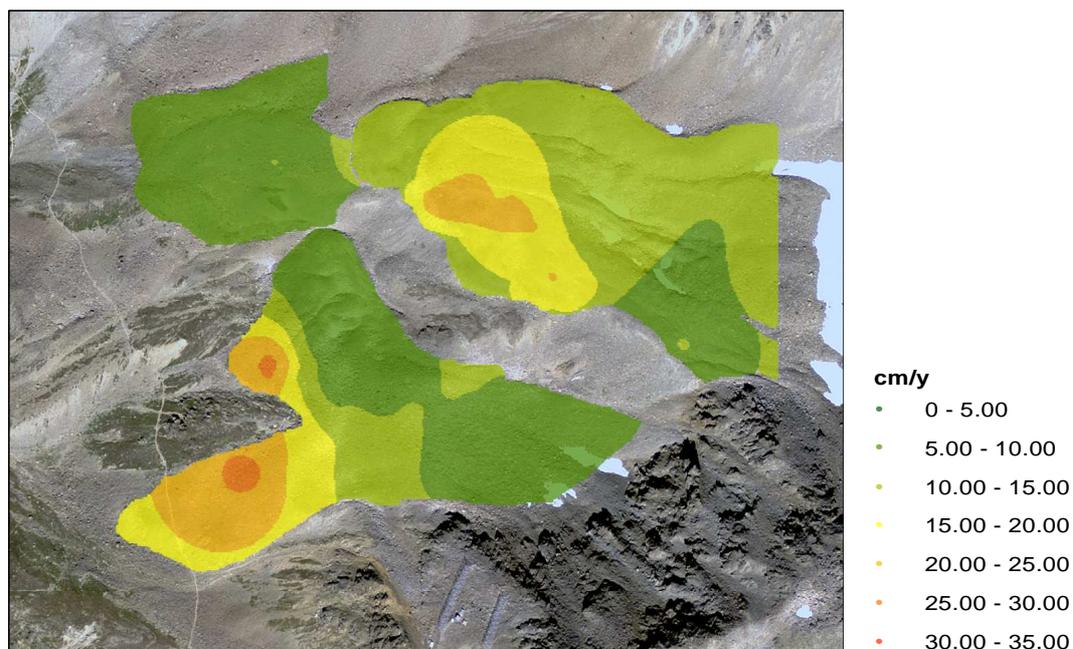
1. È possibile avere una stima spazialmente distribuita che tiene conto di tutte le diverse misure e dei loro rispettivi errori;
2. È possibile stimare l'incertezza associata a tale stima per capire quali sono le aree in cui la stima è più o meno affidabile;
3. È possibile lavorare contemporaneamente con misure che sono distribuite spazialmente in maniera diversa e che hanno incertezze che differiscono anche di uno o più ordini di grandezza
4. Permette di sfruttare al meglio i vantaggi di ogni tecnica e l'accuratezza di ogni metodo di misura.

Questo approccio, ben noto in altri campi scientifici, può fornire nuove e importanti informazioni nel campo della geologia e del monitoraggio delle frane, poiché va ad integrare diversi tipi di dati e supera i problemi legati alle differenti incertezze e ai diversi tipi di errori associati alle misure. Infine permette di utilizzare i dati satellitari in combinazione ad altre osservazioni standard in maniera ottimale e fisicamente consistente.

I risultati ottenuti in SloMove (Fig. 8.1 e 8.2) mostrano come questa metodologia possa sopperire in alcuni casi ai limiti degli strumenti di misura ed esaltarne le proprietà in una visione integrale. La proprietà principale di queste mappe è la possibilità di essere modificate al fine di ottenere un risultato di assimilazione il più possibile rappresentativo del fenomeno in studio.



*Fig. 8.1 - Carta di assimilazione dei dati GPS e TLS: in questo caso l'area nella quale il valore del dato GPS ha maggiore rilevanza è più ampia.*



*Fig. 8.2 - Carta di assimilazione dei dati GPS e TLS: in questo caso è stato dato un maggiore peso alla misura TLS mantenendo una buona significatività del dato GPS.*

## 9. SWOT analysis

### 9.1 Monitoraggio con GNSS

Punti di forza	Punti deboli
<ul style="list-style-type: none"> <li>- fornisce informazioni in un quadro di riferimento globale (WGS84)</li> <li>- fornisce informazioni accurate in un quadro di riferimento temporale assoluto (tempo GPS)</li> <li>- in grado di lavorare in tempo reale</li> <li>- formato dati standard (RINEX)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- informazioni puntuali - a volte non rappresentative per il processo</li> <li>- sensore costoso</li> <li>- le difficoltà dipendono dalle attività in loco (installazione attrezzatura e raccolta dati)</li> <li>- rumore dipendente dal sito (multipath) che non è sempre facile da eliminare</li> </ul>
Opportunità	Rischi
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ricerca nel campo del sensore GNSS a basso costo</li> <li>- in futuro interoperabilità multi-sistema (GPS, Glonass, Galileo)</li> <li>- Integrazione/assimilazione dati: per compensare debolezze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rappresentatività o precisione: quale è il peso da attribuire ai dati GNSS al fine di ottenere un'assimilazione di dati adeguata</li> </ul>

## 9.2 Monitoraggio con TLS

<b>Punti di forza</b>	<b>Punti deboli</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Risoluzione di misurazione molto alta</li><li>- Posizione fuori dalla zona di movimento</li><li>- Coordinate di superficie dirette in 3D</li><li>- Dati immagine referenziati</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Effetti ombra</li><li>- Difficoltà correlate a stretti angoli d'incidenza delle misurazioni</li><li>- Dipendenza dalle condizioni meteo</li><li>- La vegetazione può disturbare le misurazioni</li></ul>
<b>Opportunità</b>	<b>Rischi</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Rilevazione di lievi effetti di scala</li><li>- Monitoraggio di terreni inaccessibili</li><li>- Interpretazione semplice e univoca</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Lacune nei dati spaziali</li><li>- Bassa qualità dei dati in condizioni difficili</li><li>- Limitazioni nei giorni di bel tempo</li><li>- Significatività limitata per zone coperte da vegetazione.</li></ul>

### 9.3 Processamento dati SAR con algoritmo SBAS

Punti di forza	Punti deboli
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Creazione mappe sinottiche distribuite delle deformazioni</li> <li>- Misure di deformazione in aree difficilmente raggiungibili</li> <li>- Possibilità di riduzione dei costi</li> <li>- Accuratezza elevata nella misura delle deformazioni con acquisizioni regolari nel tempo e di numero sufficiente</li> <li>- Possibilità di validazione del dato ed integrazione con altre tecniche di misura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Misura delle deformazioni solo lungo la LOS</li> <li>- Necessità di un sufficiente numero di dati prima di poter fornire misure di deformazione</li> <li>- Occorre in ogni caso avere conoscenze a priori sul fenomeno per poter avere misure affidabili</li> <li>- La decorrelazione temporale del periodo invernale può inficiare i risultati delle misure</li> </ul>
Opportunità	Rischi
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il lancio di Sentinel 1 offre immagini SAR gratuite con un periodo di ripetizione di 12 giorni (che diventeranno 6 con il lancio di Sentinel 1b)</li> <li>- Presenza sul territorio nazionale dell'ente sviluppatore dell'algoritmo</li> <li>- Collaborazione instaurata con il progetto con l'ente sviluppatore dell'algoritmo</li> <li>- Aumento del numero di software che implementano una versione dell'algoritmo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non è garantita a priori la possibilità di acquisire il numero di immagini necessario per un'accurata misura delle deformazioni</li> <li>- La tecnica richiede un alto grado di esperienza per la sua applicazione non ancora disponibile internamente</li> <li>- I riflettori naturali necessari come riferimenti per l'integrazione con altre tecniche dipendono nelle dimensioni e nell'orientazioni dalla modalità del sensore SAR</li> </ul>

## 9.4 Tecnologie integrate

Punti di forza	Punti deboli
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modello di processo più completo e dettagliato: validazione dei singoli risultati;</li> <li>- Sistema di monitoraggio economicamente vantaggioso: utilizzare tecnologie adatte per fasi di deformazioni diverse nello stesso processo di deformazione</li> <li>- Metodo affermato in un altro campo (atmosfera)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Georeferenziazione affidabile dei dati</li> <li>- Mancata conoscenza delle limitazioni e delle caratteristiche delle singole tecnologie (significato dell'output)</li> </ul>
Opportunità	Rischi
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Esistenza di diversi dati nell'archivio; possono essere utilizzati dati per diversi step (sistema di monitoraggio precedente, dati remoti precedenti)</li> <li>- nuova predisposizione per condividere dati e informazioni</li> <li>- anche nuova fonte di informazioni (nuovi sensori, nuovi metodi)</li> <li>- Metodo non pienamente sfruttato in questo ramo delle geoscienze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il metodo può essere molto complesso se è inclusa la covarianza spaziale</li> <li>- Integrazione delle informazioni è diversa da. Integrazione o assimilazione di dati/tecnologie</li> <li>- Confronto tra i risultati derivanti da differenti sistemi di monitoraggio: confronto singolo prodotto.</li> <li>- Integrazione/assimilazione dei dati: ottenere da differenti prodotti singoli un prodotto multi-integrato unico più rappresentativo per il processo.</li> </ul>

## 10. Outlook e conclusioni

Nonostante le difficoltà dovute a condizioni meteo-climatiche ostili e anomale (già l'Estate 2015 si preannuncia molto più favorevole ai rilievi) ed ai conflitti nella priorità di acquisizione della costellazione di satelliti CosmoSkyMed, che hanno influito negativamente sui tempi e sui risultati del processamento, le analisi condotte hanno sicuramente portato ad una migliore comprensione della tecnica multi-interferometrica nonché dei fenomeni in studio.

Il confronto dei risultati provenienti dalle tre tecniche di misura impiegate ha permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- 1) L'informazione fornita da un dato accurato ma puntuale come quello del GNSS differenziale rappresenta un buon punto di partenza per una buona comparazione tra tecniche di misura;
- 2) L'informazione meno accurata ma spazialmente distribuita come quella fornita dal TLS e dal SAR è talvolta più rappresentativa del fenomeno;
- 3) Nonostante un numero limitato d'immagini, l'algoritmo SBAS è stato in grado di fornire, soprattutto per quanto riguarda la distribuzione spaziale delle deformazioni, informazioni compatibili con le altre tecniche di misura.

Le difficoltà incontrate durante il progetto hanno portato ulteriori informazioni sul possibile utilizzo attuale di queste tecniche per il monitoraggio di fenomeni lenti in alta montagna da parte di un Amministrazione territoriale:

- 1) La tecnica GNSS differenziale fornisce una informazione puntuale (a meno che non si utilizzino una fitta rete di punti di misura) delle deformazioni di un fenomeno, ma permette di avere risultati accurati e in breve tempo e di poter monitorare anche movimenti molto veloci o caratterizzati da accelerazione, come nel caso di fenomeni in evoluzione e monitorati ad es. per motivi di Protezione Civile. Questa tecnica comporta un maggiore lavoro in campagna (per installazione della strumentazione e per i prolungati tempi di misura) e quindi anche maggiori costi di esecuzione, oltre a risultare di difficile impiego per il controllo di vaste aree. Questa tecnica dunque risulta limitatamente utilizzabile, per una questione di sostenibilità economica e solo in casi specifici, ai fini della pianificazione territoriale.
- 2) La tecnica TLS permette di monitorare aree più vaste con meno dispiego di tempo. L'utilizzo della tecnica stessa dipende dalla possibilità di trovare un adeguato posizionamento della

strumentazione (angolo di vista e distanza) dal quale sia possibile rilevare l'intera area di studio, dall'accessibilità al sito e dalle condizioni meteorologiche. Questa tecnica e l'evoluzione della metodologia con l'impiego di nuovi sensori ed una elaborazione automatica del dato, suggeriscono che in futuro il laser scanner da terra potrà essere utilizzato efficacemente nel settore della pianificazione territoriale e per scopi di protezione civile.

- 3) L'utilizzo della tecnica SAR comporta lunghi tempi di fornitura e di elaborazione del dato. La tecnologia SAR multi-temporale è consolidata nel rilievo di vaste aree (ad es. con la tecnica PS e le serie storiche al fine della pianificazione territoriale) ma presenta ancora molte limitazioni in contesti alpini e per scopi di protezione civile. I lunghi tempi che intercorrono tra due acquisizioni, che tuttavia si sono accorciati con i satelliti di ultima generazione Cosmo SkyMed e TerraSAR-X, non si prestano al monitoraggio di processi che necessitano di tempi di restituzione delle informazioni molto brevi. L'esperienza da noi fatta dimostra che, al fine di far convergere la tecnologia SAR in un utilizzo più "pubblico" e quindi non solo a fini scientifici e di pianificazione territoriale (vedi i Piani Straordinari di Telerilevamento del Ministero dell'Ambiente Italiano), ma anche di Protezione Civile, è necessario che tale tecnologia passi da una gestione puramente strategica e militare ad una gestione esclusivamente per uso civile. Questo dovrebbe essere in grado di garantire acquisizioni programmate e di restituire velocemente le immagini per essere processate, meglio se da tecnici locali, o di fornire il dato già processato ma che possa essere "trattato" sulla base delle conoscenze locali.

Per poter valorizzare questa tecnica e far emergere tutte le potenzialità uscendo dunque da un contesto puramente scientifico o dimostrativo è necessario:

- a) creare di centri di sviluppo e processamento più vicini al territorio;
- b) abbattere i tempi di acquisizione e dei costi di processamento dei dati;
- c) sviluppare di nuovi algoritmi per il processamento di un numero sempre inferiore di immagini SAR .

## Bibliografia

BAUER, A., PAAR, G., KAUFMANN, V., 2003. Terrestrial Laser scanning for rock glacier monitoring.

BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R., SANSOSTI, E., 2002. "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms" IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., 40, 11, 2375-2383

CASU, F., MANZO, M., LANARI, R., 2006. "Performance analysis of the SBAS algorithm for surface deformation retrieval." Fringe 2005 Workshop. Vol. 610. 2006.

CASU, F., MANZO, M., LANARI, R., 2006. "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data". Rem. Sens. Env. 102, 3-4, 195-210

COLESANTI, C., FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F., 2003. "Monitoring landslides and tectonic motion with the permanent Scatterers technique." Engineering Geology 68/1-14.

COLESANTI, C., FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F., 2003. "Multi-Image Satellite SAR Interferometry: State of the Art and Future Trends" In: Proc Radar Conference, Adelaide. 2003. p. 239-244.

COLESANTI, C., WASOWSKY, J., 2006. "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry" Eng. Geo. 88, 173-199

DALEY, R., 1991. "Atmospheric Data Analysis." Cambridge University Press.

GILI, J. A., COROMINAS, J., RIUS J., 1998. "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring", Eng. Geo.55, 167-192

GHILL, M., MALANOTTE-RIZZOLI, P., 1991. "Data assimilation in meteorology and oceanography." Advances in Geophysics 33, 141e266.

KALNAY, E., 2003. "Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability." Cambridge University Press.

KENNER, R., PHILLIPS, M., DANIOTH, C., DENIER, C., ZGRAGGEN, A., 2001. "Investigation of rock and ice loss in a recently deglaciated mountain rock wall using terrestrial laser scanning: Gemsstock, Swiss Alps. 2011". Cold Reg.Sci. Tech., 67 (3) 159-164

KENNER, R., BÜHLER, Y., DELALOYE, R., GINZLER, C., PHILLIPS, M., 2014. "Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry." Geomorphology, 206(0), 492-504.

LANARI, R., MORA, O., MANUNTA, M., MALLORQUÌ, J.J., BERARDINO, P., SANSOSTI, E., 2004. "A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms" In Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 42(7), 1377-1386.

LAUKNES, T.R., 2004. "Long-Term Surface Deformation Mapping using Small-Baseline Differential SAR Interferograms", Ms. Thesis, Tromsø Un., Norway

LAUKNES, T.R., 2010. "Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis". PhD Thesis Tromsø Un., Norway

Pesci, A., Conforti, D., Fabris, M., Loddo, F., 2006. "GPS; fotogrammetria digitale e Laser Scanner: un sistema integrato di rilevamento." Quaderni di geofisica.

SQUARZONI, C., DELACOURT, C., ALLEMAND, P., 2003. "Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps)" Eng. Geo, 79, 3-4, 215-229

TALAGRAND, O., 1997. "Assimilation of observations, an introduction." Journal of the Meteorological Society of Japan 75 (1B), 191e20