



“Le possibilità non
hanno confini”



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

**Deliverable
D.3.02**

**Linee guida per gli studi di
fattibilità inerenti il
monitoraggio integrato da SAR
satellitare e rilevazione
terrestre**

Data: 01.2014

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

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

Coordinatore Scientifico

Istituto per il Telerilevamento Applicato, Accademia Europea di Bolzano EURAC

Viale Druso, 1

I-39100 Bolzano (BZ)

Responsabile

Christian Iasio

Tel +39 0471 055387

Fax +39 0471 055389

E-Mail: christian.iasio@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 quello direttamente interessato 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.

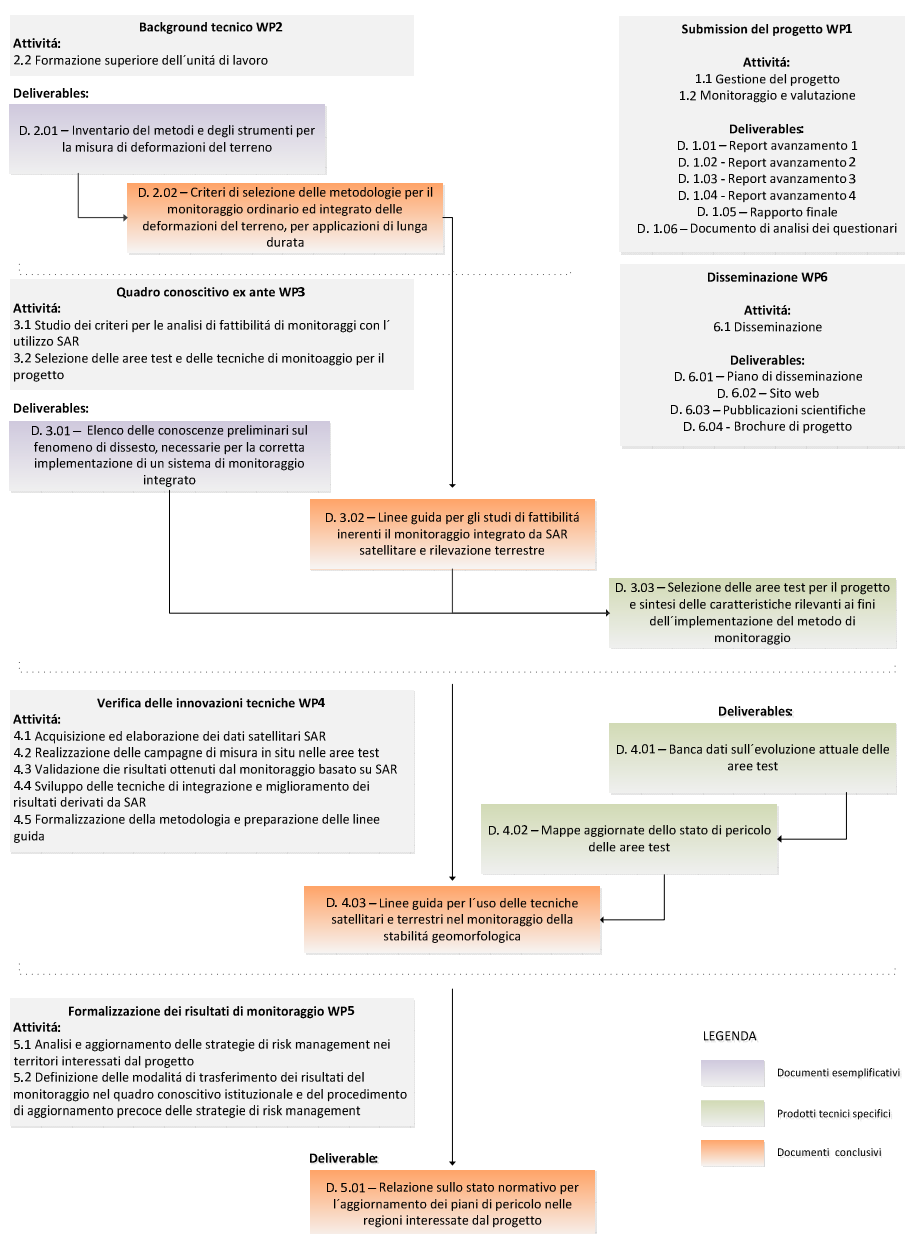
Metodologie

- 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 in un rapporto finale. I prodotti principali della ricerca, delle sperimentazioni e delle innovazioni metodologiche sono raccolti in 4 documenti o linee guida di valenza generale, 2 documenti esemplificativi oltre che una banca dati e mappe aggiornate, specifiche 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

- Gianni Cuozzo
- Giulia Chinellato

Svizzera

Partner 3

WSL - Institut für Schnee- und
Lawinenforschung SLF

- Marcia Phillips
- Robert Kenner

Partner 4

Abenis A.G. Ingenieure und Planer

- Andreas Zischg

Premessa

Con l'obiettivo di accrescere il know how sulle tecniche di telerilevamento in Alto Adige e nel Cantone dei Grigioni, il progetto SloMove aspira a formare esperti in grado di affrontare e diffondere attività volte ad incentivare il mercato dei servizi basati sul telerilevamento. Il fine primario consiste nel promuovere il monitoraggio di aree in dissesto idrogeologico in modo continuativo ed organico, attività fondamentale per creare un quadro conoscitivo delle condizioni di pericolo esistenti e necessaria per una efficace pianificazione territoriale. In questo contesto risulta necessario definire metodi e strumenti che, in sinergia, possono essere utilizzati sia per le fasi di monitoraggio sia per analizzare specifici fenomeni di dissesto a scala di dettaglio; ne consegue la necessità di sensibilizzare e aggiornare i diversi operatori nell'utilizzo integrato di metodologie di indagine alternative rispetto alle più comuni e commercialmente disponibili.

A tale scopo questo rapporto si pone come strumento di supporto nell'analisi di fattibilità di un monitoraggio integrato con dati rilevati da sistemi radar satellitari e misure da terra, attraverso un approccio autonomo e focalizzato alla valutazione dell'applicabilità delle metodologie considerate.

Il presente documento è redatto sulla base dell'esperienza maturata fino a questo punto dal Progetto SloMove e si collega ai contenuti dei rapporti D.2.01 e D.2.02.

Con riferimento inoltre agli obiettivi perseguiti da SloMove e alle caratteristiche delle tre tecnologie di monitoraggio scelte, si affronteranno i fattori determinanti per il loro efficace ed integrato impiego nello studio di deformazioni del terreno in un contesto alpino di alta quota. Il documento descrive gli elementi, fattori e parametri che sono stati affrontati durante l'analisi di fattibilità condotta sulle aree test di SloMove, che costituisce esempio pratico di applicazione dei criteri considerati.

Indice

1. INTRODUZIONE.....	10
1.1 Monitoraggio integrato e validazione - integrazione tecnologica.....	10
1.2 Scopo del documento e generalità	11
2. DESCRIZIONE DELLE TECNOLOGIE IMPIEGATE	12
2.1 Dati Radar-satellitari.....	12
2.1.1 DInSAR	14
2.1.2 Interferometria multi-temporale con il metodo Persistent Scatterers	18
2.1.3 Interferometria multi-temporale con il metodo SBAS	20
2.2 Dati da rilevazione terrestre: il GPS, le tecniche di posizionamento le metodologie.....	23
2.2.1 GPS: Il posizionamento relativo.....	25
2.2.2 Il metodo statico - rapido	26
2.3. Dati da rilevazione terrestre: Laser scanner da terra (M. Phillips, SLF, CH).....	28
3. INTEGRAZIONE DELLE METODOLOGIE DI MISURA	31
4. APPLICABILITÀ DELLE TECNOLOGIE SELEZIONATE: LIMITAZIONI TECNICHE.....	33
4.1 Limiti dell'interferometria multi-temporale	33
4.1.1 Visibilità del satellite	33
4.1.2 Visibilità: Configurazione del satellite	34
4.1.3 Caratteristiche della superficie	35
4.1.4 Cinematica del fenomeno	36
4.1.5 Accessibilità, vincoli e sicurezza	38
4.2 Limiti del rilievo con GPS differenziale	39
4.2.1 Visibilità del segnale satellitare	39
4.2.2 Accessibilità, vincoli e sicurezza	40
4.3 Limiti del Terrestrial Laser Scanner.....	41

4.3.1	Visibilità	41
4.3.2	Caratteristiche della superficie	42
4.3.3	Accessibilità, vincoli e sicurezza	42
5.	VALIDAZIONE DEI DATI.....	43
6.	CAPACITÀ DI SOSTENERE UN MONITORAGGIO INTEGRATO A LUNGO TERMINE: Variabilità dei costi	44
6.1	<i>Fattori generali</i>	44
6.1.1	Accessibilità.....	44
6.1.2	Produzione del dato/della misura.....	45
6.1.3	Durabilità e manutenzione della strumentazione	46
6.2	<i>Fattori specifici</i>	47
6.2.1	Raccolta dati	47
6.2.2	Elaborazione dei dati	48
6.3	<i>Interpretazione dei dati</i>	49
7.	Bibliografia:	50

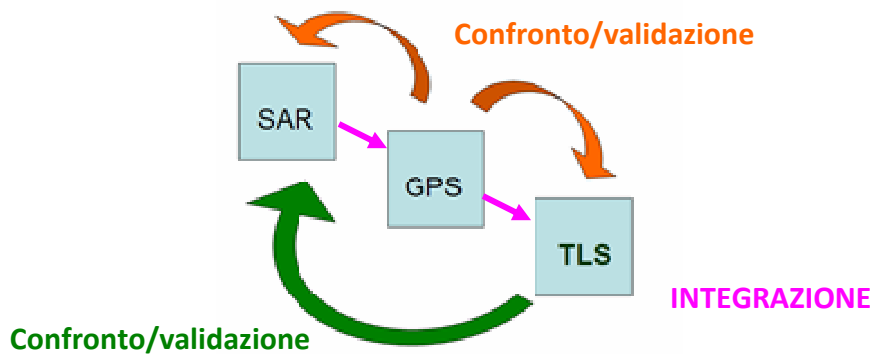
Allegati: Indicazioni operative: SCHEDE

1. INTRODUZIONE

1.1 Monitoraggio integrato e validazione - integrazione tecnologica

Il monitoraggio integrato consente di utilizzare i punti di forza delle tecnologie impiegate, che siano da remoto o da rilevazione terrestre.

Ognuna delle tre tecnologie impiegate nel Progetto, multi-interferometria Radar-satellitare, GPS (Global Positioning System) differenziale e TLS (Terrestrial Laser Scanner), presenta proprietà differenti che giocano un ruolo di forza nella complementarietà dei risultati finali. I dati ricevuti dai satelliti coprono aree molto ampie a costi contenuti, tuttavia le immagini si ottengono con bassa frequenza. I dati ottenuti tramite rilievi terrestri con strumenti GPS o laser possono essere invece estremamente precisi e la frequenza con cui si ottengono è stabilita dai tecnici a costi tuttavia rilevanti. Il progetto intende ottimizzare l'impiego di entrambi gli approcci di monitoraggio sommandone i vantaggi e cercando di superarne i limiti. L'integrabilità dei metodi inerente al monitoraggio di fenomeni naturali consiste nel poter sfruttare appieno i dati satellitari fino a quando la velocità della deformazione del suolo rimane sotto una certa soglia e di poter intervenire invece con un monitoraggio in loco più accurato e frequente che permetta una valutazione del rischio quasi in tempo reale. I risultati di un monitoraggio integrato potranno essere impiegati sia nei processi decisionali legati alla pianificazione territoriale, sia nella gestione di situazioni di rischio con l'obiettivo aggiuntivo di uniformare le tecniche di monitoraggio nei Paesi confinanti, per consentire confronti e decisioni condivise. Tra gli strumenti di misurazioni geodetiche di deformazioni del terreno lente (inferiori ad 1 cm/anno) disponibili, temporalmente lineari o non lineari, sono presenti l'interferometria multi-temporale e le misure GPS. La differente risoluzione spaziale e accuratezza rende le due tecnologie altamente complementari: il GPS presenta un'ottima accuratezza sulle tre componenti spaziali e nella risoluzione temporale, le tecniche SAR multi-temporali offrono generalmente informazioni sullo spostamento vettoriale lungo un'unica linea di vista, massimizzando però la copertura spaziale. Con l'utilizzo aggiuntivo della terza tecnologia, il Terrestrial Laser Scanner (TLS), il progetto ambisce ad approfondire la tematica dell'integrazione dei metodi di controllo di processi naturali a scopo di monitoraggio e di sistemi di allertamento.



1.2 Scopo del documento e generalità

Il presente documento si pone l'obiettivo di descrivere le fasi attraverso le quali procedere alla valutazione della fattibilità di un monitoraggio integrato di deformazioni del terreno attraverso l'impiego sinergico dell'interferometria multi-temporale, il GPS differenziale e Terrestrial Laser Scanner.

Ogni metodologia di indagine è caratterizzata da limiti applicativi: qui di seguito saranno dunque affrontate le problematiche legate all'applicabilità delle tecnologie selezionate in funzione della natura del processo sottoposto a studio e da fattori di tipo ambientale e tecnico; sulla base dell'esperienza finora condotta saranno descritti i parametri da considerare per poter definire, anche in fase progettuale, l'idoneità della tecnologia di rilevazione considerata.

Dopo una breve introduzione, nel **Capitolo 2** saranno descritte in modo sintetico le tecnologie di misura impiegate nel progetto; nel **Capitolo 3** si analizzeranno i fattori che influenzano l'applicabilità tecnico-operativa della metodologia di indagine considerando il suo impiego in un contesto di alta montagna e riferito alla rilevazione di fenomeni di deformazione lenta del terreno. Nei **Capitoli 4 e 5** saranno affrontate le tematiche relative all'importanza dell'integrazione dei metodi di misura e l'impatto dei costi sul monitoraggio, soprattutto a lungo termine.

2. DESCRIZIONE DELLE TECNOLOGIE IMPIEGATE

2.1 Dati Radar-satellitari

Il principio di funzionamento, medesimo per tutti i sistemi radar, consiste in un apparecchio trasmittente che emette un'onda elettromagnetica che, incidendo su eventuali oggetti di dimensione almeno pari a quella delle radiazione elettromagnetica, subisce un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, **scattering**). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche fisiche (ampiezza e fase dell'onda). Il dispositivo è in grado di individuare un bersaglio elettromagnetico (**detection**) che si trova lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di **range**) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (**ranging**) a cui è posizionato in modo preciso. Data la distanza tra trasmettitore e bersaglio, quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Se però, come nel caso del telerilevamento satellitare, il bersaglio è situato a grande distanza rispetto al trasmettitore, non è fisicamente realizzabile un'antenna di dimensioni tali da avere un'impronta tanto stretta da individuare un bersaglio con una risoluzione spaziale sufficiente.

L'idea alla base del SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar ad Apertura Sintetica) consente di aggirare questa limitazione, raggiungendo un compromesso tra risoluzione ed estensione dell'area osservata. Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale SAR) i dati acquisiti dal sensore nelle posizioni successivamente occupate, per mezzo di complesse operazioni di elaborazione del segnale si "sintetizza" infatti un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, apertura sintetica.

La direzione parallela all'orbita satellitare è detta **azimuth** e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La direzione della congiungente sensore-bersaglio (nel piano perpendicolare all'orbita ed inclinata di un **angolo θ** - detto off-nadir - rispetto alla verticale) è detta slant range o più semplicemente range, oppure **Line Of Sight (LOS)**. Per entrambe queste direzioni si riesce ad ottenere una risoluzione (cioè la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) dell'ordine di pochi metri. Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di range e azimuth, dette usualmente coordinate SAR (**Fig. 1**).

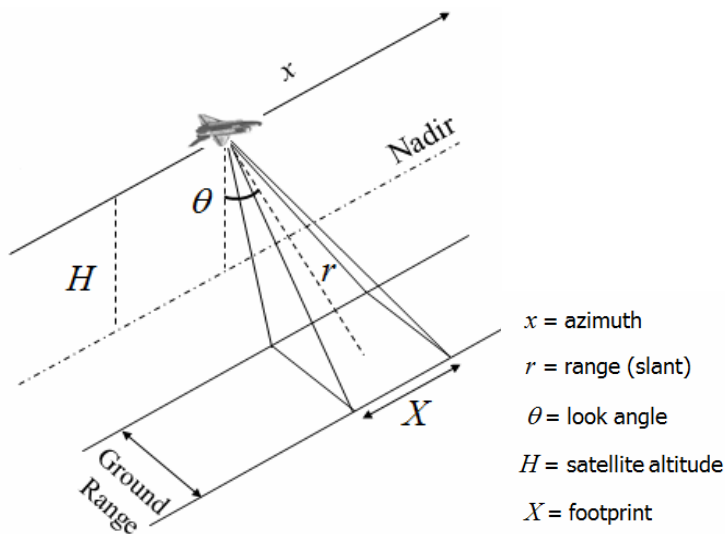


Figura 1: Geometria del sistema SAR

L'osservazione della superficie terrestre avviene dalla combinazione del movimento orbitale del satellite lungo i meridiani (orbita quasi polare) con la rotazione della terra nel piano equatoriale.

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale. Di fatto ci sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri descritte dal parametro *baseline* geometrica; di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta per angoli leggermente diversi creando matrici di *pixel* non corrispondenti alla medesima cella di risoluzione al suolo.

Per effettuare l'analisi congiunta di più immagini sulla stessa area a terra è necessario che a *pixel* omologhi nelle varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione, si procede quindi con una fase di elaborazione dei dati detta coregistrazione (o ricampionamento). Operativamente, tra tutte le acquisizioni, si sceglie secondo opportuni criteri un'immagine detta *master* come riferimento, mentre tutte le rimanenti, dette *slave*, vengono ricampionate sulla geometria della *master*, in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite.

La modalità di acquisizione con un angolo di vista θ non perpendicolare al suolo e la topografia del terreno danno origine a delle deformazioni prospettiche (Fig. 2). Ne conseguono tre differenti tipi di deformazione, in base alla pendenza del terreno:

1. **foreshortening**: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo

di off-nadir θ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.

2. **layover**: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo θ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.

3. **shadowing**: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

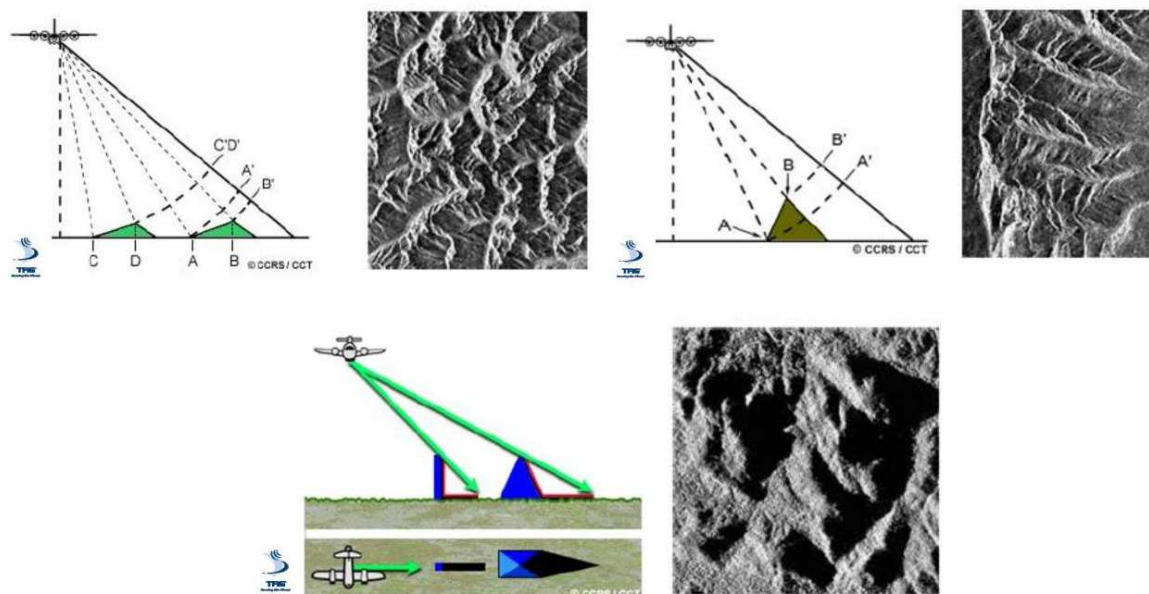


Figura 2: Deformazioni prospettiche di foreshortening, layover e shadowing e conseguenti fenomeni di deformazione nelle immagini focalizzate SAR (da T.R.E. - TeleRilevamento Europa)

2.1.1 DInSAR

La tecnica convenzionale per l'utilizzo di dati SAR per la misura delle deformazioni del terreno è l'**interferometria differenziale (DInSAR)**, che si basa sull'analisi delle variazioni del valore di fase tra due distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici (Massonnet e Feigl 1998, Rosen et al. 2000). L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero di stimare accuratamente la differenza di cammino ottico r dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra, dovuta esclusivamente alla deformazione del terreno lungo la LOS. La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno però due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare

l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra (Fig. 2).

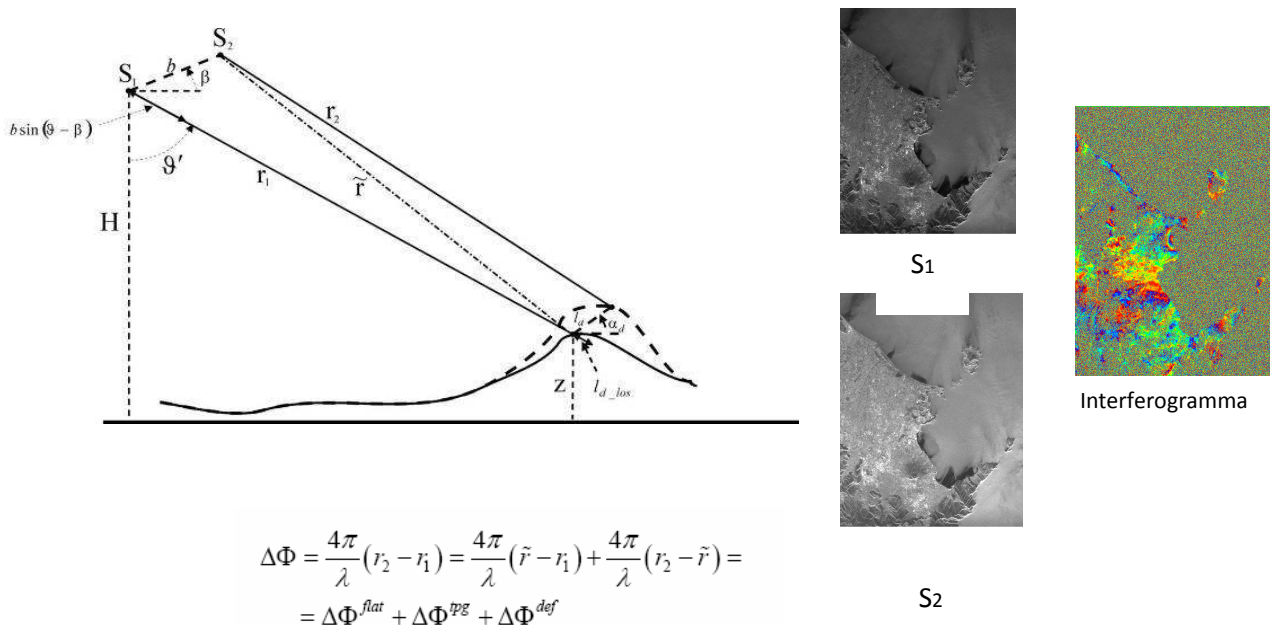


Figura 2: Generazione di un interferogramma (la differenza di fase $\Delta\Phi$ che si calcola deve il proprio contributo non solo alla deformazione ma anche all'effetto terra piatta (earth flat (*flat*)), e alla topografia (*topo*)).

Se non avvengono particolari cambiamenti nelle caratteristiche dell'area esaminata nel periodo tra le due acquisizioni, la fase dell'interferogramma dipende con buona approssimazione solo dalla distanza sensore-bersaglio e quindi da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore).

Diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR. In primo luogo i fenomeni di **decorrelazione temporale** (Fig. 3). Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar tra i diversi giorni di acquisizione del dato, indicati dal parametro *baseline* temporale: in questo

caso l'ipotesi che il contributo di riflettività del bersaglio si elida generando l'interferogramma non è più verificata.

Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

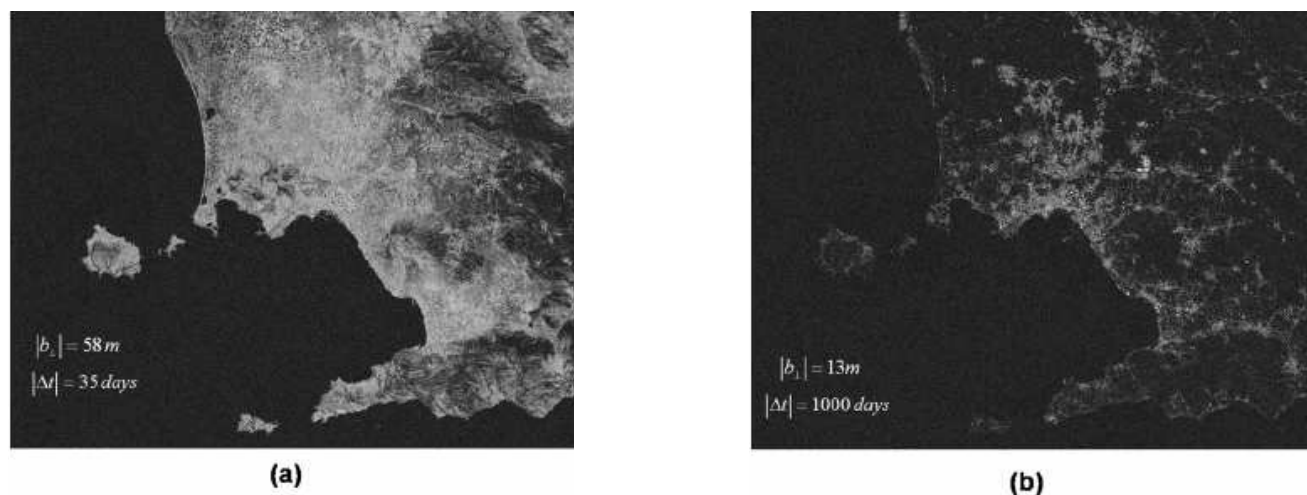


Figura 3: A sx mappa di coerenza relativa a una coppia interferometrica con piccola baseline spaziale; a dx mappa di coerenza relativa a una coppia interferometrica con piccola baseline spaziale ma elevata baseline temporale

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta **baseline geometrica**). Questo disturbo è denominato decorrelazione geometrica o spaziale (Fig. 4). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto della componente normale della **baseline**, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato.

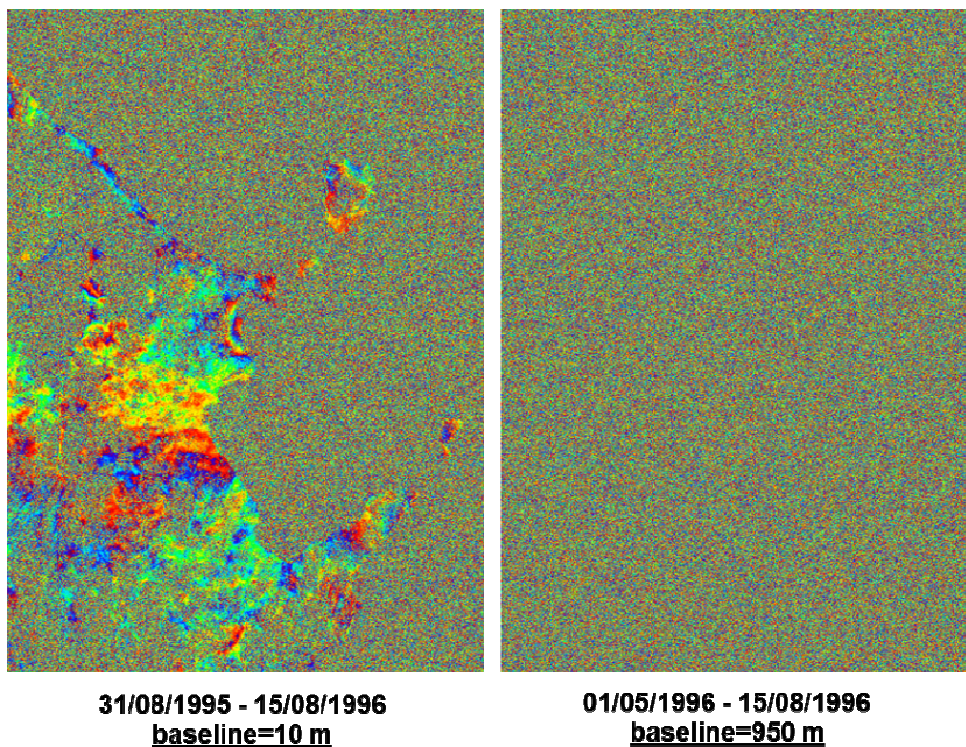


Figura 4: A sx interferogramma coerente con piccola baseline temporale e spaziale; a dx decorrelazione temporale

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalle **differenti condizioni atmosferiche** tra le due acquisizioni, che si possono tradurre in un ulteriore termine di fase (α), difficile da discriminare dal contributo relativo al movimento. Il disturbo atmosferico (mai uguale tra due diverse acquisizioni) può essere stimato accuratamente tramite l'analisi congiunta delle serie temporali di una immagine.

Un'attenta analisi bibliografica porta comunque alla conclusione che, con l'interferometria SAR tradizionale, si possono stimare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro (ordine di grandezza della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica); inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto (estensione $> 0.2 \text{ km}^2$). In altri termini la stima della misura delle deformazioni può essere realizzata solo in aree in cui il disturbo introdotto dalle decorrelazioni nell'interferogramma (**Fig. 3**) è contenuto. Queste aree sono caratterizzate da un elevato valore di un parametro chiamato **coerenza**.

2.1.2 Interferometria multi-temporale con il metodo Persistent Scatterers

L'analisi di tipo multi-interferometrica o multi-immagine utilizza una lunga serie di immagini radar relative a una stessa area, nelle quali vengono identificati alcuni **bersagli radar** stabili su cui è possibile effettuare un'accurata stima della misura degli spostamenti (nell'ordine dei mm). A differenza della tecnica interferometrica differenziale (DInSAR), per la quale si utilizzano solo coppie di immagini caratterizzate da bassi valori di *baseline* spaziale con la conseguente riduzione delle immagini utilizzabili, l'utilizzo delle tecniche multi-temporali permette di selezionare quasi tutte le immagini SAR acquisite dal sensore prescelto sulla zona in esame. Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, tali tecniche permettono di ottenere migliori risultati di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), dovuta alla risoluzione dei problemi di decorrelazione e di disturbo atmosferico, sia per la capacità di seguire l'evoluzione temporale del fenomeno di interesse. Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili. Da un'elaborazione interferometrica multi-immagine si ottiene un **database di punti** appartenenti all'area di interesse, in corrispondenza dei quali sono immagazzinati i valori di deformazione misurati nell'intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni scelte per implementare l'analisi (serie temporali). Come già sottolineato, tali punti corrispondono a bersagli radar che preservano l'informazione spettrale nel tempo e si possono definire come **diffusori permanenti (persistent scatters, PS)**: essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservano quindi l'informazione di fase nel tempo (**Fig. 5 e Fig. 6**).

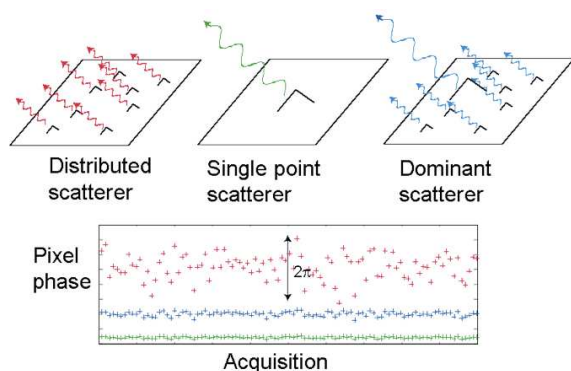


Figura 5: Meccanismo di diffusione del segnale radar per una cella campione SAR al suolo: distributed (rosso), segnale singolo ideale (verde) e persistent scatterers (blu). I pixel con diffusori del segnale tipo PS mostrano variazione della fase rispetto ai pixel caratterizzati da diffusori tipo "distributed". Scattering mechanism models for a SAR sampling cell on the ground - distributed (red), ideal single (Shanker 2010)

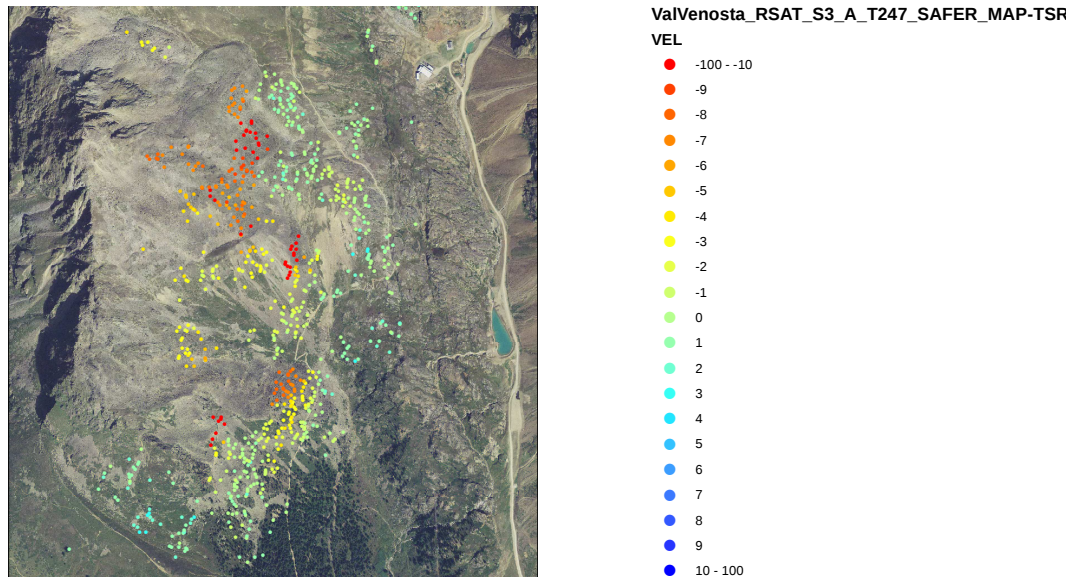


Figura 6 - Dati Radarsat ascendente (2003-2006) - progetto SAFER

I diffusori permanenti sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, comunque elementi già presenti al suolo, per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade ad esempio per la vegetazione che muta continuamente. La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone vegetate o perennemente innevate. L'insieme dei bersagli radar esistenti sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (Global Positioning System) permanente.

Colesanti et al. (2003) descrivono gli output derivanti dall'analisi di ogni PS:

- Serie temporali di deformazione lungo la LOS; riferite temporalmente all'immagine Master;
- Alta precisione nella stima della quota: la distinzione della fase condotta per ogni singolo PS permette di stimare la componente della topografia residua per ogni PS dovuta alla scarsa precisione dei DEM usati per generare gli interferogrammi differenziali.

Le principali limitazioni in relazione alle misure di spostamento sono quelle comuni a tutte le tecniche interferometriche:

- la tecnica con PS è in grado di misurare differenze di percorso del segnale radar solo in una direzione, quella della Line of Sight (LOS). Avendo dunque un'unica proiezione degli spostamenti tridimensionali lungo la LOS del satellite, non è possibile recuperare il vettore spostamento completo (Perski et al. 2010);
- per poter estrarre la componente verticale ed orizzontale (EW) del campo di deformazione sono necessarie nella stessa area le geometrie ascendente e discendente (Tamburini et al. 2010, Peltier et al. 2010, Klemm et al. 2010);
- l'orbita del satellite (approssimativamente N-S) non permette di monitorare movimenti N-S (Notti et al. 2009).

In aree dove i bersagli radar “natural” sono assenti o scarseggiano possono essere installati dei riflettori artificiali detti corner reflectors, che garantiscono nell'immagine la presenza di punti stabili di diffusione del segnale. I corner sono costituiti da superfici metalliche le cui dimensioni dipendono dalla **frequenza** del SAR che opera. La Radar Cross Section, che fornisce una misura di quanto un oggetto è rilevabile dal radar, dipende dall'orientazione del corner rispetto alla geometria di acquisizione e dalla dimensione del corner. I corner utilizzati per la Banda-C hanno dimensioni anche di 70 cm mentre quelli per la Banda-X anche solo di 24 cm. (Fig. 7).



Figura 7: corner reflector artificiali per la Banda C (sx) e Banda-X (dx) (Progetto Lawina).

2.1.3 Interferometria multi-temporale con il metodo SBAS

La metodologia impiegata nel progetto SloMove utilizza l'approccio multi-interferometrico denominato SBAS, acronimo di Small Baseline Subset, un algoritmo che consente di generare

mappe di velocità media di deformazione e di seguire l'evoluzione temporale degli spostamenti di singoli punti dell'immagine.

Una delle caratteristiche peculiari della metodologia SBAS è la possibilità di preservare le caratteristiche di ampia copertura tipiche dei sistemi di immagini satellitari e di ottenere mappe di deformazione per ogni pixel avente un buon valore di coerenza. Per ottenere questo la tecnica SBAS utilizza una combinazione di interferogrammi, ognuno dei quali ottenuto a partire da dati satellitari acquisiti da orbite sufficientemente vicine (contenute baseline spaziali) e con tempi di rivisitazione non elevati (contenute baseline temporali) (**Fig. 8**), in modo da avere contenuti fenomeni di decorrelazione.

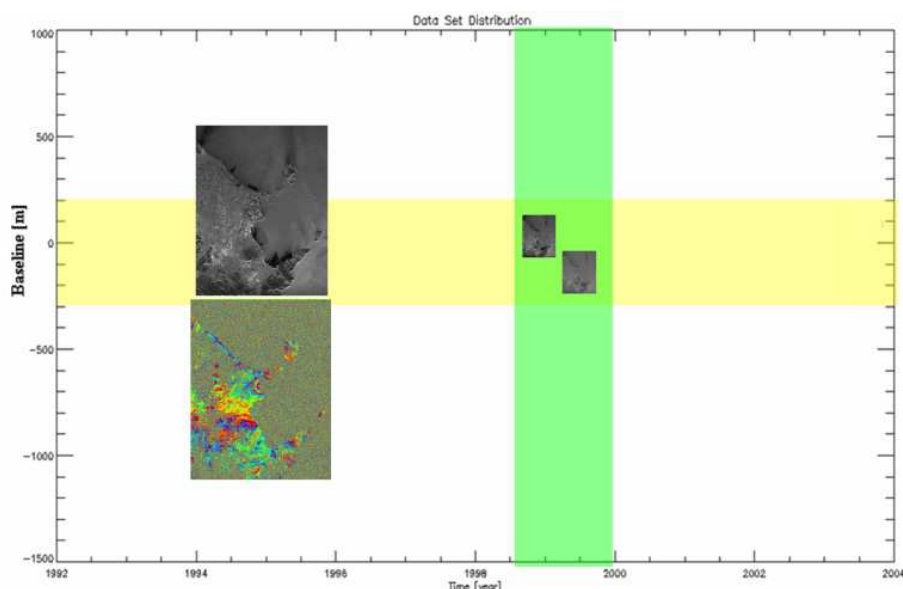


Figura 8: Esempio di baseline, coerenza e interferogramma utilizzati nell'algoritmo SBAS

Queste caratteristiche consentono di minimizzare alcuni effetti (rumore di decorrelazione spaziale e temporale) che disturbano i dati, aumentando il numero di punti per unità di area sui quali si riesce a fornire una misura affidabile della deformazione. I prodotti ottenuti con questo metodo sono, quindi, caratterizzati da un'elevata densità spaziale di punti monitorabili, i quali presentano un'accuratezza di circa 1 mm/anno sulle misure di velocità media di deformazione e di circa 5 mm sulle misure di deformazione (Casu et al. 2006).

L'applicazione del metodo matematico della decomposizione ai valori singolari (SVD), permette poi di collegare dataset di acquisizioni SAR indipendenti separate da grandi valori di baseline incrementando così il tasso di campionamento temporale e, pertanto, di avere una

adeguata descrizione dell'evoluzione temporale delle deformazioni. La disponibilità di informazioni sia spaziali che temporali nei dati processati è poi usata per identificare ed eliminare i contributi dovuti ad artefatti di fase atmosferici (**Fig. 9**).

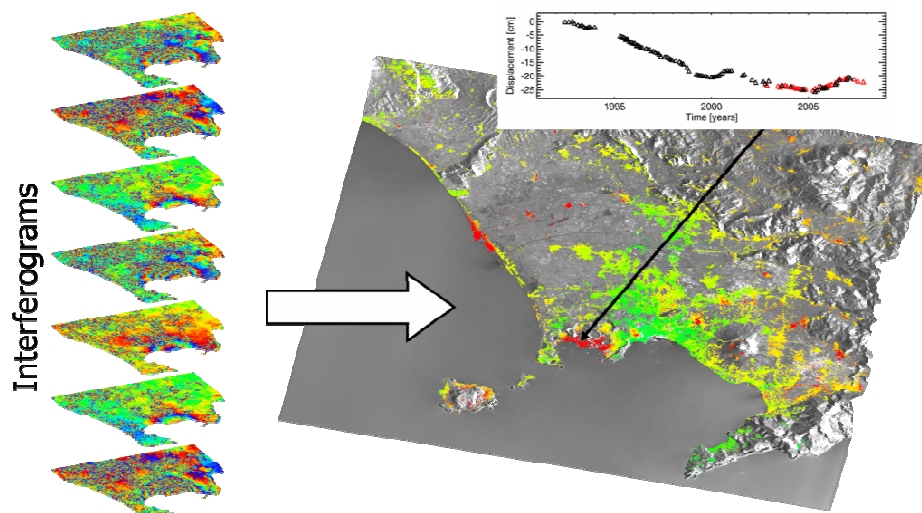


Figura 9. Esempio di analisi SBAS multi-interferometrica

L'estensione tipica dell'area analizzabile (a media risoluzione spaziale) è dell'ordine dei 100x100 km, benché sia stata dimostrata l'applicabilità della tecnica anche ad aree molto più vaste. Una versione estesa dell'algoritmo SBAS, infatti, è in grado di generare mappe di velocità e serie storiche di deformazione in aree molto vaste (estensione spaziale dell'ordine di varie decine di migliaia di km²) e di fornire informazioni sulle caratteristiche spazio-temporali delle deformazioni individuate con accuratezze che sono risultate essere in linea con quelle tipiche dell'algoritmo SBAS convenzionale.

Un ulteriore sviluppo della tecnica sopra descritta, particolarmente importante per la continuità nel tempo del monitoraggio delle deformazioni superficiali, consiste nella **possibilità di utilizzare congiuntamente più serie di dati acquisiti da sensori diversi, purché caratterizzati dalla stessa geometria di illuminazione (Multi-sensor SBAS)**. I singoli dataset sono elaborati separatamente e poi combinati con il metodo SVD.

Fondamentale nella tecnica SBAS, così come nelle altre tecniche multi-interferometriche, è la selezione della geometria di acquisizione e del numero di dati necessari all'elaborazione. Per il primo aspetto vanno scelte acquisizioni satellitari con un angolo di incidenza tale da illuminare le aree di interesse. In base a tale angolo vanno orientati anche i corner reflectors utilizzati. Nei confronti del numero di acquisizioni, ogni set di dati, per fornire una misura affidabile delle deformazioni, deve essere composto da almeno 15-20 dati.

2.2 *Dati da rilevazione terrestre: il GPS, le tecniche di posizionamento le metodologie*

Il GPS (Global Position System) è un sistema di posizionamento estremamente efficace che consente di misurare reti geodetiche ed eseguire rilievi di dettaglio con precisioni elevate. Il sistema permette di eseguire il posizionamento di punti appartenenti alla superficie terrestre, ovvero la determinazione della posizione dei punti interessati in un assegnato sistema di riferimento.

Il posizionamento che si ottiene con il GPS è tridimensionale, quindi contemporaneamente planimetrico e altimetrico.

L'accuratezza del risultato dipende dalla tecnica di acquisizione utilizzata, dalla configurazione satellitare presente al momento della campagna di misura, dalla geometria della rete, dai fattori atmosferici che intervengono a ritardare la propagazione del segnale nel tragitto satellite-ricevitore e dalla visibilità dei satelliti.

Il sistema GPS è composto da tre elementi:

- Il segmento spaziale è costituito da un gruppo di satelliti che trasmettono su due frequenze denominate L1, che lavora con la frequenza caratteristica di 1575,42 MHz, e L2 (1227,6 MHz).

Il segnale emesso dai satelliti GPS è suddiviso in frames e sub-frames: fondamentalmente esso contiene informazioni sulla distanza tra ricevitore e satellite, informazioni e correzioni relative agli orologi dei satelliti, i dati di effemeridi relative alle orbite percorse dai satelliti, lo stato di salute dei satelliti etc.

- Il segmento di controllo è costituito dalla stazione Master di Colorado Spring (USA) e da undici stazioni che rilevano con continuità i dati orbitali e di tempo dei singoli satelliti, elaborano i dati, correggono le orbite ed i tempi dei satelliti e trasmettono ad essi tali informazioni.
- Il segmento di utilizzo consiste in differenti tipi di ricevitori GPS usati per scopi diversi. Nel momento in cui il ricevitore acquisisce il segnale da almeno 4 satelliti, la precisione del dato dipende dal metodo di misura e dal ricevitore impiegato, oltre al fatto che maggiore sarà il numero di satelliti visibili dal ricevitore, migliore sarà il posizionamento perseguibile.

La determinazione delle distanze tra ricevitori e satelliti avviene tramite due distinte possibilità operative, diverse sia concettualmente che per il grado di precisione conseguibile:

- A) La tecnica di **“POINT POSITIONING”** (posizionamento assoluto di un punto singolo nel sistema di riferimento assegnato con un unico ricevitore), con la quale allo stato attuale si determina la posizione con un’incertezza dell’ordine di decine di metri (migliore accuratezza orizzontale che verticale); si tratta quindi di una tecnica di precisione sufficiente per la navigazione o per tracciamenti speditivi (con i cosiddetti apparati “pathfinder”), ma non per le applicazioni topografiche (Fig. 10).

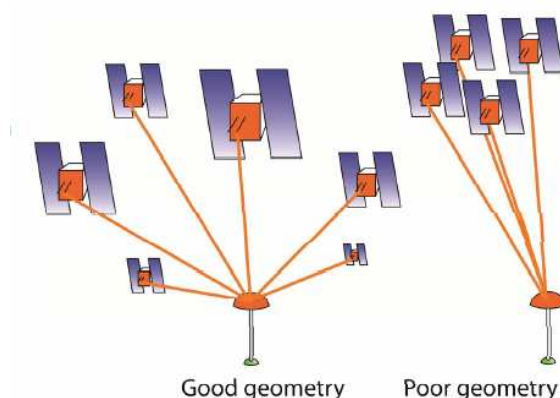


Figura 10: L’accuratezza del posizionamento del ricevitore non dipende solo dagli errori di segnale (effemeridi, satellite clock off-set, ritardo atmosferico), ma anche dalla geometria dei satelliti rispetto al ricevitore.

Sono disponibili correzioni per ridurre l’accuratezza fino a 1-2 m. La durata della sessione di misura può determinare un aumento dell’accuratezza: con un posizionamento statico di ca. 1 h questo parametro varia tra 1 a 5 m, in dipendenza dalla qualità del sensore utilizzato.

- B) La tecnica del **“DIFFERENTIAL POSITIONING”** o **“RELATIVE POSITIONING”**, con la quale si determina la posizione di un punto rispetto a un altro punto considerato noto. In pratica, viene determinato il vettore posizione relativo della “linea base” o **base** (in inglese **“baseline”**) tra i due punti nelle sue tre componenti rispetto a una terna cartesiana assegnata. La precisione ottenibile su queste tre coordinate relative è dell’ordine di qualche milionesimo della distanza, pari quindi, o superiore, a quella di operazioni geodetiche classiche eseguite con la massima accuratezza (Fig. 11).

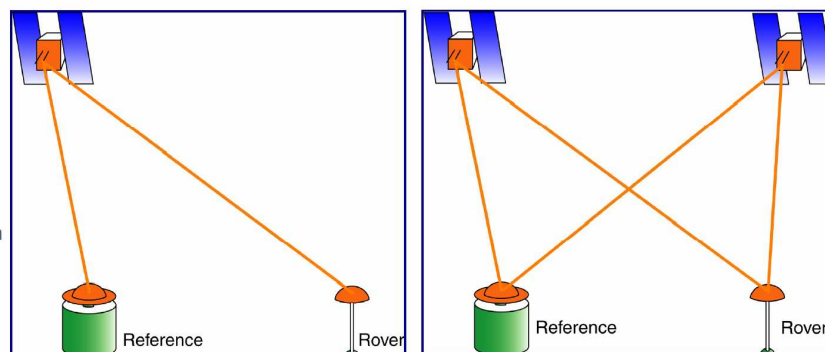


Figura 11: Single differences (SD, differenze tra 2 osservazioni simultanee da due ricevitori allo stesso satellite) e Double Differences (differenze di due differenze simultanee singole riferite a due satelliti)

Il sistema satellitare GPS consiste ad oggi di 31 satelliti disposti su 6 orbite, ed è progettato in modo da garantire sempre la visibilità di almeno 4 satelliti da qualsiasi punto sulla terra, solitamente per un periodo variabile tra 1 e 6 ore ogni 24 ore.

Le “finestre” temporali di osservabilità per una data zona e in un certo giorno possono essere determinate preventivamente (“planning”) utilizzando appositi programmi predisposti dalle ditte produttrici di ricevitori GPS e da programmi open source, consentendo così la programmazione delle sessioni di misura. Il software di preparazione dà informazioni anche sulla bontà della configurazione geometrica con cui i satelliti si presenteranno (i satelliti fungono in pratica da “trigonometrici” e devono essere il più possibile uniformemente distribuiti nel cielo), quantificandola mediante il parametro **PDOP** (Position Dilution Of Precision, ovvero “calo di precisione nel posizionamento tridimensionale”). Questo parametro (unitamente ad altri dal significato leggermente diverso, come l’HDOP, legato alle sole componenti planimetriche o il VDOP, legato alla sola quota) rappresenta il contributo del fattore configurazione geometrica dei satelliti all’errore quadratico medio nel posizionamento; perché risulti soddisfacente, **il suo valore deve essere limitato a poche unità**. Nella definizione delle “finestre” di osservabilità occorre quindi tener presente, oltre al numero di satelliti, anche il valore del PDOP.

2.2.1 GPS: Il posizionamento relativo

La procedura di misura nota come “differenziale”, accennata nel capitolo precedente e nella quale la determinazione della posizione con il sistema GPS è effettuata non per punti isolati, ma per coppie di punti, necessita di disporre di almeno due ricevitori che devono essere posti sui due estremi della **base** e funzionare contemporaneamente per l’intera durata della sessione di misura, che va da qualche decina di minuti a qualche ora, a seconda della distanza

e della precisione richiesta. Con apparati in grado di ricevere entrambe le frequenze (L1 e L2, più complessi e costosi) si possono determinare **baselines** di centinaia di chilometri. L'incremento di precisione che si ottiene con un più lungo tempo di stazionamento permette di affinare la stima del vettore baseline nelle tre componenti.

La tecnica differenziale prevede due procedure operative fondamentali, le **procedure statiche** e quelle **cinematiche**, che forniscono le coordinate corrette a posteriori, dopo aver effettuato il calcolo differenziale sul P.C., tramite un software di post elaborazione.

2.2.2 Il metodo statico - rapido

Tra le metodologie operative più diffuse e maggiormente impiegate rientrano il metodo statico e **statico-rapido** in post elaborazione (post-processing).

Il concetto base per le metodologie statiche e statiche-rapide prevede l'esecuzione contemporanea delle osservazioni da almeno 2 stazioni (sulle quali i Ricevitori restano fissi per tutta la durata della sessione) e la misura della baseline congiungente per un periodo di tempo che varia da 5 min a > di 60 min (in funzione della lunghezza delle basi e del tipo di ricevitore utilizzato).

La tecnica statica rapida differisce dalla statica per il tempo di posizionamento più breve che conduce a una maggiore produttività per quanto riguarda i punti battuti e dalla lunghezza delle basi che per le statiche possono essere generalmente maggiori. Alcune fonti (di natura didattica) parlano di un limite di 15-20 Km per i rilievi statico-rapidi, mentre per i rilievi statici si possono raggiungere baseline anche superiori a 100 Km.

Il metodo di misura consiste nello scegliere un punto di riferimento con coordinate considerate note dove sarà localizzato il ricevitore denominato "Base", mentre con un ricevitore Rover si procederà allo stazionamento sui punti da rilevare assicurandosi di poter disporre di una configurazione di minimo 4 satelliti, osservabili da entrambi i ricevitori durante ogni step di misura.

In un rilievo, al fine di ottenere una buona affidabilità delle stime del posizionamento, si deve assicurare un certo livello di ridondanza delle osservazioni. Per ridondanza si intende la differenza tra il numero di osservazioni (le misure effettuate) e il numero di parametri incogniti (le posizioni dei punti).

Per quanto riguarda i tempi di stazionamento essi dipendono dal numero di satelliti; considerando valori del parametro PDOP <7:

Numero di Satelliti

Tempo di osservazione

4	> 20 min.
5	10 - 20 min.
> 6	5 - 10 min.

2.3. Dati da rilevazione terrestre: Laser scanner da terra (M. Phillips, SLF, CH)

Il Terrestrial Laser Scanning è un metodo di monitoraggio del terreno che si è ampiamente diffuso nell'ultimo decennio. Il metodo di misura fornisce una nuvola di punti ad alta risoluzione che rappresenta la superficie dell'oggetto scansionato e permette la creazione di un modello del terreno con una precisione del cm ed una risoluzione del dm. La tecnologia, in un assetto di acquisizione multi-temporale, rende possibile l'elaborazione di un modello di deformazione 3D della superficie e il monitoraggio di singoli elementi sulla stessa. Il risultato può essere visualizzato in 2.5D, riportando le variazioni verticali e le traslazioni orizzontali della superficie.

Nel Progetto SloMove sono stati impiegati due laser a *grande range*, modello LPM321 (nel 2012) realizzato da Riegl e il modello VZ6000 nel 2013. L'acquisizione dei dati avviene tramite l'impiego di un pacchetto software RiProfile installato su portatile e collegato allo scanner. La georeferenziazione e la correzione geometrica della nuvola di punti sono realizzate sempre tramite l'utilizzo del software. Per ulteriori analisi è possibile calcolare un raster della superficie dalla nuvola di punti; i DEM che si ottengono possono essere utilizzati per definire la superficie di deformazione attraverso il calcolo, pixel per pixel, delle loro differenze. Si possono ottenere anche spostamenti orizzontali della superficie traslando i pattern di rugosità della superficie.

Al fine di consentire il monitoraggio dell'area selezionata è necessario identificare un quadro di riferimento per trasformare le singole misure in un comune sistema di coordinate, che in un contesto dinamico alpino si traduce nel materializzare in sito dei punti di controllo retro-riflettenti. I **punti di controllo** sono solitamente costituiti da fogli riflettenti posti sopra una piastra circolare di metallo (50 cmx50 cm, **Fig. 12**) che devono essere ubicati assolutamente su punti stabili (roccia in posto o blocchi stabili) e al riparo da fenomeni naturali (crolli, valanghe, carichi da neve e insolazione). Nel Progetto SloMove le misure TLS sono accoppiate con punti fissi GPS ancorati a corner reflector rendendo ancora più difficile identificare posizioni appropriate per i punti di controllo e contemporaneamente rispettare i requisiti richiesti per il GPS e il SAR (si veda **Cap. 3**).



Figura 12 - Punti di controllo

I punti di controllo (minimo 3) devono essere visibili e la loro distribuzione spaziale deve considerare la stabilità del sito al fine di garantire che successive scansioni dell'area possano essere confrontate correttamente; devono inoltre essere installati adeguatamente rispetto all'orientazione dello strumento, ortogonalmente allo scanner; la corretta installazione del punto di ancoraggio è determinante.

Il posizionamento dello scanner deve avvenire conformemente a delle esigenze tecniche che prevedono:

- un substrato stabile, che garantisca una installazione solida dello strumento;
- una buona visuale panoramica per consentire la georeferenziazione attraverso l'uso dei riflettori;
- la posizione dello scanner rispetto all'oggetto da rilevare (che non deve superare i 2500m). È raccomandabile infatti che la distanza tra scanner e oggetto sia la più breve possibile, dato che la risoluzione e l'errore aumentano con la distanza;
- evitare bassi angoli di vista tra scanner e oggetto, e interazioni del raggio laser con la superficie del terreno prima di raggiungere l'oggetto (per non peggiorare i risultati della misura).
- effettuare più misure da punti di stazionamento differenti dello scanner, per eliminare le aree non raggiunte dal beam del laser (effetto **shadowing**).

La tecnologia TLS dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche che si amplificano in un contesto di alta montagna. Pioggia, neve, vento forte, nebbia o nuvole prossime allo scanner

possono rendere impossibile la misurazione o limitare il numero di giorni nei quali effettuare la misura. In questo caso gli agenti atmosferici limitano la visibilità dello scanner, mentre nel caso di neve al suolo è l'oggetto che risulta celato.

Fondamentale per il monitoraggio con tecnologia TLS è l'entità della deformazione che si intende rilevare: in funzione della costellazione delle misure, in un approccio multi-temporale, il rate di spostamento tra due misure di un elemento deve essere di qualche centimetro circa; in caso di fenomeni lenti come i rock glacier l'intervallo di tempo tra due misurazioni dovrebbe essere di circa un anno, in modo da poter ottenere dati significativi.

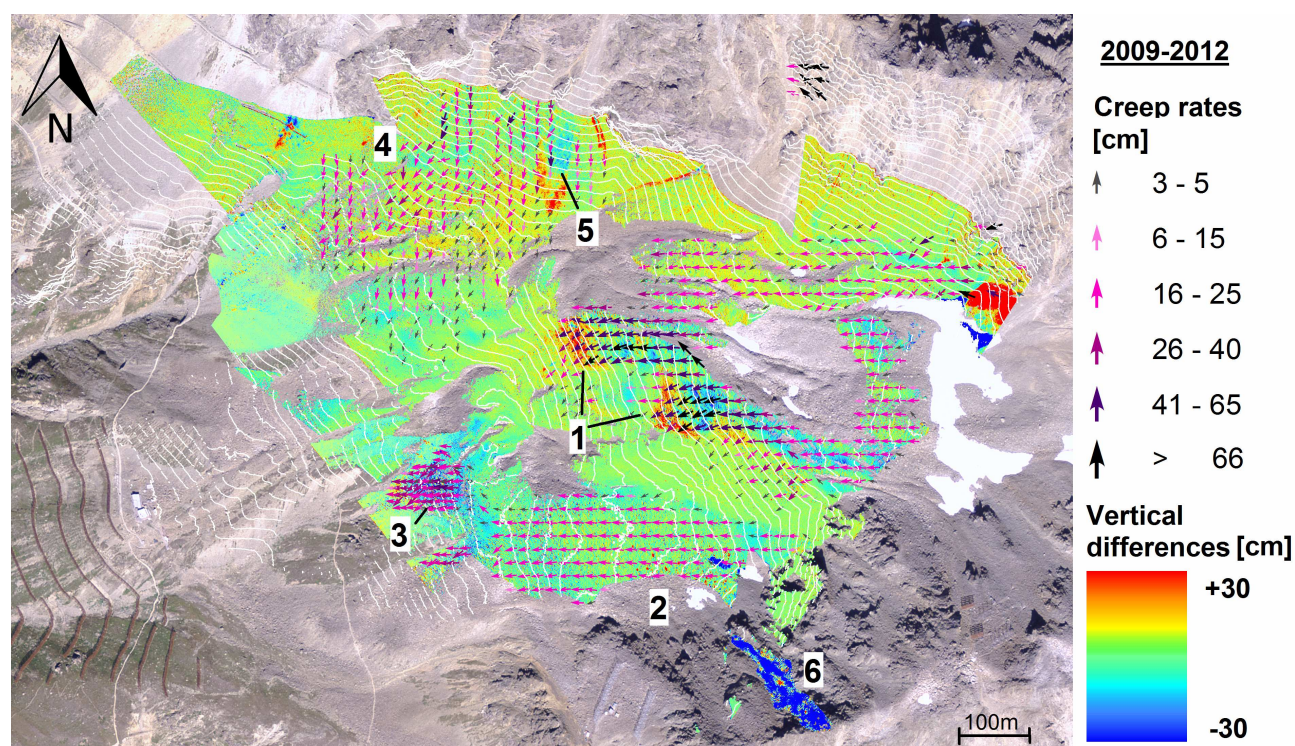


Figura 13: Prodotto ottenuto dall'elaborazione delle misure condotte dal 2009 sul rock glacier di Foura da l'amd Ursina (orthophoto © swisstopo (DV03349.2)).

3. INTEGRAZIONE DELLE METODOLOGIE DI MISURA

L'integrazione delle tecniche di misura descritte nei capitoli precedenti si concretizza in campagna tramite l'installazione di *punti di riferimento* comuni per le metodologie selezionate. Questi permettono una precisa georeferenziazione spaziale dei dati e, in fase di elaborazione, un loro facile confronto tra una tecnica di misura e l'altra in un contesto di piena complementarietà delle informazioni. Le aree test del progetto SloMove (**Deliverable 3.01**), come descritto nei capitoli precedenti, si prestano all'impiego della multi-interferometria differenziale con l'utilizzo di bersagli radar naturali. La presenza di grossi blocchi distribuiti sull'intera superficie di indagine, l'assenza di copertura boschiva e l'orientazione favorevole dei versanti favoriscono la buona riuscita di un rilievo con l'impiego di immagini SAR. La validazione del dato SAR, attraverso l'impiego di un rilievo di precisione con il GPS in assetto differenziale, necessita di individuare punti fissi di controllo comuni ad entrambi. Su alcuni punti considerati "stabili" sono stati installati corner reflector (3 a Pontresina e 4 in Val Senales) con associati punti di misura GPS, attraverso un sistema ideato *ad hoc* per il progetto (**Fig. 14**). Questa struttura consente di sovrapporre le informazioni provenienti dalle due tecnologie e di riferire con precisione i dati GPS con le immagini SAR; contemporaneamente le immagini SAR possono essere "agganciate" ai dati GPS (Global Positioning System) e riferite ad un sistema di riferimento "assoluto" (globale). La restante rete di misura GPS è stata materializzata cercando di distribuire in modo omogeneo i punti di misura sull'intero fenomeno, con particolare attenzione ai settori caratterizzati da maggiori velocità di deformazione.



Figura 14: Corner reflector e braccio con innesto a baionetta per la misura GPS

Coerentemente a quanto espresso finora, anche per il rilievo TLS i punti di controllo sono stati localizzati vicino ai corner e ai punti di misura GPS (**Fig. 15**).



Figura 15: Reference target per il TLS e corner con braccio per la misura GPS

I punti della rete GPS si localizzano su blocchi: la dinamica dei fenomeni gravitativi studiati genera non solo un moto traslativo ma anche una rotazione dei blocchi che possono falsare il risultato della misura. Per questo motivo è stato ideato uno strumento (**Fig. 16**) per valutare la componente rotazionale del blocco, che costituisce parte del modulo di spostamento rilevato con le rilevazioni GPS. Lo strumento è costituito da una struttura in acciaio inox, una livella digitale e una bussola. Il calcolo della componente rotazionale sarà considerato in fase di post-processing.



Figura 16: Strumento per la valutazione della componente rotazionale della deformazione

4. APPLICABILITÀ DELLE TECNOLOGIE SELEZIONATE: LIMITAZIONI TECNICHE

4.1 Limiti dell'interferometria multi-temporale

Nei paragrafi successivi sono descritte le limitazioni tecniche all'applicabilità dell'interferometria multi-temporale per lo studio di fenomeni lenti di deformazione del terreno in ambienti di alta montagna e ritenute tra le più rilevanti da considerare durante le fasi di selezione delle metodologie di monitoraggio.

4.1.1 Visibilità del satellite

La visibilità del satellite sull'area oggetto dello studio, o meglio, la capacità del satellite di "rilevare" il fenomeno in esame, dipende dalla geometria di acquisizione e dalle caratteristiche morfologiche del sito. Conoscendo i parametri di orientazione e pendenza media del versante/processo, si valuta la possibilità di utilizzare l'interferometria multi temporale e in caso affermativo, di selezionare la geometria di acquisizione più idonea tra quelle disponibili sul mercato.

Risulta indispensabile dunque procedere alla valutazione delle deformazioni prospettiche (**Cap. 2.1**), stimando quali e quanto estese sono le porzioni dell'area in esame nelle quali il rilevamento radar è soggetto a distorsioni e quelle dove il dato è affetto da maggiore attendibilità (**enhanced range**).

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Nell'ambito del progetto SloMove si è proceduto valutando la condizione di "visibilità" del satellite nelle aree selezionate: a questo fine sono stati elaborati alcuni raster con indicazione pixel per pixel sul tipo di distorsione presente. Gli elaborati costituiscono delle "maschere" prodotte in ambiente GIS partendo da un dtm LIDAR ad alta risoluzione (2,5mx2,5m) e da un tool creato *ad hoc*.

In fase di valutazione della geometria più idonea al rilievo delle aree test italiana e svizzera sono state create 4 maschere alle orbite discendenti e ascendenti appartenenti a due satelliti teorici aventi azimuth (angolo dell'orbita) pressoché simili (orientati N-S) ma con angoli di vista di 30° e 45,77° circa.

Qui di seguito si riporta un sunto delle geometrie considerate per la valutazione delle distorsioni:

Tabella 1

	Azimuth	Nominal incidence angle I°
Satellite n. 1	$\pm 7,50^\circ$	30°
Satellite n. 2	$\pm 6,75^\circ$	$45,77^\circ$

Prodotto

Nell'ambito del progetto SloMove è stato prodotto un tool per la creazione in ambiente GIS di maschere delle distorsioni geometriche. Il tool si basa su considerazioni di tipo geometrico: partendo da un modello digitale del terreno ad alta risoluzione, ad ogni pixel è stato attribuito un valore che è funzione delle caratteristiche di azimuth (angolo dell'orbita) e di angolo di incidenza nominale interpolate con i dati topografici dell'area.

L'angolo di incidenza nominale I° corrisponde all'angolo di vista (θ) ma considera la curvatura terrestre. In alcuni casi viene fornito I° e in altri θ .

Per maggiori dettagli si veda **Scheda operativa n.1** e **Allegato n. 1**.

Partendo dalle relazioni (**Tabella 1**, **Allegato n. 1**) si sono ottenute delle maschere di distorsione che permettono di verificare la copertura dei dati interferometrici e, nel caso di impiego di riflettori artificiali (corner reflector), forniscono indicazione sulla loro migliore ubicazione.

4.1.2 Visibilità: Configurazione del satellite

L'orbita polare determina il passaggio del satellite su una stessa area durante la fase discendente, quando attraversa l'equatore da nord a sud, e ascendente, viceversa.

Considerando una linea di vista (slant range) ortogonale all'azimuth (circa N-S) e destra-orientata, l'orbita discendente darà meno distorsioni sui versanti orientati a ovest e quella ascendente su quelli orientati a est. La geometria del satellite limita fortemente il rilievo di certe aree, in quanto il radar è sensibile solo agli spostamenti che presentano una componente nella direzione della linea di vista (orientata circa E-O). Di conseguenza gli spostamenti ortogonali alla slant range (circa N-S) (**Fig. 1**) non sono osservabili.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Sulla base di quanto descritto sopra, nelle due aree test è stato valutato il valore modale dell'orientazione del versante al fine di stabilire la visibilità del processo naturale in esame.

Ad esempio il versante dell'area test italiana è orientato prettamente a est con fenomeni convergenti verso nord-est (50°N) e verso sud-est (130°N).

Prodotto

A partire dal modello digitale del terreno sono stati creati in ambiente GIS la carta di aspect e di slope. Con un apposito tool di statistica sono stati valutati i valori modali di orientazione e pendenza dell'area test.

4.1.3 Caratteristiche della superficie

Come descritto nel paragrafo introduttivo alle tecniche di rilevazione SAR diversi effetti riducono la qualità dei risultati. Tra questi uno dei principali è la variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar tra i diversi giorni di acquisizione del dato.

Questo può essere dovuto alla vegetazione, erosione della superficie, o attività agricole. La decorrelazione temporale dipende dalla lunghezza d'onda λ del radar; più lunga è la λ minore è la sensibilità alle variazioni elettromagnetiche del bersaglio, ma minore è anche la precisione. Per questo motivo le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione. In presenza, ad esempio, di estese coperture boschive, il dato potrà essere compromesso al tal punto da non essere utilizzabile. Anche in presenza di riflettori naturali idonei come ad esempio centri urbani o rocce esposte, maggiormente stabili nel tempo, si possono avere delle decorrelazioni legate a cambiamenti atmosferici indotti da pioggia e neve.

In un contesto di alta montagna, dove la presenza di strutture o infrastrutture scarseggia e le condizioni climatiche, come ad esempio la persistenza della copertura nevosa al suolo, limitano anche la coerenza degli elementi più stabili, si deve procedere con attenzione nel valutare l'applicabilità di questa metodologia di monitoraggio. La copertura nevosa comporta una serie di inconvenienti all'acquisizione di dati dovuti all'interruzione nelle acquisizioni durante i periodi invernali, che possono essere così riassunti:

- effetto sul filtraggio atmosferico temporale per lunghi periodi di tempo tra una acquisizione e l'altra;
- la separazione temporale tra due acquisizioni successive influisce anche sulla capacità di registrare le deformazioni: per spostamenti rilevati tra due successive acquisizioni superiori a metà della lunghezza d'onda del radar il rate è sottostimato.
- La limitazione al rilievo solo durante i mesi estivi non permette, o solo limitatamente, di rilevare le deformazioni cosiddette "intrastagione";
- numero di scene nettamente inferiore, condizione alla quale si può rimediare con satelliti con intervalli di acquisizione inferiori.

Infine, verificati i fattori sopra descritti, si dovrà valutare la presenza e la densità di riflettori naturali nell'area di studio, e verificare se la loro distribuzione sia sufficiente o meno per descrivere il fenomeno considerato.

Cosa è stato fatto in SloMove

Basandosi sulla Carta dell'uso del Suolo si è proceduto valutando distintamente **la % di area coperta da bosco o colture intensive**, in quanto possibili fonti di dati decorrelati. La valutazione è stata effettuata in ambiente GIS.

Le quote di localizzazione delle aree test e la persistenza al suolo della neve hanno costretto a limitare il monitoraggio solo durante la stagione estiva, evitando i mesi con copertura di neve; questo limita la perdita di dati dovuta alla decorrelazione generata dalla copertura dei riflettori al suolo. Alla riduzione del periodo di monitoraggio si può sopperire a livello di post-elaborazione dei dati acquisendo immagini con intervalli più ridotti, permettendo di ottenere una baseline temporale breve.

Una successiva analisi è stata condotta sulla **tipologia di bersagli** riscontrabili in sito: grazie alle recenti ortofoto, ad una cartografia geologica e ad un rilievo geologico-geomorfologico di dettaglio si è verificata la presenza di materiale di copertura ideale per una analisi di tipo interferometrico multi temporale. Le due aree test, ubicate a quote superiori ai 2500 m, si presentano prive di copertura arbustiva e caratterizzate da materiale detritico grossolano con blocchi talvolta superiori ai 5 m³.

In base alla percentuale di copertura boschiva rispetto all'area totale e alla distribuzione dei riflettori (localizzazione rispetto al processo naturale) si è valutata l'idoneità della metodologia per questi parametri.

4.1.4 Cinematica del fenomeno

Come descritto nei capitoli introduttivi la tecnologia interferometrica differenziale si basa sulla differenza di fase calcolata nello stesso pixel tra due immagini SAR acquisite in due istanti temporali diversi e sottoposte a opportune operazioni di co-registrazione.

Il gradiente di deformazione del processo naturale in esame è uno dei parametri fondamentali nella scelta del satellite e della geometria di acquisizione.

In caso di fenomeni di deformazione particolarmente rapidi ed estesi, possono presentarsi problemi nell'attendibilità della misura dovuti alla riduzione della coerenza delle immagini SAR. Teoricamente la tecnica di interferometria SAR permette di valutare correttamente, tra due acquisizioni successive, solo movimenti inferiori alla metà della lunghezza d'onda, che è strettamente legata alla banda di acquisizione del satellite (**Tab. 2**).

Band	Frequency (GHz)	Wavelength (cm)
X	12,0-8,0	2,5 – 3,75
C	8,0-4,0	3,8 – 7,5
L	2,0-1,0	15,0 – 30,0

Tabella 2: Bande dei satelliti operativi con sensori SAR

Quanto detto è valido rigorosamente a livello di spostamenti puntuali. Le limitazioni precedenti possono essere infatti in parte superate nel caso in cui il moto sia “spazio correlato” e l’area oggetto di analisi sia caratterizzata da una buona densità di punti spazialmente prossimi e dotati di buona coerenza. In questo caso si ha a disposizione una rete di punti di misura (che possono essere distribuiti nel caso della tecnica SBAS utilizzata per questo progetto) e di conseguenza l’informazione proveniente da punti densi e vicini può sicuramente migliorare l’attendibilità della misura, nel caso di valori di coerenza paragonabili al caso in cui siano a disposizione punti isolati e di utilizzo di efficaci tecniche di phase unwrapping. La scelta stessa del satellite, e quindi di una lunghezza d’onda opportuna, o la possibilità di avere baseline temporali più corte, con conseguente effetto ridotto della decorrelazione dovuta agli intervalli temporali più brevi fra le acquisizioni, possono limitare questo fenomeno.

Va inoltre sottolineato che il concetto di “velocità” di un fenomeno e di rilevabilità di quest’ultimo ad opera dell’interferometria è strettamente legato anche al trend di deformazioni, cioè l’andamento lineare o meno nel tempo dell’entità degli spostamenti.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Nel contesto del progetto SloMove sono state selezionate aree test caratterizzate da fenomeni considerati per definizione “lenti”. Si tratta di processi con deformazioni massime di qualche metro all’anno, come i rock glacier e le deformazioni gravitative di versante, ai quali sono tuttavia frequentemente associati fenomeni secondari di maggiore magnitudo, come debris flow e crolli.

Un rock glacier attivo è caratterizzato da un creep non lineare ad impulsi con massime deformazioni concentrate durante i mesi più caldi e al termine della stagione estiva. Le deformazioni di versante, e in questo caso la frana in roccia della Val Finale, si suppone presentino un creep lineare continuo durante l’anno, anche se probabilmente caratterizzato da limitate accelerazioni primaverili-estive legate a fasi di scioglimento nivale e ad episodi di pioggia intensa.

Per il monitoraggio dei fenomeni sopra descritti verranno acquisite immagini con baseline temporale che può arrivare potenzialmente a 8-4 gg; questo, congiuntamente all'elevata densità dei riflettori naturali, aumenterà l'attendibilità dei risultati.

Si noti che al fine di ottenere i migliori risultati possibili dalla tecnica interferometrica è determinante conoscere, seppur in modo approssimato, il fenomeno oggetto dell'indagine, grazie a dati pregressi in grado di fornire informazioni sull'entità delle deformazioni.

4.1.5 Accessibilità, vincoli e sicurezza

Nel caso di impiego della metodologia interferometrica multi temporale con l'ausilio di riflettori artificiali, come i corner reflector, dovrà essere valutata con attenzione anche l'accessibilità al sito: la possibilità di accedere al sito in sicurezza, e di poter realizzare il lavoro di campagna ogni qualvolta sia necessario, deve essere considerata durante le fasi preliminari di progettazione del monitoraggio. L'accessibilità influenza le attività non solo dal punto di vista economico, in quanto può comportare un consistente aumento dei costi rispetto a quelli previsti (**Cap. 6**) ma può soprattutto impedire la riuscita del monitoraggio. Siti inaccessibili a causa di condizioni topografiche e ambientali sfavorevoli o presenza di vincoli territoriali che impediscano l'installazione della strumentazione, rappresentano un ostacolo rilevante all'impiego di questa metodologia.

Nell'ambito del progetto SloMove sono stati installati un totale di 7 riflettori artificiali.

4.2 Limiti del rilievo con GPS differenziale

Come per l'interferometria multi-temporale, anche per le rilevazioni terrestri si procederà nei capitoli seguenti alla descrizione delle limitazioni tecniche e operative legate all'esecuzione di un monitoraggio a lungo termine. Le principali limitazioni all'utilizzo delle misure GPS differenziali consistono principalmente nella visibilità del segnale satellitare e nell'accessibilità al sito per l'esecuzione delle misure stesse. Il primo gruppo include condizioni che, in ambiente alpino di alta quota caratterizzato da rilievi montuosi, condizionano soprattutto la visibilità della costellazione di satelliti, mentre l'accessibilità al sito di misura può limitare fortemente tutta l'attività di campagna.

4.2.1 Visibilità del segnale satellitare

Per poter operare è necessaria la contemporanea **presenza di almeno 4 satelliti** visibili dal punto di stazione. Vanno considerati "utili" solo i satelliti visibili con angolo di elevazione sull'orizzonte superiore a una certa soglia (di solito 15-20 gradi): quelli con elevazione inferiore comportano un segnale disturbato sia dall'eccessivo spessore di atmosfera attraversata, sia dalla presenza di alberi o edifici ed altre ostruzioni che impediscono la buona ricezione dei segnali stessi; in base al numero di satelliti presenti al momento dell'acquisizione, il tempo di stazionamento del ricevitore Rover sul punto di misura sarà più o meno prolungato (Cap. 2.2.2).

La presenza di ostacoli naturali o artificiali in grado di influenzare negativamente il segnale satellitare deve essere valutata accuratamente al momento della realizzazione di una rete di monitoraggio.

L'obiettivo principale deve essere il rilievo del fenomeno naturale in oggetto, considerando che il segnale satellitare perde di accuratezza in condizioni non "ideali", influenzando la misura con errori che in condizioni ottimali possono essere minimizzati. In caso di estese e fitte coperture boschive, grande densità di strutture ed edifici o di particolari configurazioni morfologiche del sito, si possono verificare condizioni inadeguate al monitoraggio con questa tecnologia.

Una volta istituiti i punti di monitoraggio, al momento del rilievo si dovrà porre attenzione, oltre che al numero, anche alla configurazione dei satelliti "avvistati". Anche l'allineamento dei satelliti lungo una direzione preferenziale può compromettere le misure in quanto comporta una "cattiva" geometria di acquisizione che nei casi peggiori rende impossibile determinare la posizione di un punto o può portare ad errori di posizionamento anche di centinaia di metri.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove?

Nell'ambito del progetto SloMove la procedura di misura con questa tecnica si è rilevata adeguata, considerando le condizioni di totale assenza di copertura boschiva e di strutture ed edifici all'interno dell'area test. Nella realizzazione della rete di misura, si è comunque tentato di posizionare i punti di misura su blocchi di dimensioni elevate, sopraelevati rispetto a limiti topografici e il più possibile rappresentativi della cinematica del fenomeno in atto. A tal fine i punti di misura sono stati realizzati installando sui blocchi barre filettate perfettamente verticali, sulle quali sono stati avvitati degli inviti a baionetta per il posizionamento delle antenne di ricezione (Rover). Le stazioni selezionate per ospitare il ricevitore "Base" sono state fatte coincidere con i basamenti sui quali saranno installati i corner reflector (**Fig. 15**).

4.2.2 Accessibilità, vincoli e sicurezza

La metodologia di misura impone attività di campagna la cui frequenza dipende dall'obiettivo del monitoraggio e dalla durata del programma di misure.

Alla base del monitoraggio con GPS c'è la necessità di poter accedere al sito in condizioni di sicurezza e di stazionare sul punto per l'intera durata della misura (in riferimento alla procedura statico-rapida).

4.3 Limiti del Terrestrial Laser Scanner

Numerosi studi hanno dimostrato come fenomeni di alta montagna quali i rock glacier e le frane lente si prestino ad essere studiati con la tecnologia TLS. Nonostante i buoni successi ottenuti, l'applicabilità della tecnologia è affetta da difficoltà e limitazioni legate soprattutto al contesto ambientale e morfologico dell'area di indagine. Nel caso in esame si aggiunge a questo anche la necessità di integrare diverse metodologie di misura, che presentano propri limiti di applicazione.

4.3.1 Visibilità

Come accennato nel capitolo generale di introduzione alla tecnica laser da terra, il **posizionamento dello scanner** comporta una attenta valutazione preliminare atta a selezionare un sito che permetta una completa visibilità dell'area da indagare, ed in caso ciò non sia possibile, l'individuazione di più posizionamenti dai quali effettuare il rilievo. Il posizionamento della strumentazione deve inoltre tener conto della distanza scanner-bersaglio in quanto la risoluzione del rilievo diminuisce all'aumentare della distanza percorsa dal segnale stesso. Nel caso dello scanner impiegato nel progetto SloMove la distanza massima è di 1000 m.

Contemporaneamente, una volta stabilito il sito/i siti di installazione dello scanner, i **punti di controllo** (reference target) dovranno anch'essi essere ben visibili ed orientati in modo adeguato.

Un altro fattore che influenza la visibilità del laser scanner e di conseguenza l'attendibilità delle misure sono le **condizioni climatiche**: nebbia, foschia, pioggia e nuvole possono compromettere, nel peggiore dei casi totalmente, l'indagine o introdurre un errore rilevante nella misura.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Nell'ambito del progetto SloMove, una volta definiti l'area e i processi da indagare, si è proceduto individuando i più idonei siti di posizionamento del laser scanner, in funzione anche dell'accessibilità al sito scelto. Nell'area test italiana la prima posizione, facile da raggiungere ed ubicata a breve distanza dal sito, non consentiva il rilievo totale dell'area. Per coprire l'intera superficie si è dovuto individuare un secondo punto di stazionamento: il punto n. 2 è localizzato in un sito facilmente raggiungibile in funivia ed entro il limite massimo di distanza sensore-bersaglio prevista da quel modello di laser. Le acquisizioni sono state condotte da entrambi i punti di osservazione (rilievi affetti da accuratezza diversa dovuta alla differente distanza tra scanner e bersaglio), ottenendo così una copertura totale dell'area di indagine.

In fase di rilievo le problematiche maggiori sono state il trasporto della strumentazione di misura e le avverse condizioni meteorologiche.

4.3.2 Caratteristiche della superficie

Terreni dotati di elevata rugosità, come possono essere depositi detritici a grossi blocchi o rock glacier, bene si prestano al rilievo laser: una accentuata rugosità e una topografia regolare consente l'osservazione del creep orizzontale senza il manifestarsi di fenomeni di shadowing.

4.3.3 Accessibilità, vincoli e sicurezza

A causa del peso della strumentazione impiegata, le misurazioni possono essere condotte solo tramite l'utilizzo di un mezzo di trasporto, tra i quali anche l'elicottero. La tecnologia laser richiede infatti un posizionamento che consenta una completa visibilità dell'area da indagare, favorendo solitamente siti posti ad alta quota e spesso di difficile accesso.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Nell'ambito del progetto SloMove, l'allestimento dell'area test per le misurazioni con TLS è stato supportato, nell'area italiana e per quanto riguarda il trasporto della strumentazione, dall'utilizzo della funivia e di un fuoristrada. Nell'area test svizzera il trasporto della strumentazione è stato assicurato tramite l'impiego di un elicottero.

5. VALIDAZIONE DEI DATI

Come accennato nei capitoli introduttivi, la validazione dei dati ottenuti dalla multi-interferometria pone le basi per permettere un suo più ampio e organico utilizzo a scala regionale nello studio di processi naturali caratterizzati da movimenti lenti.

La validazione del dato consiste nel poter verificare l'attendibilità della misura condotta, soprattutto in termini di accuratezza (di ogni singola acquisizione e di un intero pacchetto di immagini), e di conseguenza di poter utilizzare l'informazione nella sua totalità. La validazione del dato interferometrico deve avvenire attraverso una metodologia dotata di una accuratezza maggiore, come nel caso delle misure differenziali GPS in configurazione statica-rapida in post-processing. Nel monitoraggio in sito di movimenti di versante il GPS è una delle tecnologie più comunemente impiegate. La validazione dei risultati ottenuti dalle diverse tecnologie consiste nel confrontare i dati una volta che quest'ultimi sono riportati in un termine comune (velocità o posizione-spostamento) e in una comune dimensione. L'obiettivo della validazione del dato SAR è quello di poter comprendere meglio il significato delle informazioni raccolte con questa tecnologia e di poter ottenere, tramite un algoritmo di correlazione, ad esempio, stime della velocità reale di deformazione del processo naturale in esame.

Alla base della validazione del dato interferometrico, acquisito ad hoc nelle aree test italiana e svizzera, si pone anche la corretta installazione della strumentazione di misura nei siti di studio (punti GPS, corner reflector, reference target).

6. CAPACITÀ DI SOSTENERE UN MONITORAGGIO INTEGRATO A LUNGO TERMINE: Variabilità dei costi

Nella pianificazione di un sistema di monitoraggio, una volta realizzato il contesto nel quale saranno effettuate le misure, si procede alla selezione delle tecnologie e relative metodologie di misura più conformi rispetto ai risultati attesi.

La selezione delle metodologie deve tener conto delle limitazioni all'applicabilità del metodo come descritto nei capitoli precedenti, nel contesto del progetto SloMove; contemporaneamente si deve considerare l'aspetto economico legato ai costi da sostenere per la messa in opera e la sostenibilità nel tempo del monitoraggio, soprattutto se a lungo termine.

Le differenti tecnologie di misura rientrano in determinate classi di costi, che forniscono una prima indicazione al tecnico incaricato della stima delle spese totali dell'intervento (**Deliverable 2.01**).

Attenzione deve essere posta inoltre a tutti quei fattori che in misura più o meno limitata possono influenzare e far variare consistentemente i cosiddetti "costi di base". I costi variabili (come elencati nel **Deliverable 2.02**) dipendono da fattori che rientrano interamente nella catena di attività svolte all'interno di un monitoraggio, a partire dall'allestimento del sito, fino all'acquisizione dei dati e alle fasi terminali di elaborazione della misura effettuata. Qui di seguito si riportano i fattori, suddivisi tra generici e specifici, ritenuti rilevanti ai fini di una adeguata pianificazione di un sistema di monitoraggio.

6.1 Fattori generali

Questi sono i fattori che possono considerarsi generici per le metodologie di misura che implicano attività di campagna e l'installazione in sito di strumentazione specifica; si tratta di fattori strettamente legati all'accessibilità al sito e alla durabilità nel tempo della strumentazione impiegata.

6.1.1 Accessibilità

In un contesto di alta montagna le problematiche relative all'accesso all'area da monitorare assumono un ruolo rilevante nella stima dei costi finali. La possibilità di accedere al sito agevolmente influenza il numero di tecnici da impiegare, il tempo impiegato nel lavoro di campagna e i mezzi di trasporto necessari. Nel caso sia necessario un intenso lavoro di campagna a lungo termine, l'accessibilità è uno dei fattori fondamentali da valutare nelle fasi preliminari di pianificazione del monitoraggio.

Un esempio può essere dato considerando il costo orario di utilizzo di un veicolo fuoristrada rispetto ad un elicottero:

Elicottero euro ca. 50/minuto

Tempo di volo 15 minuti = 700 euro

N. di voli/anno $6 = 700 \text{ euro/volo} \times 6 = 4200 \text{ euro/annui}$

Veicolo costo 0,35 cent/km

160 km a/r per raggiungere l'area test = $180 \text{ km} \times 0,35 \text{ cent/km} = 63 \text{ euro}$

Benzina (veicolo con consumo 15 km/l per costo benzina 1,75° euro/l) = 17,5 euro

Totale 63 euro + 17,5 euro = 80,5 euro

N. misure $6 = 6 \times 80,5 \text{ euro} = 483 \text{ euro/annui}$

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Nel contesto del progetto SloMove, nel quale l'area test è stata selezionata in funzione della combinazione di numerosi fattori ritenuti rilevanti per la finalizzazione del progetto stesso, è stata determinata una precisa valutazione dei costi legati all'accessibilità del sito (**Deliverable 3.03**).

Fondamentale è stata una buona pianificazione delle attività che si sarebbero svolte in campagna, la frequenza, il periodo di monitoraggio, così come la stagionalità e le condizioni meteorologiche. Sulla base di queste valutazioni iniziali è stata selezionata l'area che da una parte rispondeva alle esigenze dell'analisi che si voleva condurre dal punto di vista tecnico, e dall'altra teneva in considerazione la limitazione di un budget definito.

In linea generale, in un contesto nel quale si debba procedere ad un monitoraggio di un dissesto e le disponibilità economiche siano note fin dall'inizio, si dovranno realmente valutare i costi in termini di tempo, il numero di tecnici e mezzi necessari per l'allestimento del sito e per l'esecuzione del monitoraggio in funzione anche dell'accessibilità al sito.

6.1.2 Produzione del dato/della misura

Questo fattore è legato anche all'accessibilità al sito ma riguarda soprattutto le attività necessarie a consentire l'utilizzo efficace della tecnologia di misura scelta e l'ottenimento del dato.

Con questo si intendono attività come ordini di acquisto di materiale accessorio, installazione della strumentazione in sito, pianificazione delle misure, progettazione di sistemi di allestimento del sito con tecnologie alternative. Rientrano in questa categoria anche tutti i

costi legati all'acquisto di materiale accessorio e della strumentazione specifica, spese di trasporto e noleggi.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

La stima dei costi rientranti in questa categoria è stata di difficile valutazione: da una parte si poteva contare su attività standard ben testate, che potevano essere valutate economicamente con precisione nei termini e nei tempi; dall'altra si sono riscontrate difficoltà nel valutare a priori i costi legati ad attività e a strumentazione sperimentali.

La pianificazione delle attività di monitoraggio, la frequenza delle misure, i tempi tecnici legati all'esecuzione stessa delle misure sono stati valutati a priori con sufficiente precisione. Le maggiori difficoltà si sono riscontrate nella stipula di contratti d'ordine e nella progettazione, con conseguenti tempi lunghi di realizzazione della strumentazione adatta alle necessità del progetto.

Nell'ambito di SloMove sono stati ideati corner reflector adeguati alle condizioni ambientali di alta montagna, e assenti sul mercato; inoltre, per quanto riguarda il rilievo GPS e date le caratteristiche dei fenomeni naturali esistenti, l'area è stata attrezzata con punti di misura fissi adatti ad accogliere i sensori.

6.1.3 Durabilità e manutenzione della strumentazione

La durabilità della strumentazione fissa presente sul sito da monitorare può essere valutata esclusivamente sulla base delle conoscenze preliminari dei processi naturali in atto nell'area. Una buona conoscenza del processo in esame e delle condizioni geologiche e geomorfologiche al contorno consentono di ubicare la strumentazione in condizioni di sicurezza.

La durabilità, in caso di misure di precisione come possono essere quelle derivanti dalle tecnologie considerate nel presente progetto, ha effetto non solo sull'attendibilità delle misure e dell'intero monitoraggio, ma anche sui costi in termini di materiale e tempi di realizzazione/acquisto di nuovi strumenti.

Cosa è stato fatto nel progetto SloMove

Il posizionamento dei corner reflector, così come anche della strumentazione per le misure GPS e con TLS, è stato pianificato sulla base delle informazioni pregresse e recenti riguardo i fenomeni naturali attivi ed esistenti nell'area test. I processi oggetto del monitoraggio sono caratterizzati da deformazioni con dinamiche evolutive molto lente: in modo più o meno dipendente da queste, nell'area si rilevano fenomeni caratterizzati da maggiore intensità (velocità, volumi e tempi di ritorno), come crolli e colate detritiche, nonché valanghe nei periodi invernali.

In particolare le aree soggette a crollo scaricano direttamente sulle zone monitorate mettendo a rischio la strumentazione installata. Per questo motivo, oltre ad evitare i canali

di run out dei blocchi e le aree immediatamente sottostanti le pareti rocciose, si sono scelte preferenzialmente zone sopraelevate a parità di significatività del punto di misura. Le stesse considerazioni sono state formulate in riferimento ai fenomeni di debris flow e alle valanghe.

6.2 Fattori specifici

Nell'ambito del progetto è stata posta attenzione alla possibilità di procedere autonomamente durante tutto il processo di misura e, dove possibile, di acquisire le competenze necessarie per affrontare in modo efficace e completo un monitoraggio integrato. Questo ha posto le basi per comprendere appieno il ciclo del monitoraggio a partire dalle fasi iniziali di pianificazione, allestimento dell'area test con la strumentazione necessaria, esecuzione delle misure fino all'utilizzo dei risultati ottenuti a scopi applicativi. In questo contesto si inseriscono dunque altri fattori da considerare, che influenzano la stima iniziale dei costi e che rientrano negli step finali del ciclo di monitoraggio, come **la raccolta dei dati, la loro elaborazione e interpretazione finale.**

Queste ultime fasi richiedono di disporre di personale altamente qualificato e di software specifici: rispetto al primo punto si è proceduto formando personale interno attraverso attività di training, per le quali è stato necessario il supporto di esperti del settore che hanno tenuto corsi di aggiornamento. Per il secondo punto si è proceduto, dove possibile, utilizzando programmi free o acquistando software specifici.

6.2.1 Raccolta dati

Interferometria multi temporale

Nell'ambito del progetto SloMove le immagini SAR sono state acquisite dalla costellazione di satelliti Cosmo-SkyMed operante nella bandaxe con tempo di rivisitazione di 16 gg. La richiesta dei dati al fornitore necessita di una attenta pianificazione e selezione della migliore geometria di acquisizione. Le cause principali legate all'impossibilità di acquisire dati nelle tempistiche prestabilite sono fondamentalmente di natura tecnica, legate al buon funzionamento del satellite, e di priorità: la costellazione Cosmo-SkyMed è stata creata per applicazioni duali civili/militari, dove la priorità sugli oggetti da rilevare e con quale tempistica può cambiare. L'impatto dovuto alla mancanza di una o più immagini rispetto a quanto previsto può influenzare la buona riuscita dell'analisi multi-interferometrica.

GPS differenziale

La raccolta dei dati in campagna con la tecnica GPS differenziale in modalità statica-rapida con più ricevitori deve essere effettuata in una data finestra temporale per permettere la visibilità contemporanea della stessa costellazione di satelliti da tutte le posizioni della rete.

Le problematiche principali riscontrate durante le misurazioni in sito sono state il raggiungimento del punto da rilevare e le condizioni climatiche. Durante la campagna di misure per il progetto SloMove, i rilievi sono stati sospesi più volte a causa del maltempo: in più occasioni la strumentazione è stata rimossa per non essere danneggiata e le misure ripetute successivamente. La riprogrammazione di una nuova campagna di misura è legata al costo orario del personale impiegato.

Terrestrial Laser Scanner

Il rilievo con laser scanner richiede attività di campagna, con il rischio di incorrere in problematiche legate all'accessibilità del sito e alle condizioni metereologiche: non potendo operare in condizioni di nubi basse e precipitazioni piovose o nevose, in più occasioni si è proceduto riprogrammando intere giornate di rilevamento. Il rilievo con TLS viene eseguito con il supporto di consulenti esterni e l'impiego di mezzi di trasporto come l'elicottero; appare subito evidente l'impatto sui costi dell'interruzione di una campagna di misura e della necessità di ritornare in sito per completare la scansione.

6.2.2 Elaborazione dei dati

Interferometria multi temporale

L'algoritmo SBAS si applica ad un numero consistente di interferogrammi classici ben selezionati e caratterizzati da baseline temporali e spaziali corte. L'algoritmo SBAS, per consentire di individuare gli effetti di decorrelazione, punta sulla ridondanza dell'analisi, che dipende strettamente dal numero di immagini disponibili. L'impiego efficace dell'algoritmo dipende dunque dal numero di immagini e dalla disponibilità di terminali e software necessari per gestire questa mole di dati; inoltre l'utilizzo dell'algoritmo richiede competenze specifiche che possono essere acquisite tramite corsi di formazione.

GPS differenziale

Il post-processamento dei dati è riassunto tramite un flusso di attività che inizia con la lettura dei dati grezzi e la loro importazione in un programma di stima delle coordinate delle linee di base tra i differenti punti. I programmi si suddividono in commerciali (quando forniti dalla ditta che produce un dato strumento) e che operano in modalità single base, e scientifici, molto più complessi e costosi.

Nel progetto SloMove è stato utilizzato il programma LGO fornito dalla ditta Leica che permette di importare ed elaborare i dati in formato RINEX e procedere alla compensazione della rete. Una volta stimate le coordinate approssimate dei punti rilevati si procede alla rimozione degli errori tramite la stima ai minimi quadrati. Queste attività richiedono competenze adeguate e personale formato.

Terrestrial Laser Scanner

La gestione ed il processamento dei dati ottenuti con TLS richiedono software di ambiente GIS potenti, in grado di gestire la mole di dati acquisiti (100.000 punti per m²). In questo caso l'acquisto di software e terminali adeguati richiede un investimento economico rilevante. Tuttavia il rilievo con TLS viene effettuato da ditte specializzate ed i costi da preventivo includono i costi di elaborazione.

6.3 Interpretazione dei dati

Per tutte le tecnologie di rilievo finora analizzate, l'interpretazione dei dati ottenuti richiede competenze specifiche che possono essere acquisite tramite corsi di aggiornamento professionale. In caso di integrazione tra metodologie di misura differenti è indispensabile anche il supporto di tecnici specializzati, soprattutto durante le fasi iniziali di analisi della fattibilità e di progettazione di un sistema di monitoraggio.

7. Bibliografia:

- Bauer A., Paar G., Kaufmann V. (2003). Terrestrial Laser scanning for rock glacier monitoring.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R. e 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), "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., Wasowsky J., (2006), "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry" Eng. Geo. 88, 173–199
- Gili J. A., Corominas J., Rius J., (1998), "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring", Eng. Geo.55, 167–192
- Kenner, R., Phillips, M., Danioth, C., Denier, C., Zraggen, 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
- 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
- Mulas M. (2011), "Using X-Band Persistent Scatterer Interferometry for slope instability monitoring" Master II livello, Bari Un., Italy
- 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

Allegati

Indicazioni operative: SCHEDA 1.

DATI RADAR SATELLITARE

1. STIMA AREE AFFETTE DA DISTORSIONI PROSPETTICHE

La modalità di acquisizione del satellite con un angolo di vista θ non perpendicolare al suolo e la topografia del terreno danno origine a delle **deformazioni prospettiche** (forshortening, shadowing, layover) che implicano assenza di dato o deformazioni delle immagini RADAR in alcune aree.

Orbita satellitare = orientato circa N-S nel caso del satellite Cosmo (± 6.75)

Angolo di vista (LoS)= θ

Angolo di incidenza nominale= I° è uguale a θ ma considerando la curvatura terrestre senza la topografia.

La stima delle aree affette da distorsioni geometriche in funzione del I° e dell'orbita del satellite permette di selezionare (1) la **geometria del satellite di acquisizione migliore** e, nel caso fosse necessario, (2) l'**ubicazione di riflettori artificiali**. Per la creazione delle maschere delle distorsioni si è utilizzato un tool apposito prodotto in ambiente GIS e un dtm 2.5mx2.5m nell'area della Val Senales e 20mx20m in Svizzera. Per la descrizione del tool si veda **Allegato n. 1**.

È IMPORTANTE ANCHE LA STIMA DELLE AREE COPERTE DA VEGETAZIONE (effetti di decorrelazione), E LA PRESENZA DI BUONI BERSAGLI DI DIFFUSIONE PERMANENTI

La selezione del satellite Cosmo-SkyMed è avvenuta sulla base delle caratteristiche geometriche del satellite, della frequenza di acquisizione delle immagini (assicurata a 16 gg), e della risoluzione del sensore (3mx3m). I dati sono stati acquistati nel contesto di Mapitaly ([Progetto Mapitaly - AO - 8mar2011.doc](#); [mapitaly - 8mar2011.kmz](#)), un programma di acquisizioni programmate e garantite di Cosmo che assicura una mappatura SAR dell'intero territorio italiano con almeno una ripetitività temporale di 16 giorni con la stessa geometria di acquisizione. Tuttavia Cosmo-SkyMed (<http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>) è una costellazione di 4 satelliti per l'impiego duale civile e militare: questo crea conflitti nella priorità di acquisizione (possibili salti rispetto alla programmazione effettuata, che implica un numero di immagini inferiore rispetto a quello previsto).

Provider immagini Cosmo-SkyMed: <http://www.e-geos.it/>

Link per vedere le immagini da catalogo: per la registrazione (<http://87.241.31.78/index.php>). Le immagini di archivio sono immagini già acquisite, acquistabili a prezzo ridotto rispetto al costo di una immagine programmata ad hoc.

2. CORNER REFLECTORS

2.1 MATERIALE ED INSTALLAZIONE

Corner: acciaio zincato e alluminio anodizzato. Tempi di realizzazione 2-3 mesi.



Basamento: piastre forate in acciaio (3 fori da 20 mm) di diametro 20 cm, spessore (10 mm). Chiodi ancoranti da 19 cm (diam. 16 mm) o barre filettate da 40 cm (diam. 14 mm). Il basamento deve essere in bolla, e le barre subverticali, per permettere il facile inserimento della base del corner. Per ogni corner si devono prevedere 1-2 piastre per il basamento. **Strumenti impiegati:** trapano elettrico, viti e dadi, chiavi inglesi, brugole, livella digitale, bussola, seghetto.

Basamento per corner

I corner accoppiati alle “basi” del GPS sono ubicati in zone stabili, in roccia, fuori dalle aree di deformazione. I corner sono orientati e la faccia basale del tetraedro è inclinata secondo le caratteristiche geometriche del satellite in acquisizione, nel caso in esame diversa per azimuth (angolo dell’orbita) e I° nelle due aree test di SloMove.



Ad ogni misura GPS il corner è stato controllato in orientazione ed inclinazione (con prolunga in legno, bussola e livella digitale).

Controllo orientamento corner

Nell'ambito del progetto i riflettori artificiali, corner reflectors, sono stati installati per creare un punto comune di controllo, validazione ed integrazione tra le tre tecnologie impiegate. La tipologia di indagine scelta per le aree test di SloMove impiega gli scatteratori presenti naturalmente nel territorio, che implica, ad alta quota, la limitazione alla sola stagione estiva dell'acquisizione delle immagini.

!!!!!! Ad alte quote (sopra i 2500 m s.l.m.) la stagione estiva, quindi l'assenza di neve al suolo, perdura circa 3-4 mesi all'anno, il che significa un limitato numero di immagini. Si deve inoltre considerare anche l'assenza di informazioni tra due o più stagioni di acquisizione che, in funzione della dinamica del fenomeno, influenza o meno l'accuratezza del risultato dell'elaborazione.

IN CASO DI INSTALLAZIONE DEI RIFLETTORI ARTIFICIALI (CORNER REFLECTOR) DEVE ESSERE VALUTATA L'ACCESSIBILITÀ AL SITO!!

2.2 POST-ELABORAZIONE DEI DATI

La post-elaborazione delle immagini SAR è stata affidata al CNR-IREA di Napoli che ha utilizzato l'algoritmo Small BASeline Subset - SBAS, da loro sviluppato. Fondamentale è il numero di immagini impiegate, che definisce l'accuratezza del prodotto finale.

Indicazioni operative: SCHEDA 2.

RILIEVO GPS E POST-ELABORAZIONE

1 MATERIALIZZAZIONE DELLA RETE GEODETICA

2 “Basi di riferimento” per ogni area test

Senales: N. punti: 18 + 2 basi. Densità di punti: ca. 79 punti/km²

Schafberg: N. punti: 14 + 2 basi. Densità di punti: ca. 92 punti/km²

IN BASE AL NUMERO DI MISURE PREVISTE È IMPORTANTE CONSIDERARE L'ACCESSIBILITÀ AL SITO!

1.1 MATERIALE IMPIEGATO

Base di riferimento: corner reflectors con braccio e innesto a baionetta. L'antenna GPS deve essere sempre rialzata rispetto al vertice superiore del corner (per evitare di introdurre nuovi errori nella misura).

Capisaldi: barre filettate da 14 mm in acciaio zincato lunghe circa 40 cm; inserite sui blocchi per circa 10 cm e ancorate con ancorante chimico.

Trapano, viti, chiavi inglesi, brugole, livella digitale, bussola, seghetto.



Base di riferimento



Caposaldo

1.2 POSIZIONAMENTO PUNTI DI MISURA

Posizionamento “basi”: Punti stabili su roccia affiorante fuori dalla zona in deformazione. Basi GPS accoppiate con corner reflector e reference target per il TLS. Distanza delle basi di riferimento dai capisaldi inferiore a 200 m.

Posizionamento capisaldi: disposti secondo una maglia il più possibile regolare lungo e perpendicolarmente le direzioni di massima deformazione. Disposizione dei capisaldi nei punti maggiormente rappresentativi del fenomeno in studio (blocchi esposti e di grandi dimensioni). Le barre devono essere verticali. L'eventuale rotazione dei blocchi deve essere rilevata (livella digitale e bussola) e considerata in fase di post-elaborazione dei dati GPS.

ATTENZIONE AD OSTACOLI NATURALI O ARTIFICIALI INTORNO AI SITI DI UBICAZIONE DELLE BASI E DEI CAPISALDI - VISIBILITÀ!

1.3 MISURE

Due sensori GPS a doppia frequenza sono stati posizionati nelle due basi di riferimento. Con un terzo sensore si è proceduto alla misura di ogni caposaldo con stazionamento di 30 minuti ciascuno. Acquisizione ogni 5 secondi; angolo di cut-off 15° ; rilevazione satelliti GPS e GLONASS.

Una sessione di misura con n ricevitori permette la stima di $n(n-1)/2$ basi (linea di base congiungente due punti di misura).

Per il rilievo completo di una rete di N punti occorre connettere tra loro tutti i punti, ovvero rilevare $N-1$ basi. La ridondanza del rilievo è la differenza tra il numero di osservazioni (basi rilevate $\times 3$ componenti) e il numero di incognite (N punti $\times 3$ componenti). La ridondanza determina l'affidabilità della rete: per questo è opportuno prevedere per ogni caposaldo almeno 2 occupazioni, ottenendo così una ridondanza $>$ di 0, il controllo di errori grossolani e una compensazione della rete rigorosa.

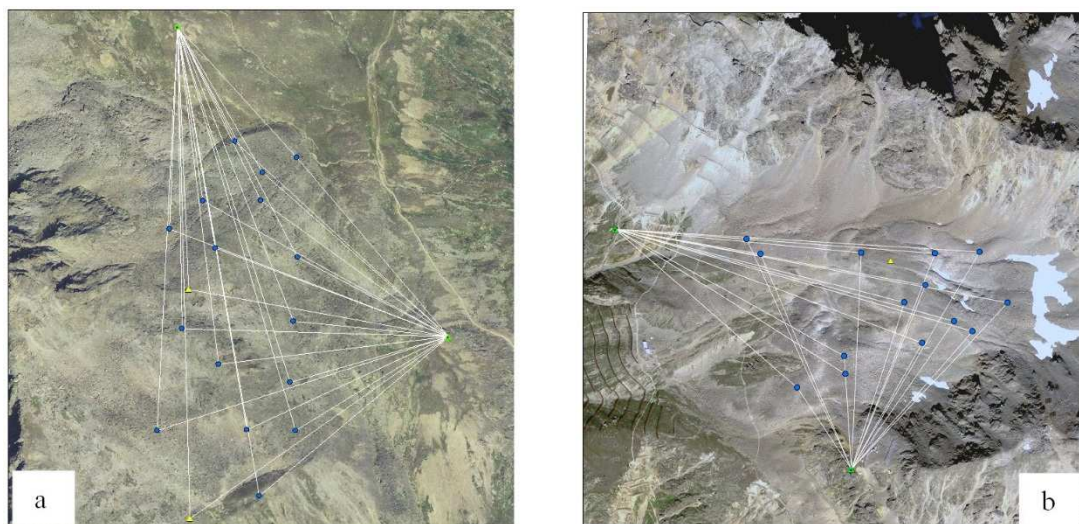


Fig. a e b - Rete di misura e baseline (bianco). **Sistema a stella**

1.4 POST-ELABORAZIONE DEI DATI

I prodotti finali dell'elaborazione dei dati GPS in posizionamento relativo sono la stima delle 3 coordinate della base (vedi sopra, Cap. 1.3 - MISURE).

1.5 DATI DI BASE

Per la post-elaborazione dei dati è stato usato il software **LGO della Leica Geosystem**.

Le **stazioni permanenti** impiegate:

- Schafberg: Tirano (50 km); Samedam (6 km);
- Senales: Malles (19 km dall'area test); Merano (41 km dall'area test).

I dati delle **stazioni di Malles e Merano** sono scaricabili, previa registrazione, dal sito della Provincia Autonoma di Bolzano <http://www.stpos.it/SpiderWeb/frmlIndex.aspx>. Dal sito sono anche scaricabili, previa registrazione, i valori assoluti di antenna (utile nel caso si utilizzino diversi sensori con differenti offset di antenna)

I dati della **stazione di Tirano** sono stati acquistati dalla Leica **SmartNet Italpos**. I dati della **stazione di Samedam** sono stati richiesti a **swisstopo**, www.swipos.ch. I dati delle stazioni permanenti sono acquisiti ogni 5 secondi, lo stesso intervallo di acquisizione delle misure.

Per una maggiore precisione dell'elaborazione dei dati GPS sono state scaricate le **efemeridi precise** (dati sul posizionamento e sullo stato della costellazione GPS al momento della misura), utili soprattutto in presenza di stazioni permanenti a elevata distanza. Come scaricarle:

1. Su <http://adn.agi.com/GNSSWeb> ricercare la data GPS rispettiva al giorno in cui si sono condotte le misure, ad es.: 19/09/2013 = giorno GPS 1758:4 = 17584
2. Andare su www.igs.org e seguire il percorso FTP - pub - gps, aprire la cartella 1758 e scaricare il file igs17584.sp3.Z (**ATTENZIONE ALL'ESTENSIONE del file: .sp3!!**)

1.6 IMPORTARE I DATI

1. Attribuire una proiezione e un sistema di riferimento al progetto (UTM - ETRF2000).
2. Caricare i dati della campagna di misure: una campagna alla volta!
3. Caricare i dati delle stazioni permanenti dei giorni nei quali sono state condotte le misure. Controllare la bontà delle stazioni verificando che la stima delle loro coordinate sia aggiornata e sottoposta a controlli periodici.
4. Importare le efemeridi precise.
5. Se non sono stati impostati in fase di rilievo, controllare gli offset di antenna.
6. Rinominare i punti di misura se necessario. Per rinominare definitivamente un punto si deve agire direttamente sul dato originale (rinex o altro).

DATO RINEX: <http://it.wikipedia.org/wiki/RINEX>

Il programma LGO permette di esportare i file raw data ottenuti dai sensori GPS in rinex.

1.7 INIZIO PROCESSAMENTO

Linee guida sull'uso del programma LGO in post-elaborazione

http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDkQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ingeosystems.it%2Fdownload.php%3F926743a5d0ce99583135805efd4d123f&ei=_l2wUrS-OqrD4gTZsYHYAw&usg=AFQjCNEG0WLJIZE5fDqFVQb6_eEw9PlnnQ&sig2=oAT43Trcoz0AvehXVyHolw&bvm=bv.57967247,d.bGE

http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEEQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ingeosystems.it%2Fdownload.php%3F17c48d25f195b7eb4bc545ec6035222b&ei=_l2wUrS-OqrD4gTZsYHYAw&usg=AFQjCNET7ZcAcZo_3_oN96K6E0YWUbj2zw&sig2=w-DqHpu_caw5yTIHMu17Fw&bvm=bv.57967247,d.bGE

a) Stima coordinate delle basi di riferimento

La stima delle coordinate delle basi di riferimento delle reti geodetiche realizzate nelle aree test del progetto è stata ottenuta riferendola alle stazioni di riferimento sopra indicate (Tirano e Samedam per le due basi svizzere, Malles e Merano per quelle italiane).

È stato usato il modello troposferico di Saastamoinen.

Stimare la baseline tra i due punti (stazione permanente-base di riferimento):

- Base corner 1 (Senales) riferita a Merano, base corner 13 riferita a Malles
- Base corner Bassa (Schafberg) riferita a Samedam, base corner Alta riferita a Tirano

CONSIDERARE ANCHE LE DIFFERENZE DI QUOTA TRA LE STAZIONI PERMANENTI E LE BASI, PER IL PROBLEMA DEL DISTURBO TROPOSPHERICO

b) Stima dei punti-capisaldi

1. Il modello di calcolo è stato impostato durante le azioni precedenti.
2. Stimare i capisaldi prima da una base (ex base corner 1) e poi dall'altra (base corner 13).
3. Avremo a questo punto due stime di coordinate per ogni punto. Verificare la differenza tra questi due valori.
4. Confrontare la stima delle coordinate punto 1 stimate da base corner 1 e base corner 13. Le differenze dovrebbero essere dell'ordine di qualche mm o pochi centimetri (solitamente l'errore in quota è leggermente superiore ai valori xy).

c) Compensazione di rete

Serve per avere una valutazione più realistica sulla precisione delle stime finali rispetto alle stime elaborate in precedenza, con l'identificazione di eventuali anomalie su singole sessioni (errori nelle efemeridi, atmosfera, ecc.).

Indicazioni operative: SCHEDA 3.

RILIEVO CON LASER SCANNER DA TERRA

Il Laser Scanner da terra è un tipo di tecnologia che richiede personale altamente qualificato per l'esecuzione dei rilievi e nelle fasi di elaborazione dei dati. Il servizio viene dunque fornito solitamente da ditte o istituti specializzati. Tuttavia, è utile conoscere come e secondo quali criteri sarà condotto il rilievo fin dalle prime fasi di "equipaggiamento" della rete di misura.

1. REALIZZAZIONE DELLA RETE DI MISURA

1.1 LASER SCANNER

L'ubicazione del laser scanner segue il principio di **"buona visibilità"** del sito da rilevare e della **distanza** sensore-bersaglio, che dipende dalla tipologia di laser impiegato, come indicato nel **capitolo 2.3**.



Nel caso in esame il laser scanner è stato installato su un treppiede, posizionato grazie anche a 3 solchi creati appositamente sulla roccia e che hanno consentito, al ripetersi delle misure, di posizionare il treppiede sempre nello stesso punto. Inoltre per ragioni di sicurezza sono stati installati 3 anelli (infissi nella roccia) e delle corde, per ancorare il treppiede al suolo in caso di forte vento. Il laser scanner è stato infatti posizionato su alti topografici molto esposti.

Per il funzionamento del laser scanner è necessario un generatore.

1.2 PUNTI DI CONTROLLO

I punti di controllo (**cap. 2.3**) sono costituiti da piastre in acciaio zincato 50cmx50cm con applicati fogli riflettenti. I punti, in numero non inferiore a 3, devono essere ubicati in modo da essere orientati ortogonalmente al raggio laser. Attenzione deve essere data all'ancoraggio delle piastre (impiego di chiodi filettati auto-ancoranti a piccolo diametro, lunghezza circa 40 cm, **Fig. 12**) e sulla loro stabilità e durabilità nel tempo.

1.3 MATERIALE IMPIEGATO

Punti di controllo: piastre in acciaio zincato, fogli riflettenti, chiodi filettati auto-ancoranti, trapano, pinze, martello, anelli.

ALLEGATO n. 1

TOOL PER LA CREAZIONE DI MASCHERE DI DEFORMAZIONI PROSPETTICHE

Software utilizzato: ArcMap 10.1

PERCHÉ?

Selezionare la geometria di acquisizione del satellite più idonea rispetto al fenomeno da indagare.

COME?

Considerando le relazioni geometriche tra angolo dell'orbita del satellite, angolo di incidenza nominale (I°) del satellite, pendenza del versante e orientazione del versante.

DATI DI INPUT

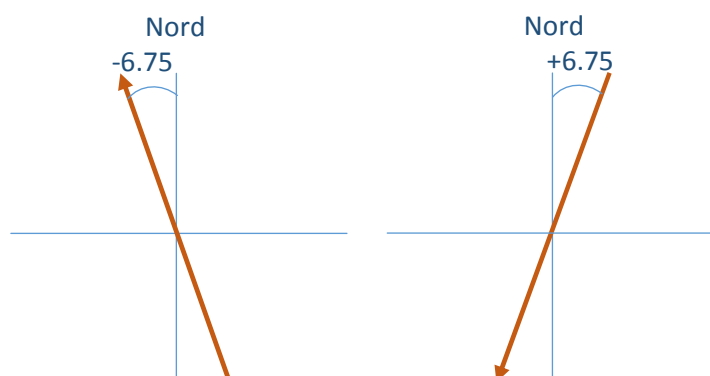
Modello digitale del terreno (dtm) - raster dataset, valore di I° e angolo dell'orbita. Questi dipendono dall'area e dalla modalità (STRIPMAP, ecc.) di rilievo.

Per verificare i dati geometrici di Cosmo e vedere le differenti opportunità: http://www.e-geos.it/products/pdf/Cosmo_FAQ.pdf.

SEQUENZA DI COMANDI

- Ricampionare il dtm rispetto alla risoluzione dell'immagine SAR
- Creare raster **aspect** e **slope** (sotto Spatial Analyst, **Aspect** e **Slope**)
- Correggere il raster **aspect** rispetto all'orbita del satellite (Map algebra expression: "raster **aspect** + (angolo dell'orbita)" ed ottenere un **aspect recalculated**).

Nel caso della costellazione Cosmo-SkyMed l'orbita ascendente ha un valore negativo pari a circa -6.75° ($353,25^\circ$ N) e discendente di $+6.75^\circ$: "raster **aspect** + (-6.75°)" per l'orbita ascendente e "raster **aspect** + ($+6.75^\circ$)" per l'orbita discendente.



- Convertire, separatamente, il raster *slope* e il raster *aspect recalculated* da gradi a radianti (Map algebra expression: 1. “*raster slope* x(3,14/180)”); 2. “*raster aspect ricalcolato*x(3,14/180)” ottenendo i raster *slope rad* e *aspect rad*).
- (in ArcMap, Map algebra expression: “*raster slope rad* x Seno(*raster aspect rad*)”) ottenendo un *raster unique*.
- Convertire il *raster unique* da radianti a gradi (Map algebra expression: 1. “*raster unique* x(180/3,14)”) ottenendo il *raster unique deg*.
- Il *raster unique deg* deve essere classificato secondo le seguenti relazioni:

Orbita discendente		Orbita ascendente	
$0 < \alpha < I^\circ$	forshortening	$0 < \alpha < 90^\circ - I^\circ$	forshortening
$\alpha > I^\circ$	layover	$\alpha < 90^\circ - I^\circ$	shadowing
$0 > \alpha > I^\circ - 90^\circ$	enhanced range	$0 > \alpha > -I^\circ$	enhanced range
$\alpha < I^\circ - 90^\circ$	shadowing	$\alpha > 90^\circ - I^\circ$	layover

Tabella 2

Dove I° è l'angolo di incidenza, α la pendenza del terreno.

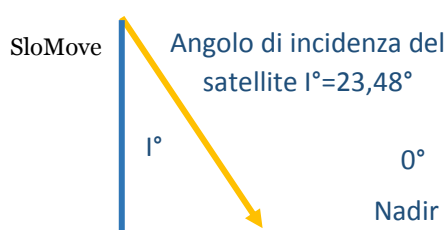
Considerando un angolo di incidenza nominale $I^\circ = 23,48$, e per un orbita ascendente right looking, usare la funzione **Reclassify** ed inserire la seguente riclassificazione:

valori di pendenza del terreno compresi tra -90° e $-23,49^\circ$ si avranno fenomeni di shadowing;

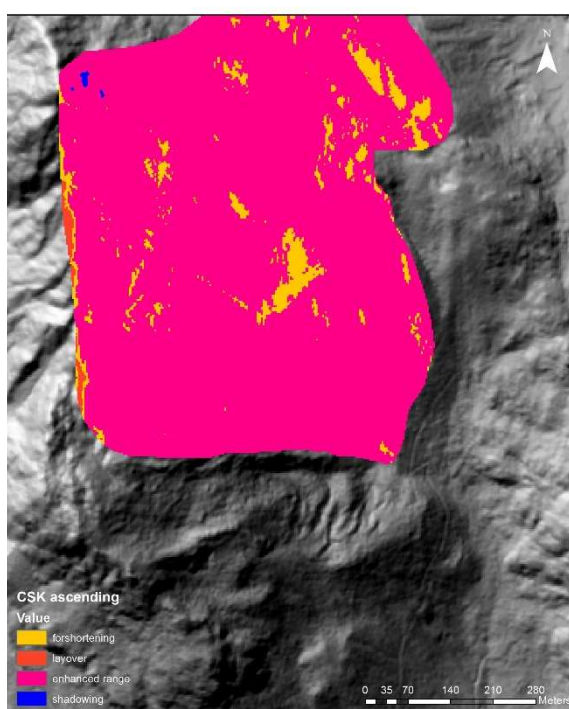
valori di pendenza del terreno compresi tra $-23,48^\circ$ e 0° si avranno aree di enhanced range;

valori di pendenza del terreno compresi tra 0° e $66,51^\circ$ si avranno fenomeni di forshortening;

valori di pendenza del terreno compresi tra $66,52^\circ$ e 90° si avranno fenomeni di layover.



Si otterrà un raster con indicate le aree interessate dalle diverse deformazioni prospettiche.



Maschera di distorsione geometrica per la geometria ascendente del satellite Cosmo-SkyMed (Area test Val Senales). In rosa l'area di enhanced range.

Variando l'angolo di incidenza o l'orbita del satellite si selezionerà la geometria di acquisizione più idonea.