LISALAB

SERVIZIO DI TIPO “PERMANENT MONIOTRING” PER IL CONTROLLO DELLE DEFORMAZIONI E L’IDENTIFICAZIONE DI EVENTUALI PORZIONI INSTABILI SUL VERSANTE MERIDIONALE DEL MONTE AVEDEÈ NEL COMUNE DI NOVATE MEZZOLA (SO) DURANTE L’ESECUZIONE DEI LAVORI DI COSTRUZIONE DEL VALLO UTILIZZANDO IL SISTEMA GBInSAR LiSALAB

Report finale

Cliente: Comunità Montana Valchiavenna

Località: Novate Mezzola SO

Contratto #: 2490103cvc

DOCUMENTO RISERVATO

9					
8					
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	25 febbraio 2026	Emissione	AG	MM	CR
Rev.	**Data:**	**Note:**	**Scritto da:**	**Controllato da:**	**Approvato da:**

LISALAB

INDICE

Indice 2

Glossario 3

Gruppo di lavoro 5

Convenzioni 6

Sistema di riferimento 6

Unità di misura del tempo 6

Introduzione 7

Servizio attivato 8

La tecnica SAR interferometrica 10

Parametri di misura e caratteristiche dell'immagine SAR 16

Attivazione sito web e georeferenziazione risultati 21

Logica allertamento automatica: Hot Spot 26

Controllo sistema e reportistica speditiva 27

Analisi degli spostamenti nel medio e lungo termine 28

Analisi degli spostamenti rilevati per la sottofinestra FAR. 43

Analisi delle serie temporali 46

Note, Avvertenze e Limitazioni di Responsabilità 48

LISALAB

Glossario

Ampiezza radiometrica Livello d'intensità di energia raggiante.

Azimut Direzione parallela al binario.

CCR Centro di Ricerca della Comunità Europea.

Range Direzione perpendicolare al binario. Le distanze lungo questa direzione sono calcolate sfruttando l'informazione di "tempo di volo" e tenendo in considerazione il fatto che le onde elettromagnetiche si propagano con velocità pari a quella della luce (3E8 m/s ca.).

Frequenza Numero di volte in cui un fenomeno periodico si ripete nell'unità di tempo

Immagine in potenza, Immagine in fase Ogni pixel di un'immagine complessa rappresenta una quota parte della regione (cella o pixel) nella quale si sono focalizzati i dati grezzi. Ad esso è associata un'informazione relativa al segnale retrodiffuso da tutto ciò che è contenuto nella cella; si hanno quindi a disposizione due tipi di rappresentazione per la stessa immagine, in potenza e in fase. La prima fornisce un'indicazione sulla quantità di segnale retrodiffuso mentre la seconda sulla fase dello stesso.

Interferogramma Immagine complessa risultante dal prodotto coniugato tra due immagini complesse. Rappresentata in fase essa fornisce l'informazione relativa ai cambiamenti avvenuti nell'arco temporale trascorso tra l'acquisizione della prima immagine e la seconda.

Linea di vista (LOS) Congiungente immaginaria tra il sensore GBInSAR LiSALab ed un punto sito nella zona d'interesse.

LiSA Linear Synthetic Aperture radar. Sensore radar interferometrico con piattaforma basata a terra (GBInSAR) studiato e sviluppato inizialmente al Centro di Ricerca della Comunità Europea di Ispra in grado di fornire mappe dettagliate di movimenti e deformazioni.

LiSALab (tecnologia) Tecnologia esclusiva sviluppata dalla Ellegi srl e derivata dalla originaria tecnologia LiSA e dal sensore GBInSAR LiSA. Appartiene esclusivamente alla Ellegi srl.

Mappe di spostamento Rappresentazione del corrispondente interferogramma ma con le differenze di fase trasformate in differenza di distanze e misurate in mm.

Microonde Onde elettromagnetiche di lunghezza compresa fra 1mm e 300mm.

Rapporto segnale rumore Nelle specifiche delle apparecchiature elettroniche il termine è spesso abbreviato in 'S/N ratio'. Si tratta del rapporto fra il segnale utile e il rumore di fondo.

Retrodiffusione	Fenomeno per cui un'onda elettromagnetica, battendo su una superficie scabra non assorbente né trasparente o attraversando un mezzo eterogeneo, viene rinviata nella direzione di provenienza
Riflettività	Proprietà caratteristica adimensionale di un materiale di riflettere tutta l'energia incidente non assorbita. Si parla di riflettività spettrale quando ci si riferisce ad un particolare intervallo di lunghezza d'onda dell'energia incidente
Risoluzione spaziale	Nel caso specifico dei radar rappresenta la dimensione minima della cella discriminabile. Due oggetti di dimensioni ridotte rispetto a quelle della cella discriminabile devono perciò appartenere a celle differenti per essere distinguibili.
SAR	Synthetic Aperture Radar. Particolare configurazione dei sistemi radar in cui la dimensione dell'antenna viene "simulata" molto maggiore di quella fisica attraverso il campionamento dei segnali dell'antenna mentre questa è in movimento. Questa tecnica serve ad ottenere una risoluzione maggiore.
Scatterometro	Lo scatterometro è un radar in grado di misurare le capacità che hanno gli oggetti di re-diffondere all'indietro (back-scattering) l'energia elettromagnetica che incide su di essi.

Gruppo di lavoro

- **Ellegi srl**
  Ing. Rivolta Carlo
  Ing. Davide Leva
  Dott. Geol. Alessio Gusmeroli
  Dott. Fabio Cafagna
  Ing. Marco Meraviglia

- **Studio Cancelli Associato**
  Ing. Gianluca Bragonzi
  Ing. Paolo Cancelli

- **Impresa Costruzioni F.lli Locatelli srl**
  Geom. Daniele Pozzi
  Ufficio Tecnico

LISALAB

Convenzioni

Sistema di riferimento

SE NON DIVERSAMENTE SPECIFICATO, IL SISTEMA DI RIFERIMENTO UTILIZZATO PER I RISULTATI PRESENTATI IN QUESTO REPORT È UN SISTEMA DI ASSI CARTESIANO CHIAMATO SISTEMA DI COORDINATE LOCALI LiSALab.

Il sistema di coordinate locali LiSALab è centrato sulla mezzeria del binario del sistema GBInSAR LiSALab (0,0,0) i cui assi sono l'uno perpendicolare (asse Y) e l'altro parallelo (asse X) all'asse del binario stesso.

Il terzo asse (asse Z) è normale al piano formato dai due assi precedenti: il piano XY è un piano orizzontale (piano di Figura 1) ed ha coordinate z pari a 0. H è la distanza tra la mezzeria della congiungente il centro delle antenne (punto 0,0,H) e la mezzeria del binario del sistema (0,0,0).

I versi positivi sono individuati prendendo come riferimento un osservatore posto al centro del sistema cartesiano (0,0,0) e con lo sguardo rivolto verso la regione osservata (punto P). L'asse perpendicolare al binario (asse Y) ha verso positivo se dall'osservatore si va verso il punto P; l'asse longitudinale (asse X) al binario è positivo se dall'osservatore si va verso la sua destra, mentre la direzione positiva dell'asse normale (asse Z) è data dalla regola della mano destra considerando prima l'asse longitudinale (asse X) e poi l'asse traversale (asse Y). La direzione individuata dall'asse longitudinale (asse X) viene anche convenzionalmente indicata come direzione "azimutale", mentre quella dell'asse perpendicolare (asse Y) co
me direzione "range".

"r" è la linea di vista (o LOS) ed è la linea immaginaria che unisce il centro del sistema ad uno specifico punto osservato P localizzato nell'area osservata.

L'angolo θ è l'angolo di elevazione definito nel piano YZ ed è formato dalla linea di osservazione r ed il piano orizzontale XY. L'angolo ψ è l'angolo azimutale definito nel piano XY ed è formato dalla proiezione sul piano XY della linea di vista r e dal piano YZ.

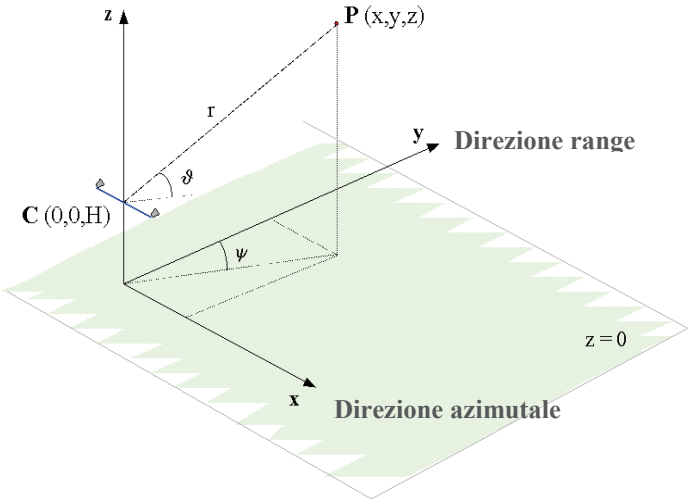


Figura 1: sistema di riferimento utilizzato.

Unità di misura del tempo

Nel presente documento l'unità di tempo utilizzata è l'ora locale e viene riportata nella notazione Anno/Mese/giorno ora:minuti (AAAA/MM/gg HH:mm).

LISALAB

Introduzione

Con contratto LL.PP. n. 04 del 21 Luglio 2025 la Ellegi Srl è stata incaricata dalla Comunità Montana della Valchiavenna per l'esecuzione del servizio di monitoraggio di tipo "permanent monitoring" utilizzando il sistema GBInSAR del versante meridionale del Monte Avedée nel Comune di Novate Mezzola SO durante l'esecuzione dei lavori di costruzione del vallo paramassi nell'area della Cava di Foppa per una durata di 7 mesi.

Area già monitorata a scoop conoscitivo nel periodo 2021 – 2024.

Dal punto di vista geologico, l'area in esame fa parte del lembo occidentale del Plutone Intrusivo Terziario del Masino-Bregaglia. Nella fattispecie, la zona di Novate Mezzola, è celebre per il suo granito chiaro, intrusosi negli gneiss biotitici del Monte Berlinghera (Figura 2).

Questo documento descrive le attività svolte durante l'incarico sopracitato, il protocollo implementato per la gestione e l'impiego del radar da terra (GBInSAR) definito dal gruppo di lavoro composto da Ellegi srl, CSE, DL e Impresa appaltante e i risultati ottenuti durante i sette mesi del monitoraggio (23 luglio 2025 – 22 febbraio 2026).

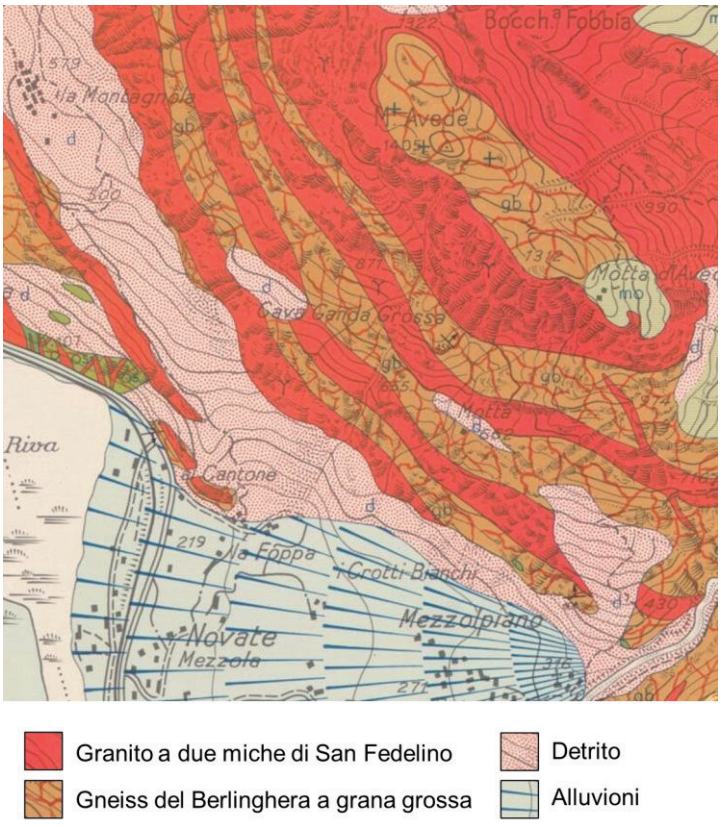


Figura 2: Estratto della *Carta Geologica della zona di Novate Mezzola (Alpi Lombarde). Consiglio Nazionale delle Ricerche. Memorie dell'istituto di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova. Vol XXVII*. Nella Figura si osserva il massiccio del Monte Avedè con i principali litotipi monitorati dal sistema LiSAmobile.

LISALAB

Servizio attivato

A partire dal 23 luglio 2025 e fino al 22 febbraio 2026 è stato attivato il servizio di monitoraggio di tipo “permanent monitoring” per il controllo delle deformazioni e l’identificazione e la mappatura di eventuali porzioni instabili sulle pareti rocciose delle pareti rocciose in località “Foppa” nel Comune di Novate Mezzola (SO) secondo le specifiche indicate di seguito.

Dal 2003 la Ellegi srl sviluppa tecniche avanzate di monitoraggio con radar interferometrici terrestri (GBInSAR) e ha brevettato la strumentazione identificata con il nome di LiSAmobile e le modalità operative di utilizzo come di seguito:

- brevetto italiano n. 0001392799 del 19 Aprile 2012 ("Metodo e sistema per il posizionamento in campo di strumentazione") Inventori: Leva, Rivolta;
- brevetto europeo n. 10 164 891.3 del 7 dicembre 2011("Synthetic-aperture radar system and operating method for monitoring ground and structure displacements suitable for emergency conditions") Inventori: Leva, Rivolta;
- brevetto americano n. US 2011/0298655 dell'8 dicembre 2011 ("Synthetic-aperture radar system and operating method for monitoring ground and structure displacements suitable for emergency conditions") Inventori: Leva, Rivolta.

Il sistema GBInSAR LiSAmobile® è un radar ad apertura sintetica con piattaforma terrestre che acquisisce in continuo le immagini radar dello scenario da monitorare ed è in grado di elaborare i dati acquisiti per eseguire la successiva analisi interferometrica. Dalla differenza delle immagini acquisite è possibile ricostruire l’evoluzione nel tempo e nello spazio degli spostamenti misurati e utilizzare i risultati ottenuti ai fini di monitoraggio ed allertamento.

Il giorno 23 luglio 2025 tale strumentazione è stata installata su un piedistallo metallico di nostra fornitura affrancato ad un magrone di cemento posto all’interno di una proprietà privata di Via Foppa nel Comune di Novate Mezzola (SO) e protetto da un apposito alloggiamento in legno e vetroresina (Figura 3).



Figura 3: Dettaglio dell'installazione e postazione di misura del sistema GBInSAR LiSALab per il controllo delle deformazioni e l'identificazione e la mappatura di eventuali porzioni instabili sulle pareti rocciose nel versante occidentale del monte Avedeè nel Comune di Novate Mezzola (SO), come appariva in seguito all'installazione avvenuta (installato il 23 Luglio 2025).

Il sistema è stato connesso alla rete WEB attraverso un router modem UMTS che garantisce velocità e qualità di connessione adeguate alle esigenze del monitoraggio.

Il sistema LiSAmobile implementa il modulo Real Time che permette l'elaborazione, l'analisi e la trasmissione dei risultati elaborati in tempo reale.

I dati sono stati acquisiti dallo strumento ed elaborati sul posto, quindi inviati ad un sito web per la visualizzazione su apposita pagina web.

Nel caso specifico, la strumentazione ha permesso di mappare nel tempo le eventuali deformazioni che sul versante, individuare le aree potenzialmente teatro di movimenti ed osservarne l'evoluzione temporale.

Dal 23 Luglio 2025 al 22 Febbraio 2026 la catena di acquisizione ed elaborazione dati sopra indicata è stata controllata giornalmente dai tecnici della Ellegi srl incaricati di seguire l'appalto per verificarne il

corretto funzionamento. I controlli hanno riguardato il sistema radar GBInSAR LiSALab, la linea di comunicazione, il software di analisi dei dati, il corretto aggiornamento e l'accessibilità del sito web, il funzionamento dei moduli software e l'individuazione e la presenza o meno di aree in movimento. La verifica è avvenuta normalmente due volte al giorno nei giorni lavorativi, una al mattino verso le ore 9.00 e l'altra entro le ore 18.00. Durante questi controlli, è stata posta particolare attenzione all'osservazione della presenza di eventuali movimenti.

Il sistema è in grado di monitorare fenomeni le cui dinamiche si dipanino alla scala delle decine di minuti a partire dalla possibile ed auspicabile insorgenza di segnali precursori fino all'eventuale crollo. La presenza di precursori dell'evento è auspicabile per poter osservare l'evoluzione del fenomeno ed eventualmente diramare una segnalazione di allerta.

Crolli istantanei o con dinamiche con evoluzioni di poche decine di secondi non sono misurabili dal radar GBInSAR. Inoltre, le dimensioni dei blocchi in movimento devono essere superiori alle dimensioni della risoluzione radar impiegata, ovvero devono interessare alcune decine di metri quadri di superficie per essere correttamente misurate dalla strumentazione.

Attraverso il modulo software chiamato "LiSAlarm", il sistema è stato in grado di generare sequenze di mappe di deformazione in 2 e 3 dimensioni, georeferenziate, importabili e leggibili da GIS. Vengono anche generate serie temporali di spostamento di punti selezionabili e modificabili a piacimento dall'operatore. I dati raccolti dal sistema sono stati resi accessibili alla committenza, alla DL al CSE e all'impresa tramite sito web, o accesso diretto al sistema radar.

La tecnica SAR interferometrica

Il sistema GBInSAR LiSALab è un sistema radar ad apertura sintetica mobile e posizionato a terra, avente capacità interferometriche. La strumentazione è stata espressamente realizzata per effettuare misure in ambiente esterno per il monitoraggio delle deformazioni strutturali e dei pericoli naturali.

Tale sistema, esclusiva della Ellegi srl e protetto da un Brevetto Italiano, uno Europeo ed uno Americano, è l'evoluzione della tecnologia sviluppata dal Centro Ricerche della Commissione Europea di Ispra (VA), avendo la Ellegi acquisito integralmente, nel 2007, il ramo d'azienda inerente ai servizi di monitoraggio radar da terra dei pericoli naturali e delle strutture della società LiSALab Srl. La società LiSALab è nata come start-up del Centro Ricerche della Commissione Europea di Ispra (VA) finalizzata all'utilizzo ed allo sviluppo commerciale della tecnologia LiSA. Tale tecnologia è nata dai risultati di dieci anni di ricerca svolta sui radar ad apertura sintetica del Centro Ricerche della Commissione Europea. Dalla originaria tecnologia, Ellegi srl ha generato, dal 2003 ad oggi, continui sviluppi e miglioramenti proprietari (identificati come tecnologia e sistema GBInSAR LiSALab), sia per quanto concerne il software che per i sistemi di acquisizione. Ad esempio, ad oggi, i sistemi di acquisizione GBInSAR LiSALab sono alla quinta generazione.

Il radar è un sensore attivo che invia impulsi a microonde verso la scena osservata, registra coerentemente il segnale diffuso e deriva l'informazione sulla distanza dei diversi diffusori tramite il calcolo del ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevute.

Nelle applicazioni di telerilevamento nelle quali l'oggetto di studio è una scena complessa, è desiderabile distinguere quanti più dettagli possibile ed è importante la capacità del sistema di collocare esattamente i diversi oggetti nello spazio al fine di discriminare oggetti vicini: in altre parole, è importante ottenere un'elevata risoluzione spaziale. In questo tipo di applicazioni un valido approccio è rappresentato dalla tecnica SAR (Radar ad Apertura Sintetica), utilizzata per ottenere immagini a microonde con elevata risoluzione spaziale. Il sensore, in questo caso, si muove lungo una direzione rettilinea puntando in direzione perpendicolare rispetto a quella di movimento ed effettuando misure radar ad opportuni intervalli spaziali. Il successivo trattamento dell'insieme dei dati raccolti consente di produrre un'immagine con una risoluzione spaziale che dipende dalla distanza dell'area in esame.

Una caratteristica importante della tecnica SAR è che il trattamento dei dati può essere effettuato in modo tale da ottenere come risultato un'immagine composta da numeri complessi. Ogni cella di risoluzione (pixel) corrispondente ad una determinata porzione della scena osservata sarà pertanto caratterizzata da

- un'ampiezza radiometrica che esprime la riflettività dell'oggetto alla frequenza di osservazione, rappresentata di seguito dalle mappe di potenza,
- un valore di fase che dipende dalla distanza sensore-oggetto e dalle caratteristiche dielettriche di quest'ultimo.

L'utilizzo dell'informazione di fase contenuta nell'immagine SAR, talvolta in combinazione con l'informazione radiometrica, consente applicazioni avanzate della tecnologia radar tra le quali vi è quella dell'*interferometria differenziale SAR*.

***L'interferometria differenziale SAR* consente, attraverso il confronto tra le fasi del segnale di due acquisizioni separate temporalmente ma acquisite dallo stesso luogo e con gli stessi parametri di misura, di ricavare lo spostamento dei vari pixel che formano lo scenario osservato lungo la direzione della linea di vista (LOS) del sistema avvenuto durante l'intervallo trascorso.**

Indipendentemente dalla piattaforma utilizzata (satellitare, aviotrasportata o terrestre) e dallo specifico metodo di misura, ogni volta che si applica l'interferometria differenziale SAR per misurare gli spostamenti il prodotto finale può essere ricondotto a mappe di spostamento che in generale possiedono le seguenti caratteristiche:

(1) Gli spostamenti misurati si riferiscono alla componente dello spostamento reale proiettata lungo la direzione di vista (LOS) del sistema SAR nell'intervallo di tempo compreso tra due acquisizioni;

(2) La risoluzione spaziale delle mappe di spostamento è uguale a quella delle immagini SAR di partenza, ma la risoluzione può degradarsi se vengono applicate delle medie spaziali durante le operazioni di elaborazione dati;

(3) La precisione nel misurare degli spostamenti è pari ad una frazione della lunghezza d'onda elettromagnetica. Solitamente si arriva a valori inferiori al millimetro.

È da notare che la tipica ambiguità caratteristica delle misure di fase, dovuta alla loro ciclicità tra –π e +π, rimane irrisolta quando lo spostamento relativo di ogni pixel supera la mezza lunghezza d'onda.

Spostamenti anche di molte lunghezze d'onda sono correttamente misurabili purché abbiano una distribuzione spaziale sufficientemente 'morbida' da riguardare un certo numero di pixel. Il semplice esempio mono-dimensionale riportato in Figura 4 contribuisce a chiarirne il concetto.

La linea continua rappresenta la sezione di una sbarra in posizione di riposo, mentre la linea tratteggiata rappresenta il profilo deformato della stessa. La deformazione è massima nella porzione centrale (pixel A), dove risulta superiore alla lunghezza d'onda e diminuisce verso gli estremi che si assumono fissi nelle due condizioni. Mentre l'interpretazione della misura sul pixel A, considerata isolatamente, è ambigua, la valutazione complessiva di tutta la serie di pixel da A ad F (l'estremità) consente di derivare univocamente un pattern di deformazione.

Tale risultato può essere ottenuto applicando particolari algoritmi detti di *phase unwrapping* che consentono di 'srotolare' la fase e interpretare correttamente le discontinuità (chiamate frange) che appaiono in tale situazione. La condizione che in ultima analisi deve normalmente verificarsi è che la differenza tra gli spostamenti in pixel adiacenti non deve superare un quarto di lunghezza d'onda.

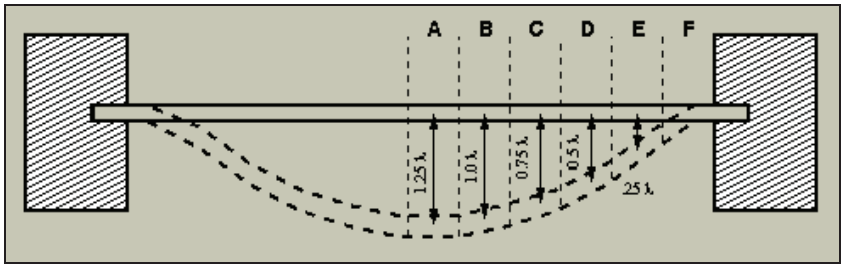


Figura 4: esempio di misura degli spostamenti in un caso mono-dimensionale

Le scale colorate che solitamente accompagnano le mappe di spostamento identificano gli spostamenti medi lungo la linea di vista del sensore dei pixel considerati. I valori negativi rappresentano spostamenti in avvicinamento al sistema (nel caso specifico sono spostamenti verso valle); viceversa, quelli positivi rappresentano spostamenti in allontanamento dal sistema (nel caso specifico spostamenti verso monte).

Le mappe di spostamento a copertura di un lungo intervallo di tempo possono essere ottenute per via diretta, confrontando le immagini corrispondenti all'intervallo prescelto, o per via indiretta, sommando gli spostamenti misurati nelle coppie di interferogrammi successivi a copertura dell'intervallo temporale di interesse. Queste ultime mappe di spostamento sono spesso indicate anche con il nome di mappe degli spostamenti cumulati proprio perché gli spostamenti rappresentati sono la somma degli spostamenti misurati nei vari sotto-periodi relativi all'intervallo considerato.

Con la procedura indiretta, scegliendo opportunamente l'intervallo temporale tale per cui non si presenti il fenomeno della ciclicità della fase, si riesce a eliminare il problema dello "srotolamento" di fase.

Tutti gli spostamenti misurati e presentati nelle mappe di spostamento ottenute rappresentano le componenti dello spostamento reale del punto osservato proiettate lungo la linea di vista (LOS) del sistema GBInSAR LiSALab.

Con la strumentazione GBInSAR LiSALab è possibile realizzare la condizione di ripresa delle varie immagini SAR esattamente dalla stessa posizione. In tali condizioni, il contributo topografico alla fase dell'interferogramma è nullo. L'interferogramma è generato mediante la semplice moltiplicazione, pixel per pixel, del dato complesso di una prima immagine con il complesso coniugato del dato complesso della seconda (Figura 5).

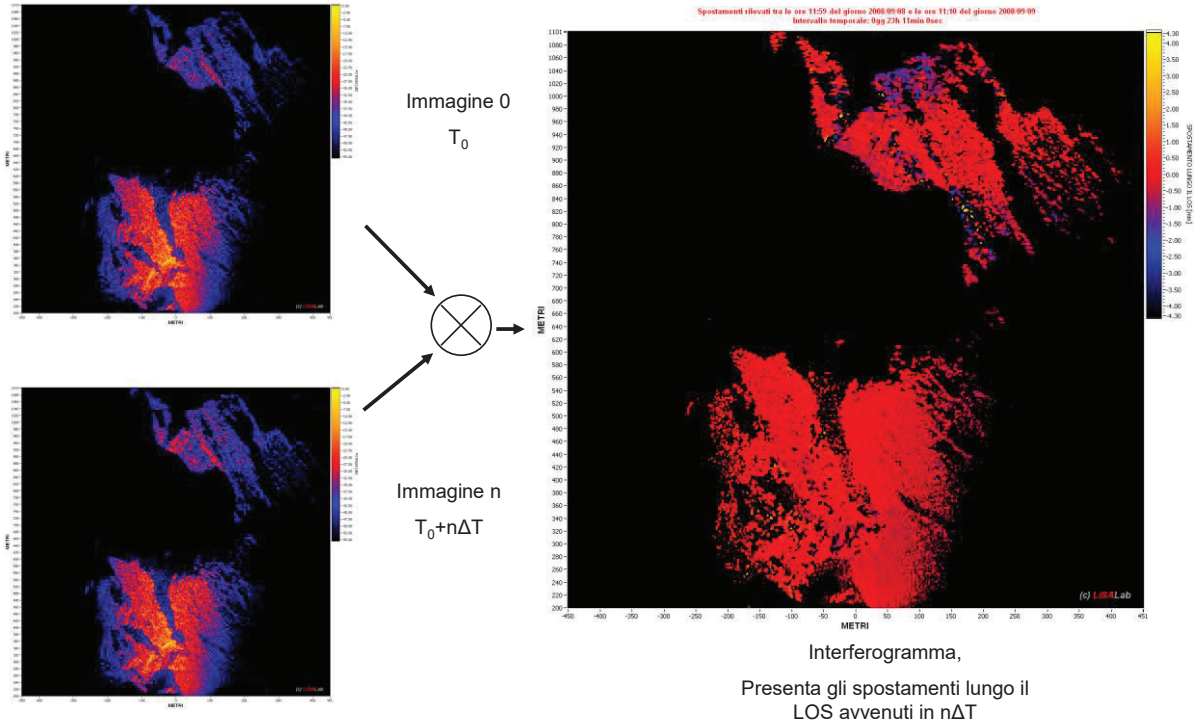


Figura 5: Schema concettuale di produzione di un interferogramma a partire da due immagini acquisite in tempi differenti T0 e T0+ΔT, le immagini a sinistra sono immagini in potenza GBInSAR.

Nell'assunzione che anche le varie ipotesi riguardo l'influenza degli effetti dielettrici siano verificate, il valore di fase di ogni pixel dell'interferogramma risultante è direttamente legato allo spostamento relativo, lungo la linea di vista del sistema (LOS), della porzione di terreno corrispondente alla cella secondo la relazione seguente:

$$\Delta\phi_s = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta S$$

dove $\Delta\phi_s$ è la fase dell'interferogramma, λ la lunghezza d'onda a cui si osserva e ΔS è lo spostamento.

Le scale colorate che solitamente accompagnano gli interferogrammi (se i risultati sono visualizzati in fase) o le mappe di spostamento (se i risultati sono visualizzati in millimetri) identificano gli spostamenti medi lungo la linea di vista del sensore dei pixel considerati. I valori negativi rappresentano spostamenti in avvicinamento al sistema (nel caso specifico sono spostamenti verso valle), viceversa quelli positivi rappresentano spostamenti in allontanamento dal sistema (nel caso specifico sono spostamenti verso monte).

Avendo a disposizione una serie di immagini SAR prodotte in istanti di tempo diversi ed acquisite al fine di studiare l'evoluzione temporale di un determinato fenomeno, sono generabili due tipi di sequenze di interferogrammi.

È possibile definire un'unica immagine di riferimento e generare gli interferogrammi con tutte le immagini seguenti in modo tale che ognuno serva a misurare lo spostamento totale intercorso nel relativo intervallo di tempo (logica incrementale).

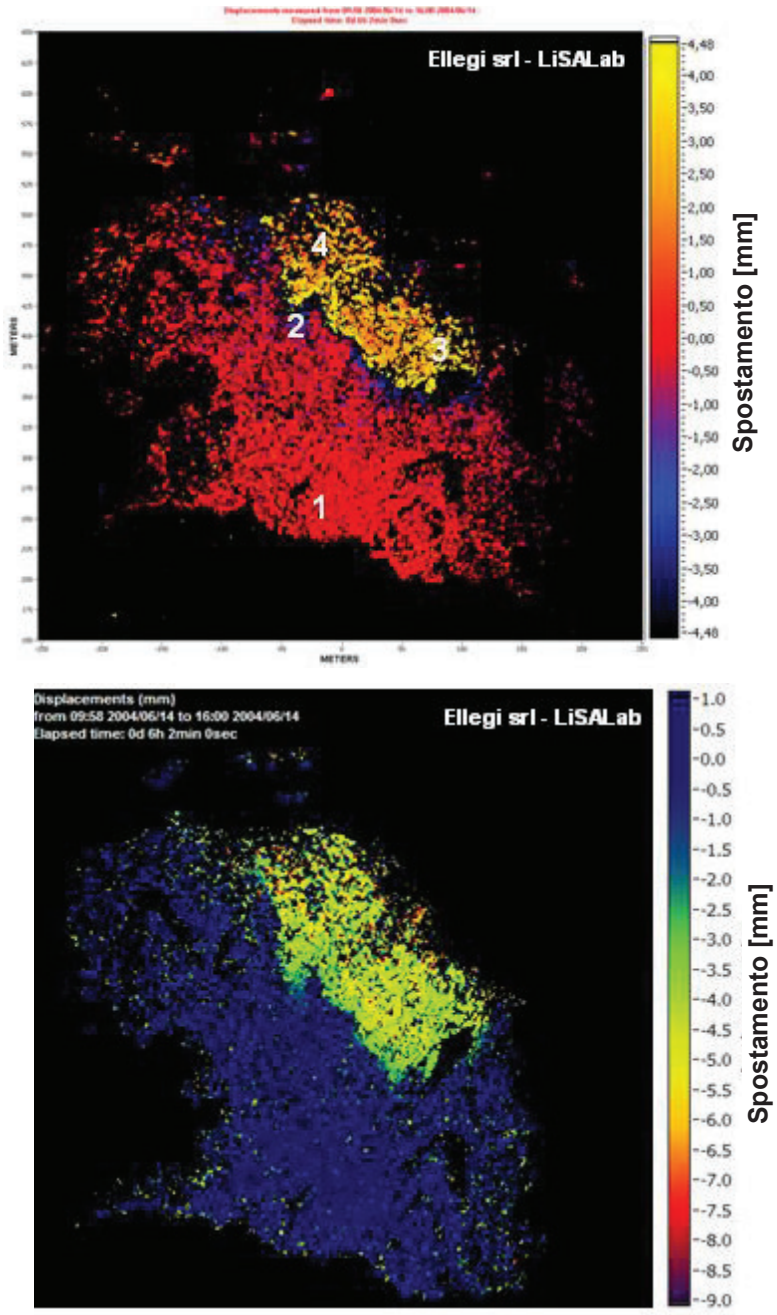
Alternativamente si può procedere alla generazione di interferogrammi tra coppie consecutive in modo da misurare l'eventuale spostamento passo – passo (logica rolling). Lo spostamento parziale misurato ad ogni passo può essere aggiunto alla sommatoria dei precedenti, ottenendo uno spostamento cumulato.

Le due sequenze devono, in generale, condurre agli stessi risultati finali, ma relativamente ad ogni caso specifico, hanno delle peculiarità che possono far preferire l'una o l'altra.

In particolare il primo metodo può risentire di effetti di perdita di coerenza, riferendosi ad intervalli temporali più lunghi. In questo caso, gli spostamenti potrebbero essere pari ad un numero elevato di lunghezze d'onda e richiedere la procedura addizionale di *phase unwrapping* per eliminare le frange di interferenza (salti di fase) e consentire un'analisi più semplice dei risultati. È bene rilevare che la logica incrementale tende ad aumentare il rumore rispetto alla logica rolling.

Con la procedura passo – passo e scegliendo opportunamente un intervallo temporale tale per cui non si presenti il fenomeno della ciclicità della fase, si riesce a eliminare il problema legato a tale fenomeno.

Spesso negli interferogrammi presentati, i valori di fase non sono "srotolati" e di conseguenza i valori delle deformazioni risultano affetti intrinsecamente dall'ambiguità delle misure di fase.



Punto 1: area stabile, differenza di fase 0°, *n* = 0 e spostamento pari a 0 mm, è il punto di riferimento a partire dal quale contare le fasi;

Punto 2: blu scuro, equivale a una differenza di fase *n* pari a - ¼ λ ed uno spostamento di ~-2.24 mm;

Punto 3: giallo chiaro, equivale a una differenza fase pari a *n* = - ½ λ + ¼ λ ed uno spostamento di ~-8.96 + 2.24= ~-6.72 mm;

Punto 4: rosso, equivale a *n* = - ½ λ (prima frangia) = ~-8.96 mm di spostamento.

Figura 6: in alto: mappa di deformazione non "srotolata" e relativo esempio di lettura. In basso: mappa di deformazione "srotolata".

In Figura 6 sono presentate due mappe di deformazione della stessa area: una con valori "non srotolati", l'altra con valori "srotolati". Nel caso specifico si è scelta una mappa di deformazione con una frangia d'interferenza. Nella prima immagine (quella non "srotolata"), se lo spostamento del terreno verso l'osservatore eccede la fine della scala colorata, che passa dal rosso al blu scuro, i successivi valori delle

misure ripartiranno dall'estremità opposta della scala (per la proprietà di ciclicità della fase), che passa dal colore giallo al rosso.
Accade così che dopo uno spostamento del terreno di 0.5 λ, pari a 8.96 mm, i singoli pixel dell'interferogramma presenteranno di nuovo valori di fase pari a zero (colore rosso nella mappa di spostamento).
Tenendo presente questo effetto, è possibile quindi valutare e misurare il valore dello spostamento d'ogni singolo pixel contando il numero dei cicli di fase (n) e moltiplicandoli per 0.5 λ (nell'esempio n × 8.96 mm). Nella mappa srotolata invece si ha una corrispondenza biunivoca tra i valori degli spostamenti e la scala colorata relativa e ciò ne rende più immediata ed intuitiva la lettura.

Parametri di misura e caratteristiche dell'immagine SAR

Le proprietà dell'immagine SAR acquisite per mezzo della tecnica GBInSAR LiSALab, in particolare la risoluzione spaziale, sono legate ai parametri di misura scelti, alle caratteristiche dell'installazione e alla distanza del sensore dalla scena osservata.
Le risoluzioni in *range* (distanza) ed *azimut* (ovvero, la direzione parallela al movimento del sensore) sono date dalle due seguenti relazioni:

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \qquad \Delta r_x = \frac{cR}{2Lf_c}$$

L'estensione totale del tratto percorso lungo il binario dalle antenne (*L*) e la frequenza centrale del segnale trasmesso (f_c) influiscono in maniera inversamente proporzionale sulla dimensione longitudinale (*azimut*) della cella di risoluzione, mentre la larghezza della banda di frequenze trasmessa (*B*) ha effetto solo sulla seconda dimensione (*range*), sempre in modo inversamente proporzionale. È bene anche sottolineare che, diversamente dalla tecnica SAR tradizionale (satellitare), la risoluzione non solo dipende dalla distanza ma ha anche una dipendenza con la posizione in azimut della cella rispetto alla collocazione del sensore.
Tipicamente ci si può attendere una variazione in aumento fino al 50% della dimensione della cella di risoluzione reale a partire dalle dimensioni della cella di risoluzione radar teorica.
In accordo con i parametri scelti per l'osservazione delle pareti rocciose nella porzione meridionale del monte Avedeè nel Comune di Novate Mezzola SO la risoluzione teorica minima in range è approssimativamente di 0.75 m, mentre quella in azimut varia tra 1.6 m e 1.9 m.
Le condizioni operative e i parametri di misura utilizzati dal sistema sono riassunti nella tabella seguente:

- Massima distanza dell'area osservata: 650 m
- Minima distanza dell'area osservata: 200 m
- Risoluzione teorica in range (costante): ~ 0.75 m
- Risoluzione teorica in azimut a 200 m: ~ 0.6 m
- Risoluzione teorica in azimut a 425 m: ~ 1.2 m
- Risoluzione teorica in azimut a 650 m: ~ 1.9 m
- Accuratezza calcolata su due immagini acquisite: ~ 0.1 mm
- Precisione calcolata su due immagini acquisite (1σ):~ ±0.6 mm

In seguito a valutazione con CSE e DL il radar è stato impostato per acquisire con i seguenti parametri di elaborazione:

Revisiting time: 3.4 minuti

Restituzione dei risultati: ogni 60 minuti, utilizzando dati mediati a 4 ore.

Con i parametri selezionati è stato possibile acquisire immagini SAR del versante osservato di buona qualità.

L'immagine SAR in potenza mostra la mappa dell'energia riflessa dagli oggetti presenti nella scena osservata relativizzata al massimo segnale riflesso misurato. I valori sono adimensionali ed espressi in scala logaritmica (dB).

La Figura 7 e Figura 8 mostrano diverse visualizzazioni dell'immagine SAR in potenza dello scenario osservato dal sistema GBInSAR LiSALab. Le regioni gialle sono quelle che riflettono meglio le onde elettromagnetiche, mentre quelle blu sono le regioni che presentano una riflettività minore a causa della geometria dello scenario stesso o a causa del materiale di cui sono composte.

Le zone rocciose e le strutture in muratura o metalliche tipicamente riflettono meglio le onde incidenti rispetto alle aree coperte da vegetazione ed alle aree che, per motivi geometrici, rimangono in ombra.

Nel caso specifico, le pareti rocciose e le aree non vegetate creano zone particolarmente riflettenti. Le aree vegetate presentano al contrario generalmente una colorazione tendente al blu scuro, mentre le zone d'ombra sono rappresentate con il colore nero opaco.

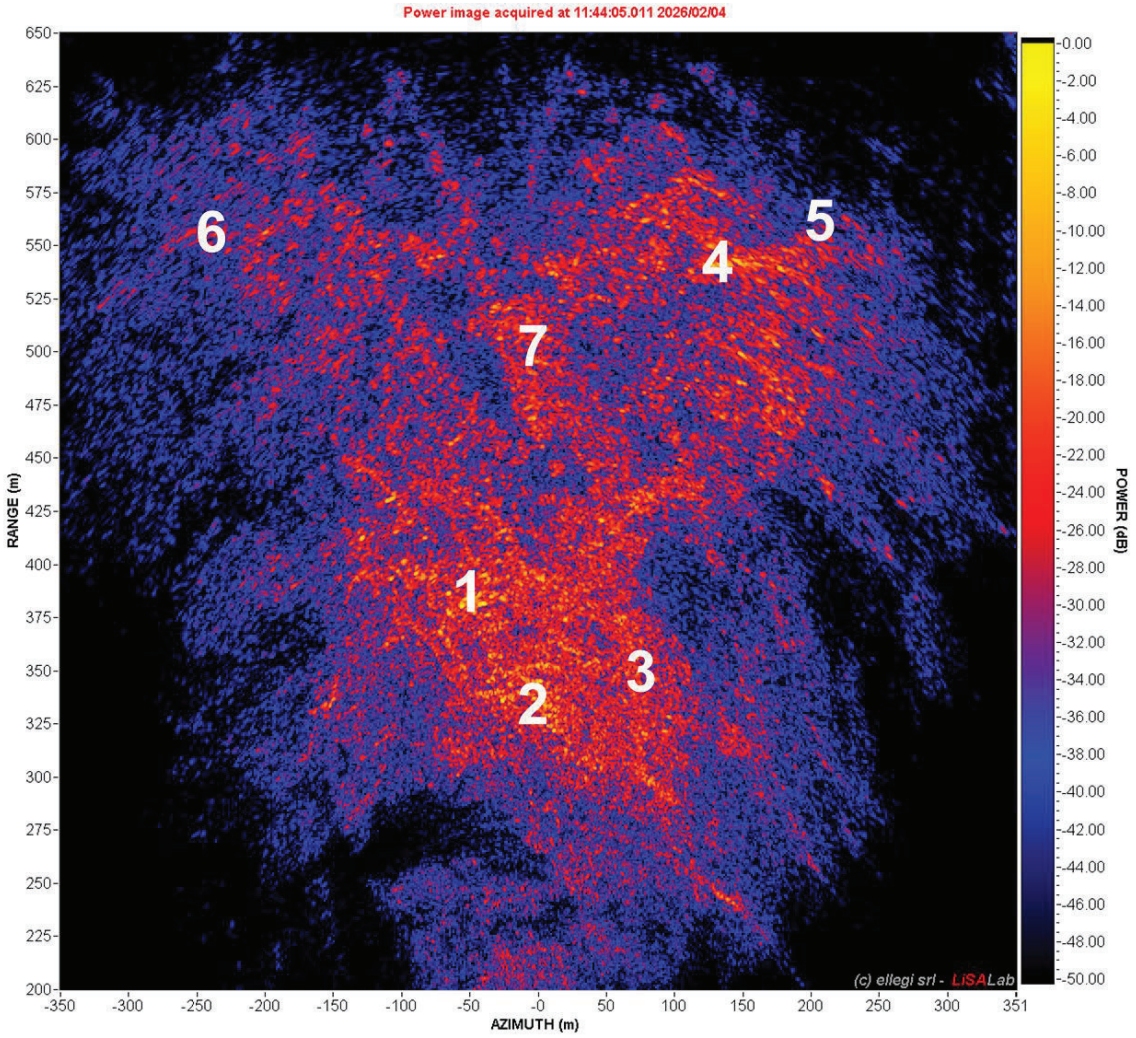
L'immagine radar è originariamente una immagine 2D, quindi è intrinsecamente distorta in quanto lungo la direzione "range" sono riportate le distanze "sensore – punto osservato", che sono funzione anche dell'elevazione del punto stesso. Proprio per questo motivo le immagini tendono ad essere "stirate" o "compresse" in funzione della quota di quest'ultimo e della sua geometria.

Attraverso una successiva elaborazione della mappa sul rilievo in tre dimensioni del versante è possibile eliminare le distorsioni e rendere immediata la collocazione delle aree oggetto di monitoraggio.

I risultati presentati in seguito sono stati elaborati e geo riferiti sul modello di elevazione digitale del versante per rendere immediata la comprensione delle aree in movimento e del loro grado di mobilitazione in un intervallo di lungo termine.

Nell'immagine di Figura 8 è rappresentata l'immagine in potenza del versante prodotta dal sistema GBInSAR LiSAmobile di Figura 7, ma elaborata in 3D e georeferenziata sul rilievo fotogrammetrico del versante fornitoci. Ciò rende più agevole la comprensione delle immagini radar da parte del lettore.

Si rammenta che la presenza di vegetazione è fonte di rumore nelle misure GBInSAR e pertanto nelle zone in cui essa è più folta, i risultati sono meno precisi o impossibili da ottenere, infatti, il segnale su quelle aree risulta particolarmente attenuato rispetto a quelle non vegetate.



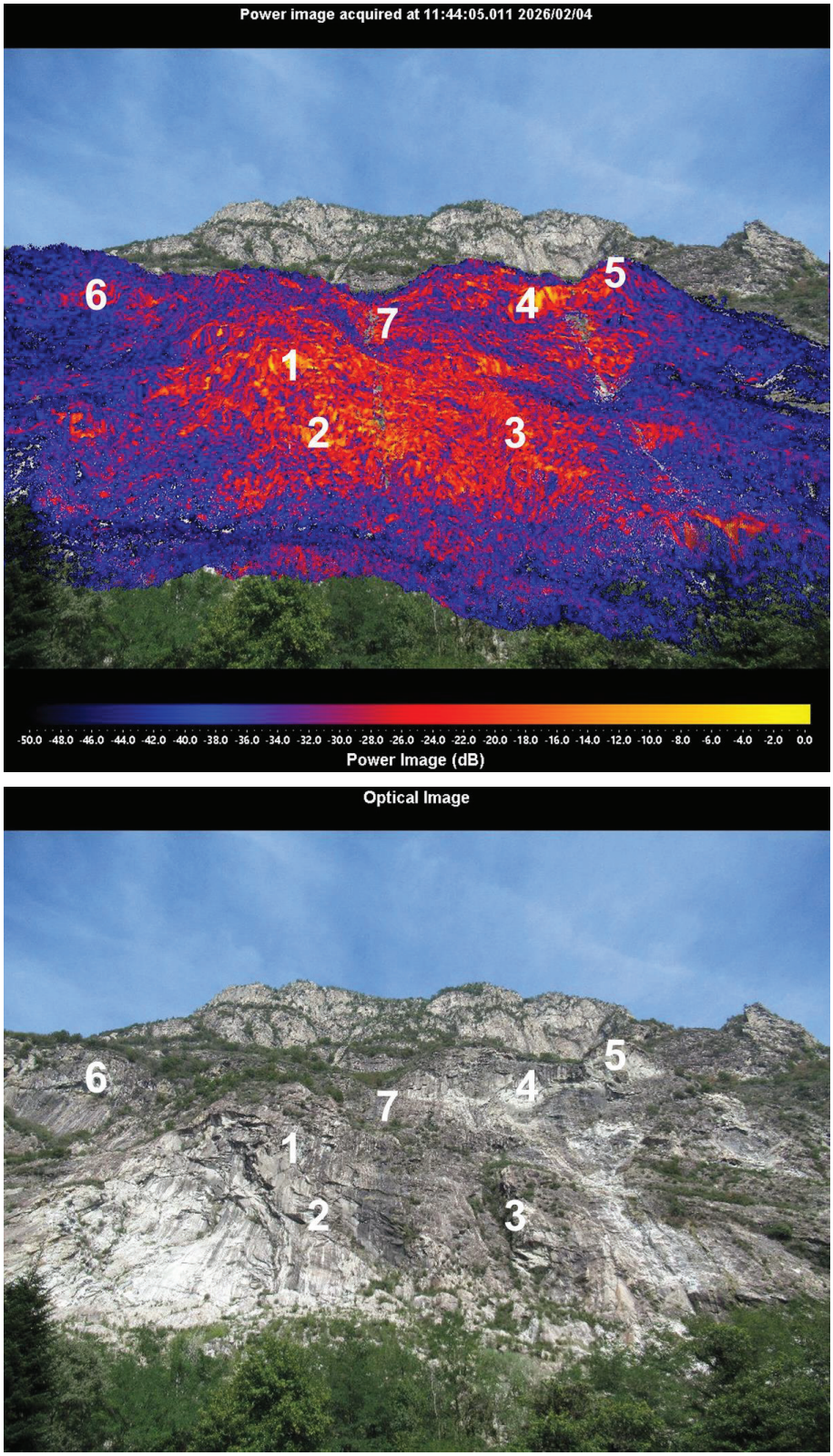


Figura 7: Immagini SAR in potenza e loro georeferenziazione qualitativa su immagine del versante. Il pannello superiore mostra l'immagine radar in 2D con coordinate radar range e azimut. Il pannello centrale mostra la proiezione dell'immagine radar sul sull'immagine ottica mentre il pannello inferiore mostra la fotografia del versante con indicazione delle zone mostrate nei pannelli precedenti.

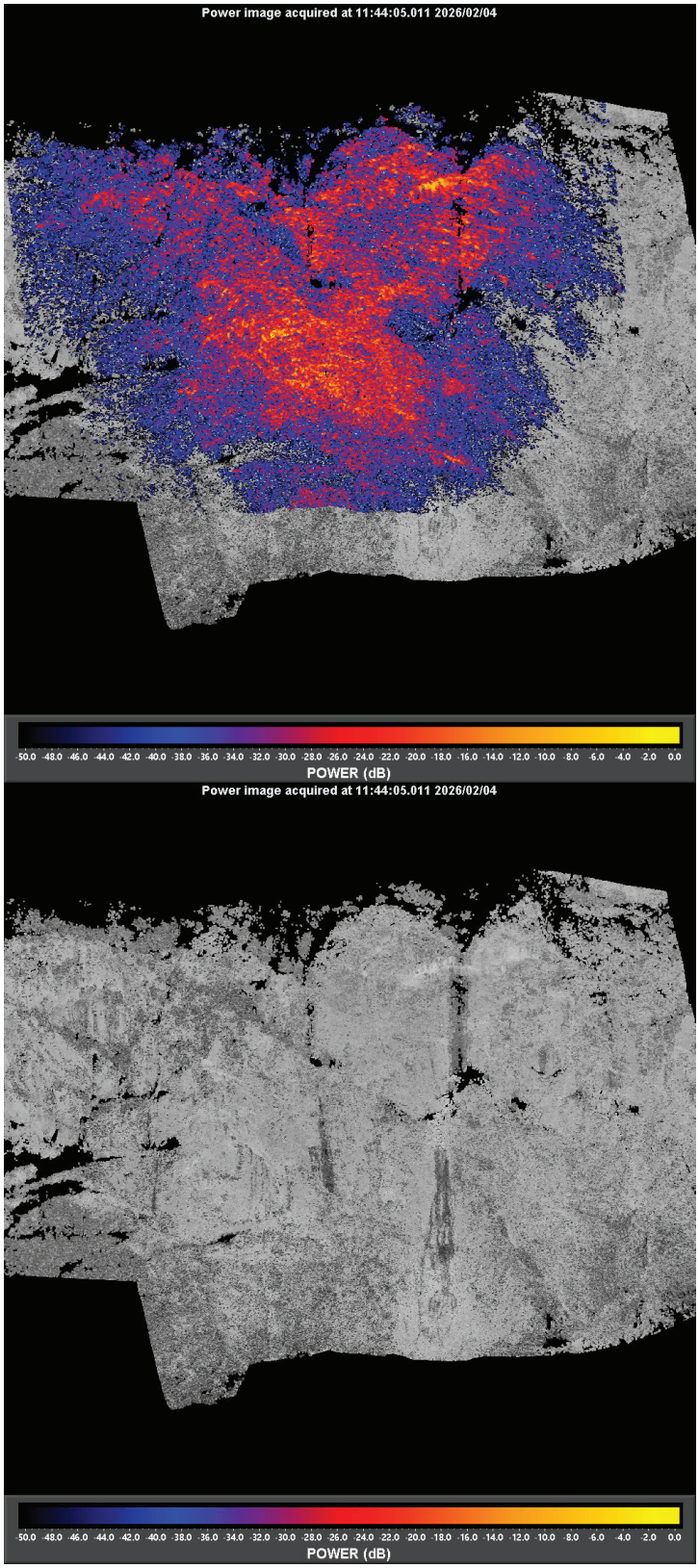


Figura 8: Mappa in potenza 3D del versante monitorato. Il pannello superiore mostra la mappa in potenza proiettata su modello 3D del versante mentre la porzione inferiore mostra il modello 3D utilizzato.

Attivazione sito web e georeferenziazione risultati

I risultati acquisiti dal radar sono stati visualizzati su di un sito web, raggiungibile all'indirizzo: lisalab.com/Novate_est_PM/.

L'intervallo di aggiornamento dei dati sul sito web è stato impostato ad 1 ora.

Il sito visualizza le mappe di spostamento acquisite dal radar in (Figura 9):

- due dimensioni.
- in tre dimensioni, georiferite su nuvola di punti ottenuta da rilievo fotogrammetrico fornito dalla Committenza.
- In tre dimensioni, proiettate sull'immagine ottica del versante.

Le mappe di spostamento visualizzate sono relative ai seguenti intervalli temporali:

- Ultimi 60 minuti;
- Ultime 6 ore;
- Ultime 12 ore;
- Ultime 24 ore;
- Ultimi 7giorni;

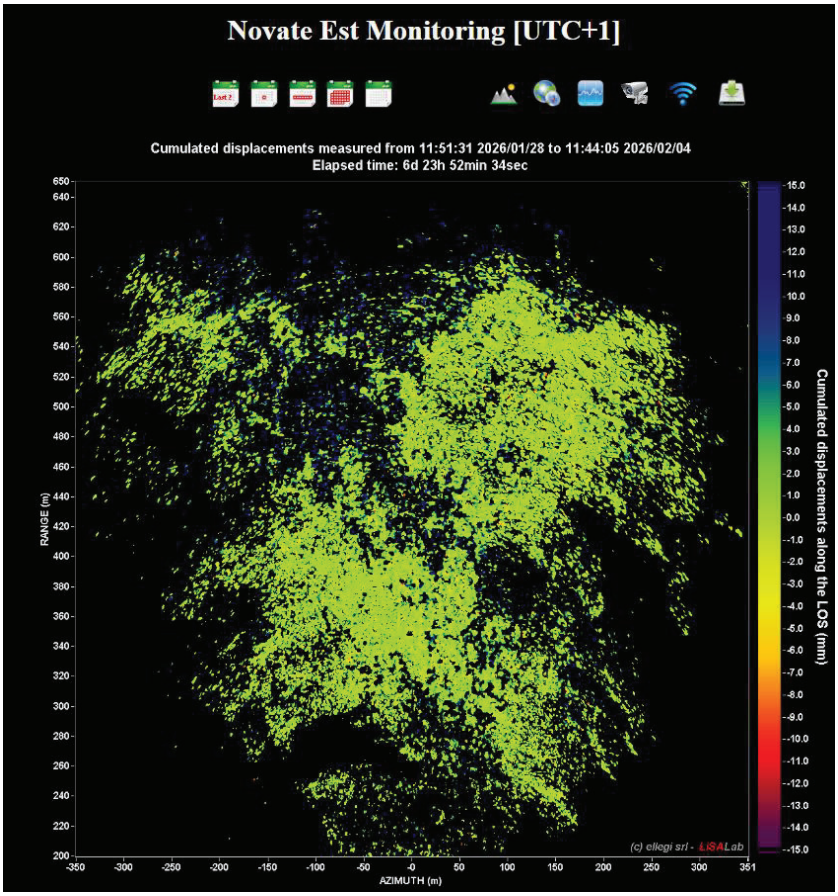
E' inoltre possibile visualizzare gli Hot spot rilevati, se presenti.

Sono stati anche selezionati e posizionati 16 punti di interesse (POI) sul versante osservato le cui serie temporali e posizioni sono analizzabili dal sito web (Figura 10 e Figura 11) e le loro coordinate assolute sono indicate in Tabella 1.

POI	Est [m]	Nord [m]	Elevazione [m s.l.m.]
A	534883.1	5119376.5	366.2
C	535166.6	5119317.0	527.1
F	535195.8	5119306.0	625.8
U	534988.1	5119314.5	388.6
V5	534843.3	5119549.0	597.3
A1	534938.5	5119338.0	363.4
E4	535208.1	5119298.0	560.5
8_3	534940.4	5119377.0	471.7
8_4	534865.9	5119442.5	457.1
IX1	535037.3	5119297.5	427.3
IX2	535102.6	5119197.5	367.3
01	535000.3	5119409.0	531.8
02	534999.0	5119404.5	522.8
03	535138.2	5119330.5	499.6
04	535158.8	5119333.0	549.0
05	535190.0	5119314.0	627.3

Tabella 1 : Coordinate assolute dei 16 POI distribuiti lungo il versante.

LISALAB


Novate Est Monitoring [UTC+1]
Cumulated displacements measured from 11:51:31 2026/01/28 to 11:44:05 2026/02/04
Elapsed time: 6d 23h 52min 34sec
RANGE (m)
AZIMUTH (m)
Cumulated displacements along the LOS (mm)
(c) ellegi srl - LiSALab

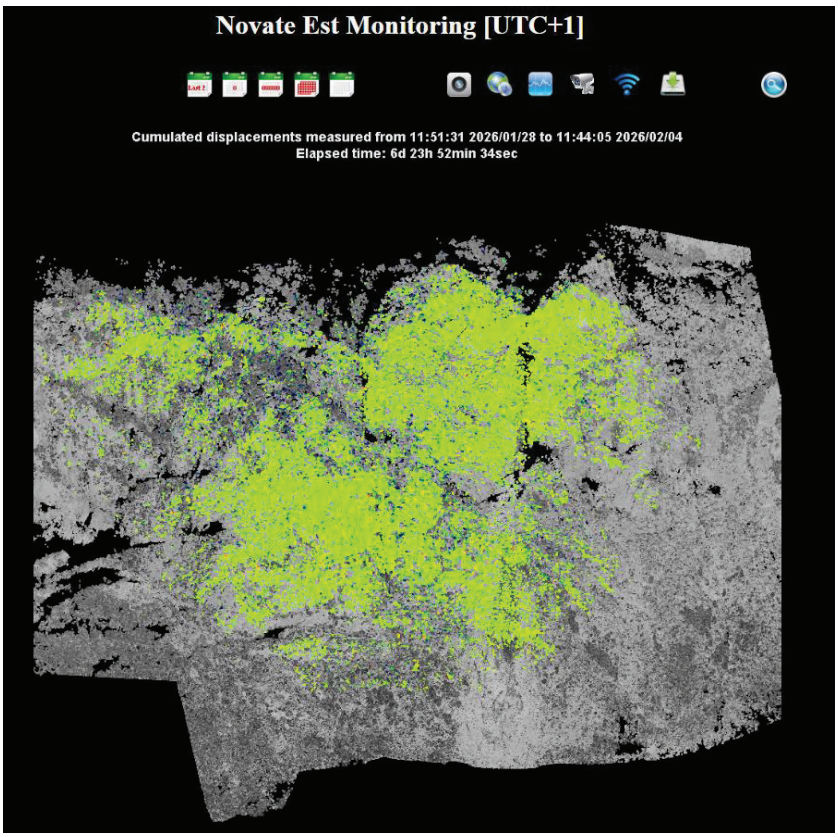
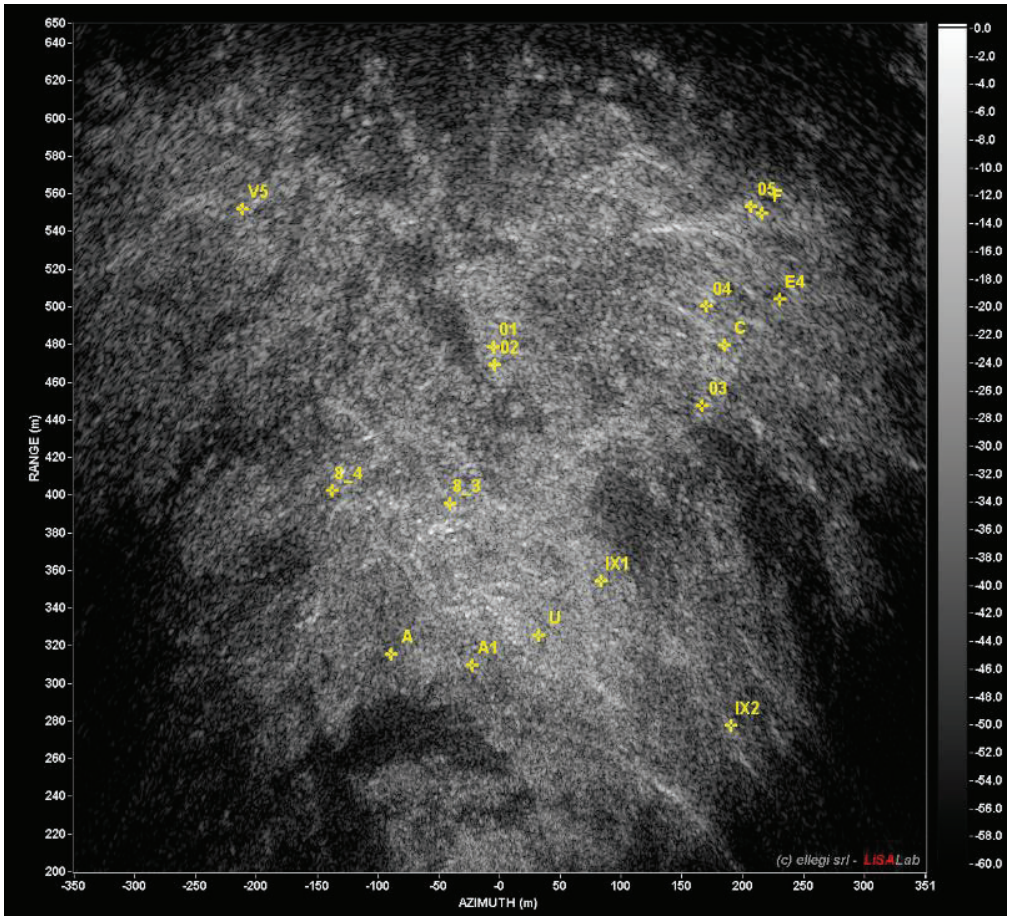

Novate Est Monitoring [UTC+1]
Cumulated displacements measured from 11:51:31 2026/01/28 to 11:44:05 2026/02/04
Elapsed time: 6d 23h 52min 34sec

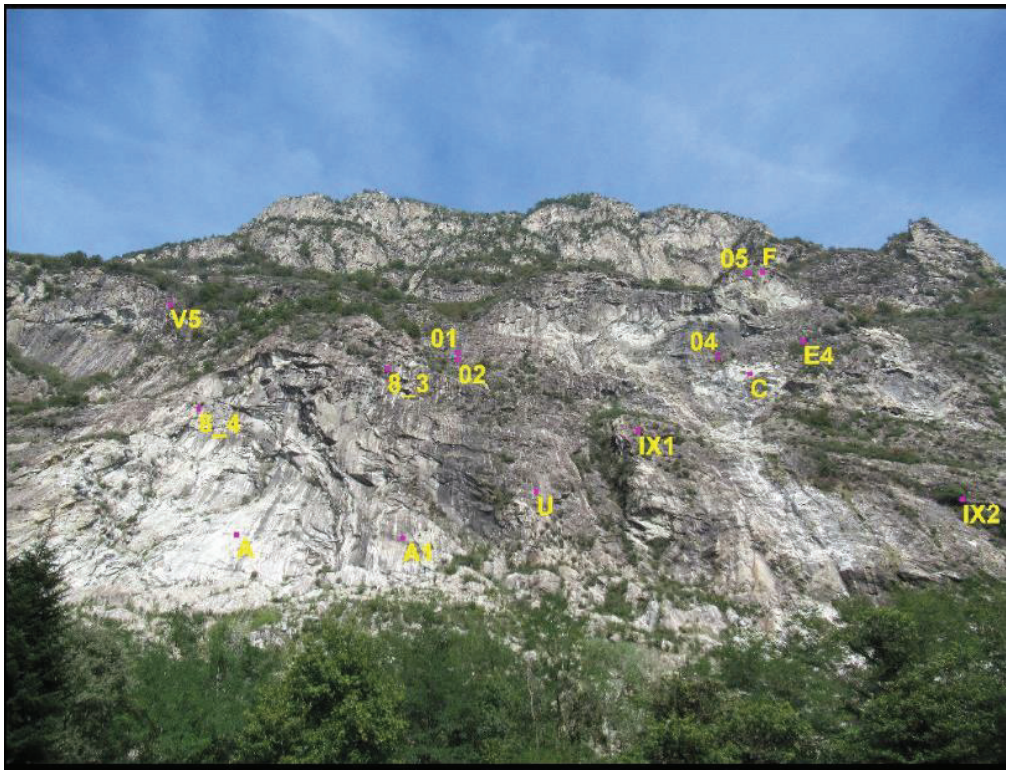


Figura 9: Sito web – Immagine superiore: visualizzazione 2D della mappa degli spostamenti cumulati. Immagine centrale: proiezione della mappa degli spostamenti cumulati su modello 3D del versante. Immagine inferiore: proiezione della mappa degli spostamenti cumulati sull'imagine ottica del versante.

I POI sono stati distribuiti in maniera tale da essere posizionati su aree specifiche già osservate e documentate durante i monitoraggi periodici effettuati fra il 2022 e il 2024. I punti denominati con una lettera (A, C, F, U, V5, A1, E4, IX1, IX2) sono stati infatti posizionati su aree osservate in movimento durante le campagne periodiche mentre i punti denominati con un numero (8_3, 8_4, 01, 02, 03, 04) sono stati creati ed aggiunti appositamente per questo monitoraggio permanente.

L'andamento delle serie temporali verrà analizzato in dettaglio utilizzando delle immagini mediate a 24 ore nella sezione conclusiva di questo report.


V5
05
E4
04
C
01
02
03
8_4
8_3
IX1
U
A
A1
IX2
RANGE (m)
AZIMUTH (m)
(c) ellegi srl - LiSALab


05_F
V5
01
02
8_3
04
E4
C
8_4
IX1
U
IX2
A
A1

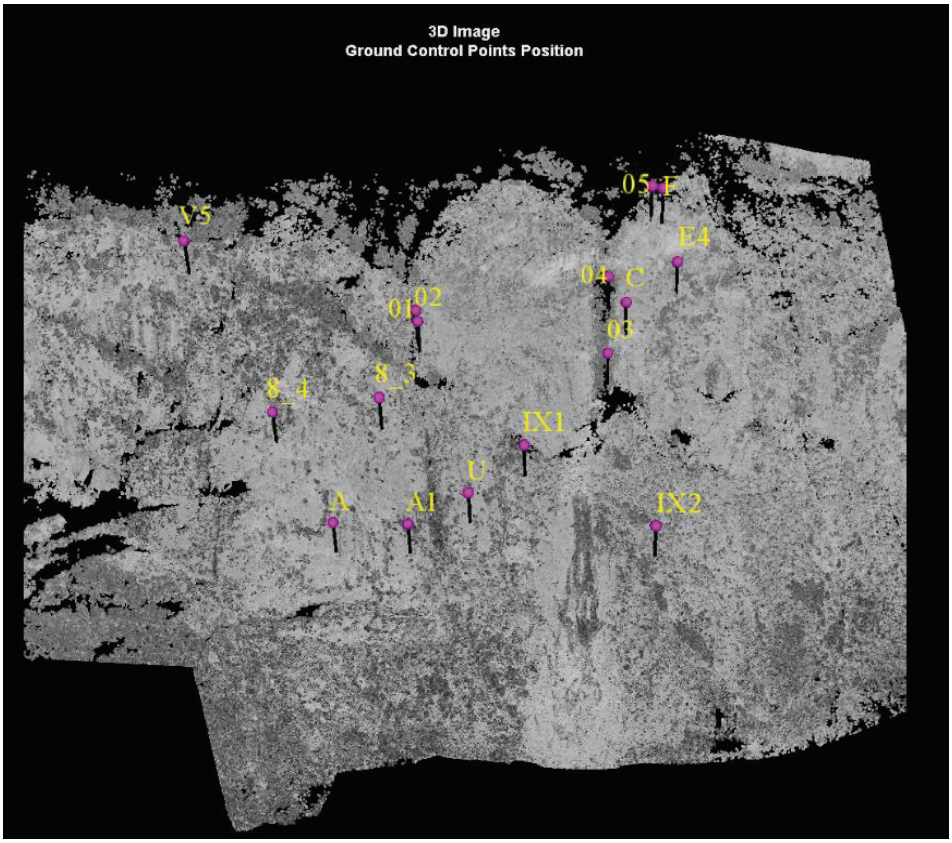


Figura 10: Posizionamento dei 16 POI distribuiti lungo il versante in 2D e 3D.

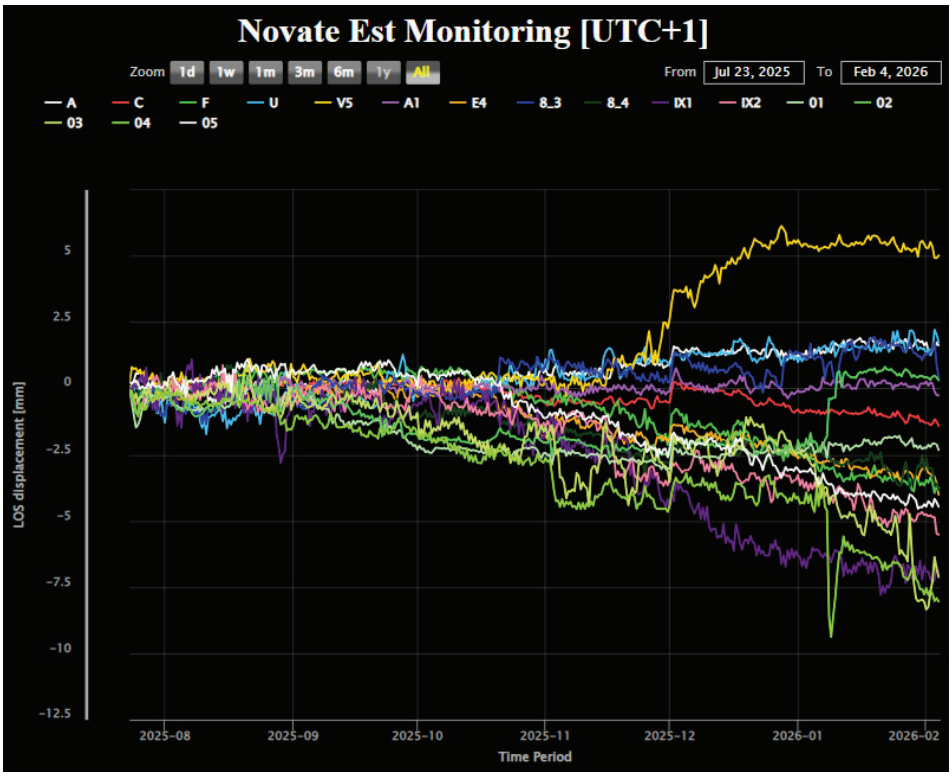


Figura 11: Serie temporali dei 16 POI.

LISALAB

Logica allertamento automatica: Hot Spot

Per ottenere un primo screening automatico di zone potenzialmente sorgenti di crolli, è stato attivato il modulo di analisi Hot Spot (HS).
In generale, le tradizionali logiche di allarme sono basate sull'analisi dei Punti di Interesse (POI), per cui viene definita una soglia sugli spostamenti e/o velocità delle serie storiche degli stessi.
Questa modalità di allarmistica è molto dipendente dai POI selezionati: in alcuni casi, infatti, potrebbe accadere che i movimenti siano in aree senza POI ed in tal caso si potrebbero perdere i precursori di eventi che porterebbero al collasso di alcune zone senza aver generato un allarme.
Al fine di superare questo limite, il modulo di analisi implementato nel radar identifica automaticamente se, in un certo intervallo temporale, sono presenti aree che hanno mostrato spostamenti (Hot Spot) omogenei al di sopra di un valore di soglia: in tal caso il sistema radar genera degli allarmi Hot Spot (HS).
L'idea di base è quella di utilizzare algoritmi in grado di eseguire analisi morfologiche sulle mappe GBInSAR che sono in grado di identificare aree chiuse e omogenee i cui pixel di appartenenza hanno spostamenti superiori a soglie selezionabili. In caso di identificazione positiva possono essere generati allarmi che vengono inviati agli utenti finali, i quali vengono messi a conoscenza della posizione ed estensione di queste aree.
In accordo con la DL e CSE i parametri per **attivare gli allarmi HS** sono stati impostati in questo caso specifico come segue:

- Intervallo di osservazione: 24 ore
- Area di allertamento: 30 m^2
- Soglie di spostamento:
    - Attenzione: -1.5 mm
    - Preallerta: -3.0 mm
    - Allerta: -5.0 mm

Le mail di allerta automatiche verranno inviate ai seguenti indirizzi:
A partire dalla soglia di Attenzione:

- Ellegi srl, tutto il personale coinvolto;
- CSE Ing. Gianluca Bragonzi info@studiocancelli.eu;
- DL Ing. Paolo Cancelli info@studiocancelli.eu;
- Impresa F.lli Locatelli srl
  Geom. Daniele Pozzi info@locatelli-introbio.it

A partire dalla soglia di Preallerta:

- i precedenti;

ed in più a

- RUP CM Valchiavenna

  Ing. Alberto Bianchi alberto.bianchi@cmvalchiavenna.it

All'arrivo di un messaggio di hot spot, il tecnico Ellegi srl preposto all'osservazione dei dati eseguirà una valutazione dell'allarme automatico ed invierà una mail ai soggetti che hanno ricevuto la comunicazione confermando o meno la correttezza della segnalazione.
Durante il monitoraggio, considerando che l'area ha zone coperte da vegetazione, zone soggette a fuoriuscite d'acqua e zone affette da neve e ghiaccio nei mesi più freddi sono state emesse varie segnalazioni di Hot Spot.
Tutte le segnalazioni automatiche inviate dal sistema durante il periodo di monitoraggio sono state valutate dal personale Ellegi e la loro attendibilità è stata confermata o smentita attraverso una mail inviata agli interessati secondo il protocollo delineato.
Nessuna modifica è stata apportata al protocollo in data successiva alla sua definizione.

Controllo sistema e reportistica speditiva

Il controllo in remoto dei risultati acquisiti ad opera dei tecnici Ellegi srl avviene al mattino ed alla sera di ciascun giorno lavorativo della settimana, festività escluse.
Eventuali aggiornamenti ed invio di reportistica integrativa via E-Mail vengono previsti secondo le modalità concordate con il responsabile dei lavori e con il coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione al manifestarsi di situazioni anomale ai seguenti destinatari:

- Ellegi srl, tutto il personale coinvolto;
- CSE Ing. Gianluca Bragonzi info@studiocancelli.eu;
- DL Ing. Paolo Cancelli info@studiocancelli.eu;
- Impresa F.lli Locatelli srl
  Geom. Daniele Pozzi info@locatelli-introbio.it
- RUP CM Valchiavenna

  Ing. Alberto Bianchi alberto.bianchi@cmvalchiavenna.it

In data 1 Dicembre 2025 i tecnici ellegi hanno segnalato la presenza di una zona avente spostamenti millimetrici nel lungo termine. I dettagli di questa zona verranno forniti nelle analisi seguenti.

Analisi degli spostamenti nel medio e lungo termine

In questa sezione vengono analizzati i dati raccolti dal 23 Luglio 2025 al 22 Febbraio 2026, in un intervallo di 214 giorni, per valutare l'eventuale presenza e distribuzione degli spostamenti sulla parete nel medio e lungo termine. Inoltre, l'analisi di tali dati fornisce un complemento alle analisi orarie eseguite in tempo reale, che invece sono servite ad evidenziare gli spostamenti di breve termine, utili per l'attivazione dell'allarmistica.

Le mappe di deformazione mostrano le regioni soggette a spostamenti e permettono di individuare comportamenti o anomalie locali seguendo l'evoluzione degli eventuali fenomeni in atto nello spazio e nel tempo. Si ricorda che esse possono essere lette utilizzando la barra colorata di ciascuna mappa, che associa ad ogni colore un valore di spostamento; valori negativi indicano spostamenti in avvicinamento al sistema (verso valle) mentre valori positivi possono indicare spostamenti in allontanamento dal sistema (verso monte) oppure spostamenti in avvicinamento al sistema tali da superare il valore della fase interferometrica di -4.4 mm. In queste analisi bisogna considerare che i fenomeni di decorrelazione presenti in natura si manifestano nelle immagini SAR come rumore sovrapposto alla fase interferometrica legata agli spostamenti e si concretizzano con una perdita di precisione delle misure o, nei casi peggiori, nell'impossibilità della misurazione stessa. Per ottenere valori accettabili nella precisione delle misure degli spostamenti estrapolate dagli interferogrammi, questi ultimi sono spesso prodotti mascherando le zone che hanno una coerenza troppo bassa. Per questo motivo, le mappe relative ad intervalli temporali più brevi, che sono pertanto affetti in minor quantità da fenomeni di decorrelazione, contengono un maggior numero di punti non mascherati in coerenza.

Per ovviare agli inconvenienti derivanti dal deterioramento della qualità degli interferogrammi, sono state utilizzate diverse metodologie di trattamento delle immagini SAR acquisite, in modo da poter garantire l'efficacia delle misure.

Generalmente l'approccio più consueto si concretizza nell'ottenere, per un dato intervallo di misura, un'immagine opportunamente elaborata statisticamente che genera una sorta di immagine "mediata" in un determinato intervallo preso come riferimento in cui si eliminano i risultati meno affidabili. Le immagini "mediate" incrementano il rapporto segnale rumore delle misure effettuate e di conseguenza la precisione delle stesse in quanto si eliminano o si riducono le influenze di fenomeni di disturbo quali ad esempio dilatazioni termiche o movimenti caotici della vegetazione causati dal vento.

Nel presente report si è deciso di utilizzare immagini mediate ad intervalli di 24 ore poiché si è rivelata la scelta migliore per l'analisi dei dati. La media su intervalli giornalieri permette infatti di migliorare il rapporto segnale/rumore oltre che la qualità e la precisione dei dati.

TUTTI I RISULTATI PRESENTATI RIPORTANO LA MISURA DEGLI SPOSTAMENTI LUNGO LA DIREZIONE DI OSSERVAZIONE (LOS) DEL SISTEMA GBInSAR LiSALab, OSSIA LA DIREZIONE CHE SI OTTIENE CONGIUNGENDO IL SISTEMA AL PARTICOLARE PUNTO OSSERVATO.

I risultati sono di seguito presentati come mappe interferometriche: viene mostrata una prima mappa relativa all'intero periodo di monitoraggio eseguito (23 Luglio 2025 – 22 Febbraio 2026) e, successivamente, una serie di interferogrammi con passo incrementale di circa 30 giorni a partire dal 23 Luglio 2025.

Per l'intervallo temporale che copre l'intero periodo dal 23 Luglio 2025 al 22 Febbraio 2026, si presentano i seguenti elaborati:

- Interferogramma 2D degli spostamenti registrati nel periodo analizzato (Figura 12).
- Interferogramma 3D degli spostamenti registrati nel periodo analizzato, georeferenziato sullìimmagine ottica del versante (Figura 13).
- Analisi statistica condotta per le aree che presentano spostamenti differenziali nel periodo analizzato (Figura 14).

Per l'intervallo temporale con passo incrementale, si presentano i seguenti elaborati:

- Interferogrammi proiettati su immagine fotografica relativi ai seguenti periodi: 23 Luglio 2025 – 22 Agosto 2025, 23 Luglio 2025 – 22 Settembre 2025, 23 Luglio 2025 – 22 Ottobre 2025; 23 Luglio 2025 – 22 Novembre 2025; 23 Luglio 2025 – 22 Dicembre 2025; 23 Luglio 2025 – 22 Gennaio 2026; 23 Luglio 2025 – 22 Febbraio 2026 (Figura 15).

Analizzando gli interferogrammi di seguito riportati si evince che nei circa 214 giorni di monitoraggio ci sono alcune aree aventi spostamenti al di sopra della precisione strumentale. La natura dei movimenti è in generale di tipo "lento" ovvero di una magnitudo di mm / mese e comunque inferiore al valore di 1 cm / anno.

Queste aree erano già state identificate nei report inviati alla committenza in occasione delle campagne periodiche che hanno preceduto l'avvio del monitoraggio dalla postazione permanente.

La prima area (identificata con A) si trova nella parte inferiore della parete rocciosa ed ha coordinate in azimut negative. Questa area ha mostrato degli spostamenti nell'intero periodo di monitoraggio in allontanamento dal sistema con valori medi di circa +2.0 mm e picchi massimi di circa +3.3 mm nei 214 giorni di monitoraggio. Tali spostamenti sono distribuiti su un'area di circa 748 m^2 calcolati in coordinate radar.

Nello stesso intervallo di tempo si osserva la presenza della seconda area (identificata con F) in movimento sul versante. Quest'area è caratterizzata da spostamenti in avvicinamento rispetto al sistema. In questa zona, nel periodo considerato, si registrano valori medi di spostamento di circa -2.7 mm con picchi massimi di -3.9 mm. Tali spostamenti sono distribuiti su un'area di circa 742 m^2. La zona F si trova nella parte sommitale destra del versante monitorato. Il gradiente degli spostamenti in crescita dal basso verso l'alto suggerisce una cinematica deformativa di ribaltamento.

Vi sono poi altre tre sottozone, una con spostamenti complessivi in allontanamento (U) e due con lievi spostamenti in avvicinamento (U2 e IX1). Queste tre zone sono tutte collocate nella parte inferiore della parete rocciosa e hanno avuto degli spostamenti medi di circa +1.1 mm, -1.8 mm e -1.9 mm (U, U2 e IX1; rispettivamente).

I risultati complessivi delle analisi statistiche condotte sulle aree menzionate sono riportati in Figura 14.

Dall'osservazione delle mappe presentate (Figura 12 e Figura 13) oltre alle aree precedentemente descritte, si osserva la presenza di spostamenti localizzati sparsi lungo il resto del versante ma collocati in prossimità di aree vegetate o non coerenti e pertanto affette da rumore. Inoltre, sulla parete rocciosa monitorata, vi sono delle fuoriuscite d'acqua, soggette a formazione e disfacimento di ghiaccio durante i mesi più freddi; in queste zone è normale osservare degli spostamenti apparenti causati da queste dinamiche e non riconducibili quindi a spostamenti sulla parete rocciosa.

Nella tabella seguente forniamo le coordinate geografiche baricentriche delle aree menzionate in questo report secondo il sistema di riferimento UTM WGS84 del Point Cloud fornito ed utilizzato per la georeferenziazione dei dati.

	X [m]	Y [m]	Z [m]
A	534892.8	5119371.0	365.9
F	535189.4	5119310.5	618.7
U	534997.4	5119312.5	392.2
U2	535024.1	5119289.0	404.2
IX1	535042.8	5119296.0	428.0

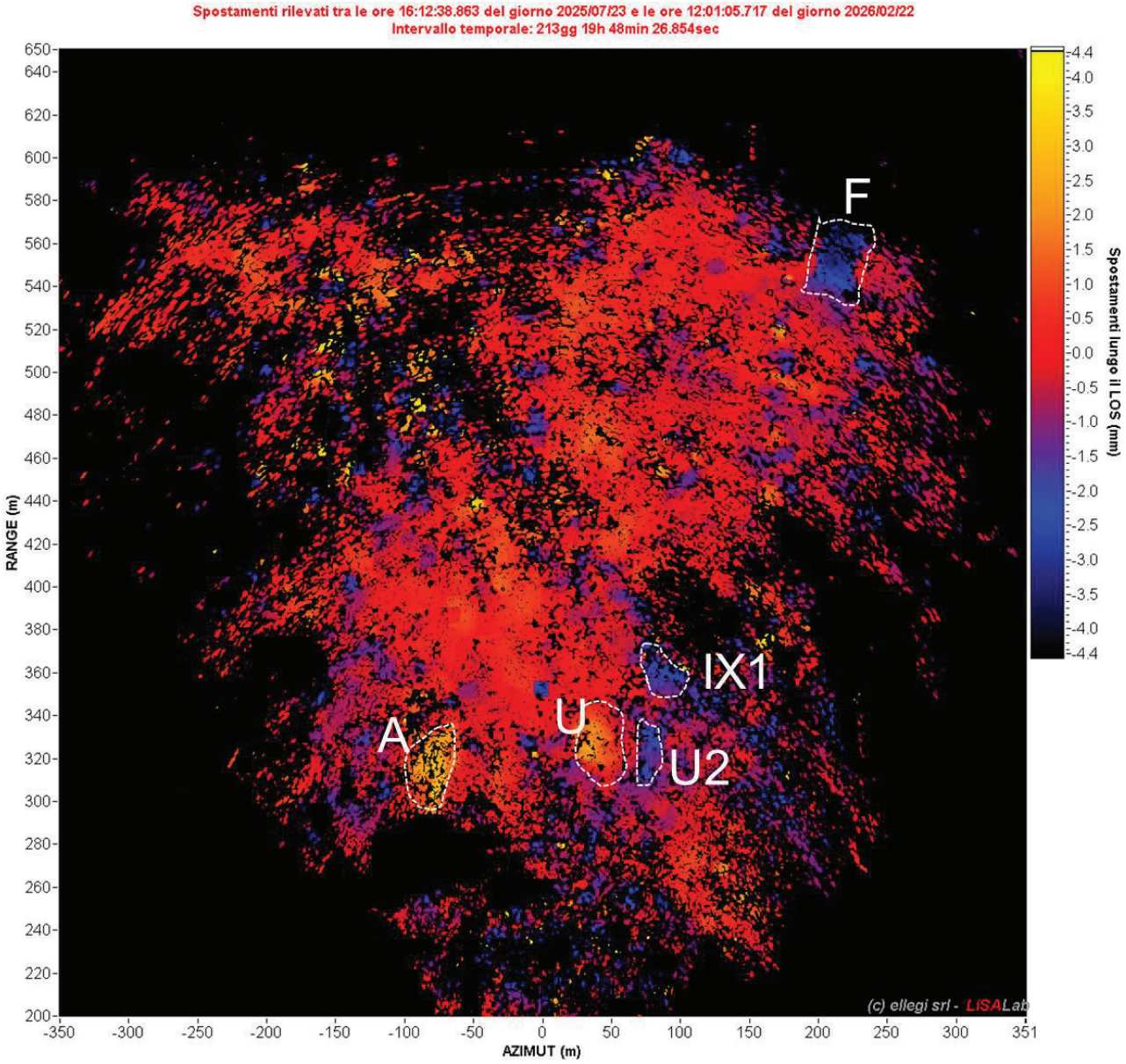


Figura 12: Interferogramma 2D relativo all'intervallo temporale 23 Luglio 2025 – 22 Febbraio 2026. Immagini mediate a 24 ore. In bianco sono indicate le aree caratterizzate da spostamenti (in allontanamento e avvicinamento al sistema). La nomenclatura delle aree segue quella utilizzata nelle campagne periodiche dalla Postazione Est di Novate Mezzola.

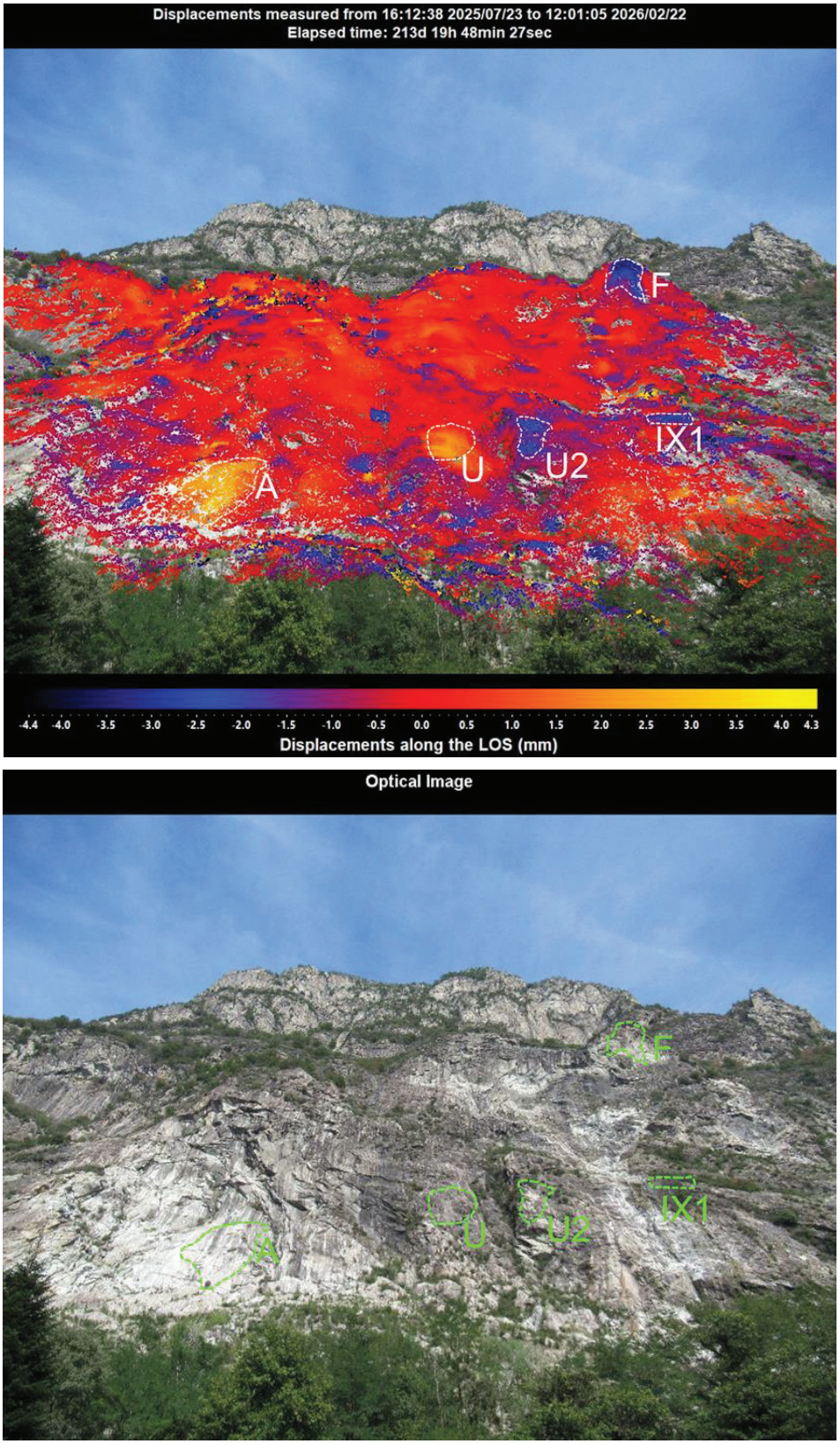
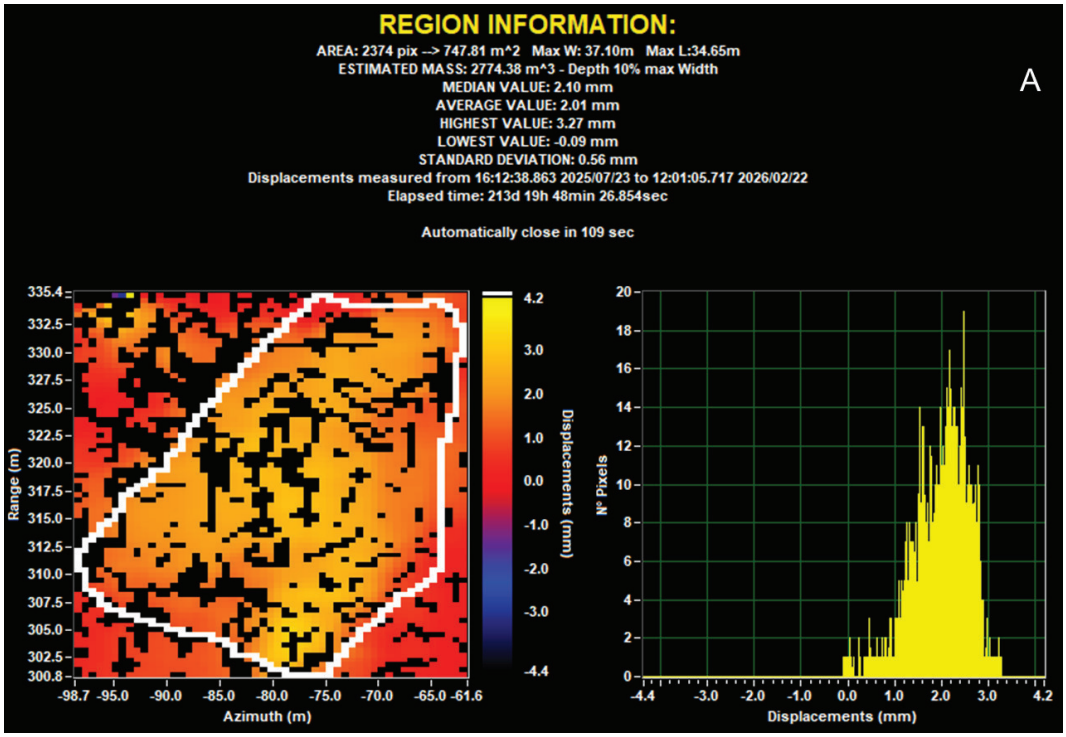
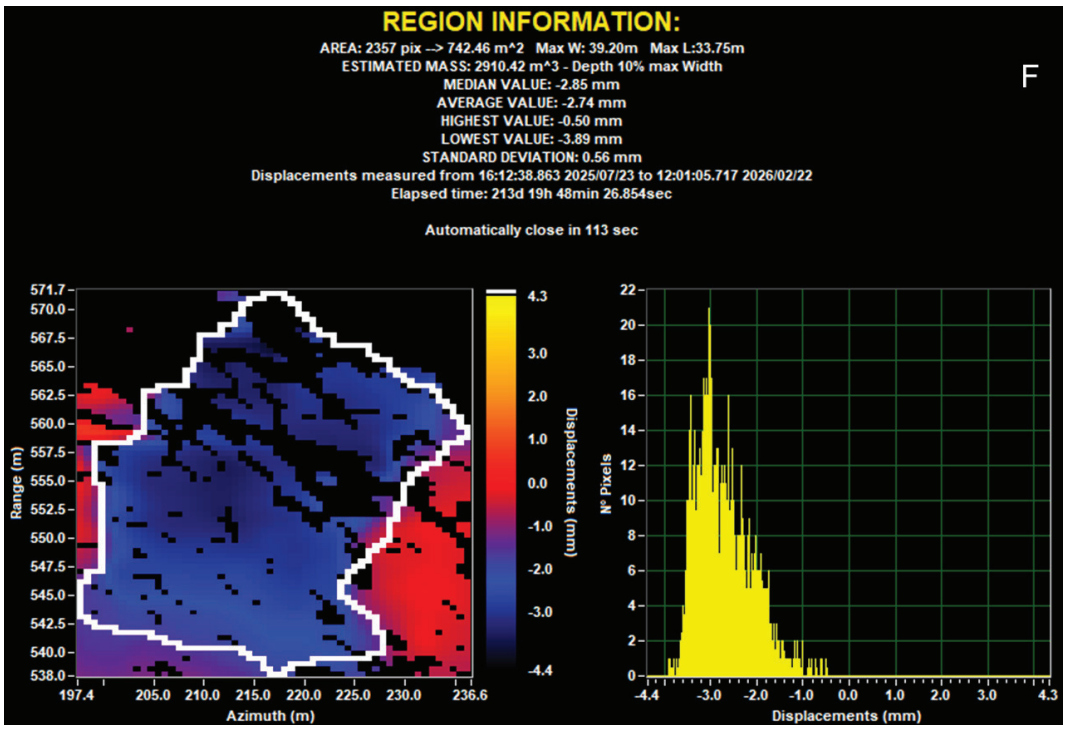
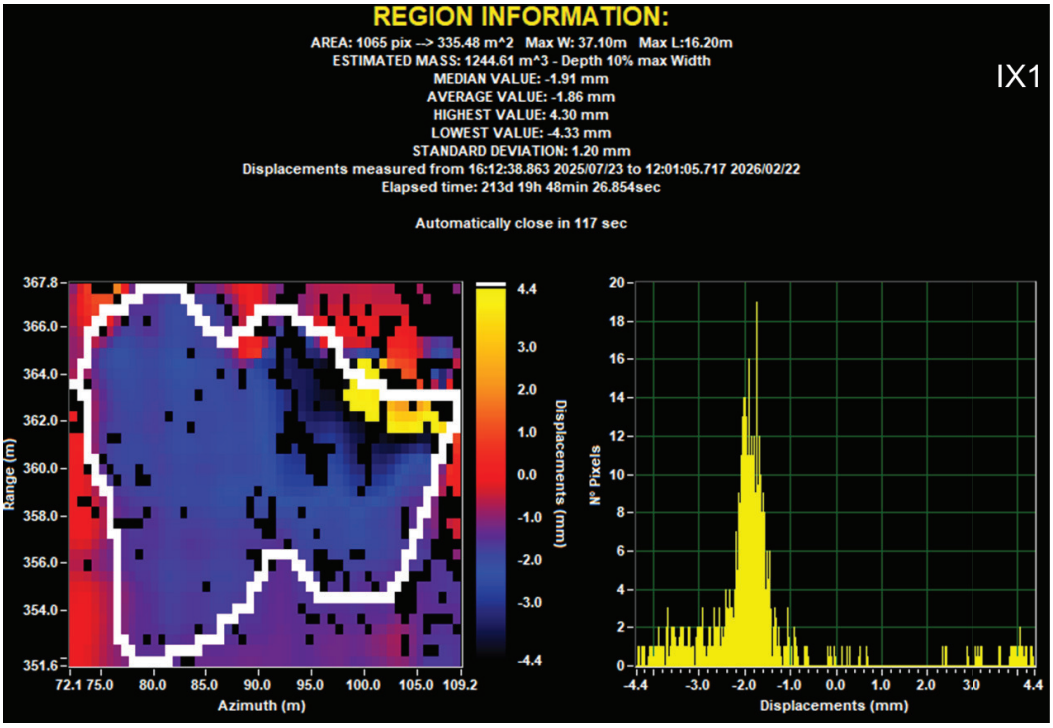


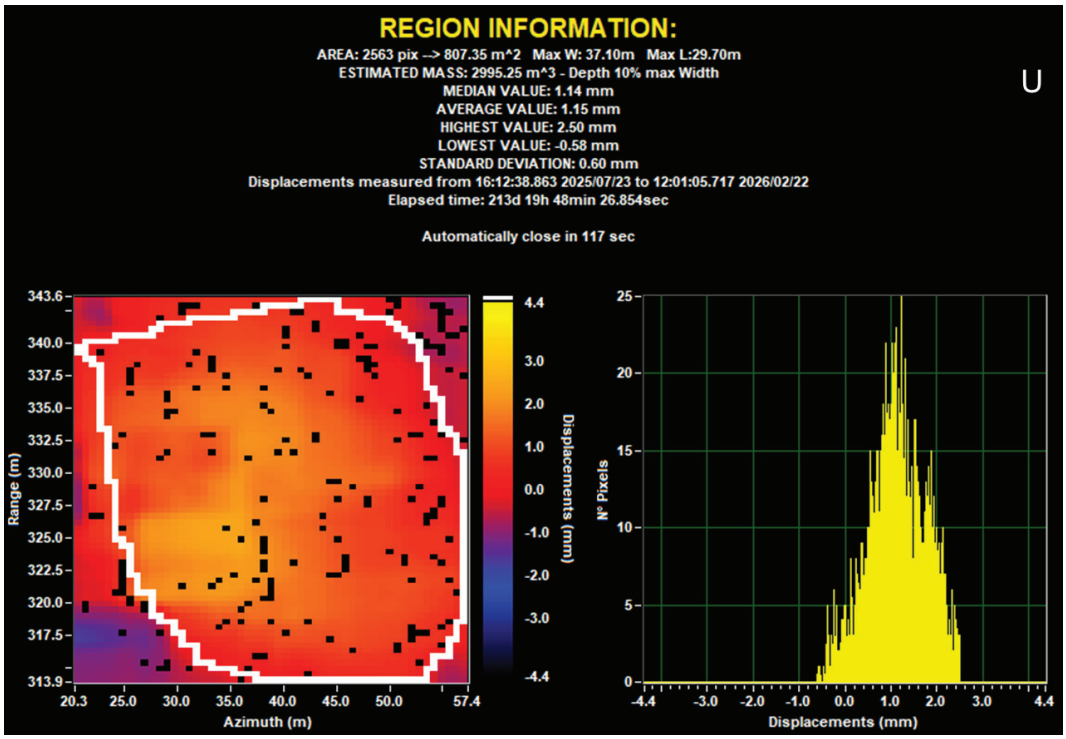
Figura 13: Immagine superiore: interferogramma degli spostamenti georeferenziato sull'immagine fotografica del versante per il periodo temporale 23 Luglio 2025 – 22 Febbraio 2026 (immagini mediate a 24 ore). Immagine inferiore: Identificazione delle aree in movimento sulla fotografia del versante.


REGION INFORMATION:
AREA: 2374 pix --> 747.81 m^2 Max W: 37.10m Max L:34.65m
ESTIMATED MASS: 2774.38 m^3 - Depth 10% max Width
MEDIAN VALUE: 2.10 mm
AVERAGE VALUE: 2.01 mm
HIGHEST VALUE: 3.27 mm
LOWEST VALUE: -0.09 mm
STANDARD DEVIATION: 0.56 mm
Displacements measured from 16:12:38.863 2025/07/23 to 12:01:05.717 2026/02/22
Elapsed time: 213d 19h 48min 26.854sec
Automatically close in 109 sec
A
Range (m)
Azimuth (m)
Displacements (mm)
Nº Pixels
Displacements (mm)


REGION INFORMATION:
AREA: 2357 pix --> 742.46 m^2 Max W: 39.20m Max L:33.75m
ESTIMATED MASS: 2910.42 m^3 - Depth 10% max Width
MEDIAN VALUE: -2.85 mm
AVERAGE VALUE: -2.74 mm
HIGHEST VALUE: -0.50 mm
LOWEST VALUE: -3.89 mm
STANDARD DEVIATION: 0.56 mm
Displacements measured from 16:12:38.863 2025/07/23 to 12:01:05.717 2026/02/22
Elapsed time: 213d 19h 48min 26.854sec
Automatically close in 113 sec
F
Range (m)
Azimuth (m)
Displacements (mm)
Nº Pixels
Displacements (mm)

LISALAB


REGION INFORMATION:
AREA: 1065 pix --> 335.48 m^2 Max W: 37.10m Max L:16.20m
ESTIMATED MASS: 1244.61 m^3 - Depth 10% max Width
MEDIAN VALUE: -1.91 mm
AVERAGE VALUE: -1.86 mm
HIGHEST VALUE: 4.30 mm
LOWEST VALUE: -4.33 mm
STANDARD DEVIATION: 1.20 mm
Displacements measured from 16:12:38.863 2025/07/23 to 12:01:05.717 2026/02/22
Elapsed time: 213d 19h 48min 26.854sec
Automatically close in 117 sec
IX1
Range (m)
Azimuth (m)
Displacements (mm)
N° Pixels
Displacements (mm)


REGION INFORMATION:
AREA: 2563 pix --> 807.35 m^2 Max W: 37.10m Max L:29.70m
ESTIMATED MASS: 2995.25 m^3 - Depth 10% max Width
MEDIAN VALUE: 1.14 mm
AVERAGE VALUE: 1.15 mm
HIGHEST VALUE: 2.50 mm
LOWEST VALUE: -0.58 mm
STANDARD DEVIATION: 0.60 mm
Displacements measured from 16:12:38.863 2025/07/23 to 12:01:05.717 2026/02/22
Elapsed time: 213d 19h 48min 26.854sec
Automatically close in 117 sec
U
Range (m)
Azimuth (m)
Displacements (mm)
N° Pixels
Displacements (mm)

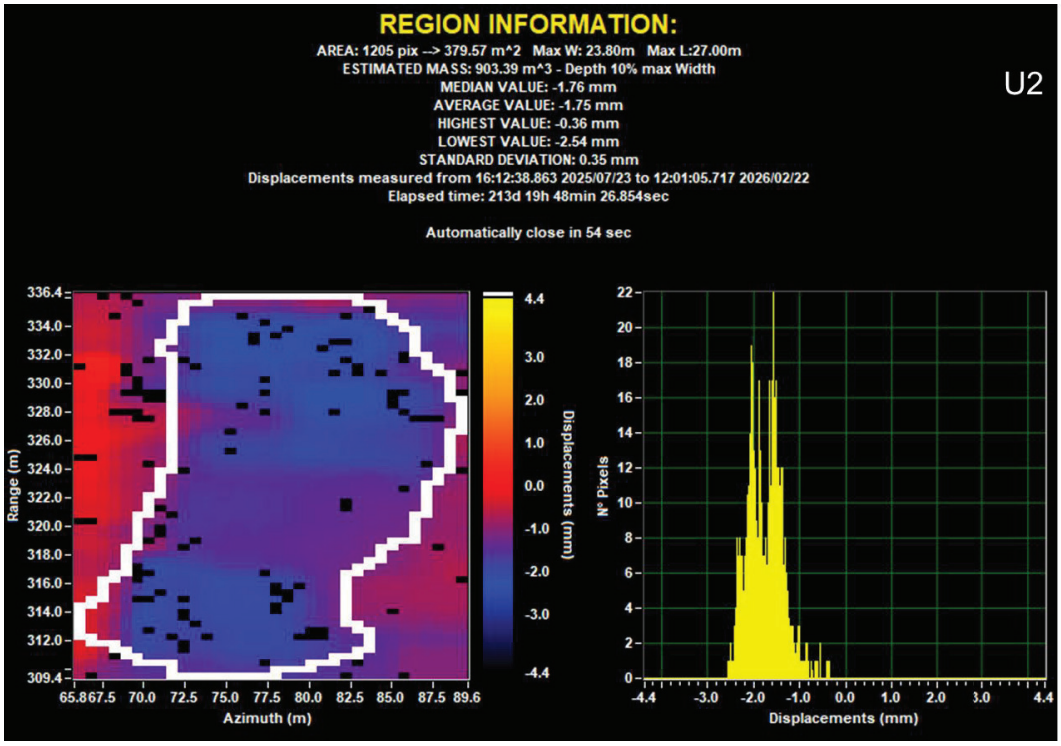
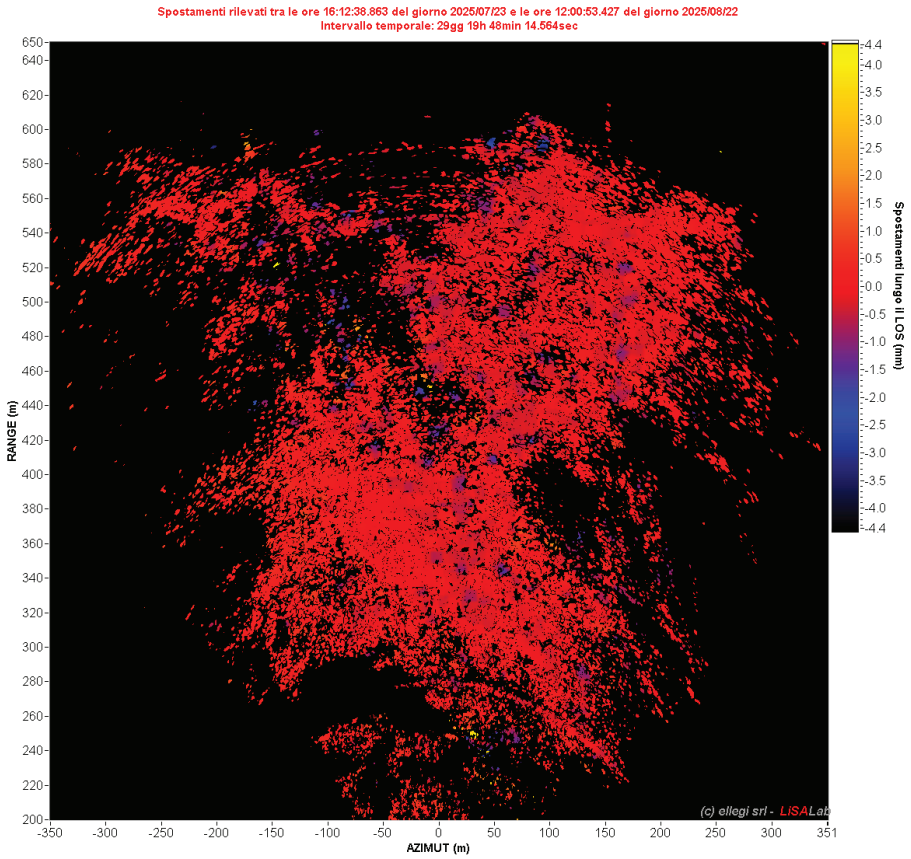
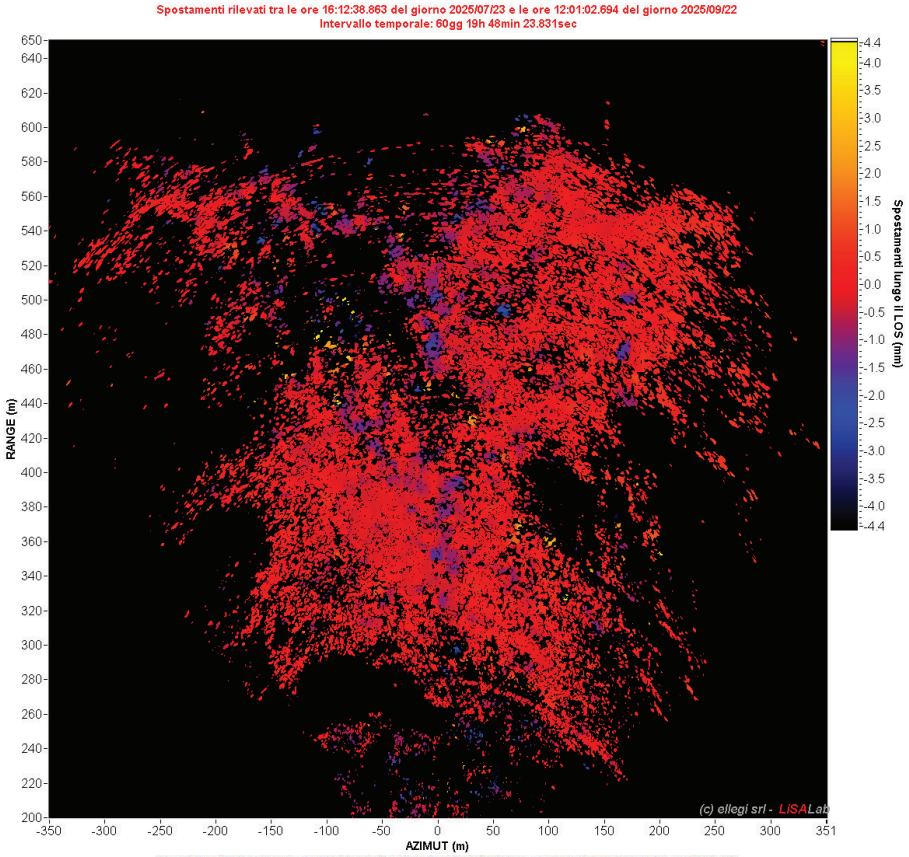
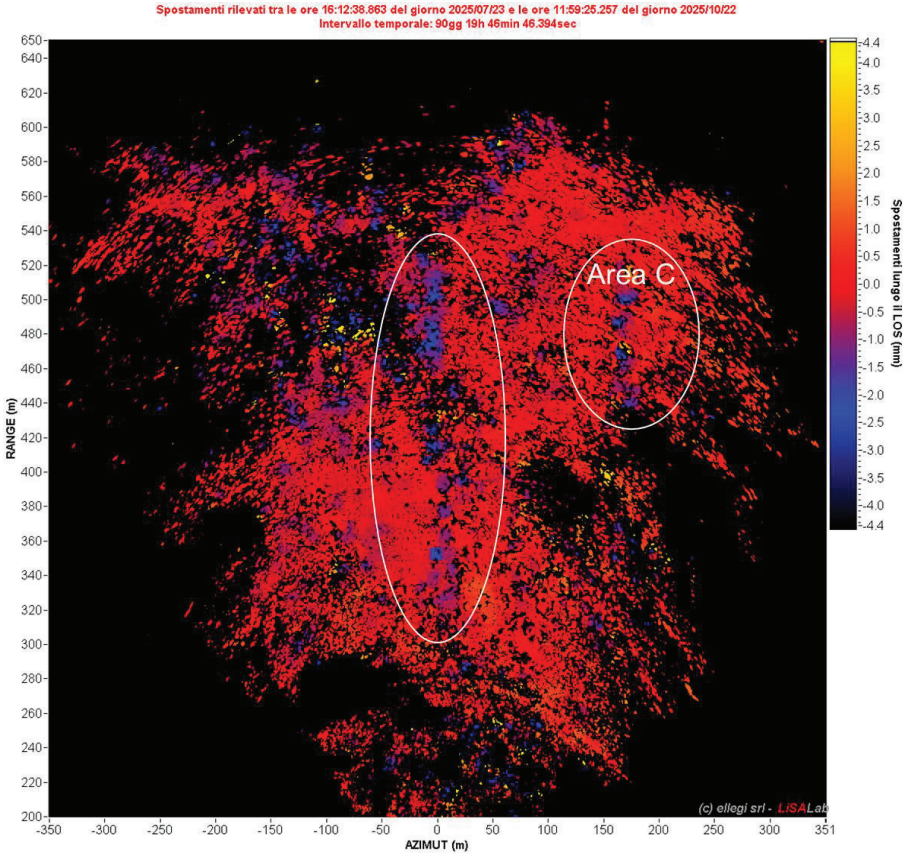


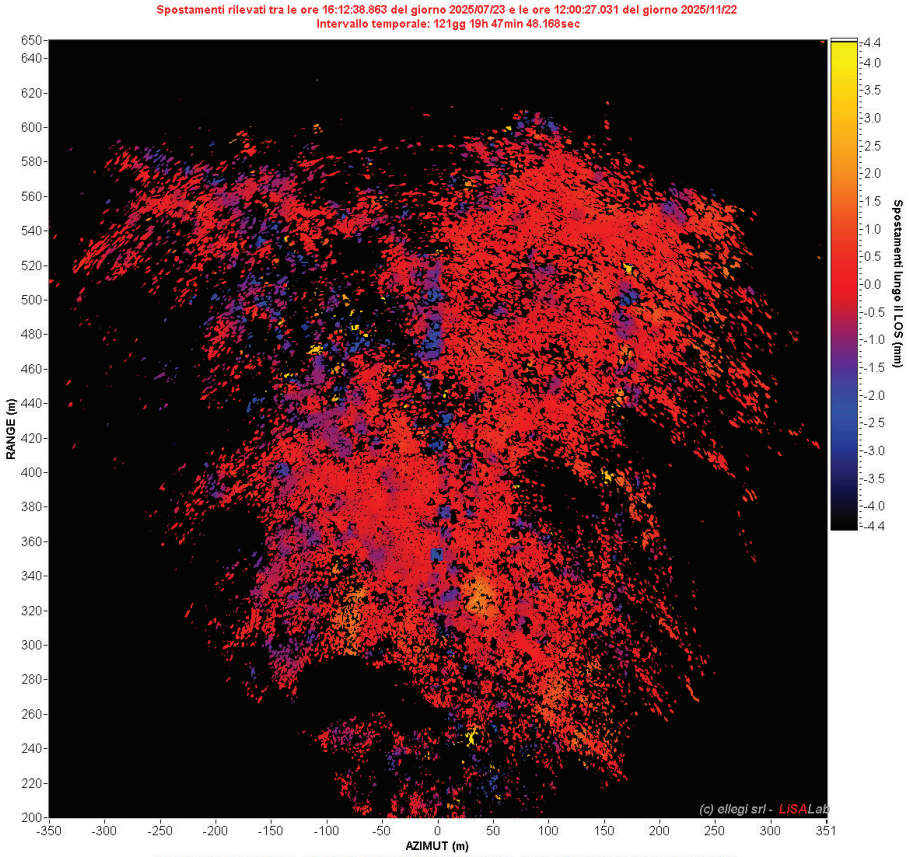
Figura 14: Statistica areale delle zone che presentano, nei 214 giorni di monitoraggio, spostamenti in avvicinamento o in allontanamento rispetto al sistema e superiori alla precisione strumentale.

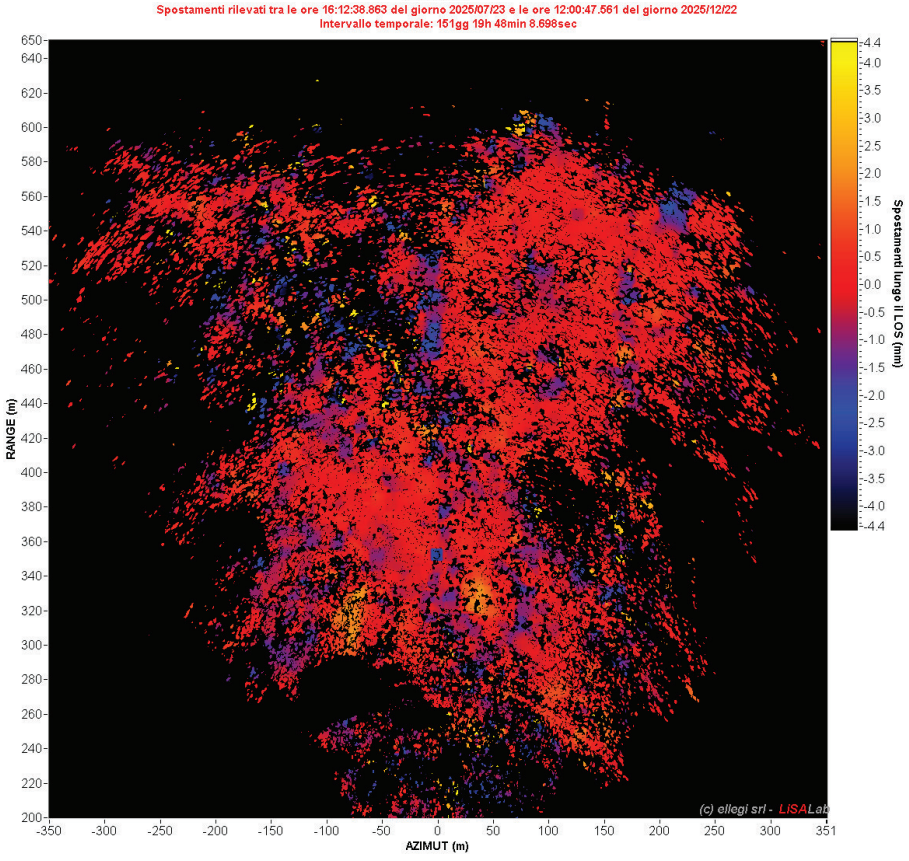



Spostamenti rilevati tra le ore 16:12:38.863 del giorno 2025/07/23 e le ore 12:01:02.694 del giorno 2025/09/22
Intervallo temporale: 60gg 19h 48min 23.831sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab


Spostamenti rilevati tra le ore 16:12:38.863 del giorno 2025/07/23 e le ore 11:59:25.257 del giorno 2025/10/22
Intervallo temporale: 90gg 19h 46min 46.394sec
Area C
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab

LISALAB


Spostamenti rilevati tra le ore 16:12:38.863 del giorno 2025/07/23 e le ore 12:00:27.031 del giorno 2025/11/22
Intervallo temporale: 121gg 19h 47min 48.168sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab


Spostamenti rilevati tra le ore 16:12:38.863 del giorno 2025/07/23 e le ore 12:00:47.561 del giorno 2025/12/22
Intervallo temporale: 151gg 19h 48min 8.698sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab

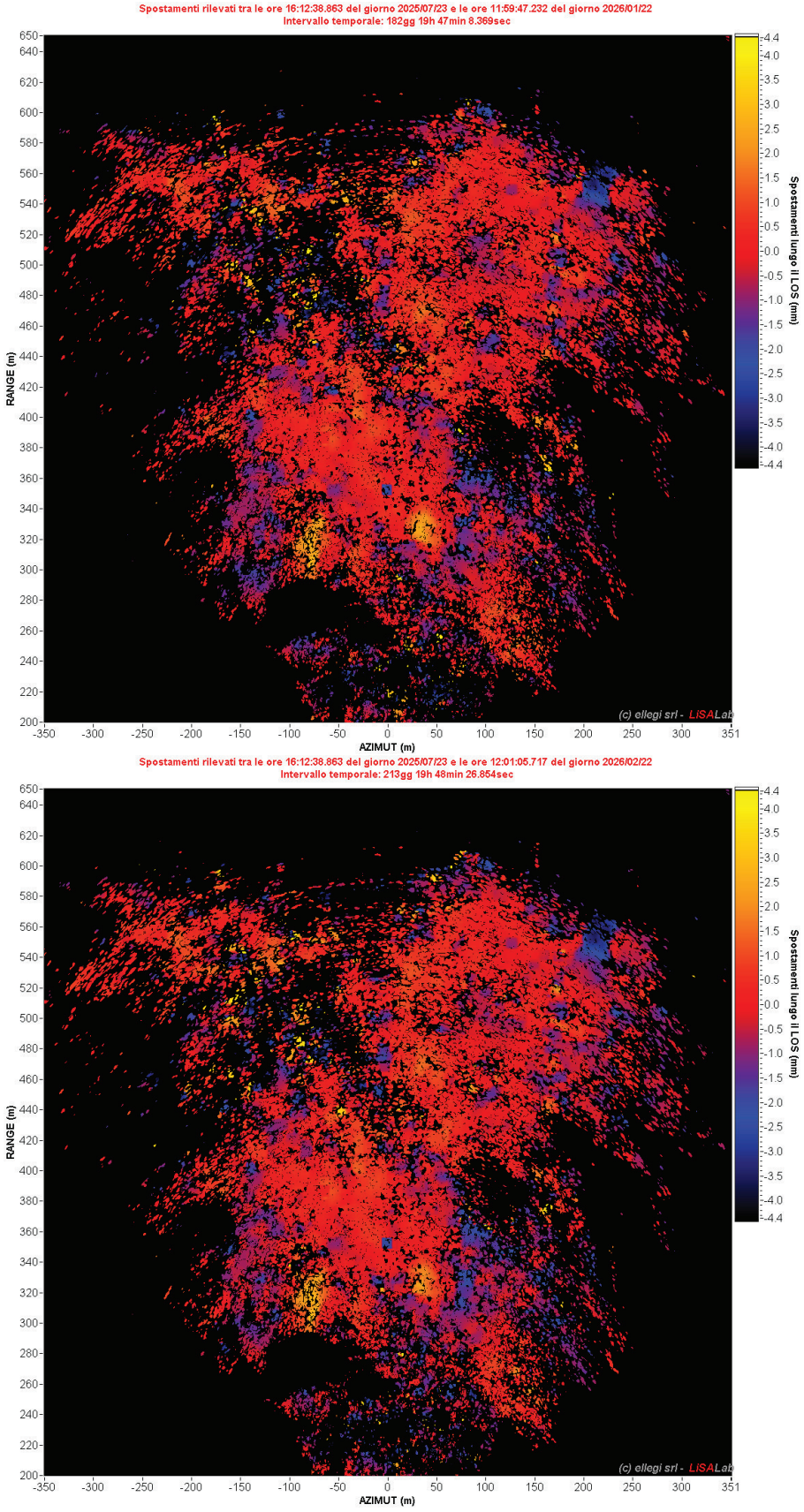


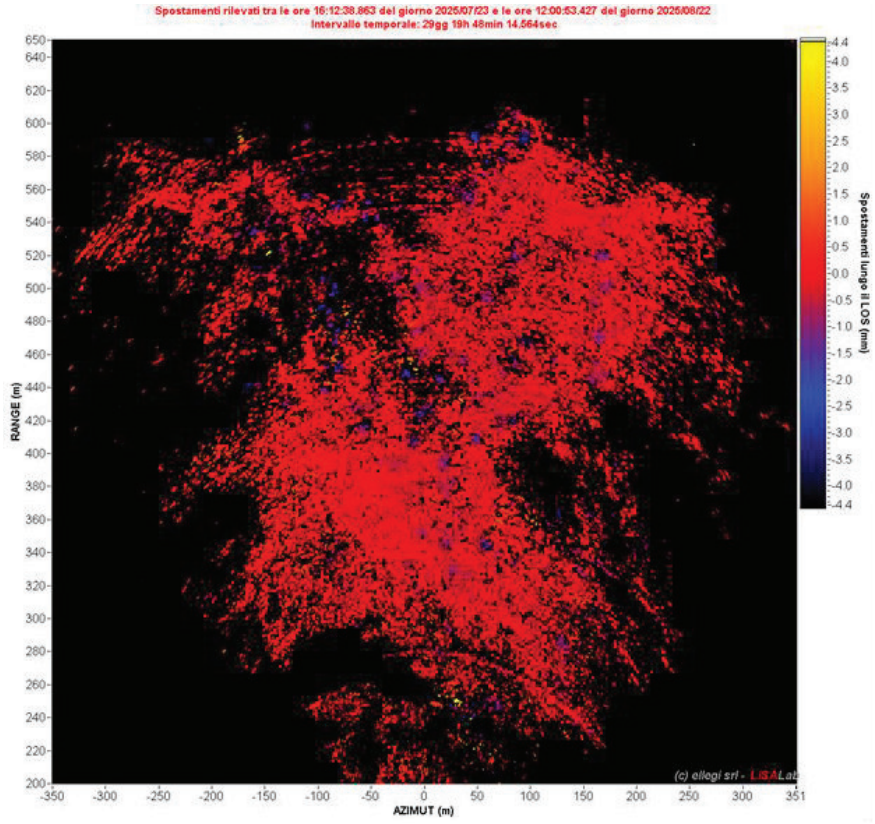
Figura 15: Interferogrammi incrementali di circa 30 giorni ciascuno, a partire dal 23 Luglio 2025. Immagini mediate a 24 ore.

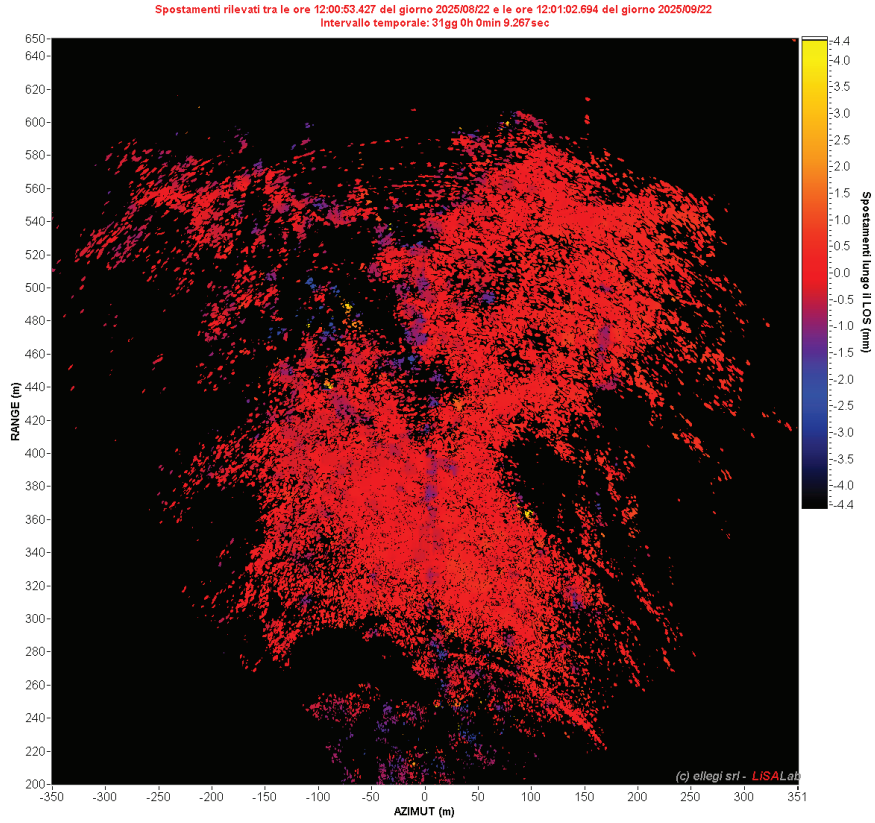
Analizzando la sequenza di interferogrammi in Figura 15 si evince come gli spostamenti si siano evoluti durante i 214 giorni di monitoraggio.
In particolare l'area F, l'area avente spostamenti più significativi, mostra un comportamento graduale. Gli spostamenti sono praticamente assenti nei primi tre mesi del monitoraggio ed è solo nella quarta mappa mensile e quindi verso la fine di Novembre 2025 che è possibile osservare la comparsa di movimenti in questa zona. Da fine Novembre sino al 22 di Febbraio gli spostamenti di questa zona continuano con un trend incrementale.
Dalla sequenza di mappe mensili si notano inoltre alcune zone disposte lungo la direzione range. Queste zone, ben visibili ed indicate nella mappa numero 3 di Figura 15, sono afferenti a porzioni della parete caratterizzate da impluvi e fuoriuscite di acqua. Il motivo del loro "allungamento" nella direzione range è infatti dovuto alla verticalità della geometria della canalizzazione dell'acqua. Una di queste due zone è la zona C che venne sottoposta a particolari attenzioni in passato a causa del crollo dell'8 Settembre 2023.
In queste zone di impluvio si sono registrati degli spostamenti al di sopra della precisione strumentale. I due punti con spostamenti più alti delle serie temporali, il punto 03 e il punto 04 si trovano in tali aree.
In Figura 16 viene inoltre presentata una sequenza di interferogrammi a passo costante di circa un mese. La sequenza permette di riconoscere la presenza di mesi con spostamenti particolarmente elevati e consente una deduzione della variabilità temporale degli spostamenti nelle zone già descritte in precedenza. In particolare emergono le seguenti considerazioni:

1. Alla scala temporale di circa 30 giorni, gli spostamenti rilevati sulla parete rocciosa sono esigui e raramente raggiungono l'ordine di grandezza di -1.5 mm / mese.

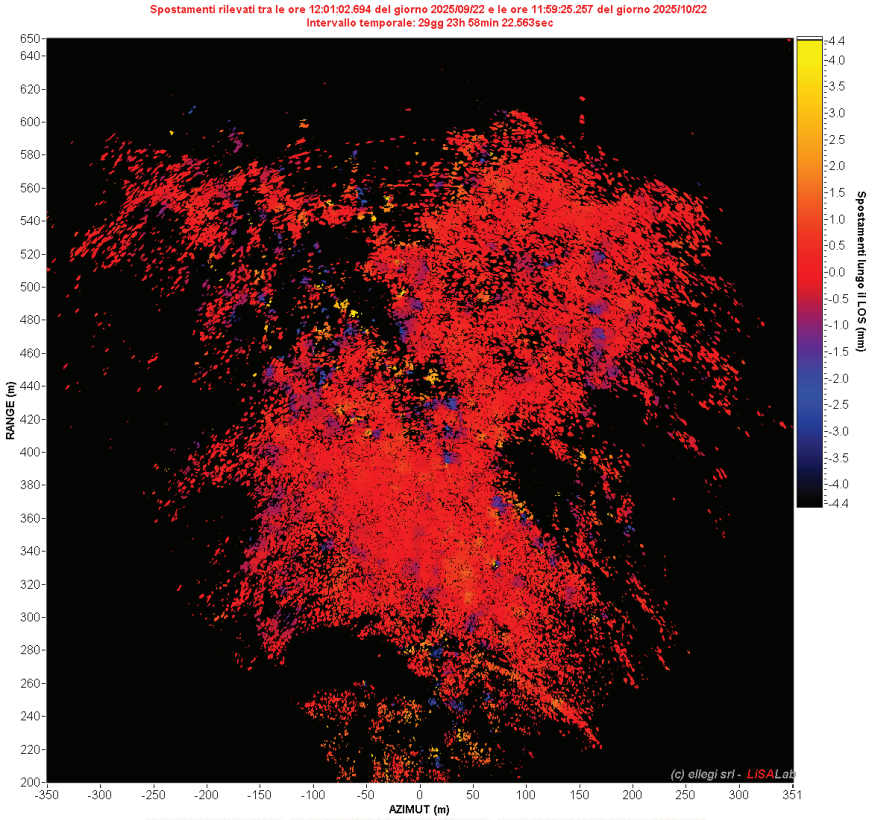
2. Nella zona F, gli spostamenti maggiori sono condensati nei mesi di Novembre, Dicembre e Gennaio. In questi mesi in questa zona si possono apprezzare spostamenti di circa -1 mm / mese. Negli altri mesi del monitoraggio gli spostamenti in questa zona sono pressoché assenti.

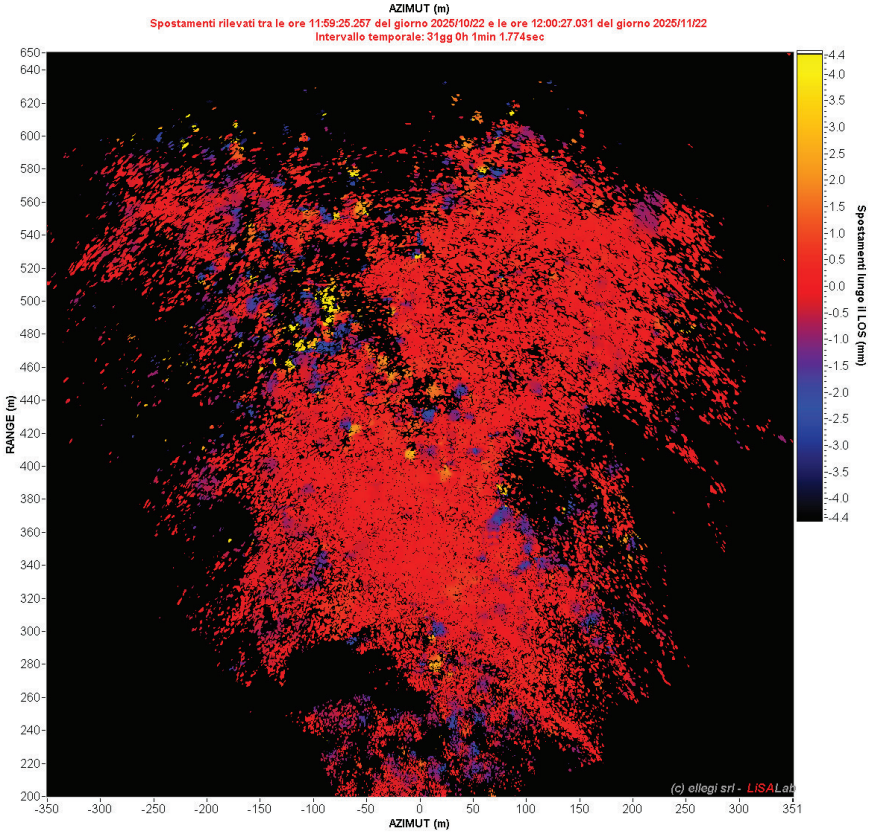
3. Nelle zone di impluvio, menzionate in precedenza, si osservano lievi spostamenti in avvicinamento su scala mensile. Questi spostamenti raggiungono comunque il valore massimo di circa -1 mm / mese.


Spostamenti rilevati tra le ore 16:12:38.863 del giorno 2025/07/23 e le ore 12:00:53.427 del giorno 2025/08/22
Intervallo temporale: 29gg 19h 48min 14.564sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab

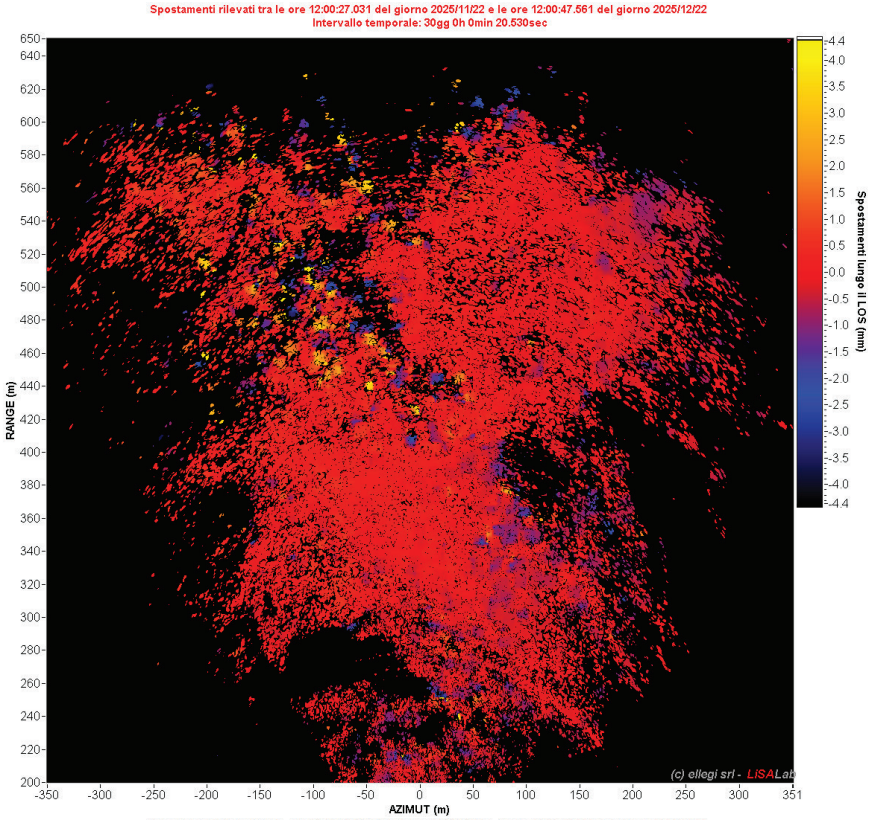

Spostamenti rilevati tra le ore 12:00:53.427 del giorno 2025/08/22 e le ore 12:01:02.694 del giorno 2025/09/22
Intervallo temporale: 31gg 0h 0min 9.267sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LISALab

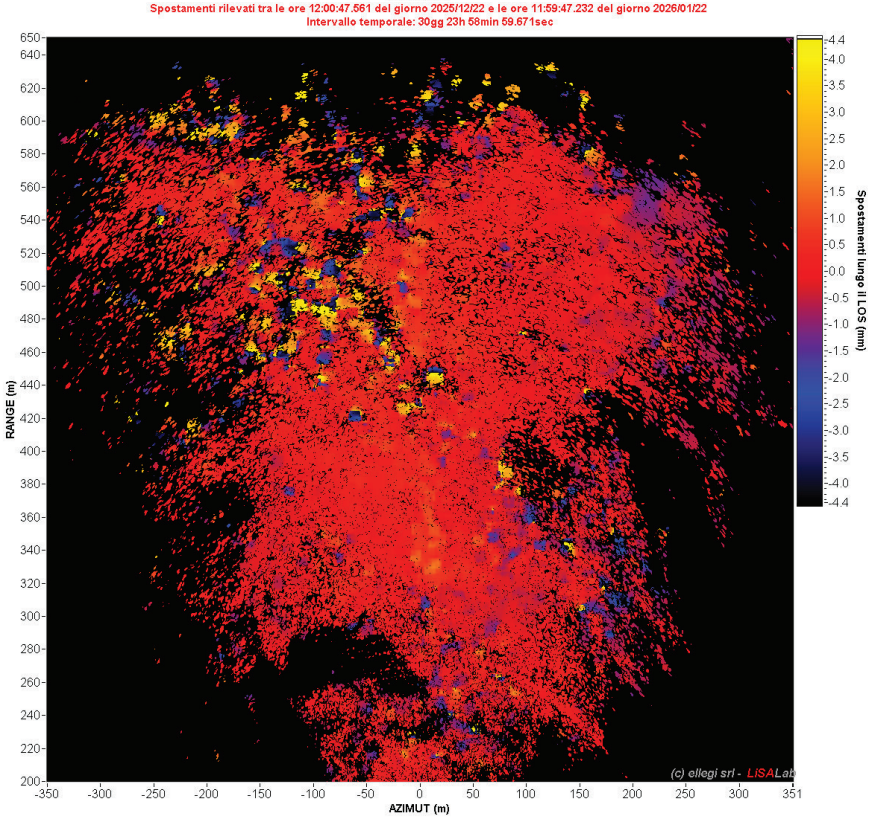
LISALAB


Spostamenti rilevati tra le ore 12:01:02.694 del giorno 2025/09/22 e le ore 11:59:25.257 del giorno 2025/10/22
Intervallo temporale: 29gg 23h 58min 22.563sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LiSALab


Spostamenti rilevati tra le ore 11:59:25.257 del giorno 2025/10/22 e le ore 12:00:27.031 del giorno 2025/11/22
Intervallo temporale: 31gg 0h 1min 1.774sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LiSALab

LISALAB


Spostamenti rilevati tra le ore 12:00:27.031 del giorno 2025/11/22 e le ore 12:00:47.561 del giorno 2025/12/22
Intervallo temporale: 30gg 0h 0min 20.530sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LiSALab


Spostamenti rilevati tra le ore 12:00:47.561 del giorno 2025/12/22 e le ore 11:59:47.232 del giorno 2026/01/22
Intervallo temporale: 30gg 23h 58min 59.671sec
RANGE (m)
AZIMUT (m)
Spostamenti lungo il LOS (mm)
(c) ellegi srl - LiSALab

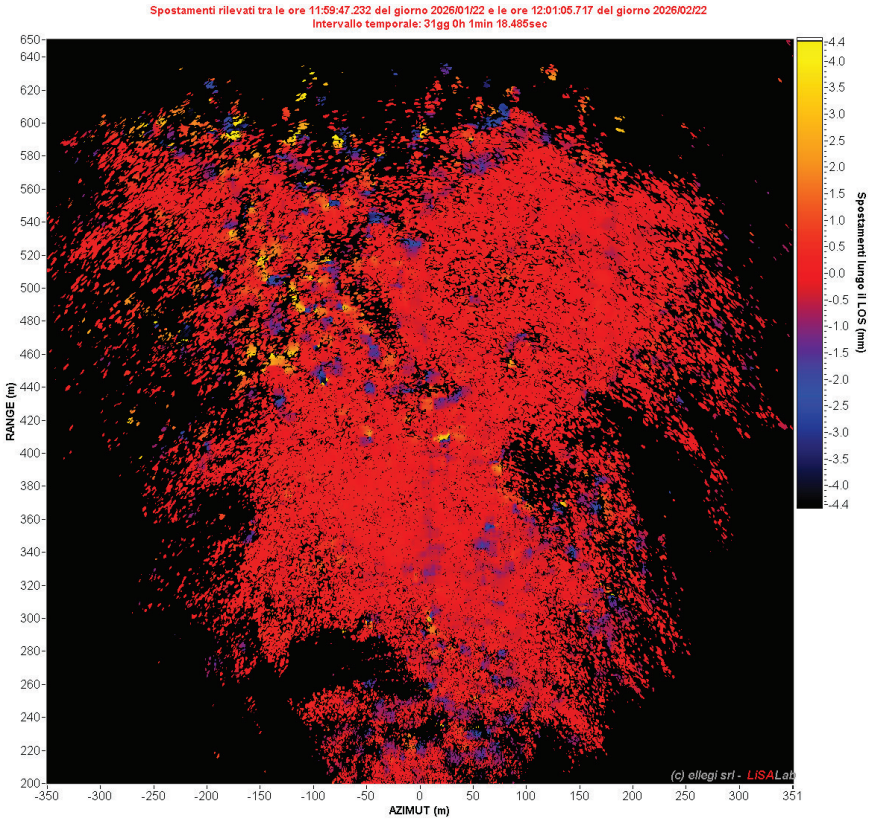


Figura 16: Interferogrammi a passo costante di circa 30 giorni ciascuno, a partire dal 23 Luglio 2025. Immagini mediate a 24 ore.

Analisi degli spostamenti rilevati per la sottofinestra FAR.

Il presente monitoraggio, come spiegato, ha come obiettivo principale la porzione più bassa della parete rocciosa visibile dallo scenario. Ciò nonostante, i dati grezzi acquisiti permettono, attraverso un apposito riprocessamento dei dati, di quantificare anche gli spostamenti della parte più alta della parete rocciosa. Durante i monitoraggi periodici effettuati fra il 2022 e il 2025 il sistema LiSAmobile® aveva evidenziato la presenza di alcune aree in movimento nella porzione sommitale del Monte Avedeè. Queste aree sono da considerarsi obiettivo secondario del monitoraggio (Figura 17) ma in ogni caso, nel presente report, si è provveduto ad implementare un'analisi per dettagliare gli spostamenti in questa zona (sottofinestra FAR).

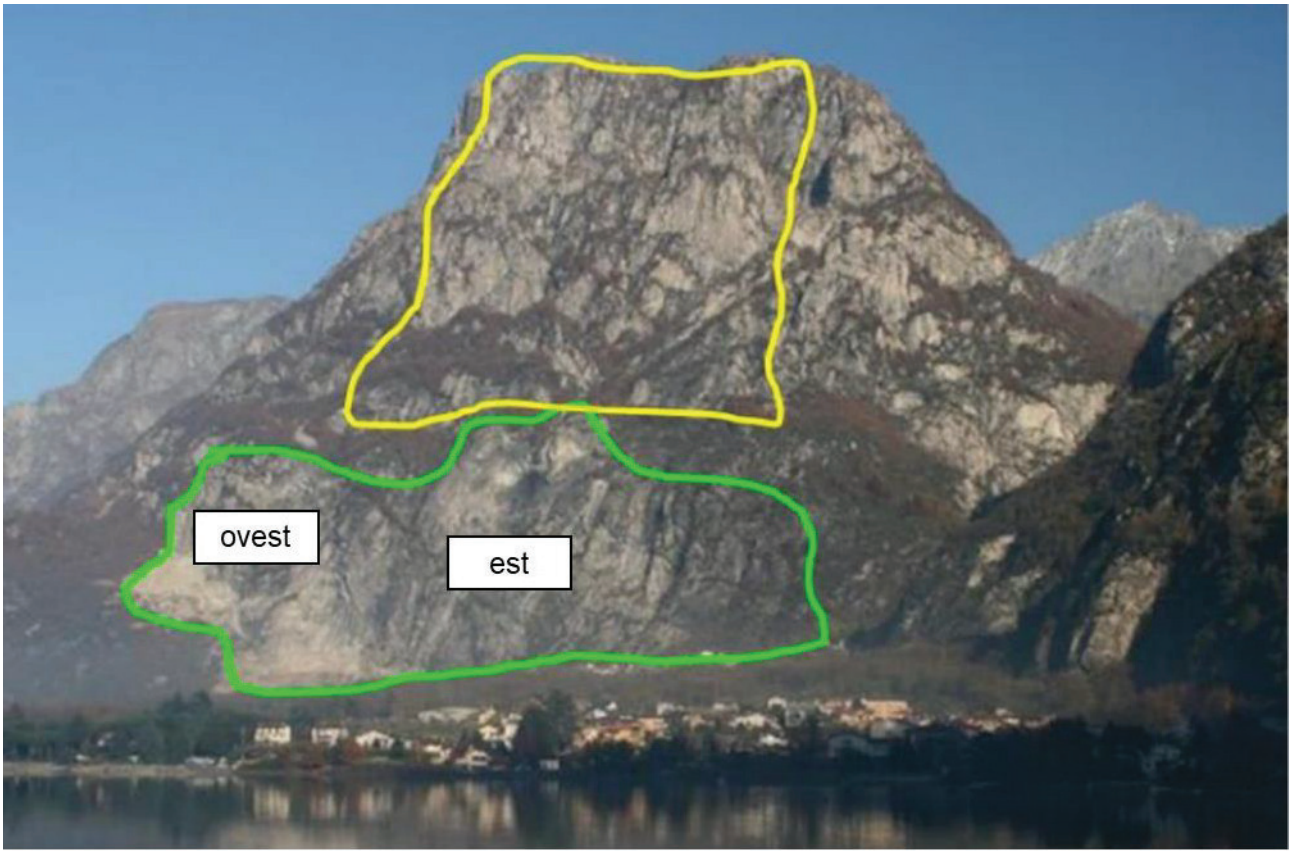


Figura 17: Fotografia del versante meridionale del Monte Avedèe. In verde le aree di primario interesse per il monitoraggio con tecnologia SAR terrestre (GBInSAR). In giallo sono evidenziate invece le pareti rocciose a quote più elevate e considerate obiettivo secondario del monitoraggio. Le indicazioni rappresentano zone di interesse delle due postazioni originariamente utilizzate per il monitoraggio periodico (postazione Est e postazione Ovest).

I parametri relativi alle acquisizioni e al processing della finestra FAR sono i seguenti:

Minima distanza osservata	950 m
Massima distanza osservata	1550 m
Risoluzione teorica in azimut a distanza minima	2.7 m
Risoluzione teorica in azimut a distanza massima	4.5 m
Risoluzione teorica in range (costante)	0.7 m

Per questa analisi è stato creato un apposito dataset composto da immagini mediate per ottenere una misura interferometrica che sia rappresentativa di tutto il periodo del monitoraggio (Intervallo temporale di 211 giorni fra il 25 Luglio 2025 e 21 Febbraio 2026. La mappa degli spostamenti in coordinate radar in 2 dimensioni è mostrata in Figura 18.

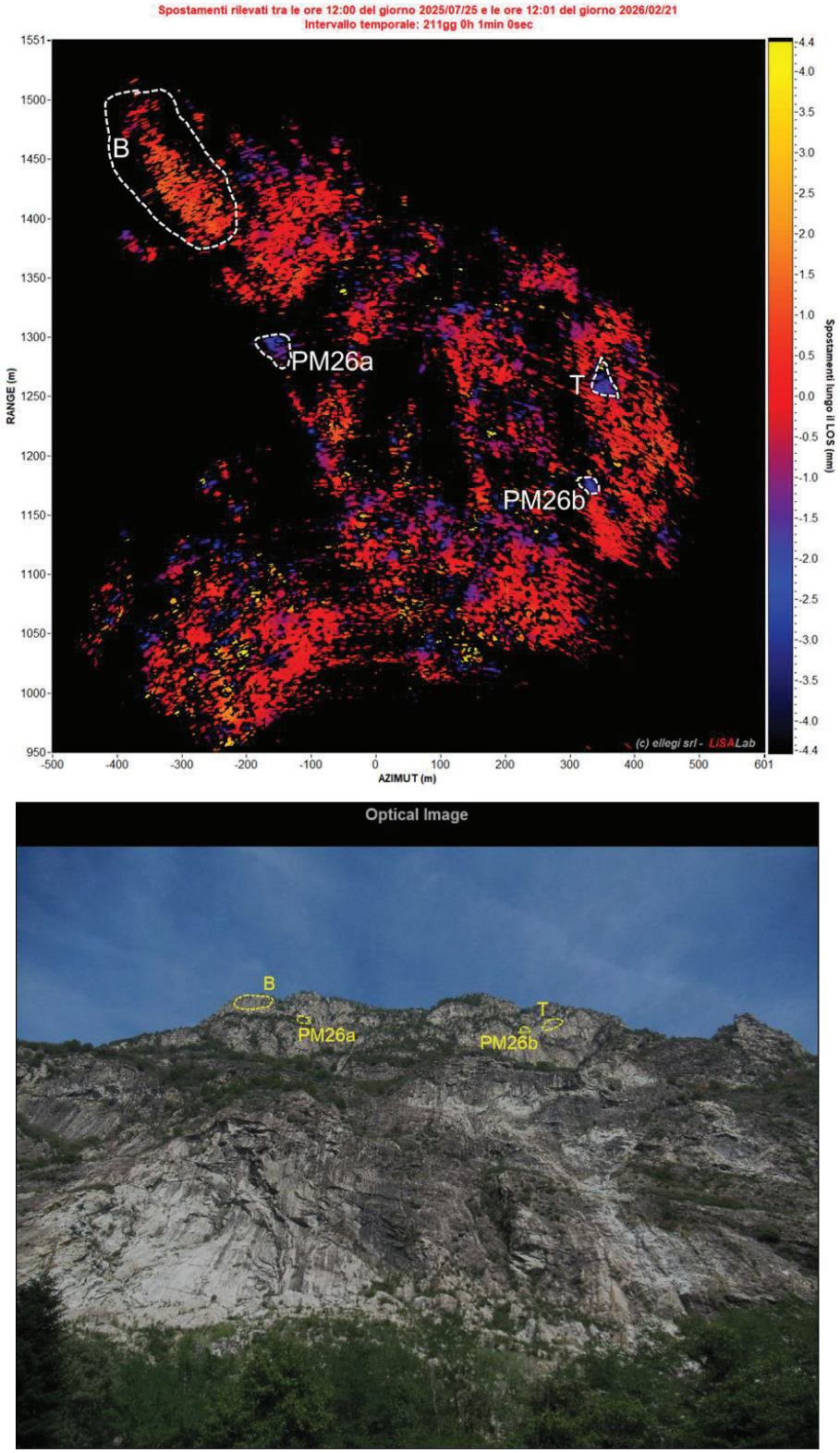


Figura 18 Pannello superiore: Mappa degli spostamenti fra il 25 Luglio 2025 e il 21 Febbraio 2026 per la sottofinestra di monitoraggio FAR dalla Postazione Est di Novate Mezzola. Pannello inferiore: posizione delle aree osservate nel pannello superiore su immagine fotografica del versante.

L'analisi rivela la presenza di alcune aree degne di segnalazione. Due di queste aree erano già state osservate nelle campagne periodiche passate. Queste due aree già conosciute sono l'area B e l'area T.
L'area B interessa la porzione superiore del versante. Dall'analisi dei dati a disposizione relativi a quest'area, si è potuto dedurre che essa presenta delle deformazioni di tipo termico. Le coordinate geografiche del suo baricentro indicativo sono X=535008.8 m, Y=5120061.8 m e Z= 1293 m s.l.m. Per il periodo coperto dal presente monitoraggio le deformazioni in quest'area sono lievemente in allontanamento (+ 0.8 mm lungo la linea di vista del sistema).
L'area T, invece, anche nelle precedenti misure ha mostrato degli spostamenti lievi e in generale in avvicinamento. Gli spostamenti medi di questa zona sono di -1.9 mm in avvicinamento nei 211 giorni considerati. Le coordinate geografiche del suo baricentro indicativo sono X= 535541.3 m, Y= 5119628.0 m e Z= 1176 m s.l.m.
Le restanti due aree, di estensione piuttosto limitata, non erano mai state documentate in precedenza. In quanto afferenti al Permanent Monitoring conclusosi nel 2026, queste due regioni sono state denominate PM26a e PM26b. Gli spostamenti in queste due regioni sono di circa -1.5 mm in avvicinamento per PM26a e -1.8 mm in avvicinamento per PM26b.

Analisi delle serie temporali

Verranno qui analizzate le serie temporali dei 13 punti d'interesse posizionati sul versante monitorato. La lista dei punti d'interesse utilizzati nel presente monitoraggio è fornita in Tabella 1 mentre la loro posizione è consultabile in Figura 10.
Le serie temporali estratte da delle immagini mediate a 24 ore sono mostrate in Figura 19. Si sono utilizzate delle immagini mediate per aumentare il rapporto segnale rumore e ottimizzare la qualità delle stime quantitative. Dal grafico si può osservare come, durante il monitoraggio, la maggior parte dei punti si sia mantenuto entro uno spread di circa $\pm$ 3 mm. Questi punti sono praticamente stabili e le loro fluttuazioni sono dovute a rumore strumentale accumulato e a variazioni dovute a effetti locali o presenza di neve e ghiaccio. Ci sono però alcuni punti che meritano attenzione in quanto sono rappresentativi di zone in movimento. Fra questi, il punto F e il punto 05 sono posizionati nelle aree in movimento segnalate in precedenza. Questi due punti hanno gradualmente accumulato spostamento e raggiungono dei valori cumulati totali attorno ai -4 mm in avvicinamento durante il monitoraggio.
Il punto con spostamenti maggiori è il punto 04. Questo punto è posizionato nella zona C, caratterizzata dalla presenza di un impluvio verticale. Questa zona è stata la zona sorgente del crollo dell'8 Settembre 2023 e i movimenti in questa zona sono spesso condizionati anche dalla presenza di fuoriuscite di acqua.

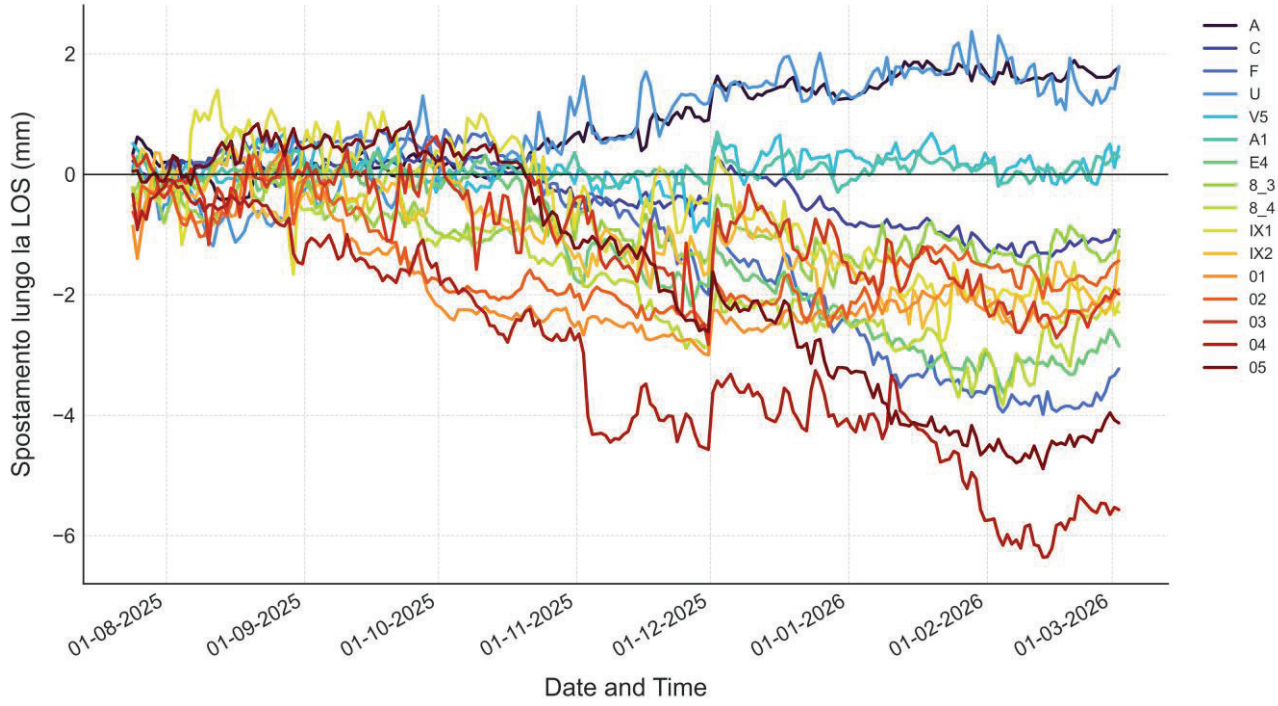


Figura 19: Serie temporali dei punti d'interesse utilizzati per il monitoraggio radar dalla postazione Est di Novate Mezzola. Dati ricavati utilizzando delle immagini mediate a 24 ore.

LISALAB

Note, Avvertenze e Limitazioni di Responsabilità

Le fasi di analisi e trasmissione dati alle diverse Parti potranno essere modificate su richiesta della Committente a seguito di integrazione del Contratto in essere. Gli scriventi si mettono a disposizione per l'integrazione eventuale delle richieste e per l'armonizzazione delle stesse con le procedure di gestione previste

Nel presente documento non è stata prevista né è stata fornita nessuna interpretazione geofisica, geologica o strutturale dei dati acquisiti, elaborati e presentati.

Nessuna interpretazione successiva potrà essere ascritta o associata alla Ellegi srl.
LISALAB il suo logo e lo slogan, LiSAmobile e LiSAlarm sono marchi o marchi registrati della Ellegi srl.
Tutti gli altri prodotti, servizi, nomi menzionati nel documento sono marchi dei rispettivi proprietari.
Qualsiasi prodotto, processo o tecnologia descritta in questo documento può essere soggetta a Proprietà Intellettuale di proprietà della Ellegi srl. Lo stesso può essere applicato alla Proprietà intellettuale di proprietà di altri.
Le informazioni contenute in questo documento sono fornite "così come sono" senza alcuna garanzia di qualsiasi genere, sia espressa sia implicita, inclusa ma non limitata alla garanzia implicita di fattibilità tecnico - commerciale, adattabilità a particolari applicazioni e o scopi, o di inviolabilità di proprietà intellettuale.
Le informazioni contenute in questo documento possono contenere errori tipografici e imprecisioni tecniche. Cambiamenti e modificazioni delle informazioni e dei contenuti possono essere apportate ed incorporate nelle nuove revisioni del documento.
La Ellegi srl può apportare in qualsiasi momento e senza alcun obbligo di comunicazione modificazioni, sviluppi o cambiamenti ai prodotti ed ai servizi descritti.
Vietata la riproduzione e la diffusione senza preventivo consenso della Ellegi srl.