© 2003-2004

LiSALab

by ellegi srl

... a step ahead in monitoring structures and natural hazards

# REPORT

## II PERIODICAL CHECK

## Rilievo con tecnologia GBInSAR LiSALab per il monitoraggio delle pareti rocciose del Monte Avedèe nel Comune di Novate Mezzola (SO)

## 9 – 13 SETTEMBRE 2022

**Cliente: Comunità Montana Valchiavenna**

**Località: Novate Mezzola (SO)**

**Contract #: 180204cvc**

**CUP: B11B21004540002**

**CIG: 91968611CA**

## STRICTLY CONFIDENTIAL DOCUMENT

| Rev. | Data: | Note: | Scritto da: | Controllato da: | Approvato da: |
|---|---|---|---|---|---|
| 9 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 3 | 3 Novembre 2022 | Revisione | SC | CR | DL |
| 2 | 19 Ottobre 2022 | Revisione | AG | CR | DL |
| 1 | 14 Ottobre 2022 | Revisione | SC | CR | DL |
| 0 | 13 Ottobre 2022 | Emissione | AG | CR | DL |

# INDICE

INDICE 2

GLOSSARIO 4

Convenzioni 6

Sistema di riferimento 6

Unità di misura del tempo 6

Introduzione 7

La tecnica SAR interferometrica 10

Specifiche del servizio 10

Punto d'installazione del sistema GBInSAR LiSALab 12

Descrizione del servizio 14

Parametri di misura e caratteristiche dell'immagine SAR 17

Elaborazione dei risultati della campagna di misura di Settembre 2022 21

Analisi 2D 21

Mappe di potenza 21

Mappe di spostamento 28

Analisi degli spostamenti a breve termine: 9 Settembre 2022 – 13 Settembre 2022 28

Analisi degli spostamenti a lungo termine: Maggio 2022 – Settembre 2022 34

Elaborazione dei risultati in 3 dimensioni 44

Mappe di spostamento 3D a breve termine: 9 Settembre 2022 – 13 Settembre 2022 georeferenziate su Point Cloud 45

Mappe di spostamento 3D a lungo termine: 22 Maggio 2022 – 11 Settembre 2022 georeferenziate su Point Cloud 51

Analisi quantitativa delle aree in movimento 59

Conclusioni 70

Allegati 72

Note, Avvertenze e Limitazioni di Responsabilità 73

# *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.

| | |
|---|---|
| **LiSAmobile** | 5° generazione del sensore GBInSAR che implementa la tecnologia LiSALab sviluppato e prodotto dalla Ellegi srl. Tale sensore 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 300 mm. |
| **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. |

# *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 (Figura 1).**

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) come 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 $\theta$ è l'angolo di elevazione definito nel piano YZ ed è formato dalla linea di osservazione r ed il piano orizzontale XY. L'angolo $\psi$ 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.

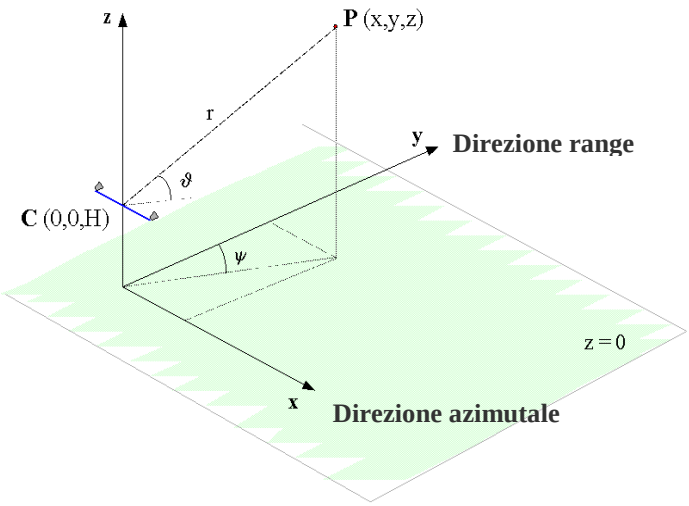



**Figura 1:** Sistema di riferimento utilizzato

## Unità di misura del tempo

Nel presente report l'unità di tempo utilizzata è l'ora UTC, viene riportata nella notazione Anno/Mese/giorno ora:minuti (AAAA/MM/gg HH:mm). Nel mese di Maggio e Settembre 2022 per ottenere l'ora locale aggiungere + 02:00.

# Introduzione

Con contratto LL.PP. n. 03 del 14 Giugno 2021 la Ellegi Srl è stata incaricata dalla Comunità Montana della Valchiavenna di eseguire nel biennio 2022-2024 un monitoraggio del versante meridionale del Monte Avedèe, nell'area della Cava di Foppa già soggetta ad attività estrattive nei decenni scorsi, finalizzato all'identificazione e alla mappatura di eventuali porzioni instabili delle pareti rocciose.

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 nelle rocce granodioritiche e quarzodioritiche del Masino-Bregaglia.

Il servizio di monitoraggio si compone di svariate campagne di misura effettuate in diversi periodi dell'anno (ogni quattro mesi circa) da due postazioni differenti, identificate come postazione *Est* e postazione *Ovest*. Vista l'estensione della parete da monitorare, per il monitoraggio si è scelto di utilizzare una doppia postazione di misura che permette di avere una visione completa sull'area di interesse. In particolare, la postazione *Ovest* si trova in prossimità del Lago di Novate mentre la postazione *Est* si trova nei pressi del piede della parete rocciosa della Cava di Foppa (Figura 2).

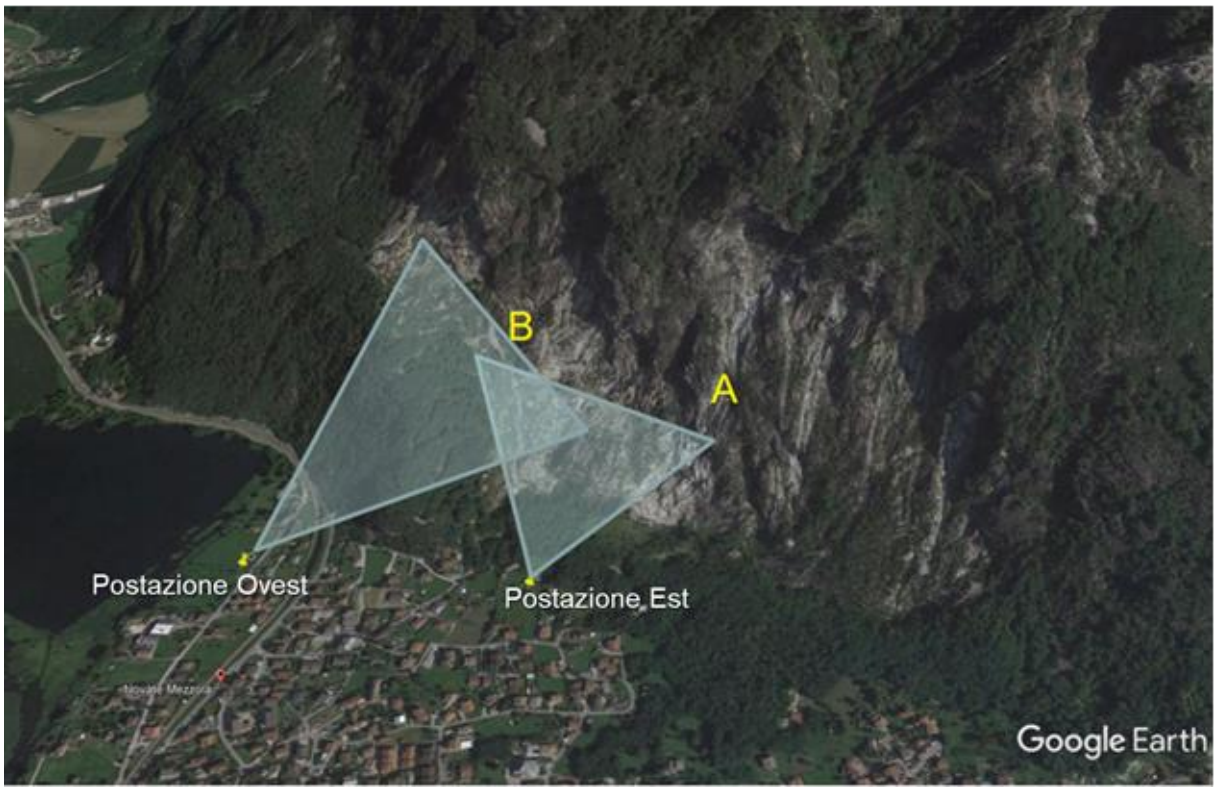



**Figura 2:** Ubicazione delle due postazioni di misura individuate nel test preliminare del 23 Marzo 2022 e oggetto di questo report. La Postazione Ovest, situata in vicinanza del Lago di Novate Mezzola, permette di ottimizzare le misure nell'area B mentre la Postazione Est, prossima al versante, permette una buona copertura dell'area A.

L'area di interesse si estende dalla strada statale SS36 in località Foppa fino a Montagnola e Ganda Grossa per una estensione lineare di circa 1.000 m. L'area da indagare di primario interesse è quella immediatamente sopra l'abitato fino a circa 650 m s.l.m. (area circoscritta in verde in Figura 3). A questa zona si aggiunge una ulteriore area che comprende la parte superiore del versante roccioso del monte Avedèe (area circoscritta in giallo in Figura 3). Il fine del monitoraggio richiesto è il controllo della stabilità e l'individuazione e la perimetrazione di eventuali aree in movimento.

In Figura 4 sono riportate le fotografie dei due sistemi di monitoraggio LiSAmobile impegnati nella campagna di misura. Vengono inoltre riportate delle riprese fotografiche del versante montuoso dalle due postazioni (Figura 5).

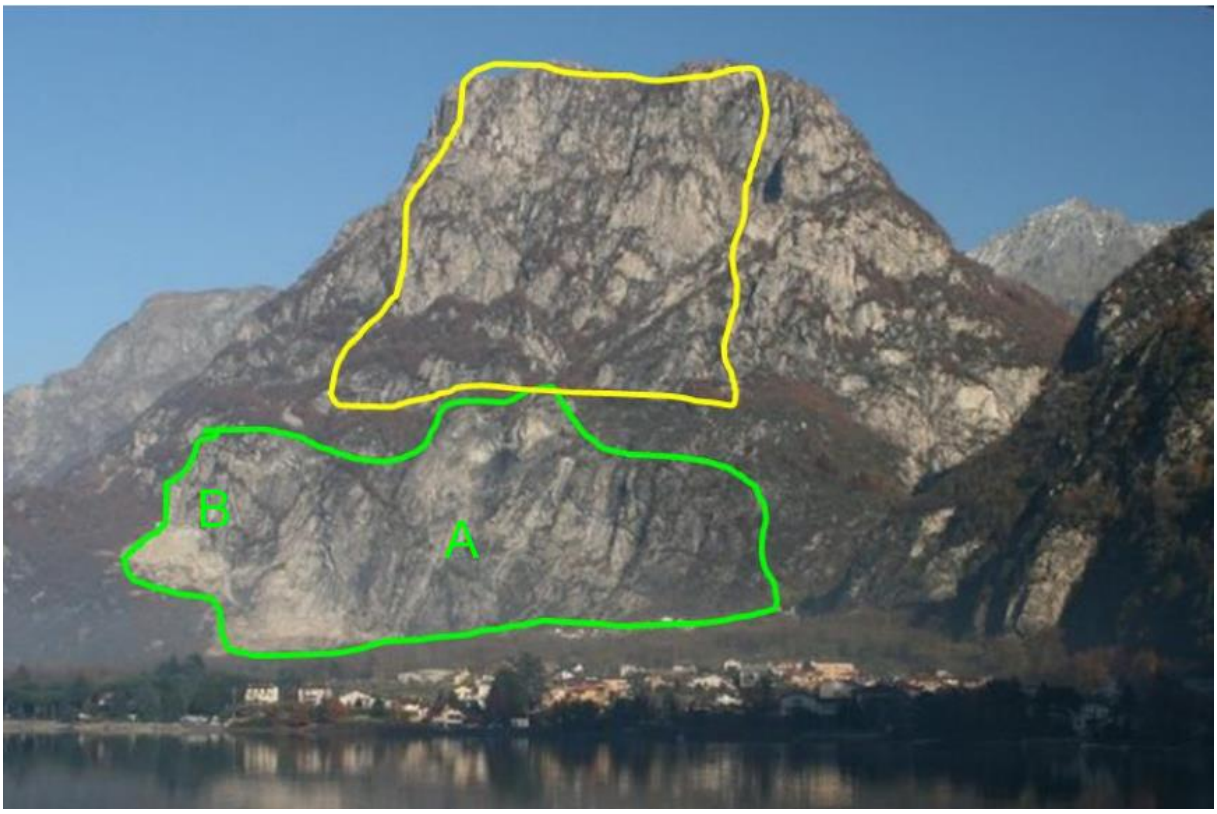



**Figura 3:** Fotografia del versante meridionale del Monte Avedèe, sopra Novate Mezzola, con circoscritte in verde le aree di primario interesse per il monitoraggio con tecnologia SAR terrestre (GBInSAR). In giallo sono evidenziate invece le pareti rocciose a quote più elevate e considerate obiettivo secondario del monitoraggio.

In Figura 3 sono state perimetrate in verde le aree da monitorare considerate di primaria importanza ed in giallo le pareti rocciose a quote più elevate che rappresentano l'obiettivo secondario del monitoraggio. Le lettere A e B indicano due settori nella zona di interesse. L'area A è situata immediatamente sopra al luogo dove si sta progettando la costruzione di un vallo a protezione dell'abitato di Novate mentre l'area B, immediatamente sopra la località Foppa, presenta un pilastro roccioso che sembra mostrare recente

attività. L'eventuale distacco di materiale da questo pilastro interesserebbe la strada SS36 e la ferrovia sottostante.

Il presente report riassume i risultati raccolti dal sistema GBInSAR LiSALab durante la seconda campagna di misura periodica, che segue la misura di zero, dal 9 al 13 Settembre 2022. Il presente report è articolato come segue:

1. Descrizione dell'installazione del sistema GBInSAR LiSALab, sua messa in funzione e parametri di misura selezionati;
2. Definizione parametri di misura;
3. Analisi delle immagini radar acquisite;
4. Elaborazione dei risultati in 3D;
5. Conclusioni.




**Figura 4:** Fotografia del sistema di monitoraggio LiSAmobile impegnato nella campagna di monitoraggio della parete del monte Avedèe nel mese di Settembre 2022. Pannello di sx: postazione *Ovest* nei pressi di via Riva. Pannello di dx: postazione *Est* nei pressi della ex Cava della Foppa.




**Figura 5:** Fotografia del sistema di monitoraggio LiSAmobile impegnato nella campagna di monitoraggio della parete del monte Avedèe nel mese di Settembre 2022. Pannello di sx: versante inquadrato dalla postazione *Ovest*. Pannello di dx: versante inquadrato dalla postazione *Est*.

# La tecnica SAR interferometrica

Per la descrizione della tecnica SAR interferometrica si rimanda al report della misura zero (rep.cvc.220601.ag.01).

# Specifiche del servizio

La Comunità Montana della Valchiavenna ha richiesto un servizio di monitoraggio di tipo “Periodical Check” per l’identificazione e la mappatura di eventuali porzioni instabili sulle pareti rocciose del monte Avedèe nel Comune di Novate Mezzola (SO), utilizzando il sistema GBInSAR LiSALab.

Il servizio di tipo “Periodical Check” si compone di una campagna iniziale di misura in cui il sistema GBInSAR LiSALab, che è stato precedentemente assemblato e adattato allo specifico utilizzo presso la sede Ellegi srl, verrà trasportato in loco ed installato presso una apposita struttura di sostegno.

Dopo le necessarie attività di implementazione, controllo e calibrazione il sistema acquisirà dati consecutivamente per circa 5 giorni, incluso il giorno di installazione e disinstallazione.

Al termine dei giorni previsti, il sistema verrà smontato, prelevato e riportato alla sede Ellegi srl, salvo che Ellegi srl reputi necessari (senza oneri aggiuntivi per il committente) ulteriori giorni di misura per migliorare la qualità dei dati e fino ad un massimo di 2 giorni addizionali. In sede si procederà quindi alla successiva elaborazione dei dati in due dimensioni e la successiva analisi interferometrica delle stesse.

Successivamente, trascorso un intervallo definito con la Committenza e attualmente stimato in circa 4 mesi, il sistema GBInSAR LiSALab verrà trasportato in luogo, installato e dopo le necessarie attività di implementazione e calibrazione rieseguirà le misure radar per acquisire un numero sufficiente di immagini radar classificabili come di alta qualità per circa 5 giorni, incluso il giorno di installazione e disinstallazione.

Il grado di qualità delle immagini radar acquisite è un parametro di sviluppo interno alla Ellegi srl, viene definito di volta in volta ad ogni campagna di misura sul campo utilizzando metodi statistici derivati sull’esperienza ed il know-how sviluppati nel tempo nel monitoraggio interferometrico SAR da terra.

Questo processo è finalizzato ad acquisire un numero di immagini radar sufficienti ad ottenere misure affidabili ed entro i limiti di accuratezza richiesti dal Cliente.

Dalla differenza delle immagini acquisite tra le differenti campagne verrà ricostruita l’evoluzione della deformazione del versante, nel tempo e nello spazio.

Dall’analisi interferometrica verranno restituite le mappe degli spostamenti dall’area osservata. Le mappe di spostamento verranno rilasciate in formato raster e/o Point Cloud. In questo modo il Committente potrà estrarre gli spostamenti da tutti i punti presenti nelle mappe stesse.

Inoltre, se reputato utile, si forniranno le serie temporali degli spostamenti di punti di interesse particolare selezionati assieme al Committente e ricavati dalle mappe di deformazione acquisite dal sistema GBInSAR LiSALab nell’esecuzione del servizio “Periodical Check”. Tali dati (spostamenti) verranno forniti

sotto forma di file importabili in software quali MS Excel per le successive elaborazioni da parte dei tecnici e professionisti.

Il prodotto finale di questo servizio sarà una serie di report aventi i seguenti contenuti:

| Definizione | Contenuti |
|---|---|
| 1° Report | • Definizione parametri di misura<br>• Analisi immagini radar acquisite<br>• Analisi delle immagini interferometriche relative alla campagna in oggetto |
| Successivi Report | • Definizione parametri di misura<br>• Analisi immagini radar acquisite<br>• Analisi delle immagini interferometriche relative alla campagna in oggetto<br>• Analisi delle immagini interferometriche tra le varie campagne eseguite<br>• Analisi delle serie temporali di n°. 10 punti (ove definiti)<br>• Riassunto e conclusione delle misure eseguite nel servizio |

I risultati verranno consegnati in formato elettronico.

In seguito al test eseguito il giorno 23 marzo 2022 per validare il monitoraggio per mezzo di tecnologia GBInSAR del versante roccioso sovrastante l'abitato di Novate Mezzola e minimizzare gli effetti distorsivi della tecnica sui risultati, si è concluso che la misura periodica di questo versante è fattibile per le aree non vegetate. Tuttavia, per monitorare correttamente il versante roccioso ed in particolare le due aree indicate dalla Committenza è necessario prevedere due distinte postazioni di misura, pertanto il servizio si compone di 3 misure/anno per 3 (tre) anni da eseguirsi per entrambe le postazioni.

Il servizio di "Periodical Check" è comprensivo di:

1. implementazione, preparazione e calibrazione del sistema GBInSAR LiSALab© presso i laboratori Ellegi srl;
2. utilizzo per le campagne di misura di un sistema GBInSAR LiSALab©
3. trasporto della strumentazione;
4. installazione e configurazione del sistema ad opera dei tecnici specializzati Ellegi srl;
5. acquisizione dei dati grezzi da parte del sistema GBInSAR LiSALab©;
6. elaborazione dei dati grezzi acquisiti per ottenere le immagini radar;
7. analisi delle immagini radar per ogni campagna di misura e loro successiva elaborazione;
8. produzione e consegna del report in forma elettronica per ogni campagna;
9. produzione di serie temporali degli spostamenti dei punti selezionati assieme al Committente e ricavate dalle mappe di deformazione acquisite dal sistema GBInSAR LiSALab nell'esecuzione del servizio "Periodical Check". Tali dati (spostamenti) verranno forniti sotto forma di file importabili in software quali MS Excel per le successive elaborazioni da parte dei tecnici e professionisti;
10. conservazione dei dati grezzi per tutta la durata del servizio di monitoraggio "Periodical Check";

11. conservazione dei dati grezzi acquisiti nell'esecuzione di tutto il servizio di "Periodical Check" per almeno i 3 anni successivi alla conclusione del servizio;
12. fornitura e messa a disposizione del basamento metallico che verrà lasciato in loco per la durata del servizio, al termine il luogo verrà ripristinato allo stato di fatto;
13. riunione tecnica con Committenza per discussione dei risultati al termine di ogni campagna;
14. allacciamento, gestione e fornitura della linea elettrica di alimentazione se disponibile o in caso di assenza alimentazione per mezzo di generatore autonomo opzionale.

Sono escluse dal servizio e quindi non a carico e responsabilità del Committente, ma necessarie alla corretta esecuzione del servizio sopra esposto:

- la richiesta e l'ottenimento dei permessi di occupare il sito od il terreno ove installare il basamento e il sistema GBInSAR LiSALab;
- la sistemazione ed il mantenimento delle infrastrutture che non fanno parte del sistema GBInSAR LiSALab nel sito prescelto per il posizionamento dello strumento compresa la garanzia a favore della Ellegi di poter accedere autonomamente e liberamente al sito ed ai locali ove è contenuta la strumentazione ed il sistema per tutta la durata del contratto più i successivi 3 mesi;
- i costi di riparazione o sostituzione di tutti i componenti danneggiati nel caso in cui il sistema venga danneggiato da sovraccarichi dovuti alla linea elettrica od altri eventi imputabili alla linea elettrica o a negligenza del Committente;
- le analisi integrative e/o successive delle immagini e dei dati grezzi conservati diverse da quanto previsto nel contratto di "Periodical Check";
- i costi dell'eventuale rilievo del punto di installazione del sistema GBInSAR LiSALab rispetto al sistema di coordinate generali che si vuole utilizzare e l'acquisizione del DEM o DTM.

## *Punto d'installazione del sistema GBInSAR LiSALab*

Per poter operare correttamente nello specifico caso di misura del versante del monte Avedèe, entrambe le postazioni del sistema GBInSAR LiSALab sono state installate in siti aventi le seguenti caratteristiche:

- buona visuale della zona da monitorare;
- postazione stabile non soggetta a movimenti;
- distanza media dall'area da monitorare tale da non comportare la perdita di risoluzione spaziale;
- migliore linea di osservazione (LOS) possibile del fenomeno.

Tali caratteristiche permettono di osservare nella sua quasi totalità l'area d'interesse del versante del monte Avedèe.

Di seguito ripotiamo le coordinate (nel sistema UTM – WGS84, Fuso 32) delle due postazioni di misura:

| Postazione | Est [m] | Nord [m] | Quota [m s.l.m.] |
|---|---|---|---|
| EST (PE) | 534815.1 | 5119084.4 | 233 |
| OVEST (PO) | 534419.0 | 5119154.0 | 207 |

Per entrambe le postazioni, la Comunità Montana della Valchiavenna ha fatto realizzare un magrone in cemento con dimensioni tali da poter, in un secondo tempo e all'occorrenza, predisporre una postazione di monitoraggio permanente. Al di sopra dei magroni in cemento sono state installate delle travi metalliche (Figura 6 e Figura 7) per il posizionamento dello strumento. Queste verranno lasciate in loco per tutta la durata del servizio e permetteranno di mantenere un riferimento univoco nelle successive installazioni. Il sistema in entrambe le postazioni viene alimentato direttamente dalla rete in corrispondenza di due case poste nelle vicinanze delle postazioni di misura.
Il sistema di ancoraggio a terra combinato con l'impiego del portale metallico in questa serie di campagne di misura conferisce un sufficiente grado di stabilità al sistema e garantisce la riuscita del monitoraggio interferometrico. La presenza di contro-piastre sulla trave metallica orizzontale permette di mantenere invariato il posizionamento del sistema nei futuri Periodical Check rendendo possibile il confronto tra i dati acquisiti progressivamente.



**Figura 6:** Postazione *Est*: a sinistra dettagli del magrone di cemento su cui è stato fissato il basamento in metallo; a destra come appariva il sistema ad installazione ultimata.



**Figura 7:** Postazione *Ovest*: a sinistra il magrone di cemento e il portale metallico; a destra il sistema ad installazione ultimata.

## *Descrizione del servizio*

Il servizio di monitoraggio periodico si compone di svariate campagne di misura.

Per ciascuna campagna il sistema GBInSAR LiSALab, che è stato precedentemente assemblato, adattato e calibrato allo specifico utilizzo presso la sede della Ellegi srl, verrà trasportato in loco ed installato sul basamento utilizzato per la prima campagna di misura (misura di zero).

Dopo le necessarie attività di implementazione, controllo e calibrazione, la strumentazione inizierà ad eseguire indagini radar. Al termine della serie di acquisizioni il sistema sarà smontato, prelevato e riportato alla sede Ellegi srl per la elaborazione dei dati acquisiti.

I risultati delle analisi presentati qui di seguito sono restituiti sotto forma di sequenze di mappe di spostamento in due ed in tre dimensioni, a copertura totale e/o parziale dell'intervallo considerato.

Il presente report riporta i risultati della campagna di Settembre 2022 e fornisce una prima valutazione delle deformazioni che interessano il Monte Avedèe, anche mediante confronto con le misure acquisite nella prima campagna di Maggio 2022 (misura di zero su questo sito).

La presente campagna di misura si è svolta nei giorni 9-13 Settembre 2022 ed ha permesso di acquisire un totale di 683 immagini dalla Postazione *Est* e di 716 immagini dalla Postazione *Ovest*.



**Figura 8:** Postazione *Est*, ripresa fotografica del versante durante l'installazione del sistema del 9 Settembre 2022.



**Figura 9:** Postazione *Est*, sistema LiSAmobile ad installazione ultimata il 9 Settembre 2022.



**Figura 10:** Postazione *Ovest*, ripresa fotografica del versante durante l'installazione del 9 Settembre 2022.



**Figura 11:** Postazione *Ovest*, sistema LiSAmobile ad installazione ultimata il 9 Settembre 2022.

## *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* (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.

Nel presente report, vista la complessità geometrica della parete rocciosa del Monte Avedèe e la necessità di ottimizzare l'analisi del dato in relazione alle diverse zone mostrate in Figura 3 si è scelto di processare le immagini radar utilizzando, per ogni postazione, due sottofinestre: una, la sottofinestra *Near*, ha come obiettivo principale il monitoraggio delle deformazioni nella porzione di versante più vicina al sistema (area circoscritta in verde in Figura 3); la seconda, la sottofinestra *Far*, si focalizza invece sulle pareti più lontane, nella porzione superiore del monte Avedèe (area circoscritta in giallo in Figura 3). Gli estremi delle due sottofinestre, in coordinate radar, sono riportati nelle seguenti tabelle:

Postazione EST

| Sottofinestra | Min Azimuth (m) | Max Azimuth (m) | Min Range (m) | Max Range (m) |
|---|---|---|---|---|
| **FAR** | -500 | 600 | 950 | 1550 |
| **NEAR** | -400 | 600 | 200 | 950 |

Postazione OVEST

| Sottofinestra | Min Azimuth (m) | Max Azimuth (m) | Min Range (m) | Max Range (m) |
|---|---|---|---|---|
| **FAR** | -600 | 800 | 1000 | 1650 |
| **NEAR** | -500 | 600 | 500 | 1000 |

È bene anche sottolineare che, diversamente dalla tecnica SAR tradizionale, la risoluzione non solo dipende dalla distanza ma ha anche una dipendenza dalla posizione in azimut della cella rispetto alla collocazione del sensore.

Tipicamente ci si può attendere una variazione fino al 50% della dimensione della cella anche a seconda dei filtri utilizzati nell'elaborazione dei dati.

In accordo con i parametri scelti, la risoluzione teorica in range è approssimativamente di 0,7 m, mentre quella in azimut varia tra 0,6 m e 4,8 m. La Figura 12 mostra le due griglie di risoluzione utilizzate per la postazione *Ovest* mentre in Figura 13 vengono mostrate le griglie utilizzate per la postazione *Est*.
Le condizioni operative e i parametri di misura utilizzati dal sistema sono riassunti nella tabella seguente:

Postazione EST

| | NEAR | FAR |
|---|---|---|
| Minima distanza osservata | 200 m | 950 m |
| Massima distanza osservata | 950 m | 1550 m |
| Risoluzione teorica in azimut a distanza minima | 0.6 m | 2.7 m |
| Risoluzione teorica in azimut a distanza massima | 2.7 m | 4.5 m |
| Risoluzione teorica in range (costante) | 0.7 m | 0.7 m |

Postazione OVEST

| | NEAR | FAR |
|---|---|---|
| Minima distanza osservata | 500 m | 1000 m |
| Massima distanza osservata | 1000 m | 1650 m |
| Risoluzione teorica in azimut a distanza minima | 1.4 m | 2.9 m |
| Risoluzione teorica in azimut a distanza massima | 2.9 m | 4.8 m |
| Risoluzione teorica in range (costante) | 0.7 m | 0.7 m |

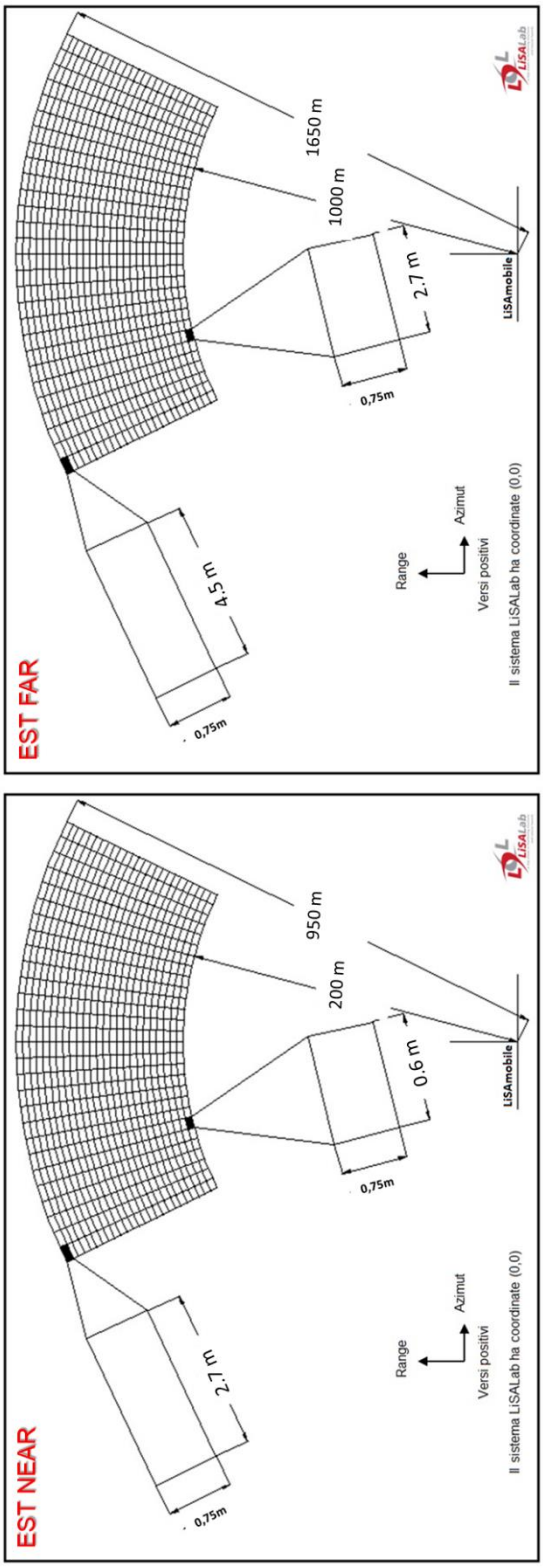



**Figura 12:** griglia di risoluzione del sistema GBInSAR LiSALab per la campagna in oggetto, Postazione *Est*.

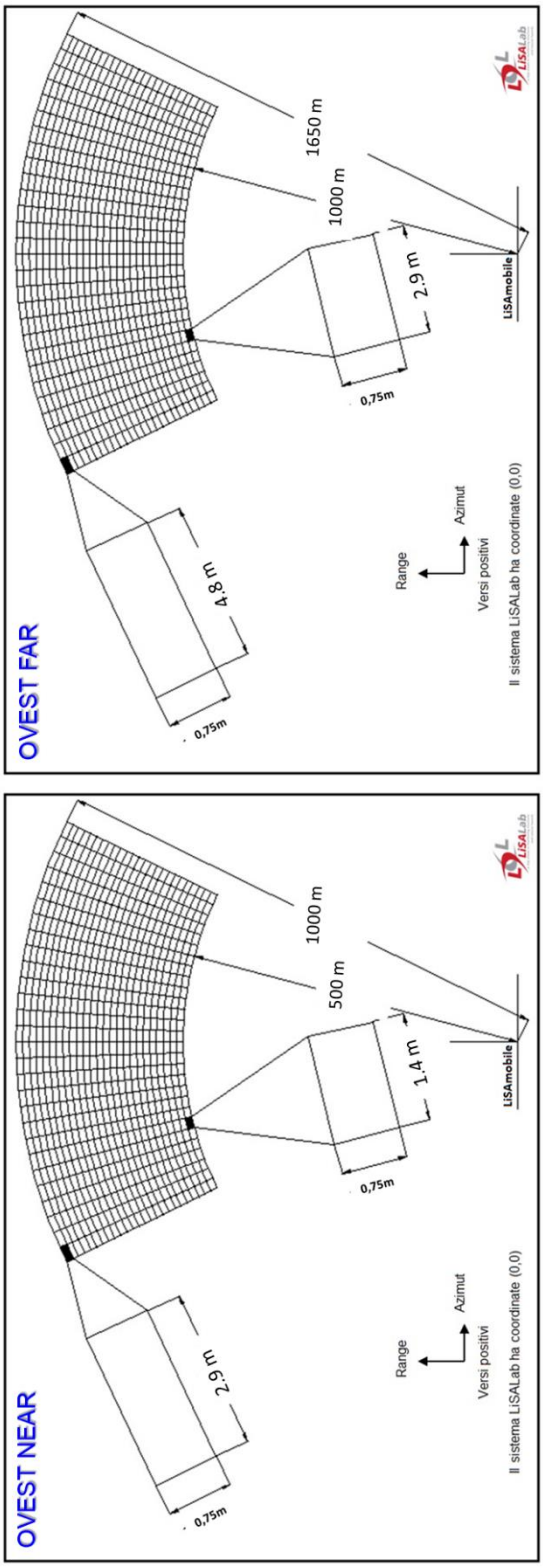



**Figura 13:** griglia di risoluzione del sistema GBInSAR LiSALab per la campagna in oggetto. Postazione *Ovest*.

# Elaborazione dei risultati della campagna di misura di Settembre 2022

In questa sezione saranno presentati i risultati della presente campagna di misura, effettuata tra il 9 e il 13 Settembre 2022, che rappresenta il II Periodical Check di questo sito.

## *Analisi 2D*

## *Mappe di potenza*

Nelle figure seguenti vengono presentate le immagini SAR in potenza del versante del monte Avedèe acquisite dal sistema GBInSAR LiSALab secondo le griglie di risoluzione presentate nella sezione precedente. Ciascuna mappa mostra l'energia riflessa dagli oggetti presenti nella scena osservata, relativizzata al massimo segnale riflesso misurato. L'unità di misura utilizzata è il dB.

Le regioni gialle sono quelle che riflettono meglio le onde elettromagnetiche, mentre quelle blu sono le regioni che riflettono peggio i raggi trasmessi, a causa della geometria o del materiale della superficie su cui incidono che tende ad assorbire maggiormente le onde.

In generale, le zone rocciose e le strutture in muratura o metalliche riflettono le onde incidenti meglio delle aree coperte da vegetazione. Le zone d'ombra o vegetate presentano generalmente una colorazione vicina al nero.

Dalle precedenti immagini in potenza si può notare che le pareti rocciose pseudo-verticali dello scenario sono ben visibili ed hanno una buona risposta al segnale radar.

Le immagini radar 2D di un oggetto sono intrinsecamente distorte in quanto lungo la direzione "range" sono riportate le distanze "sensore – punto osservato" e per questo le immagini tendono ad essere "stirate" più ci si allontana dal sensore stesso.

Per rendere più immediata la comprensione dell'immagine in potenza e per riassorbire le distorsioni caratteristiche delle immagini 2D, si presenta una rappresentazione qualitativa con indicazioni delle zone radar sull' immagine fotografica dello scenario. Tale georeferenziazione è mostrata in Figura 18 per la postazione *Ovest* e in Figura 19 per la Postazione *Est*.

Nel capitolo relativo alla georeferenziazione e alla proiezione di dati in tre dimensioni, le immagini e le mappe di spostamento verranno direttamente proiettate su un DEM dell'area monitorata recuperando così le distorsioni tipiche delle misure radar ed ottenendo una relazione univoca tra pixel radar e punto "fisico" osservato. A tal proposito si rimanda al relativo capitolo dedicato alla fine del presente report.

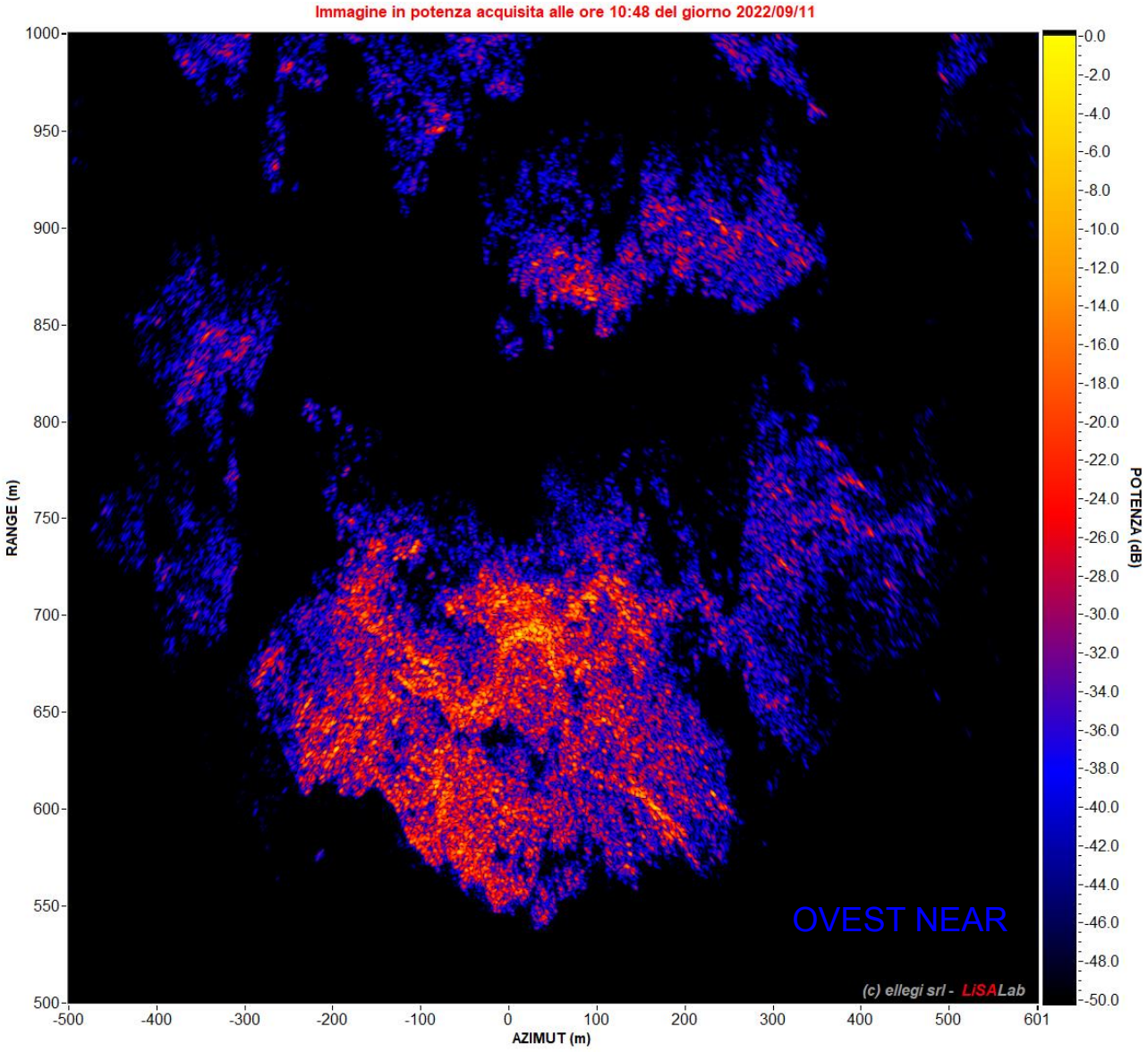



**Figura 14:** Immagine SAR in potenza in 2D dello scenario osservato dal sistema GBInSAR LiSALab, Settembre 2022. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Near*.

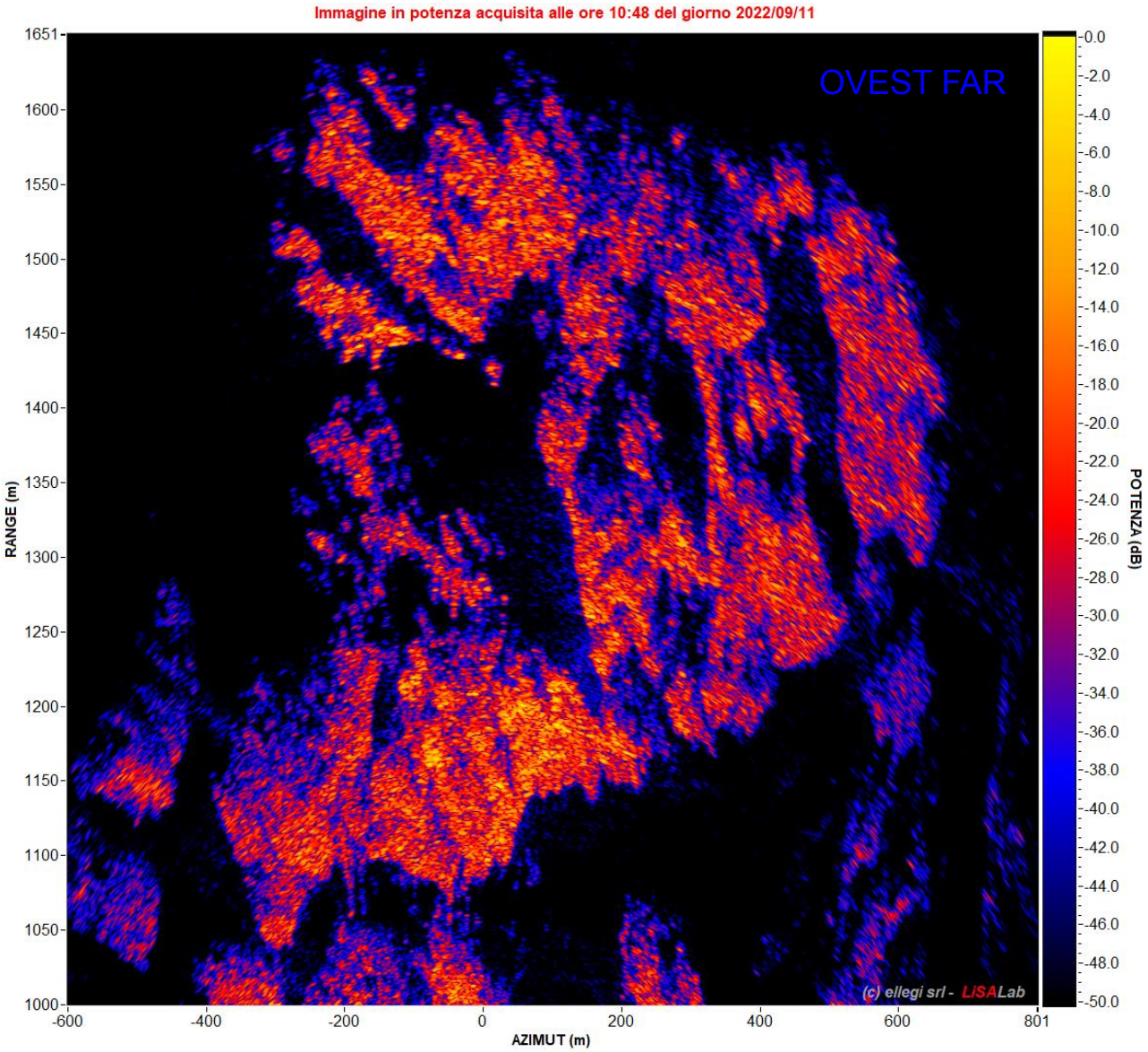



**Figura 15:** Immagine SAR in potenza in 2D dello scenario osservato dal sistema GBInSAR LiSALab, Settembre 2022. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Far*.

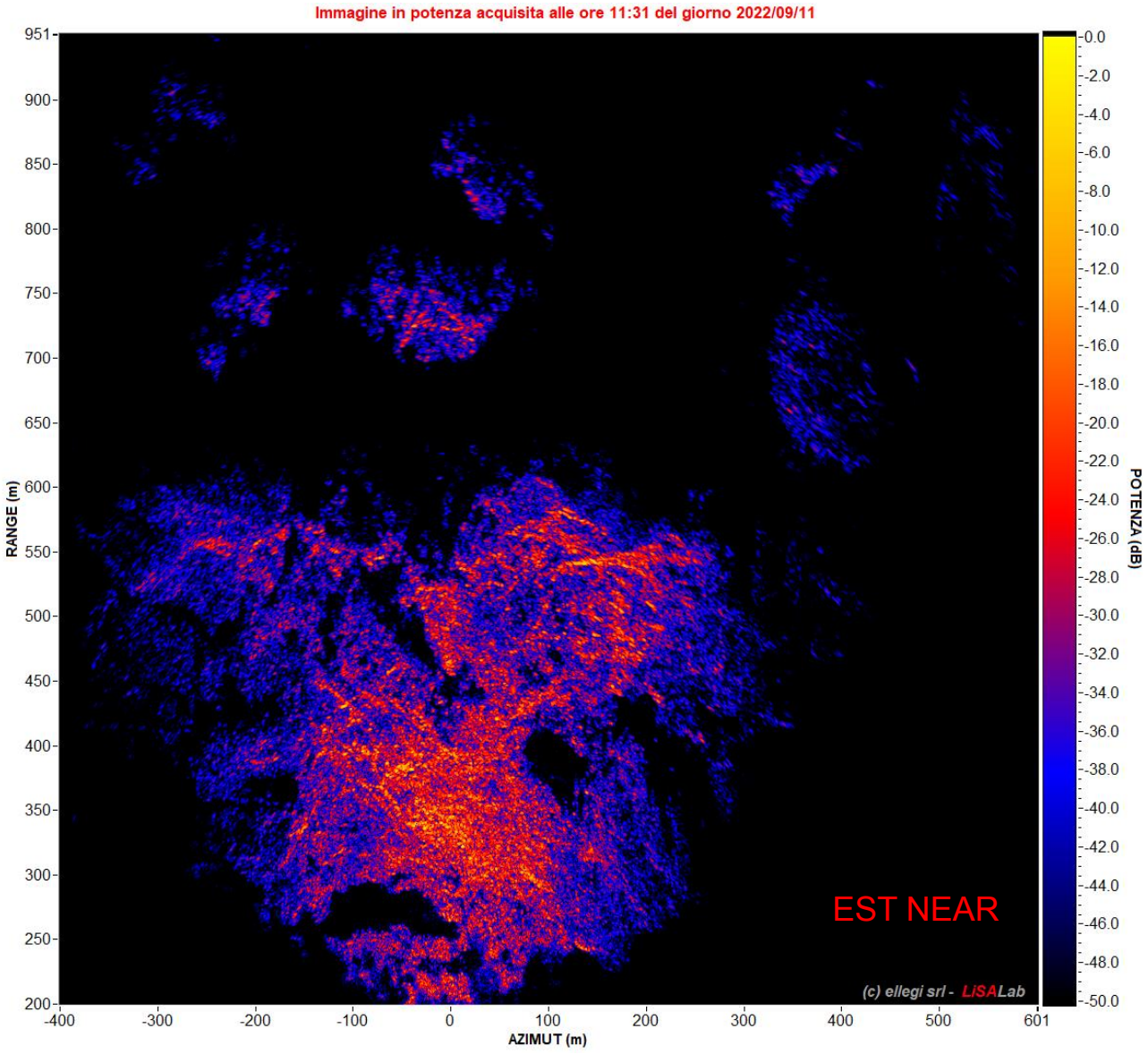



**Figura 16:** Immagine SAR in potenza in 2D dello scenario osservato dal sistema GBInSAR LiSALab, Settembre 2022.

Postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

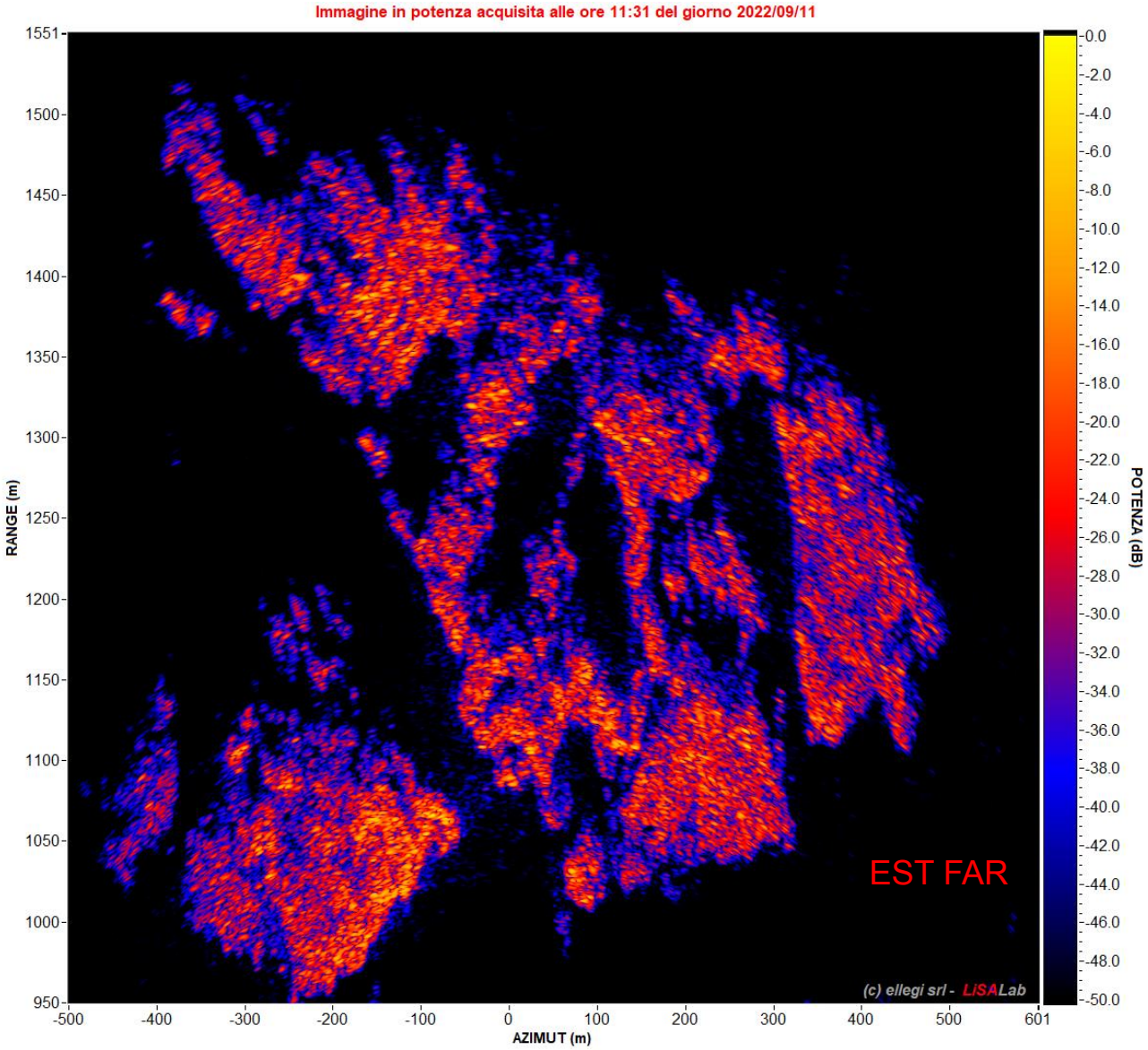



**Figura 17:** immagine SAR in potenza in 2D dello scenario osservato dal sistema GBInSAR LiSALab, Settembre 2022.

Postazione *Est*, sottofinestra *Far.*

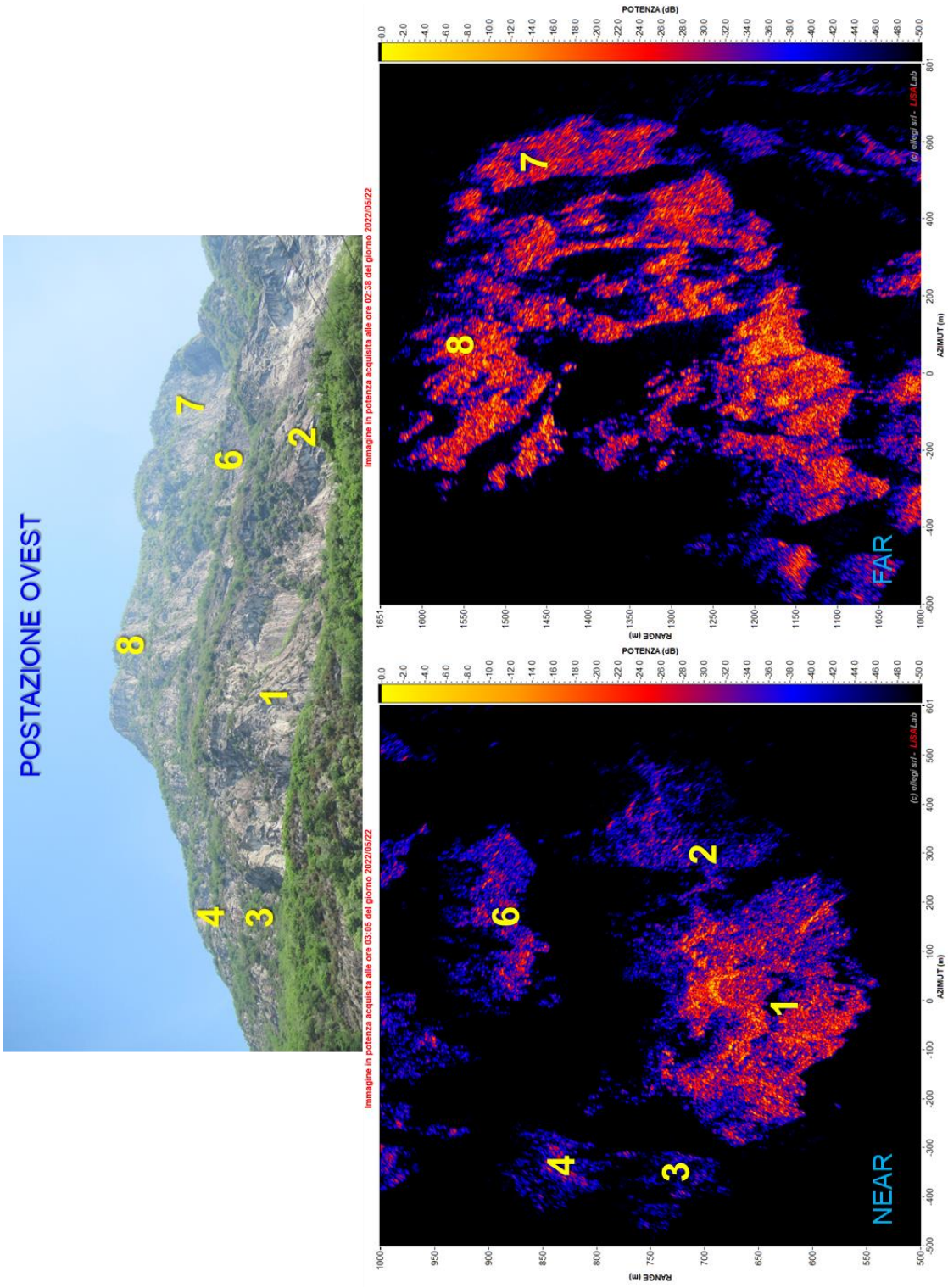



**Figura 18:** Georeferenziazione qualitativa delle immagini radar in potenza sulla fotografia del versante.

Postazione *Ovest*, sottofinestre *Near* e *Far*.

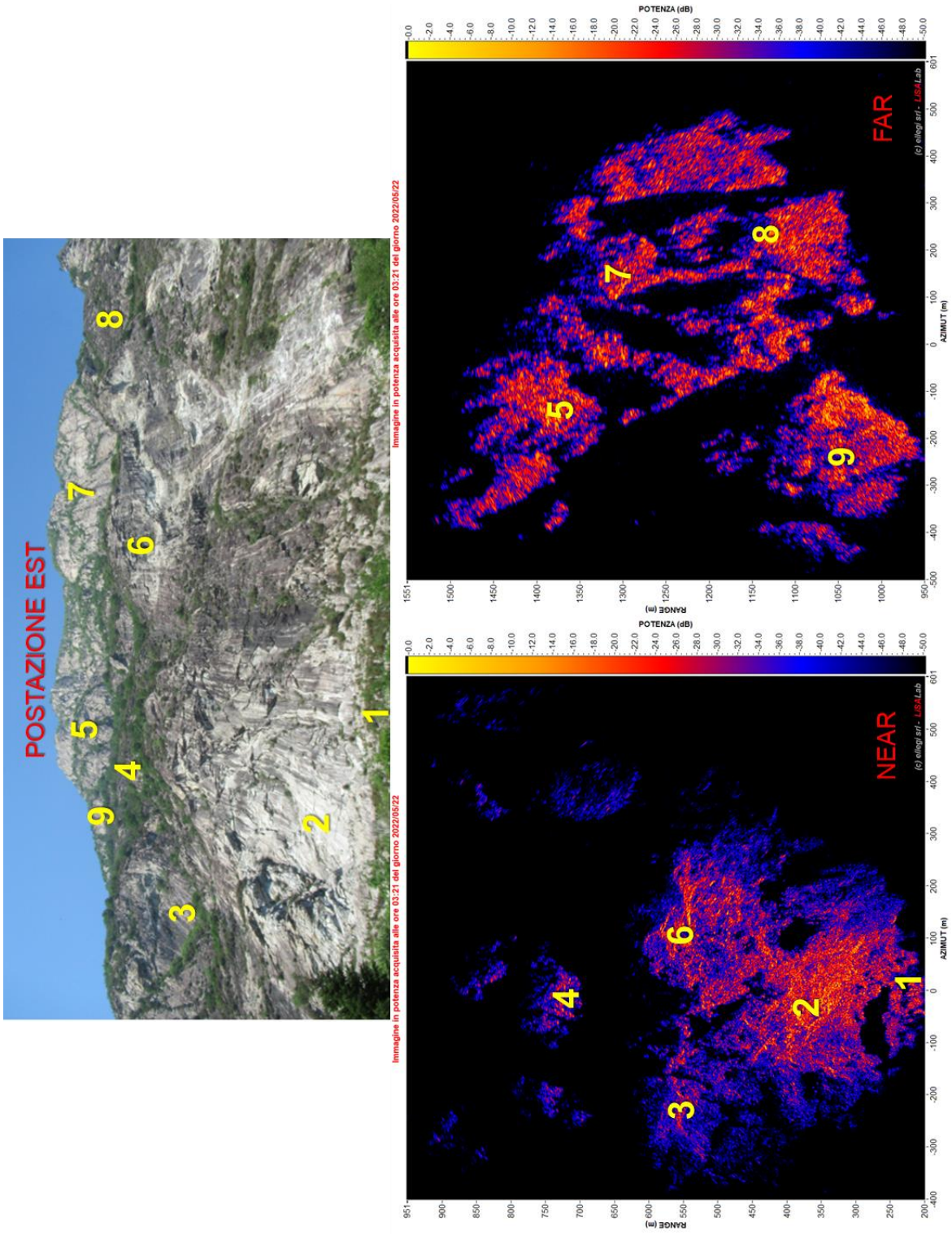



**Figura 19:** Georeferenziazione qualitativa delle immagini radar in potenza sulla fotografia del versante.

Postazione *Est*, sottofinestre *Near* e *Far*.

# *Mappe di spostamento*

## Analisi degli spostamenti a breve termine: 9 Settembre 2022 – 13 Settembre 2022

In questa sezione vengono presentate le mappe di spostamento a breve termine del versante del monte Avedèe. Nelle mappe a breve termine l'obiettivo principale è verificare la stabilità o la presenza di deformazioni che intercorrono durante la singola campagna di misura, ad esempio a distanza di 4 giorni. Nella fattispecie, vengono di seguito presentate le mappe degli spostamenti avvenuti fra il 9 Settembre 2022 e il 13 Settembre 2022, a copertura di un intervallo temporale di circa tre giorni.

Le mappe di spostamento a breve termine sono in grado di evidenziare le regioni in movimento ed individuare comportamenti o anomalie locali che interessano il versante montuoso nell'arco temporale coperto dalla singola campagna di misura (Figura 20, Figura 22, Figura 24, Figura 26).

Le mappe possono essere lette utilizzando le barre colorate poste sul fianco sinistro di ciascuna mappa. I risultati, per entrambe le postazioni, sono riportati nelle figure seguenti (da Figura 20 a Figura 26).

Per ciascuna postazione/sottofinestra vengono presentati:

A) Gli interferogrammi degli spostamenti presentati nella rappresentazione interferometrica "classica" tipicamente utilizzata in misure SAR da terra. Questa rappresentazione permette di visualizzare eventuali spostamenti in avvicinamento ed allontanamento e la presenza di superamenti del limite di fase interferometrica. In questa visualizzazione le zone stabili hanno un colore rosso mentre le zone con spostamenti fra i -2 e i -4 mm in avvicinamento hanno un colore blu/blu scuro. Le zone in cui viene superato il limite di fase interferometrica hanno colore giallo.

B) Gli istogrammi con la distribuzione degli spostamenti per tutti i pixel della mappa di spostamento.

Ricordiamo che i fenomeni di perdita di coerenza, o decorrelazione, 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 dalle mappe di spostamento, queste ultime sono spesso prodotte mascherando le zone che hanno una coerenza troppo bassa, motivo per cui le mappe di spostamento relative ad intervalli temporali più brevi contengono un maggior numero di punti non mascherati in coerenza.

**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 VALORI NON SONO SROTOLATI.**

L'analisi è stata effettuata utilizzando immagini SAR ottenute elaborando statisticamente tutte le immagini acquisite in 24 ore (24h). Il prodotto di questa elaborazione statistica è una immagine "mediata" caratterizzata da un rapporto segnale/rumore superiore a quello della immagine iniziale e una qualità e precisione di misura ritenute più idonee allo scopo di questo monitoraggio conoscitivo.

Dall'analisi delle mappe di spostamento ottenute da entrambe le postazioni (*Est* e *Ovest*) per le due sottofinestre analizzate (*Near* e *Far*) è evidente che in tutta l'area osservata dal sistema GBInSAR LiSAmobile non sono presenti aree estese affette da movimenti nel breve termine (intervallo di tempo compreso tra il 9 e il 13 settembre 2022). Negli interferogrammi sono comunque individuabili delle aree puntiformi (di pochi pixel) caratterizzate da spostamenti millimetrici dovuti a locali fenomeni di disturbo (es. rumore per presenza di vegetazione nelle porzioni esterne delle immagini o ai bordi delle pareti verticali) che non devono essere tuttavia interpretati come reali spostamenti di materiale roccioso sul versante.

Al fine di fornire una analisi statistica dei dati ottenuti dagli interferogrammi si presentano, unitamente a questi, gli istogrammi con la distribuzione degli spostamenti ottenuti plottando sull'asse delle x il valore di spostamento e sull'asse delle y il numero di pixel dell'immagine radar. Sotto il grafico vengono forniti, per ciascuna distribuzione, i rispettivi valori medi e le deviazioni standard. Lo spostamento medio di tutti i pixel presenti nelle seguenti mappe di spostamento di circa 0.0mm, con una deviazione standard compresa tra 0.3 mm e 0.7 mm.

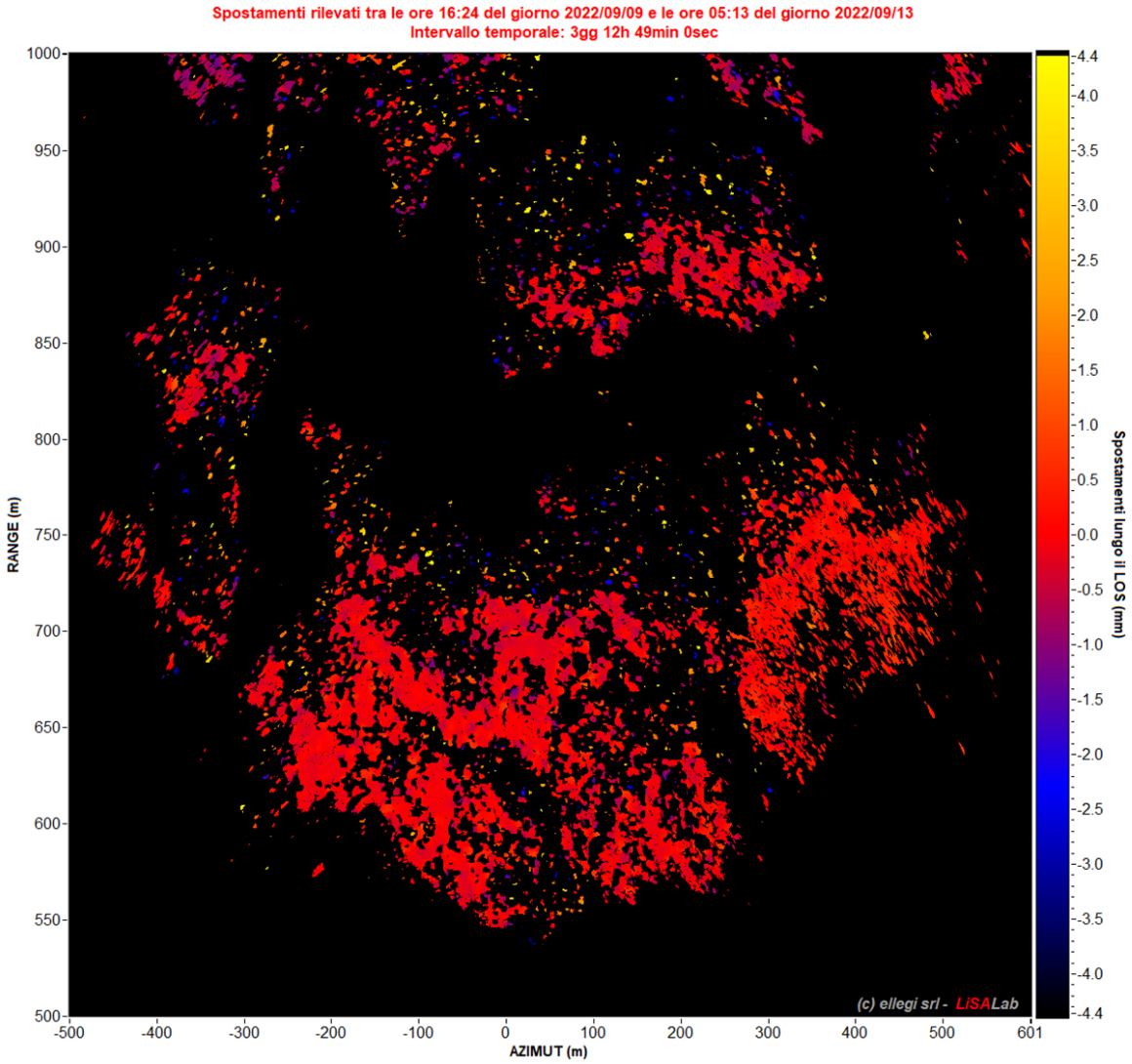



**Figura 20:** Mappa di spostamento a breve termine bidimensionale 9 – 13 Settembre 2022 (3 giorni 12 ore e 49 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Near*.

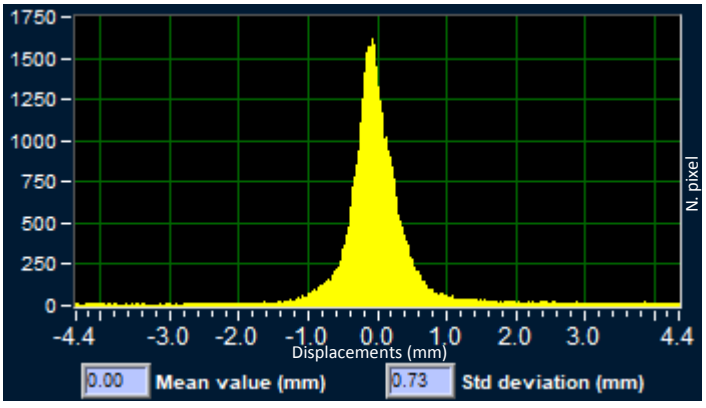



**Figura 21:** Istogramma della distribuzione degli spostamenti della mappa relativa alla postazione *Ovest*, sottofinestra *Near*.

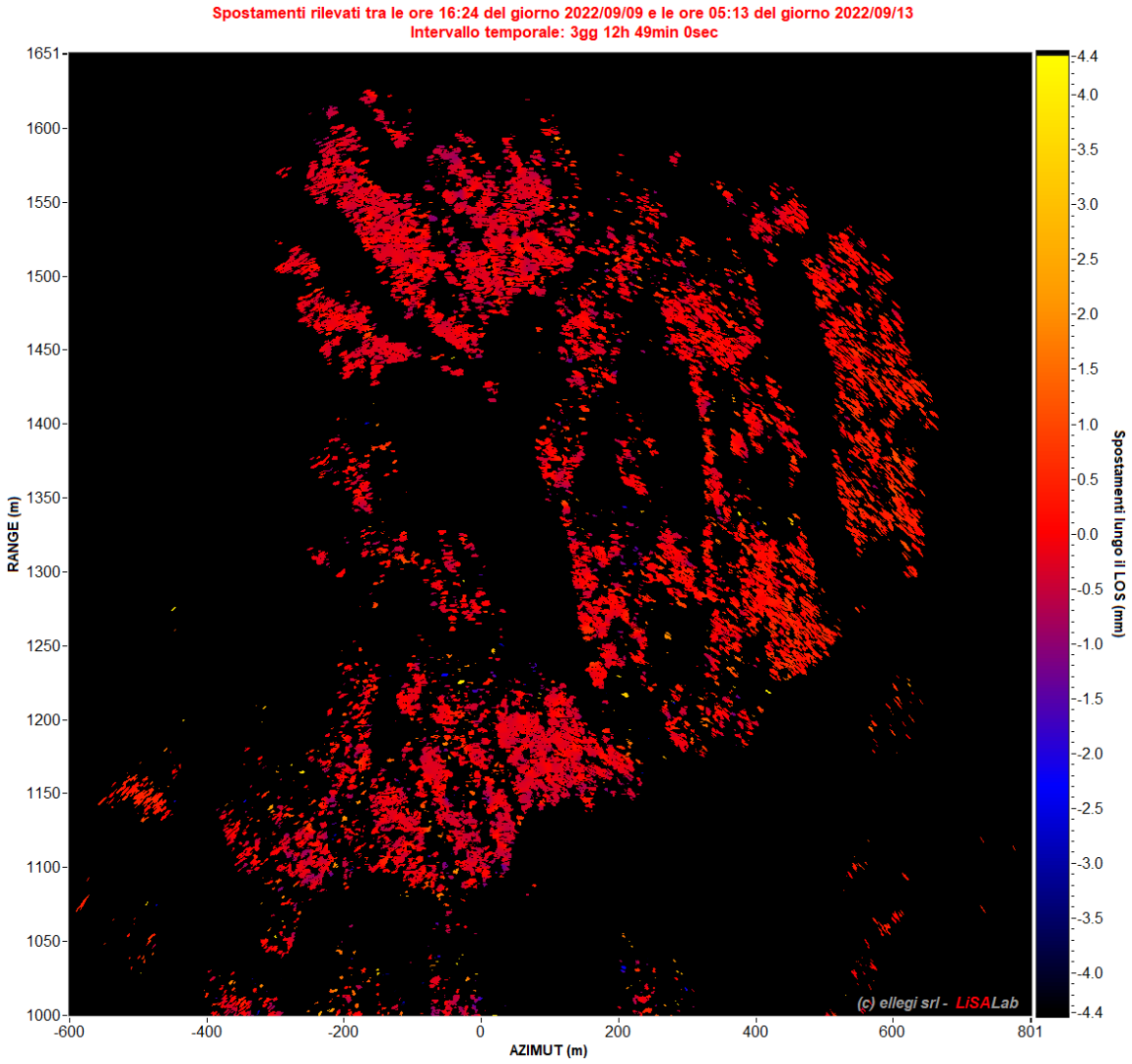



**Figura 22:** Mappa di spostamento a breve termine bidimensionale 9 – 13 Settembre 2022 (3 giorni 12 ore e 49 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Far*.

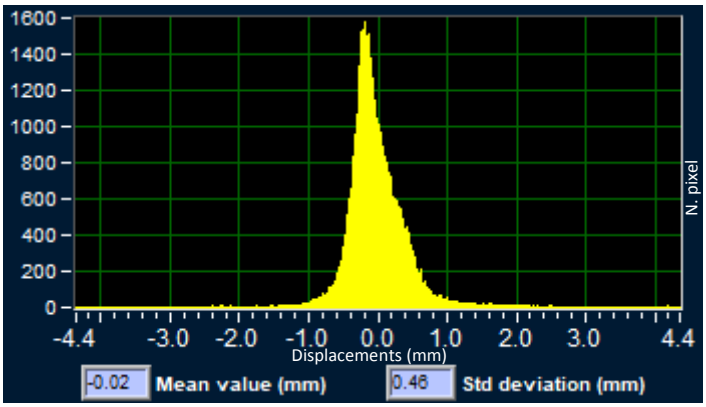



**Figura 23:** Istogramma della distribuzione degli spostamenti della mappa relativa alla postazione *Ovest*, sottofinestra *Far*.

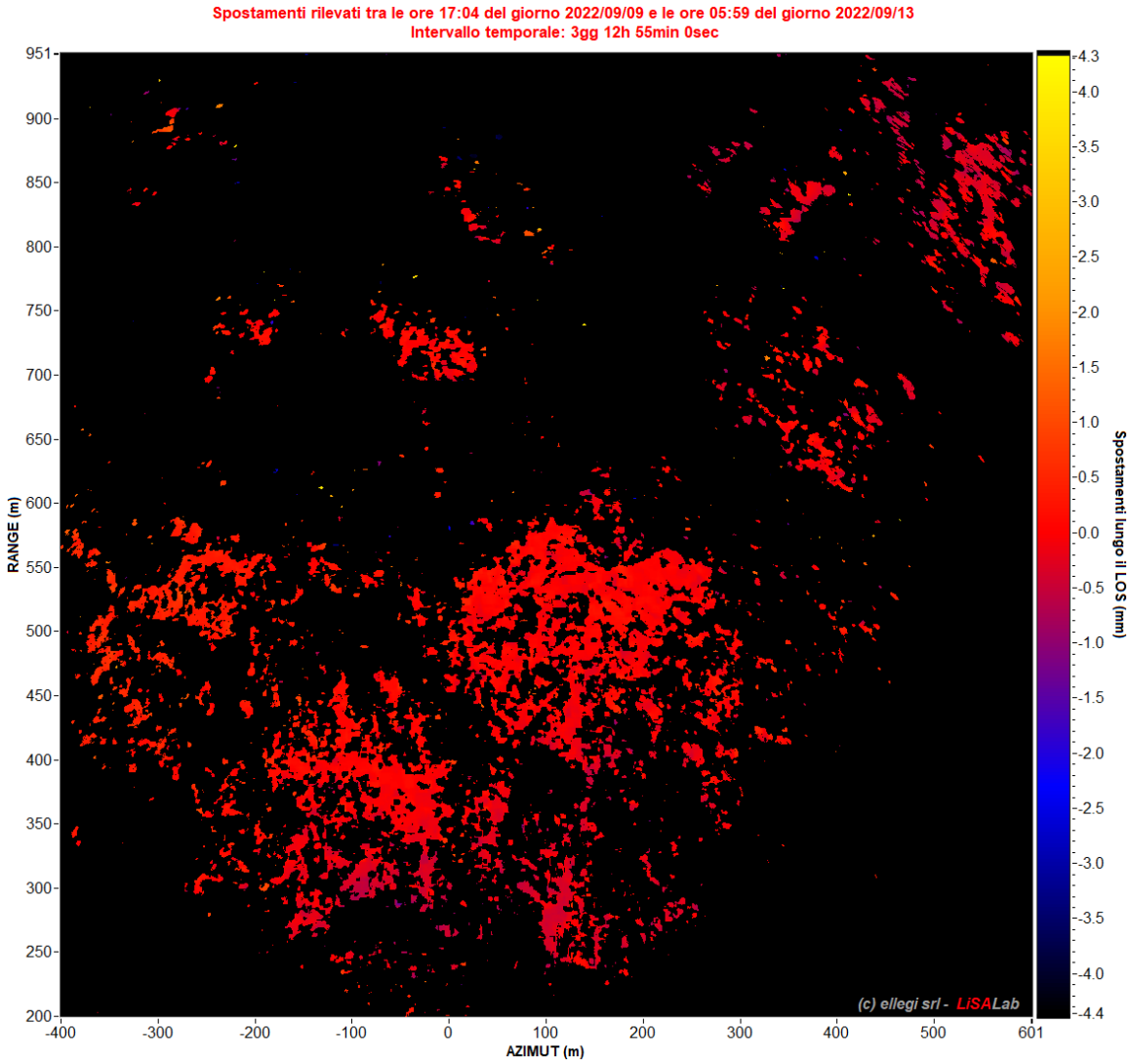



**Figura 24:** Mappa di spostamento a breve termine bidimensionale 9 – 13 Settembre 2022 (3 giorni 12 ore e 55 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

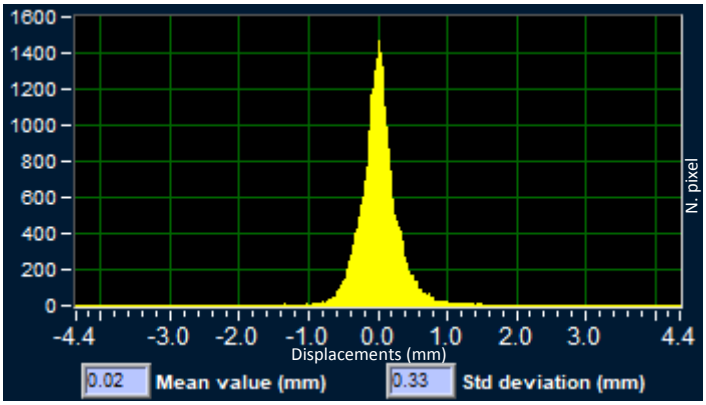



**Figura 25:** Istogramma della distribuzione degli spostamenti della mappa relativa alla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

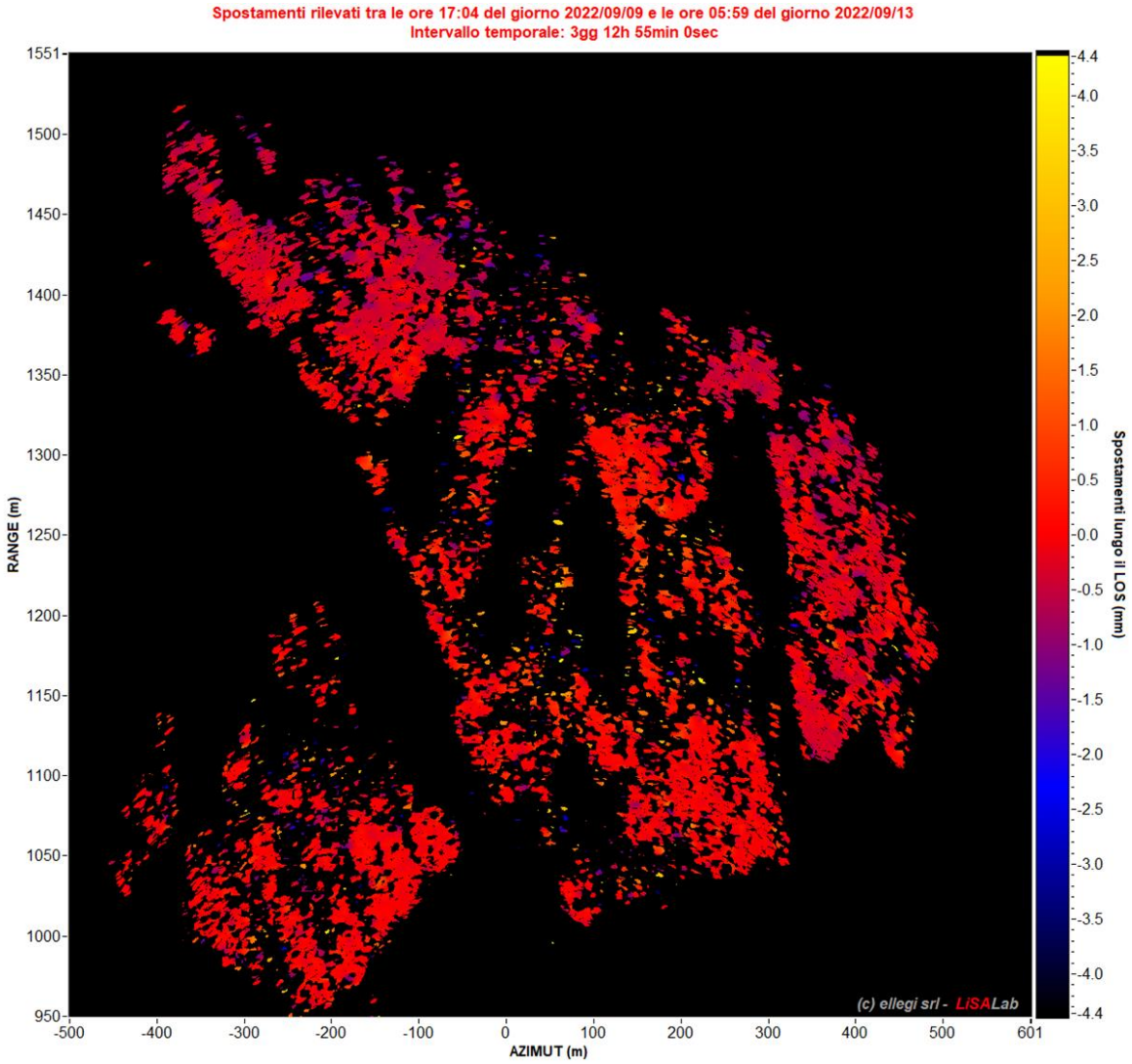



**Figura 26:** Mappa di spostamento a breve termine bidimensionale 9 – 13 Settembre 2022 (3 giorni 12 ore e 55 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Est*, sottofinestra *Far*.

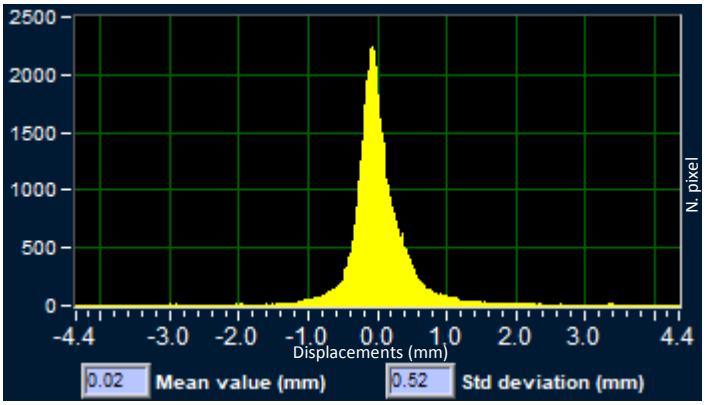



**Figura 27:** Istogramma della mappa degli spostamenti. Postazione *Est*, sottofinestra *Far*.

## Analisi degli spostamenti a lungo termine: Maggio 2022 – Settembre 2022

In questa sezione saranno analizzati i risultati ottenuti confrontando le due campagne di misura effettuate rispettivamente nei mesi di Maggio 2022 e Settembre 2022 al fine di rilevare l'eventuale presenza di spostamenti che hanno avuto luogo all'interno di questo intervallo temporale di circa 112 giorni.

Analogamente a quanto descritto per le analisi al breve termine, le mappe degli spostamenti relative al lungo termine possono essere lette utilizzando le barre colorate poste sul fianco sinistro di ciascuna mappa, che associano ad ogni colore un valore di spostamento. I valori positivi indicano spostamenti in allontanamento dal sistema; i valori negativi indicano spostamenti in avvicinamento al sistema. Nella scala utilizzata in queste immagini, il colore rosso identifica zone ferme o stabili nell'intervallo di misura considerato. Le zone con spostamenti fra i -2 mm e i -4 mm in avvicinamento hanno un colore blu/blu scuro. Le zone in cui viene superato il limite di fase interferometrica hanno colore giallo.

Rammentiamo nuovamente che i fenomeni di perdita di coerenza, o decorrelazione, si manifestano nelle immagini SAR come rumore sovrapposto alla fase interferometrica legata agli spostamenti e si concretizzano con una perdita di precisione nelle misure o, nei casi peggiori, nell'impossibilità della misurazione stessa. Per ottenere valori accettabili nella precisione delle misure dalle mappe di spostamento, queste ultime sono spesso prodotte mascherando le zone che hanno una coerenza troppo bassa, quindi risulta evidente come le mappe di spostamento relative ad intervalli temporali più brevi contengano un maggior numero di punti non mascherati in coerenza.

Le seguenti mappe di spostamento (da Figura 28 a Figura 31) mostrano il campo deformativo misurato dal sistema LiSAmobile tra le due campagne di misura finora eseguite, cioè tra la campagna di misura di zero ed il presente *Periodical Check* a copertura quindi di tutto l'intervallo di monitoraggio.

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

Negli interferogrammi che descrivono la situazione del versante nel lungo termine (intervallo temporale tra Maggio 2022 e Settembre 2022) si identificano cinque aree in lento movimento che mostrano spostamenti in avvicinamento lungo la linea di vista del sistema radar con picchi tra -1.5 mm e -3.1 mm in 112 giorni (area B in Figura 29 e Figura 31, aree A, C, D, E in Figura 30) e una area con spostamenti in allontanamento fino a +2.0 mm in 112 giorni (area F in Figura 30).

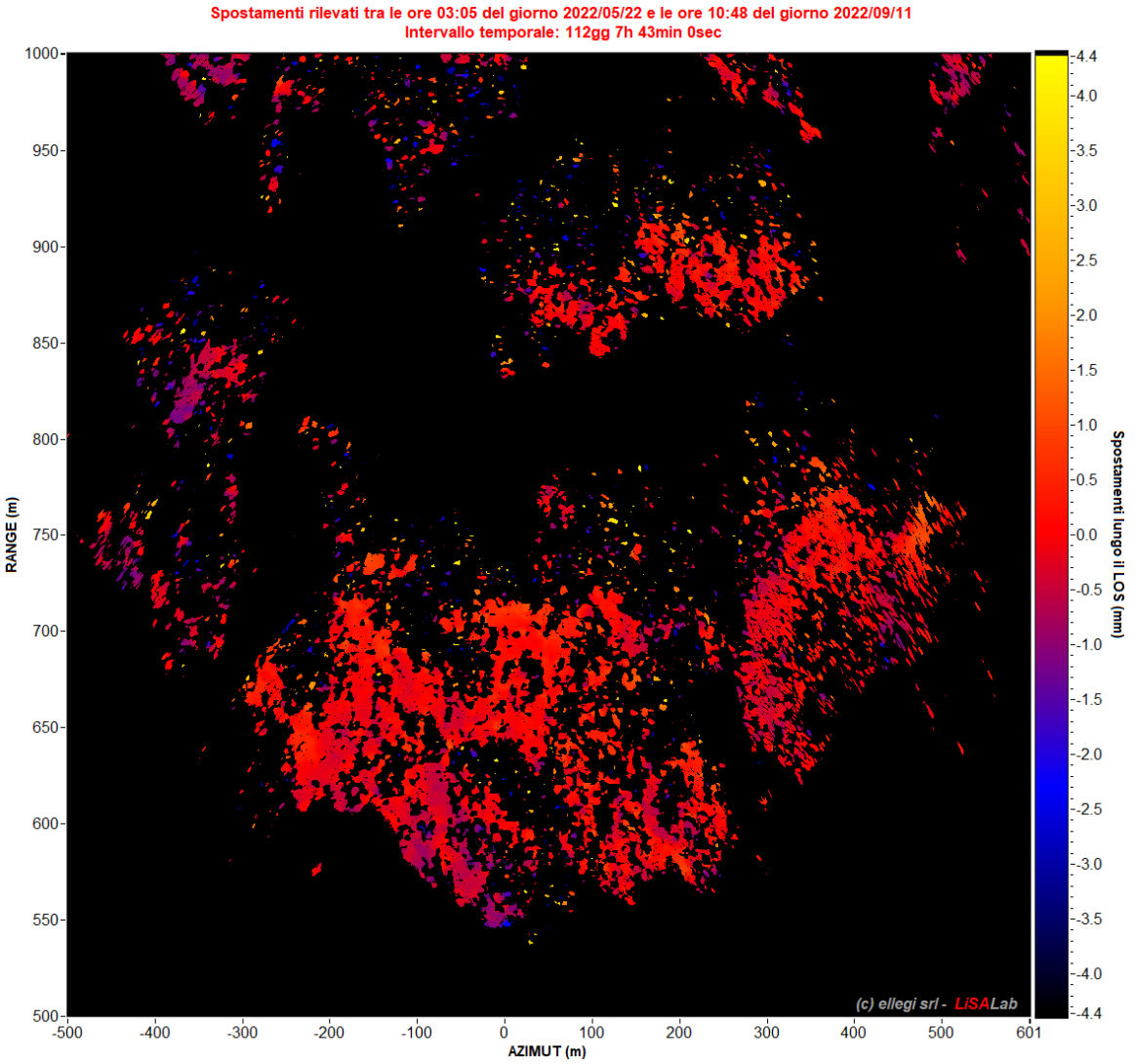



**Figura 28:** Mappa di spostamento a lungo termine bidimensionale 22 Maggio – 11 Settembre 2022 (112 giorni 7 ore e 43 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Near.*

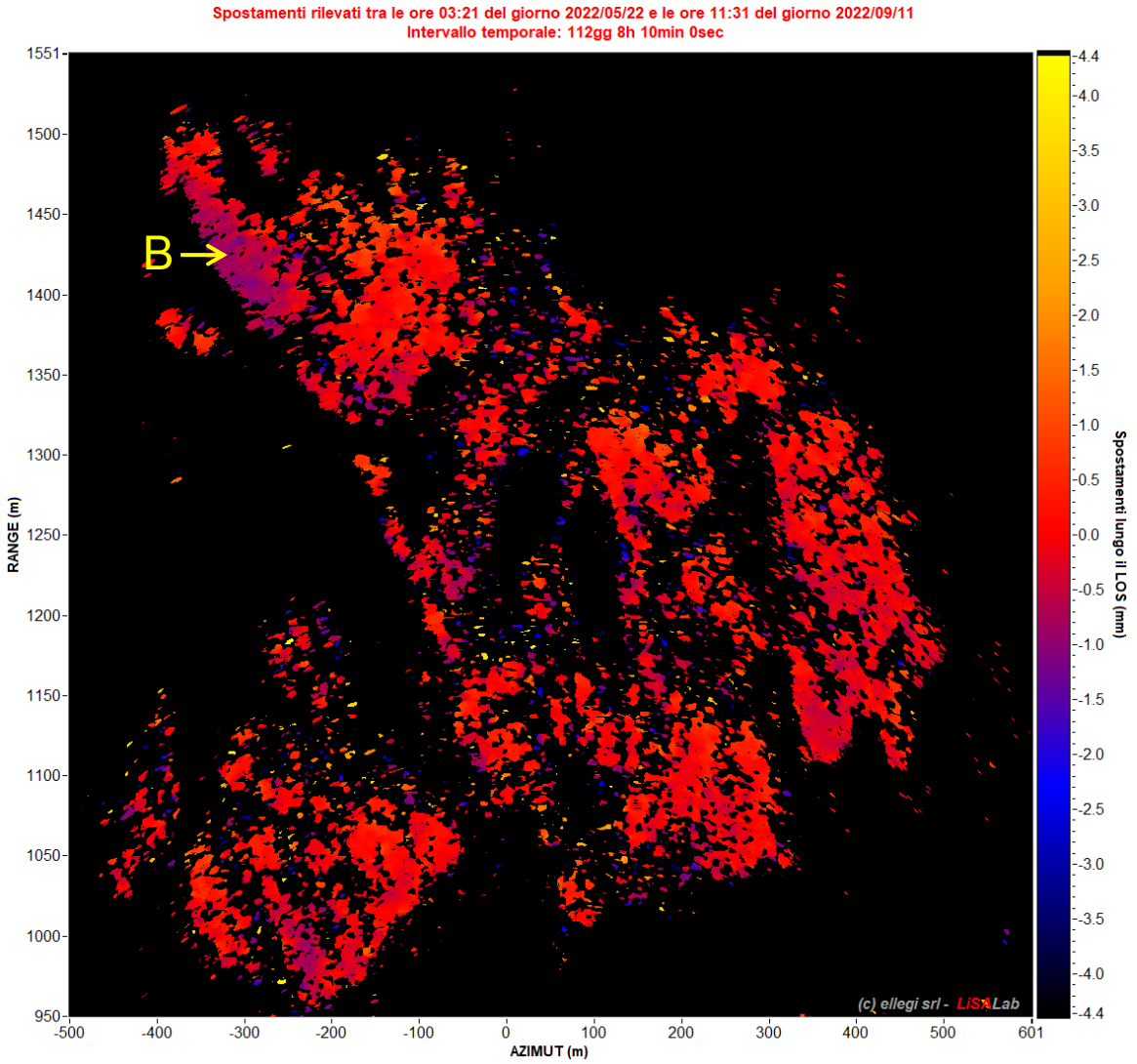



**Figura 29**: Mappa di spostamento a lungo termine bidimensionale 22 Maggio – 11 Settembre 2022 (112 giorni 8 ore e 10 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Far.*

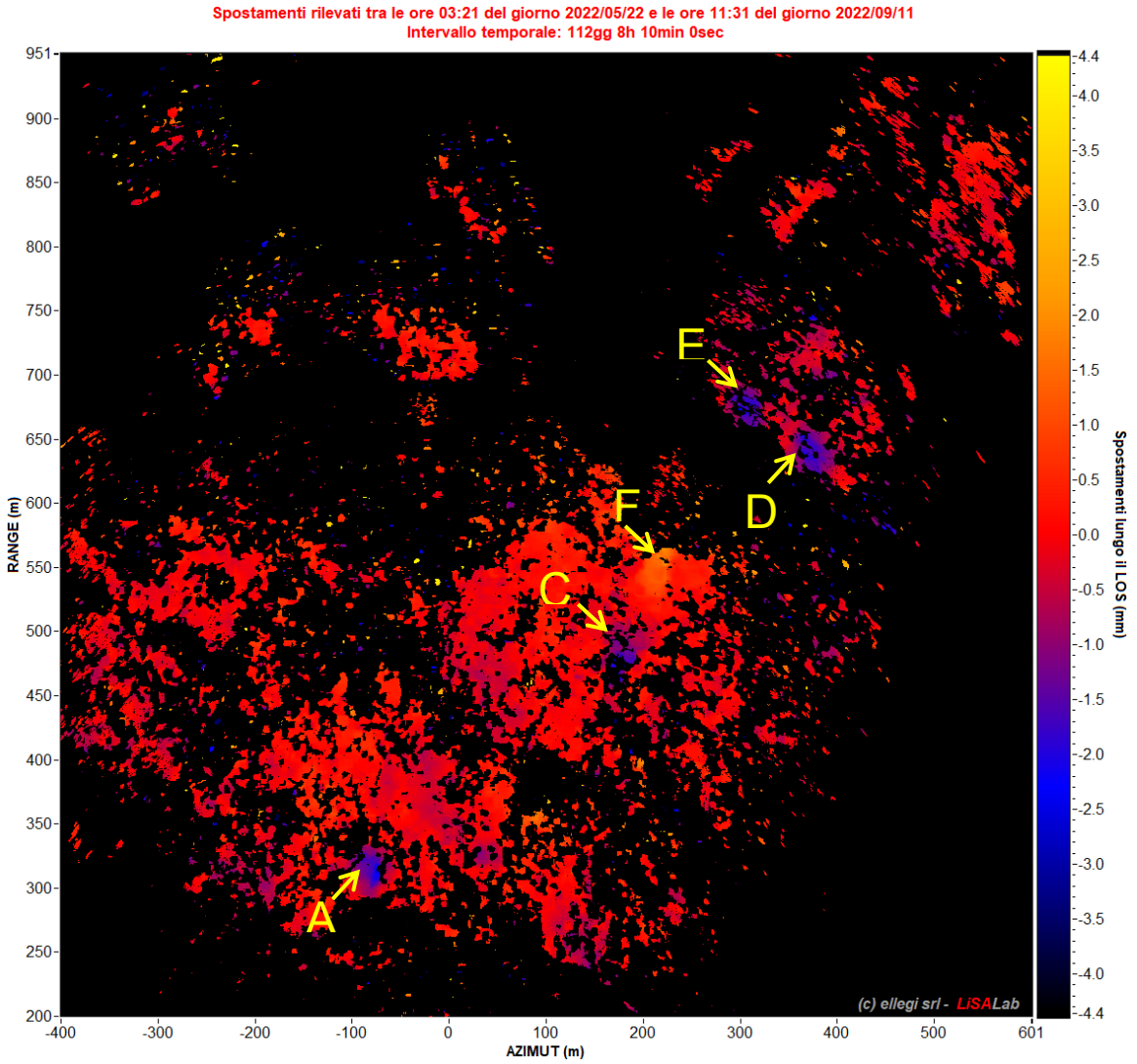



**Figura 30:** Mappa di spostamento a lungo termine bidimensionale 22 Maggio – 11 Settembre 2022 (112 giorni 8 ore e 10 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

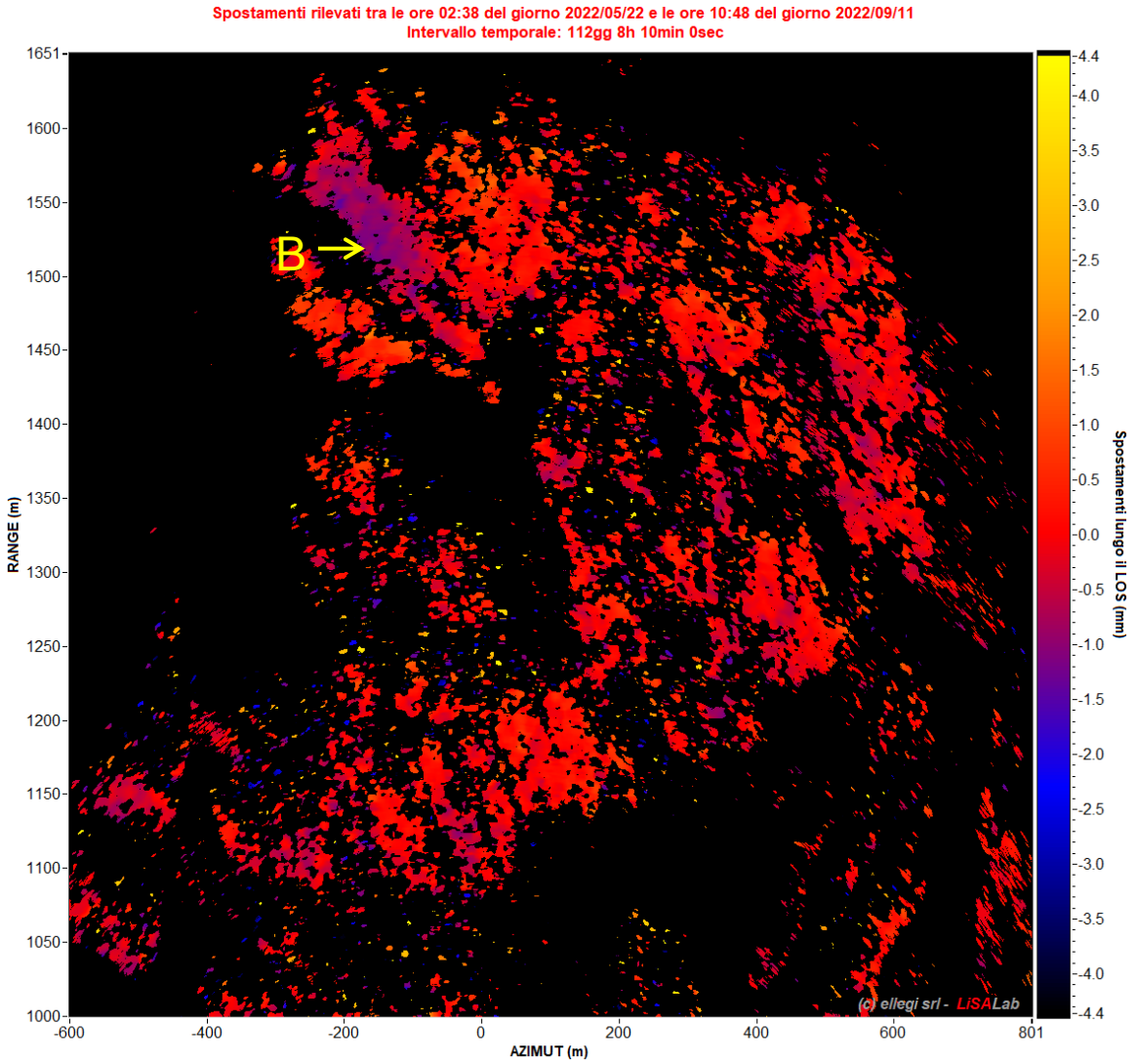



**Figura 31:** Mappa di spostamento a lungo termine bidimensionale 22 Maggio – 11 Settembre 2022 (112 giorni 8 ore e 10 minuti) – rappresentazione classica. Postazione *Est*, sottofinestra *Far.*

Nelle immagini seguenti (Figura 32 e Figura 33) è riportata la mappa degli spostamenti nel lungo termine (22 Maggio – 11 Settembre) proiettata sull'immagine ottica del versante. In entrambe le figure si riconosce bene l'ubicazione delle aree in movimento, eccetto l'area B che essendo a quote più elevate non appare visibile in questa vista ottica.

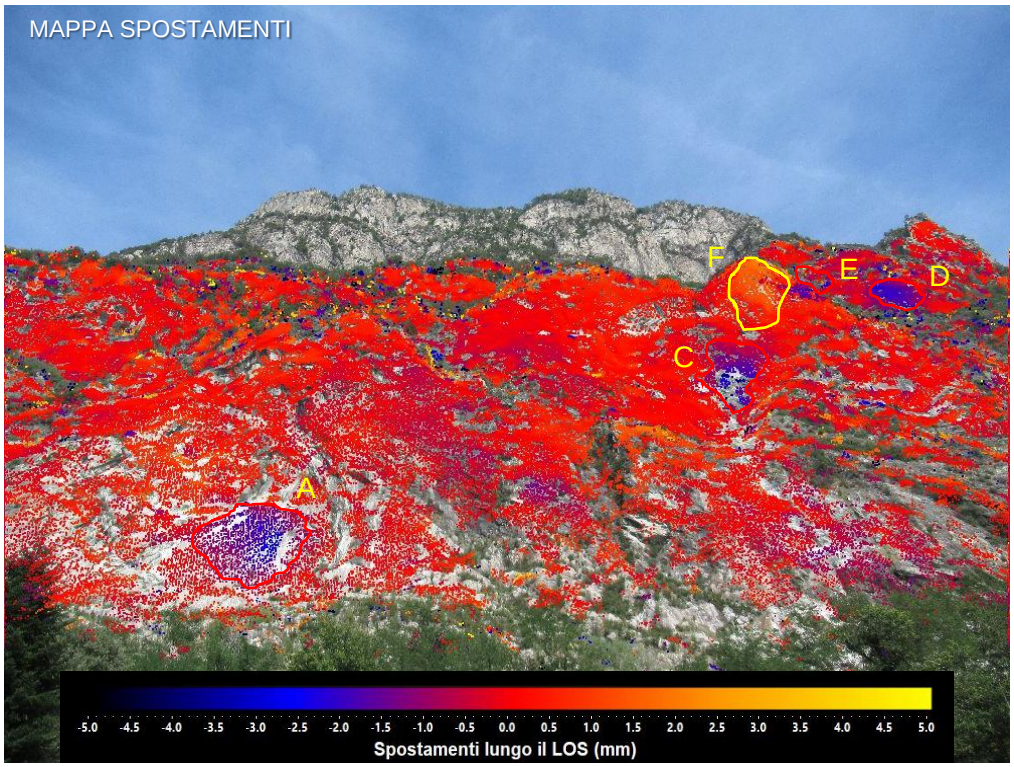



**Figura 32:** Mappa degli spostamenti 2D ottenuta plottando il dato radar dalla postazione *Est* del lungo termine (22 Maggio – 11 Settembre 2022) sull' immagine ottica del versante (i cerchi rossi e gialli indicano le aree in movimento).

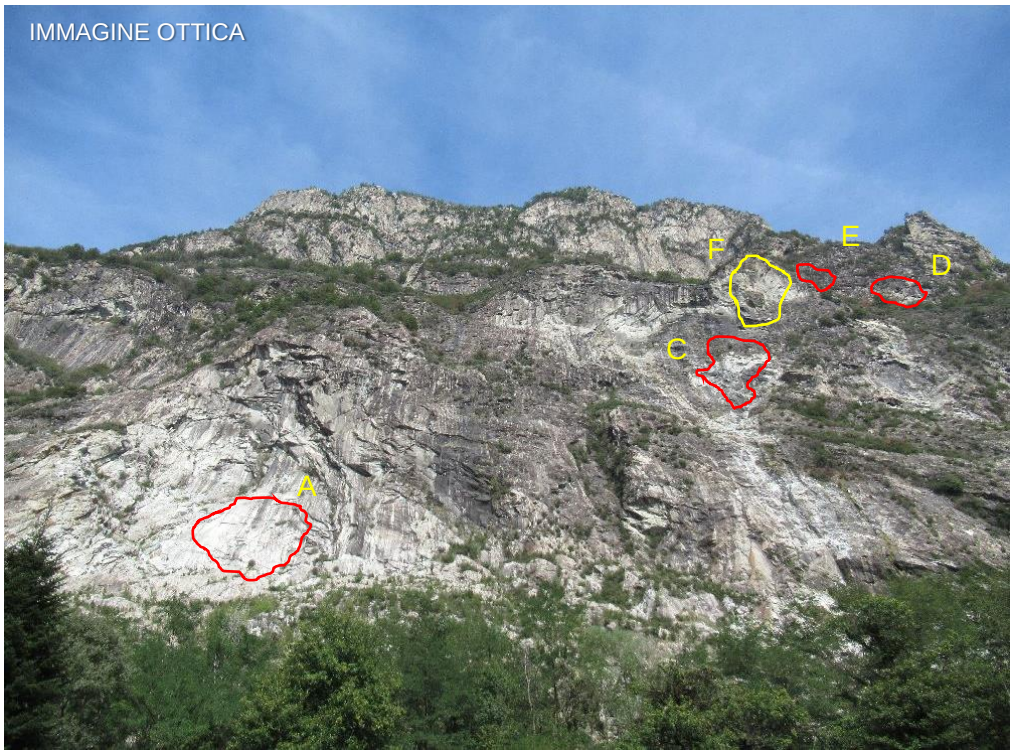



**Figura 33:** Immagine ottica del versante dalla postazione *Est* con ubicazione delle aree in movimento nel periodo 22 Maggio – 11 Settembre 2022 (cerchi rossi e gialli).

A seguito dell'individuazione delle aree in movimento sul versante è stata eseguita una analisi di dettaglio per determinare l'estensione areale di ciascuna di esse e calcolare i parametri statistici utili a definire, in termini quantitativi, lo spostamento accumulato nel corso del periodo di monitoraggio compreso tra Maggio 2022 e Settembre 2022.

Si riportano di seguito (da Figura 34 a Figura 40) i risultati dell'analisi statistica sulle aree individuate.

Al fine di definire con la maggior precisione possibile lo spostamento avvenuto sulle pareti rocciose monitorate, si è scelto di analizzare i dati raccolti dalla postazione che offriva la linea di osservazione (LOS) il più allineata possibile alla direzione di spostamento reale di ciascuna area in movimento. Per questo motivo, dato che le aree A, C, D, E ed F si collocano nelle pareti inferiori del versante, si è scelto di utilizzare i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near* (Figura 34, Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40), mentre, per l'area B, collocata a quote superiori, si è scelto di utilizzare i dati raccolti dalla postazione *Ovest*, sottofinestra *Far* (Figura 36). Per la sola area B si presentano anche i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Far* (Figura 35). A questo proposito, è interessante osservare che, nonostante la postazione di misura *Est* abbia una LOS con orientazione meno favorevole rispetto alla postazione Ovest, entrambe registrano spostamenti differenziali per l'area B. In particolare, dalla postazione *Est* si osservano movimenti in avvicinamento appena al di sopra della precisione strumentale (valore medio di -0.7 mm con deviazione standard di 0.5 mm) mentre dalla postazione *Ovest* si rilevano sempre spostamenti in avvicinamento ma superiori, e precisamente di –0.9 mm (valor medio) con deviazione standard 0.1 mm. Pertanto, pur avendo spostamenti vicini o leggermente superiori alla precisione strumentale, poiché da due punti differenti di acquisizione e da misure ottenute da due strumenti differenti, misurando lo stesso fenomeno, possiamo dedurre con un buon grado di sicurezza che effettivamente quell'area ha mostrato i movimenti rilevati. Attendiamo il prossimo Periodical Check per verificare se i movimenti rilevati avranno una progressione o una inversione di tendenza.

I valori medi di spostamento di tutti i pixel nel lungo termine (intervallo di monitoraggio Maggio 2022 - Settembre 2022) per le aree in avvicinamento variano da un minimo di -0.9 mm, con deviazione standard di 0.1 mm e 0.3 mm, rispettivamente per le aree B (vista *Ovest-Far*) e C (vista *Est-Near*) ad un massimo di -1.3 mm, con deviazione standard di 0.3 mm, registrato per l'area E (vista *Est-Near*). L'area F in allontanamento mostra invece valori medi di +1.3 mm con deviazione standard di 0.3 mm.

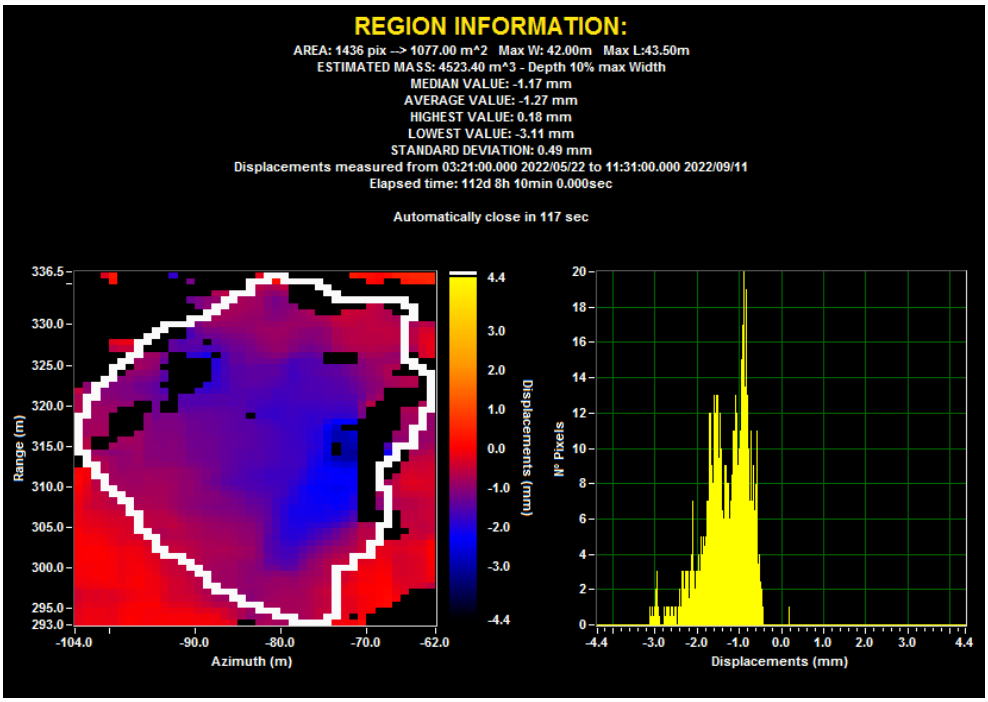



**Figura 34:** Risultati dell'analisi statistica sull'area A utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

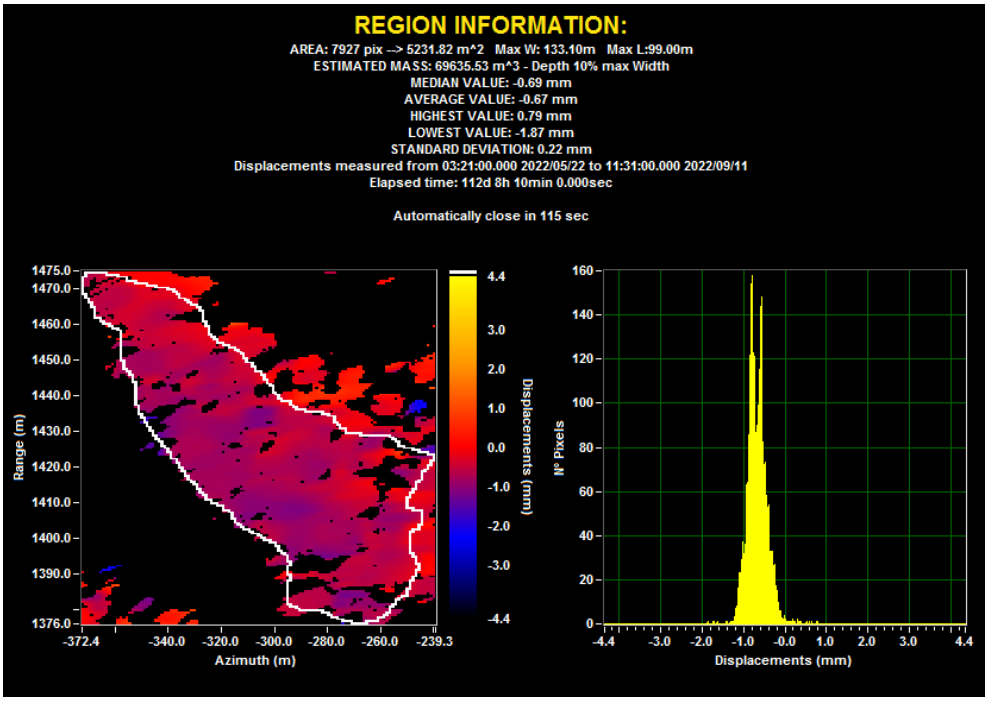



**Figura 35:** Risultati dell'analisi statistica sull'area B utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Far*.

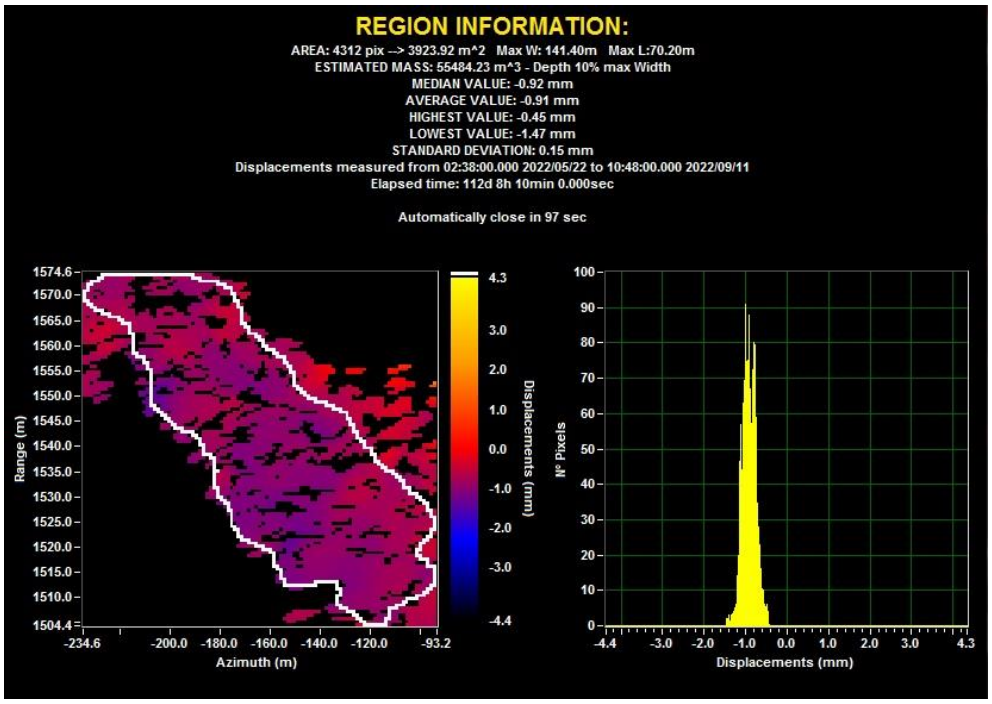



**Figura 36:** Risultati dell'analisi statistica sull'area B utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Ovest*, sottofinestra *Far*.

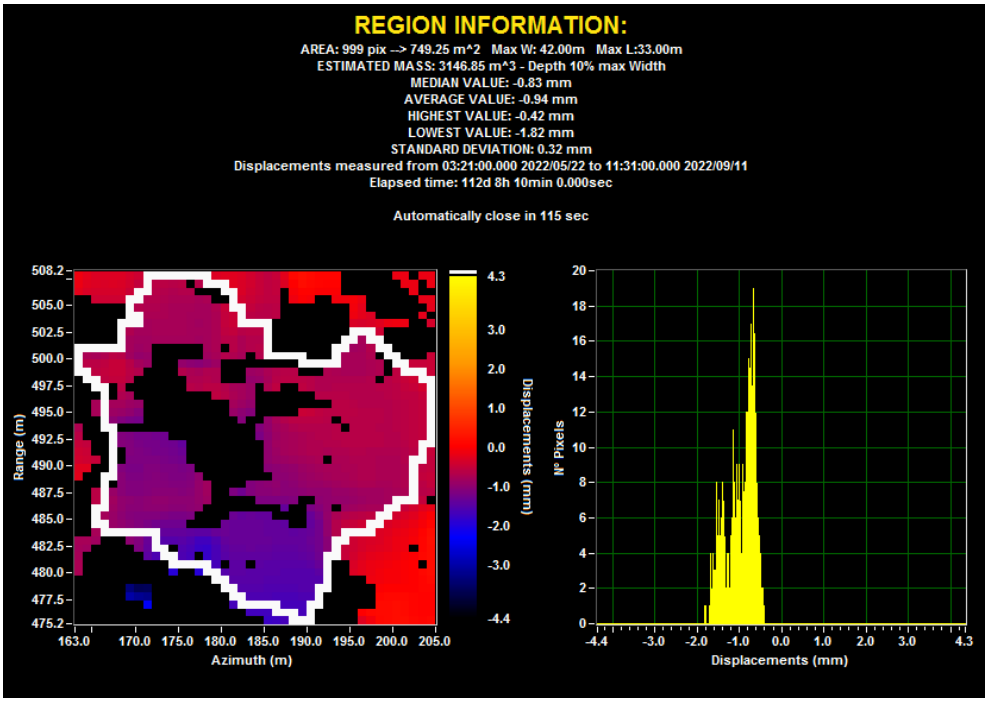



**Figura 37:** Risultati dell'analisi statistica sull'area C utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

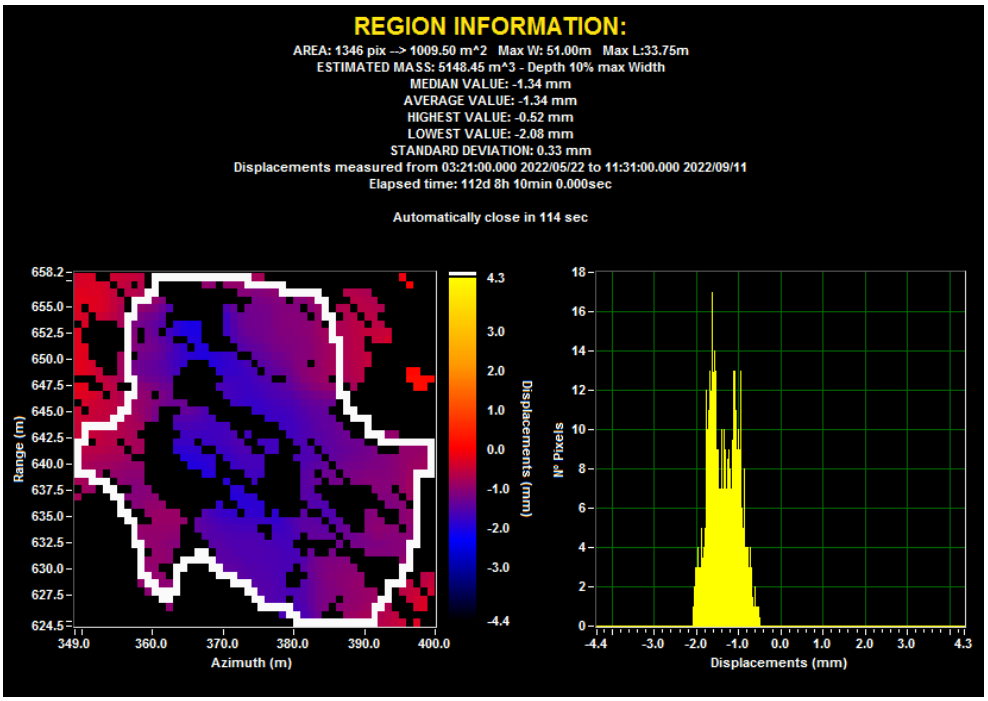



**Figura 38:** Risultati dell'analisi statistica sull'area D utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

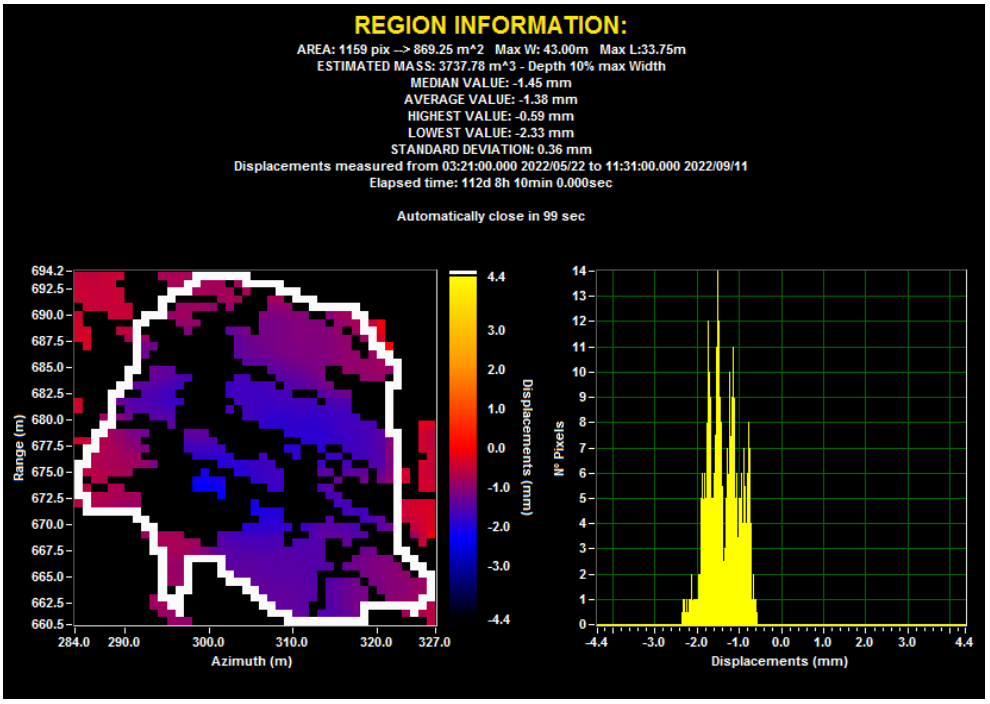



**Figura 39:** Risultati dell'analisi statistica sull'area E utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

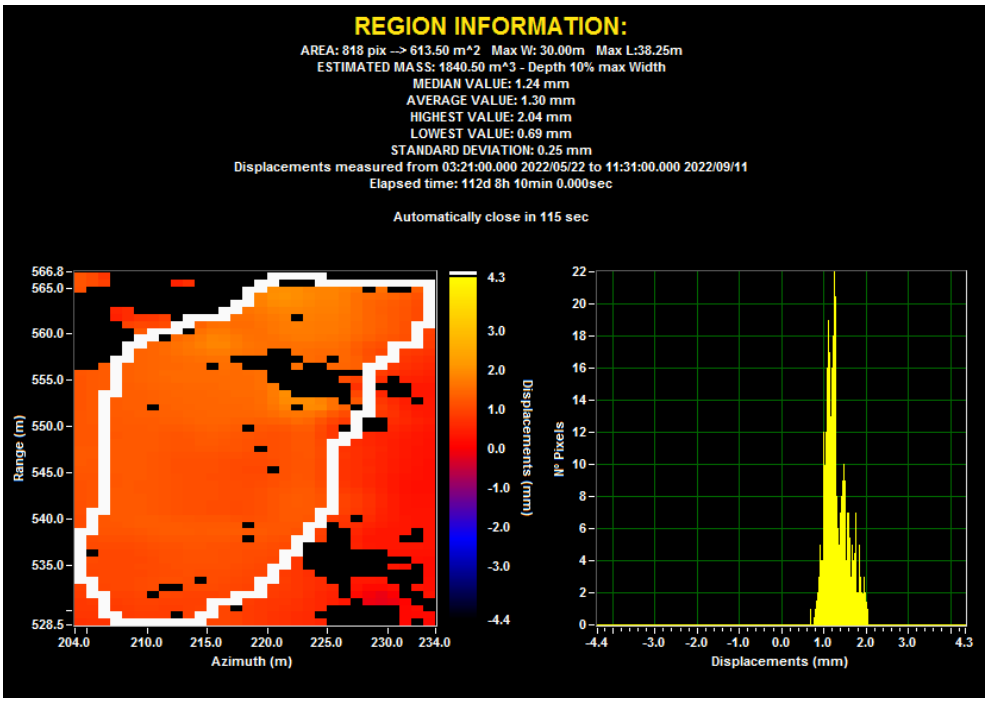



**Figura 40:** Risultati dell'analisi statistica sull'area F utilizzando i dati raccolti dalla postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

## *Elaborazione dei risultati in 3 dimensioni*

Si è provveduto ad elaborare e geo-referenziare i risultati su Point Cloud con risoluzione a 10 cm..

Facciamo presente che questo Point Cloud, fornito dalla Comunità montana della Valchiavenna e ottenuto da rilievo Lidar, ha una ottima risoluzione per le aree del versante poste nelle immediate vicinanze dell'abitato ed in prossimità della Postazione *Est*, ma non copre a sufficienza le aree del versante poste a quote più elevate (quelle analizzate con la sottofinestra *Far*). Inoltre, il Point Cloud non copre a sufficienza l'area immediatamente sopra la località Foppa dove si colloca il pilastro roccioso individuato come attivo ed oggetto di monitoraggio.

Se fosse possibile aumentare i punti acquisiti dal Lidar a copertura di queste aree ed estendere ulteriormente la ripresa nella parte Ovest del pilastro roccioso attivo, si avrebbe un miglioramento della qualità della restituzione in tre dimensioni permettendo di raggiungere una migliore precisione nell' individuazione di eventuali aree in movimento nei settori sottocampionati della nuvola di punti.

Prima di integrare il Point Cloud con il dato radar, è stato necessario trasformare e rielaborare il file originale eliminando le aree non coperte dal segnale radar e/o vegetate e ri-campionarlo con una risoluzione a 40 cm per renderlo più maneggiabile.

La visualizzazione dei dati in tre dimensioni permette di localizzare in maniera univoca la posizione del dato radar all'interno della scena osservata e di facilitare il confronto con gli spostamenti rilevati sul versante.

La georeferenziazione è stata eseguita per i dati da entrambe le postazioni e sottofinestre.

Le mappe nelle figure seguenti (da Figura 41 a Figura 51) mostrano i risultati ottenuti nella seconda campagna di misura (Maggio 2022 – Settembre 2022) georeferenziati sul Point Cloud 3D. Per ogni vista vengono mostrati i risultati dell'analisi sul breve e sul lungo termine.

## Mappe di spostamento 3D a breve termine: 9 Settembre 2022 – 13 Settembre 2022 georeferenziate su Point Cloud

Nelle Figure seguenti (da Figura 41 a Figura 45) vengono mostrate le mappe di spostamento a breve termine in 3D con i dati ottenuti dalle diverse postazioni e sottofinestre. La Figura 45 mostra in una sola vista l'unione di tutte le mappe presentate per il breve termine.

Da queste mappe non si notano spostamenti significativi sul versante monitorato. I pixel di colore blu e giallo che talvolta compaiono nelle mappe sono localizzati ai bordi delle pareti rocciose e/o al limite della vegetazione e sono dovuti a locali effetti di rumore residui che non è stato possibile rimuovere durante il processamento del dato radar.

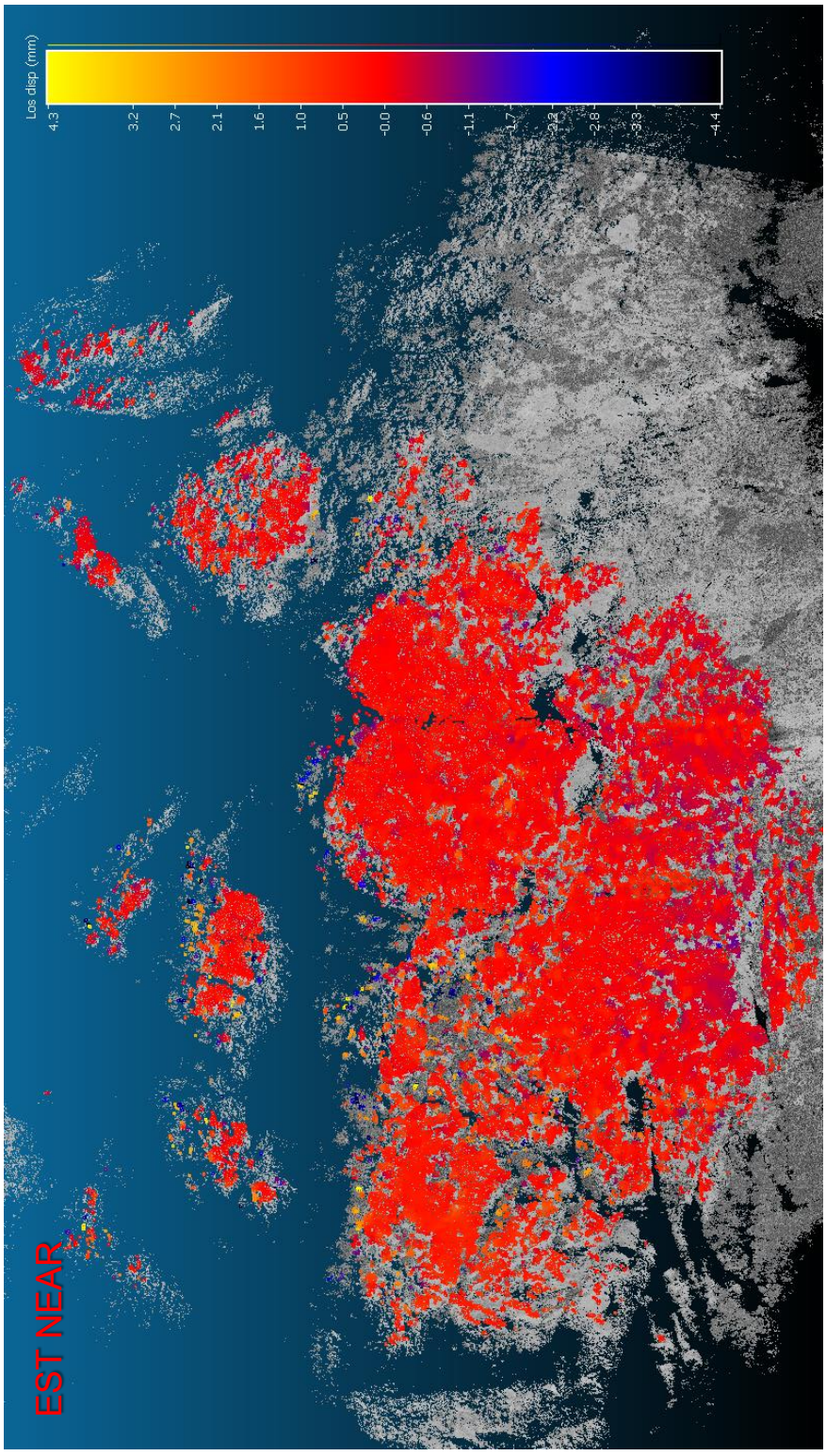



**Figura 41:** Mappa di spostamento tridimensionale a breve termine dal 9 al 13 Settembre 2022 elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

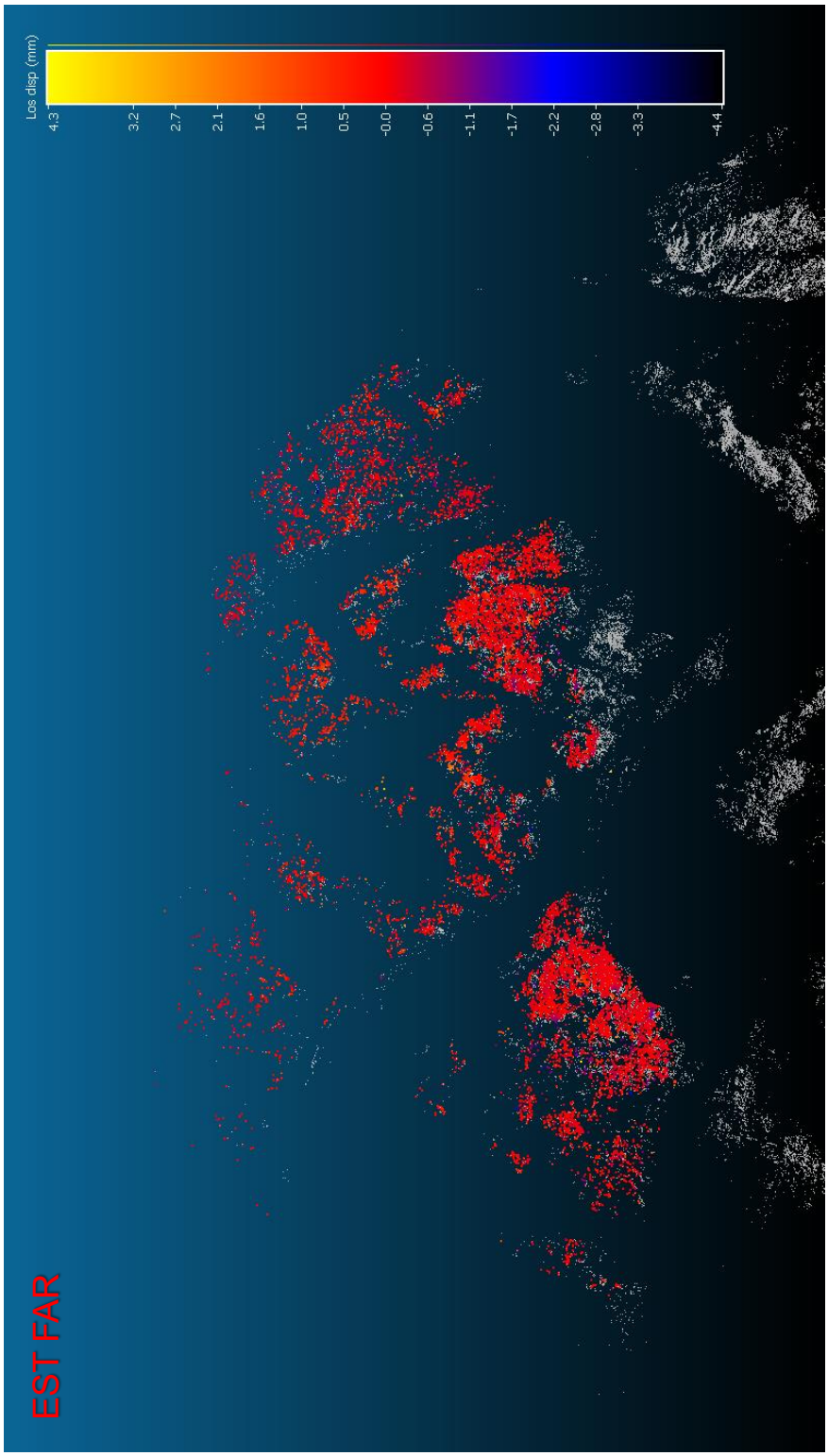



**Figura 42:** Mappa di spostamento tridimensionale a breve termine dal 9 al 13 Settembre 2022 elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Est*, sottofinestra *Far.*

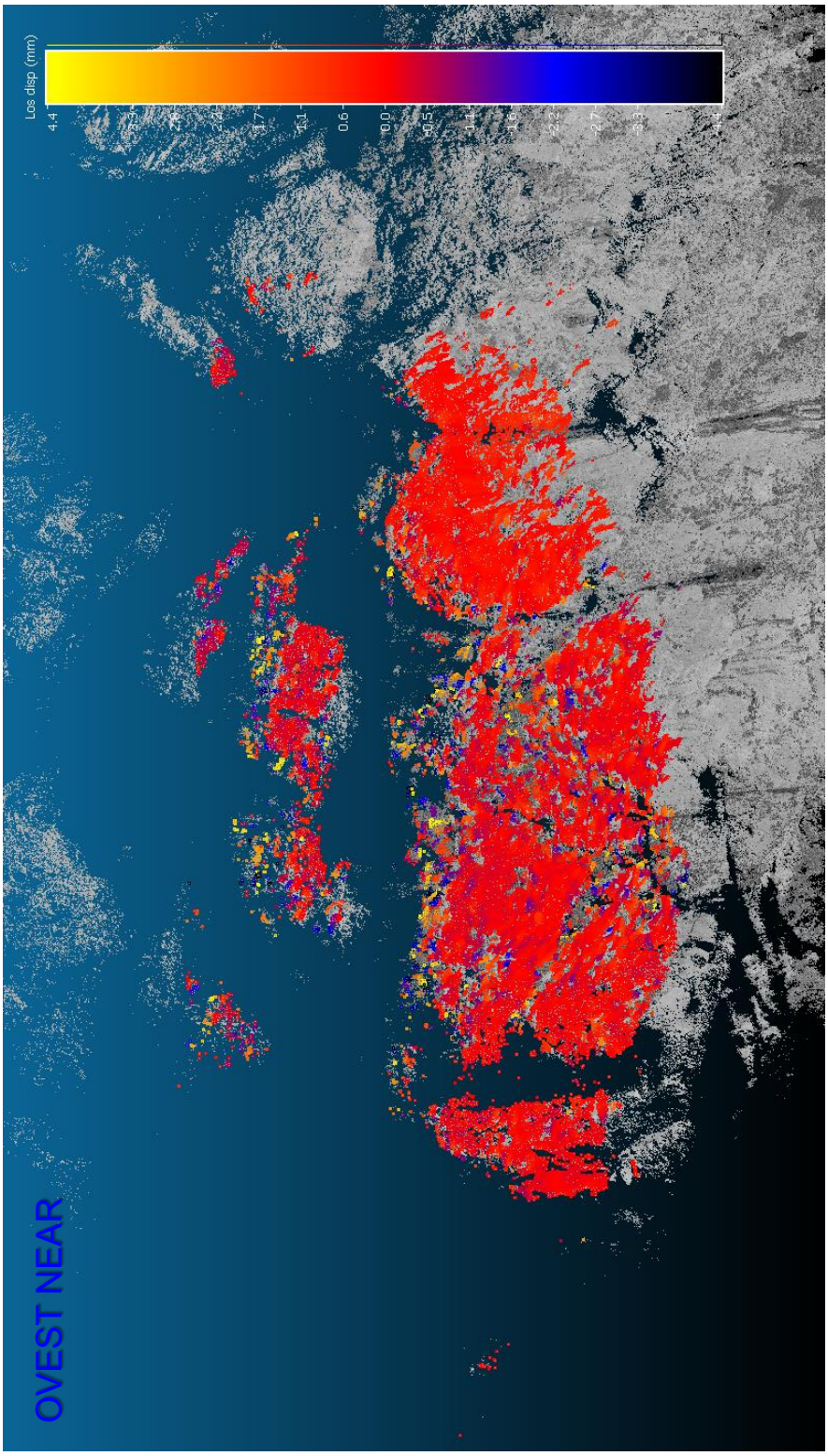



**Figura 43:** Mappa di spostamento tridimensionale a breve termine dal 9 al 13 Settembre 2022 elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Near.*

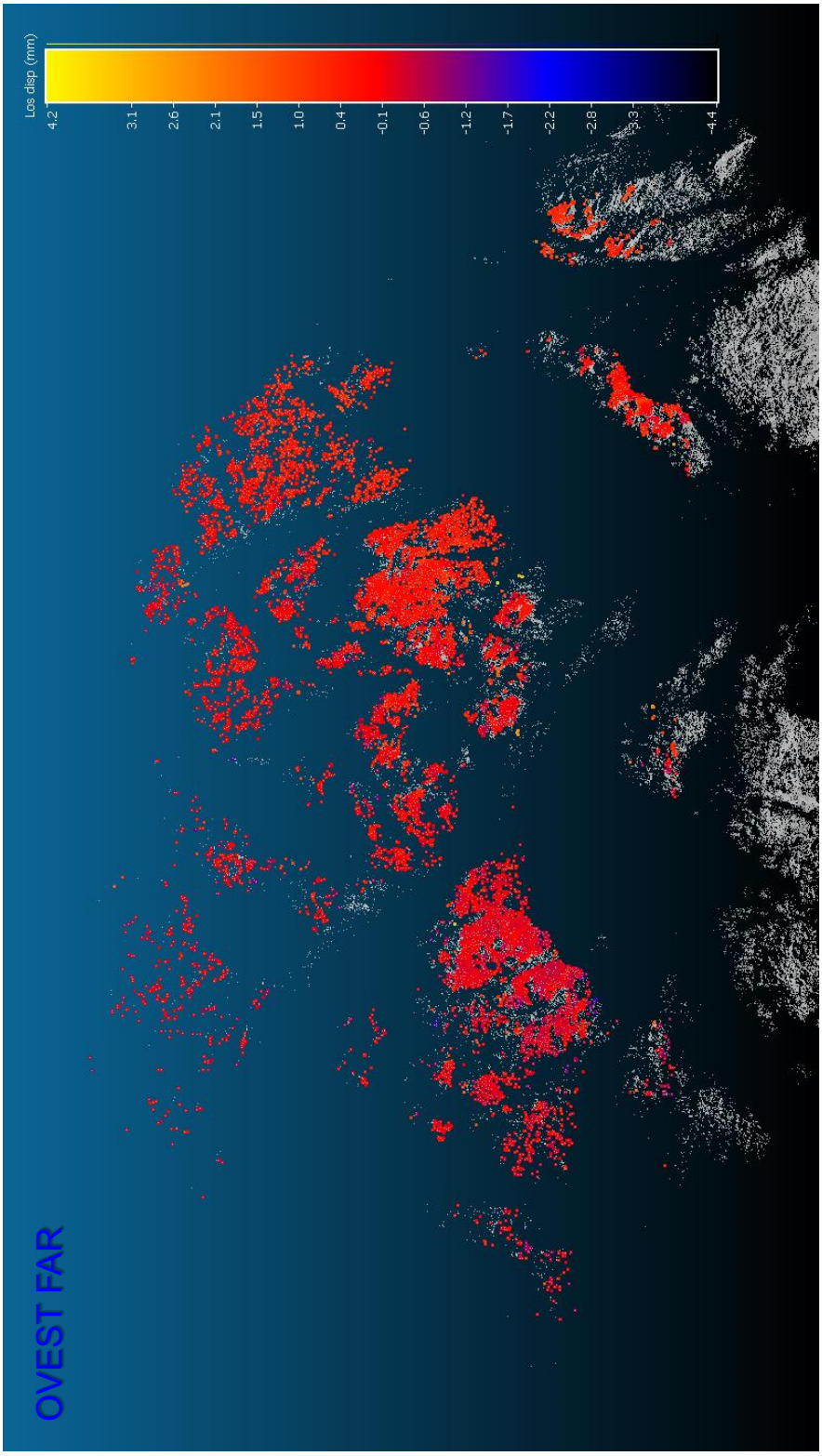



**Figura 44:** Mappa di spostamento tridimensionale a breve termine dal 9 al 13 Settembre 2022 elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Far.*

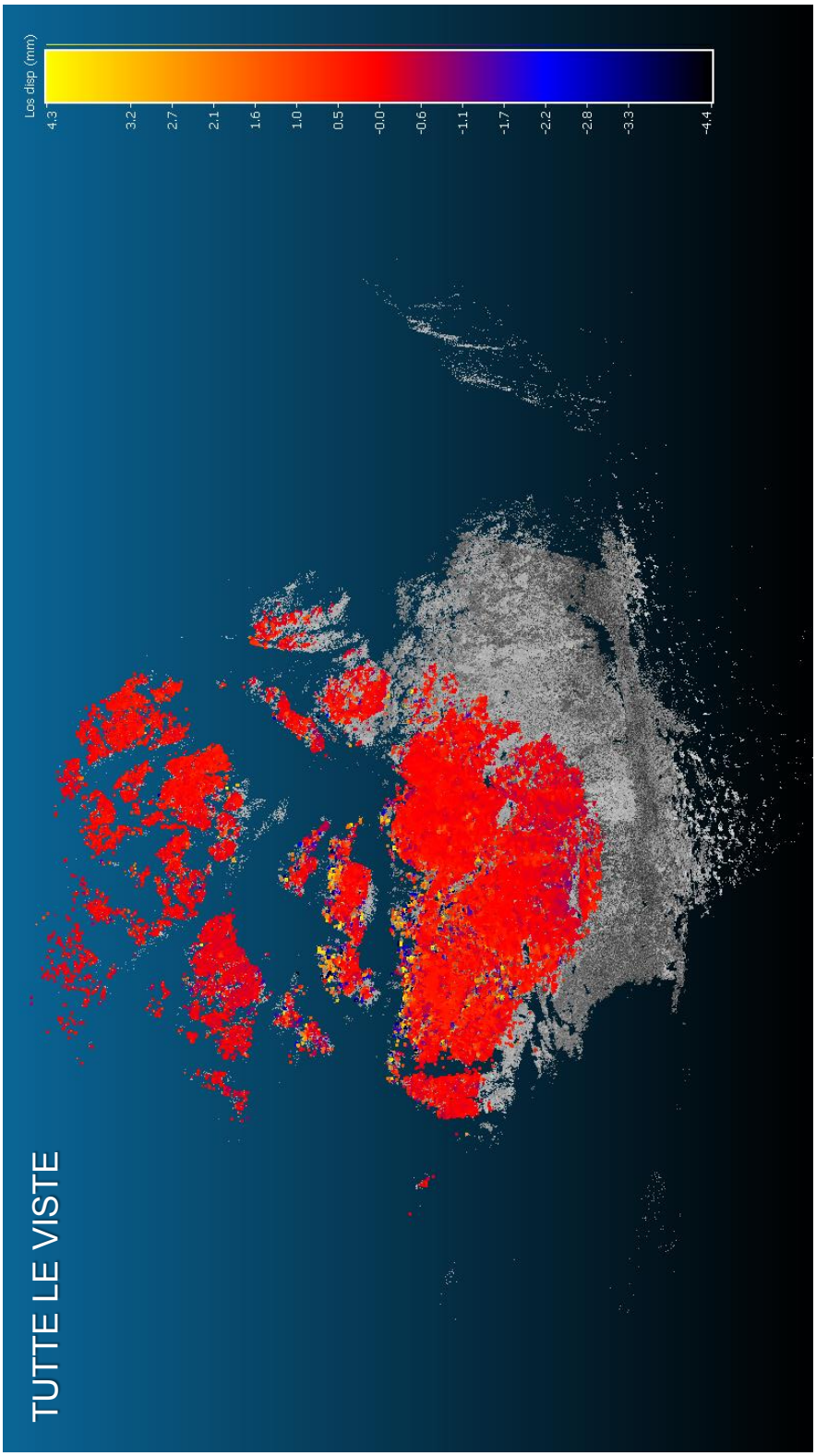



**Figura 45:** Unione di tutte le mappe di spostamento del breve termine, periodo dal 9 al 13 Settembre 2022, proiettate sul Point Cloud.

## Mappe di spostamento 3D a lungo termine: 22 Maggio 2022 – 11 Settembre 2022 georeferenziate su Point Cloud

Nelle Figure seguenti (da Figura 46 a Figura 50) sono mostrate le mappe di spostamento a lungo termine in 3D con i dati ottenuti dalle diverse postazioni e sottofinestre. La Figura 50 mostra in una singola vista l'unione di tutte le mappe presentate per il lungo termine.
Queste mappe permettono di definire chiaramente la posizione delle aree in movimento (A,C,D,E,F), già introdotte nei paragrafi precedenti. In particolare, nella tabella seguente si inseriscono le coordinate radar e le quote dei punti baricentrici individuati per ciascuna area in movimento nella sottofinestra *Near*.

| AREA | Est (m) | Nord (m) | Quota min (m) | Quota max (m) |
|---|---|---|---|---|
| A | 534889.2 | 5119369.8 | 336 | 377 |
| C | 535155.9 | 5119318.9 | 478 | 521 |
| D | 535376.1 | 5119298.6 | 643 | 675 |
| E | 535324.9 | 5119346.7 | 669 | 713 |
| F | 535197.4 | 5119306.5 | 566 | 632 |

Da quanto visibile nelle immagini ottiche in nostro possesso, l'area A è associabile ad una superficie liscia che potrebbe corrispondere ad un piano di scivolamento o ad altra superficie di discontinuità che immerge verso S-SW e i cui limiti a E ed W sono particolarmente evidenti e mostrano un netto piano di discontinuità laterale, così come la parte sommitale. Al contrario, la parte inferiore mostra un gradiente più dolce tra zone ferme e zone in movimento. L'area C si colloca invece su un'area di recente crollo (zona bianca visibile nelle immagini ottiche) e presenta spostamenti superiore nella pozione basale. Questa caratteristica porta ad ipotizzare che i blocchi interessati si stiano lentamente muovendo verso il basso con una dinamica di scivolamento traslazionale. Ciò che sembra emergere dalle immagini ottiche è infatti la presenza di roccia intensamente fratturata con giunti e discontinuità visibili nella parte inferiore dell'area in esame. Le aree D ed E, posizionate a quote più elevate, corrispondono a porzioni di parete che non sembrano essere state interessate da recenti crolli e su cui è difficile individuare, sulla base delle sole immagini ottiche, la presenza di eventuali fratture, data soprattutto la distanza significativa dalle postazioni di misura. E' interessante notare, per queste aree, come gli spostamenti siano comunque omogeneamente distribuite. L'area F è l'unica area tra quelle individuate nel corso di questa campagna ad essere caratterizzata da spostamenti positivi, e cioè in allontanamento dal sistema, e presenta tassi di movimento maggiori nella parte sommitale. Questo fa ipotizzare una dinamica caratterizzata da possibile ribaltamento del blocco e la presenza di fratture nelle aree immediatamente retrostanti la sommità dell'area in movimento. E' interessante notare però che la direzione di movimento è in realtà opposta a quella che ci aspetterebbe in caso di ribaltamento con una geometria di questo tipo.

In Figura 51 e Figura 52 si ripropone la vista *Est* sottofinestra *Near* con indicazione nella prima della mappa di spostamento relativa al lungo termine mentre nella seconda i contorni delle aree individuate. Le aree in avvicinamento sono contornate con linee rosse mentre le aree in allontanamento sono contornate con linee gialle. Purtroppo, l'area B non è identificabile in queste immagini a causa della scarsa densità di punti della nuvola 3D nella sottofinestra *Far* ma verrà analizzata più nel dettaglio nel seguito sulla base di un rilievo 3D su base raster che permette di individuare e studiare anche le aree sotto campionate della nuvola di punti.

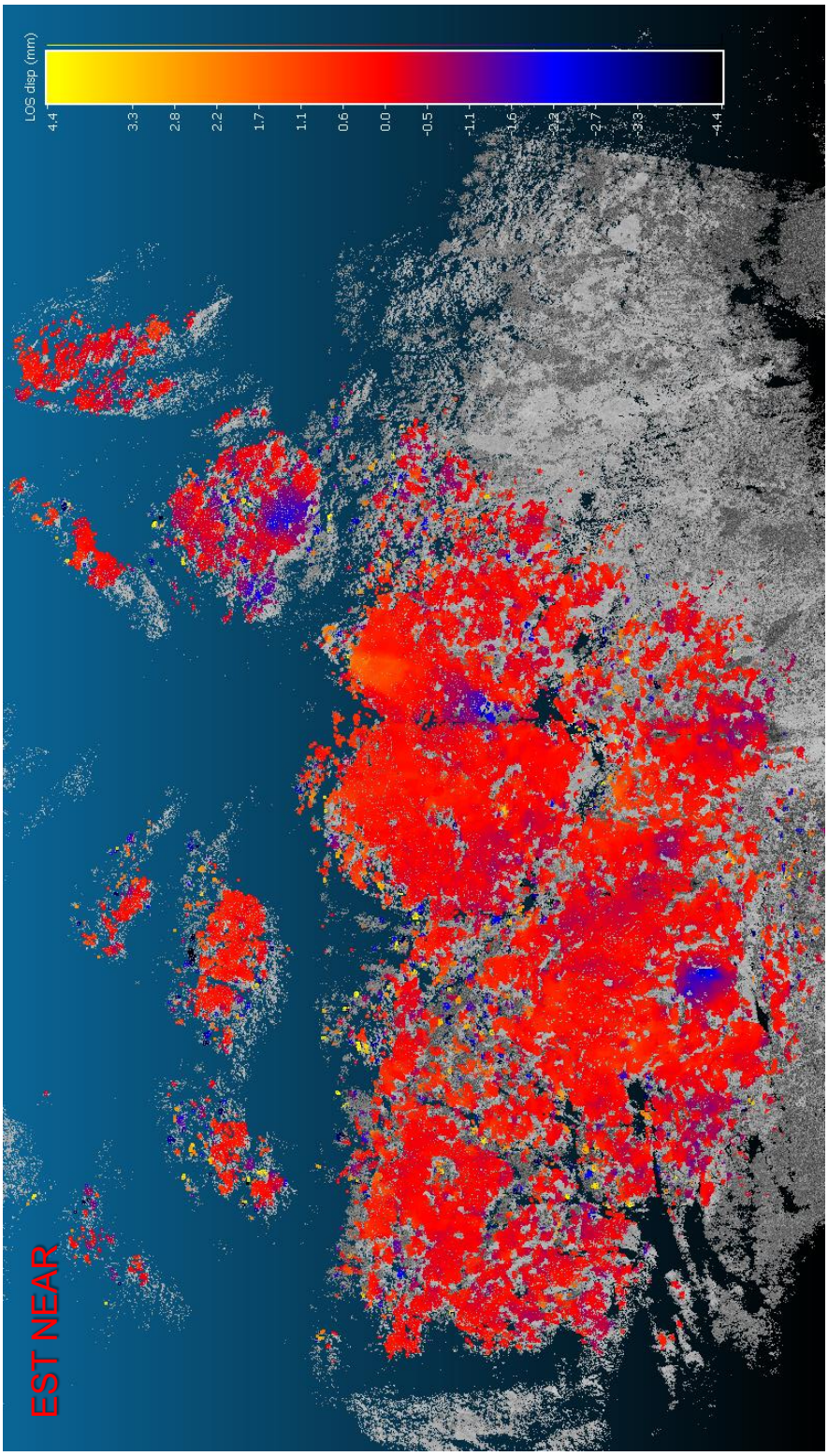



**Figura 46:** Mappa di spostamento tridimensionale a lungo termine, dal 22 Maggio al 11 Settembre 2022, elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

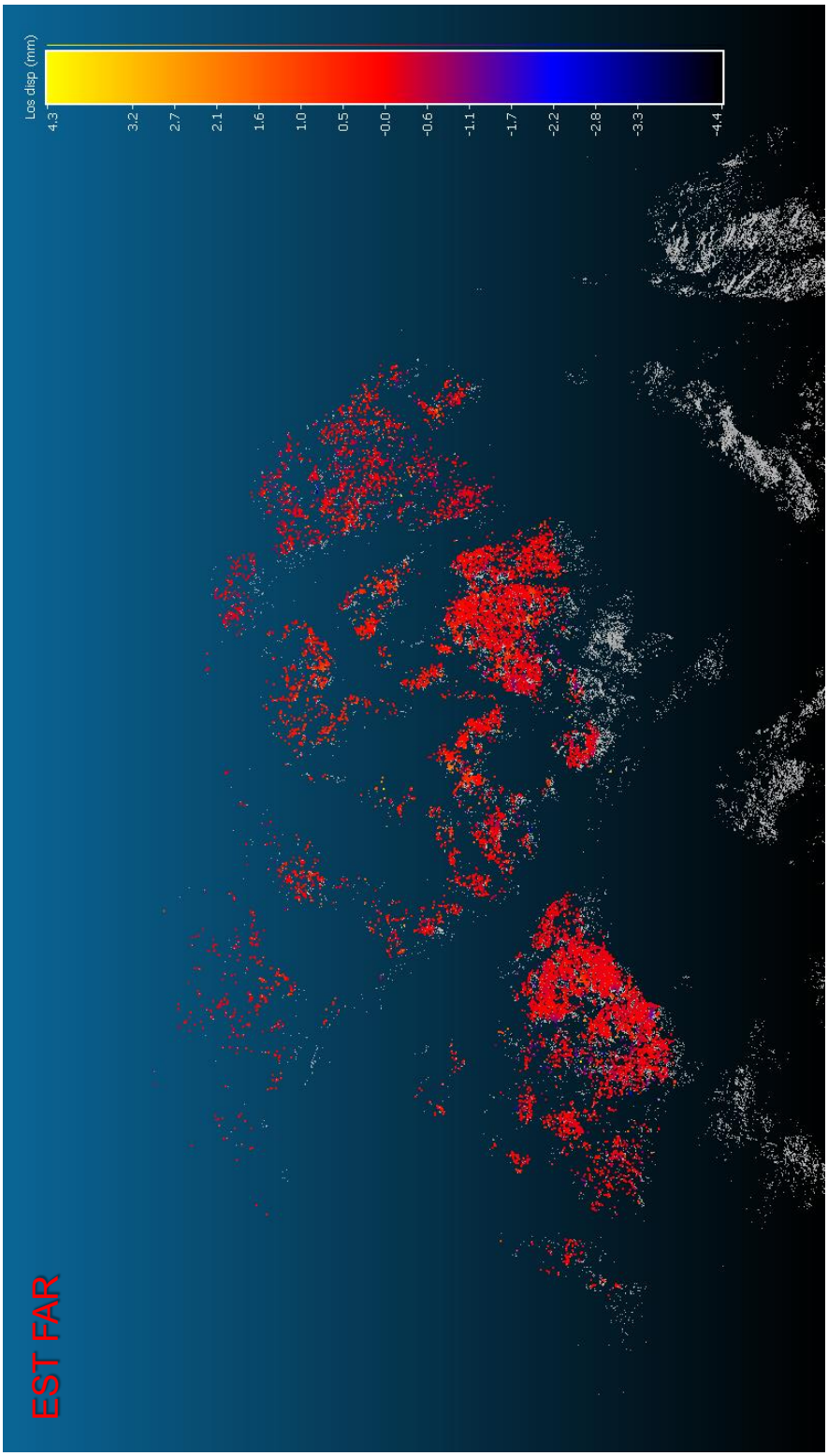



**Figura 47:** Mappa di spostamento tridimensionale a lungo termine, dal 22 Maggio al 11 Settembre 2022, elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Est*, sottofinestra *Far.*

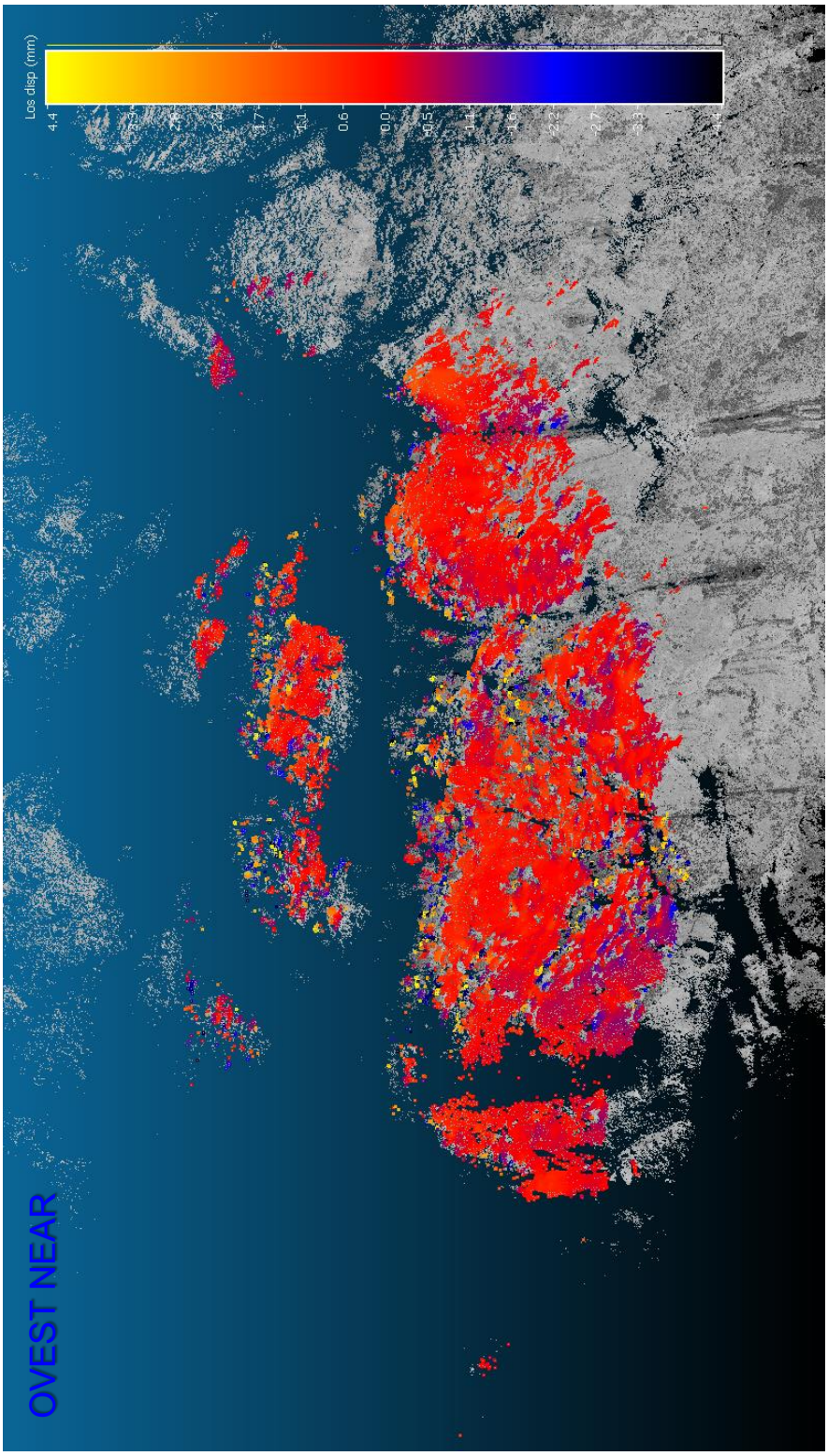



**Figura 48:** Mappa di spostamento tridimensionale a lungo termine, dal 22 Maggio al 11 Settembre 2022, elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Near*.

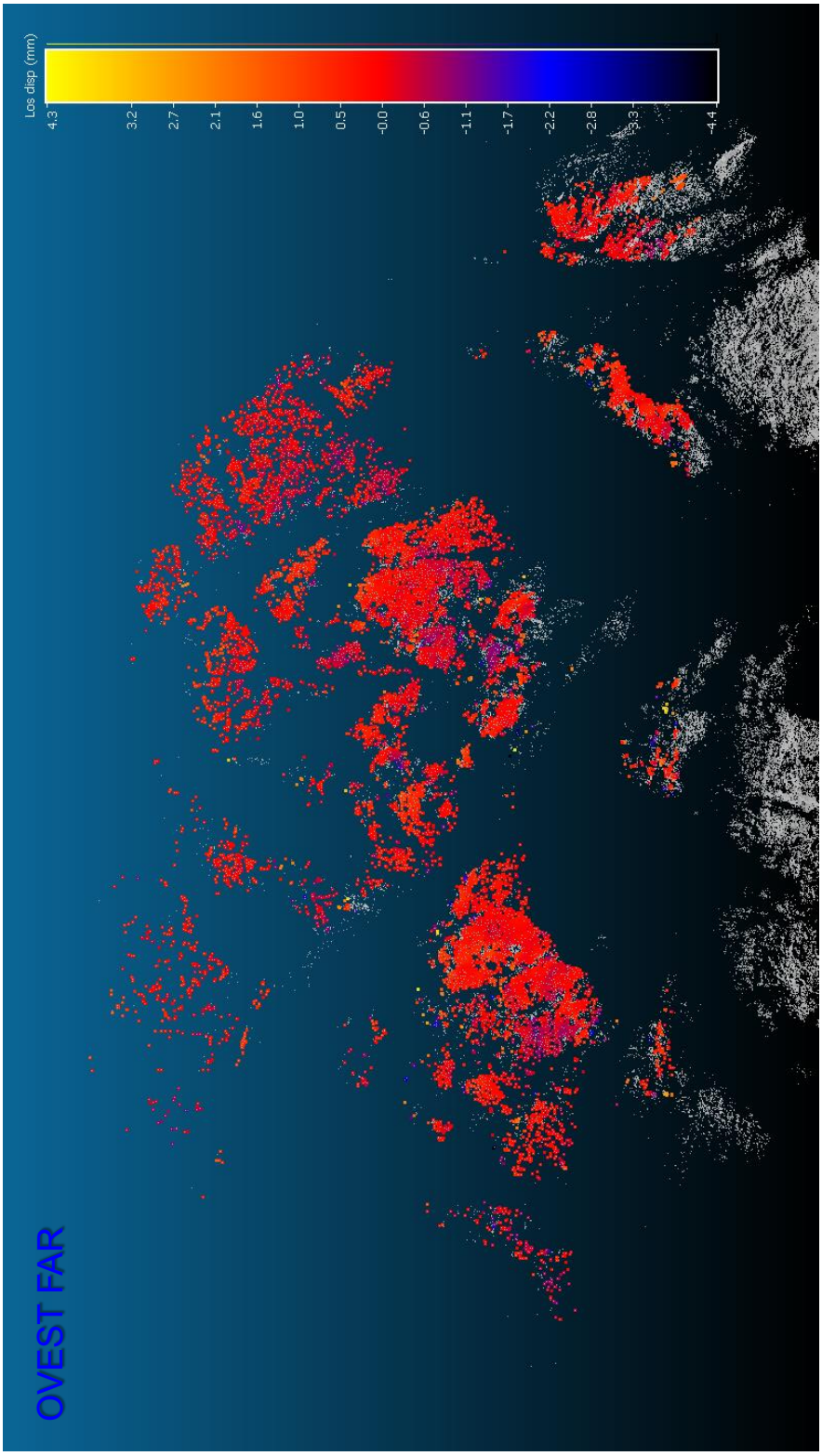



**Figura 49:** Mappa di spostamento tridimensionale a lungo termine, dal 22 Maggio al 11 Settembre 2022, elaborata su Point Cloud 3D. Postazione *Ovest*, sottofinestra *Far.*

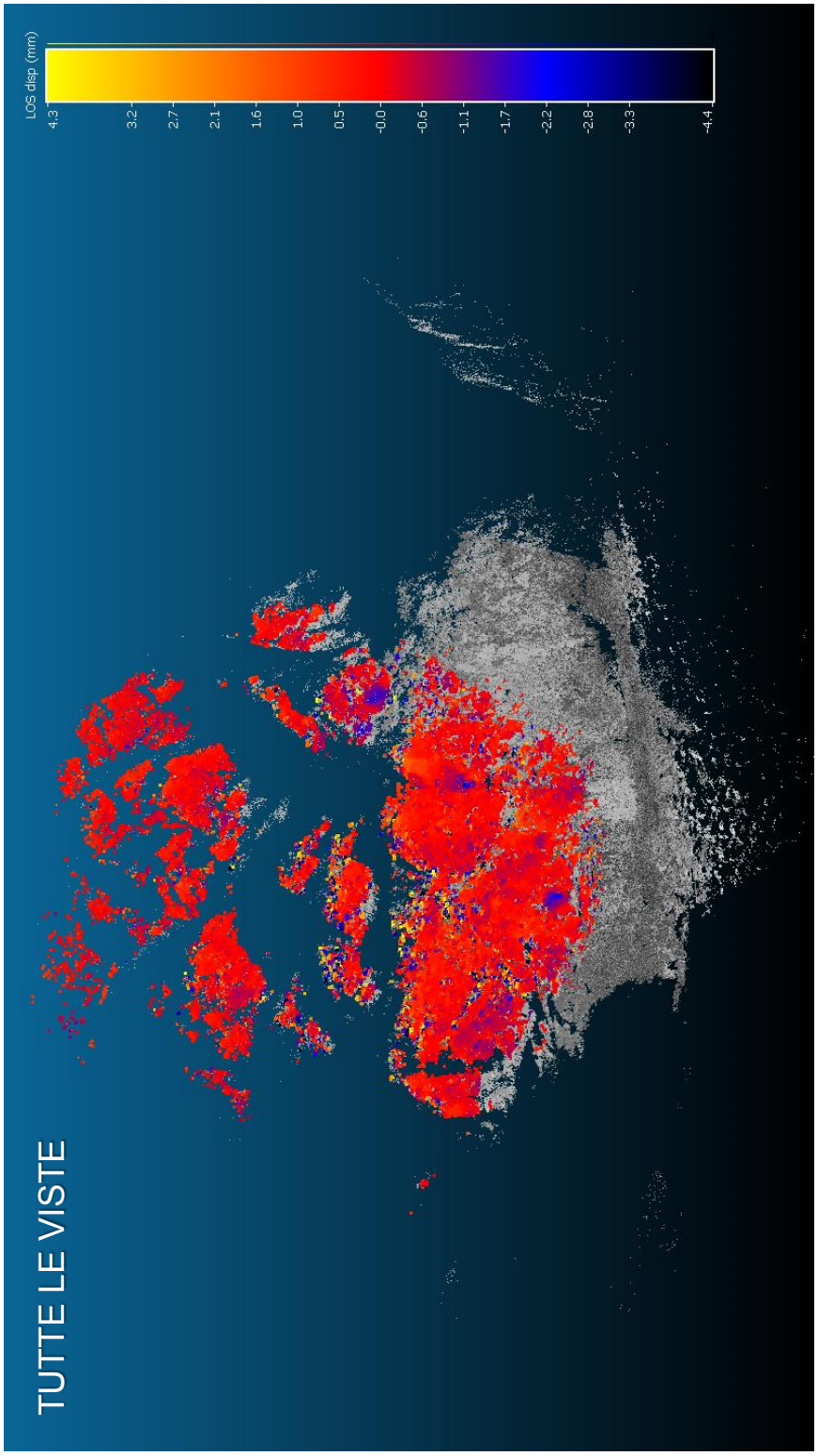



**Figura 50:** Unione di tutte le mappe di spostamento del lungo termine, periodo 22 Maggio - Settembre 2022, proiettate sul Point Cloud.

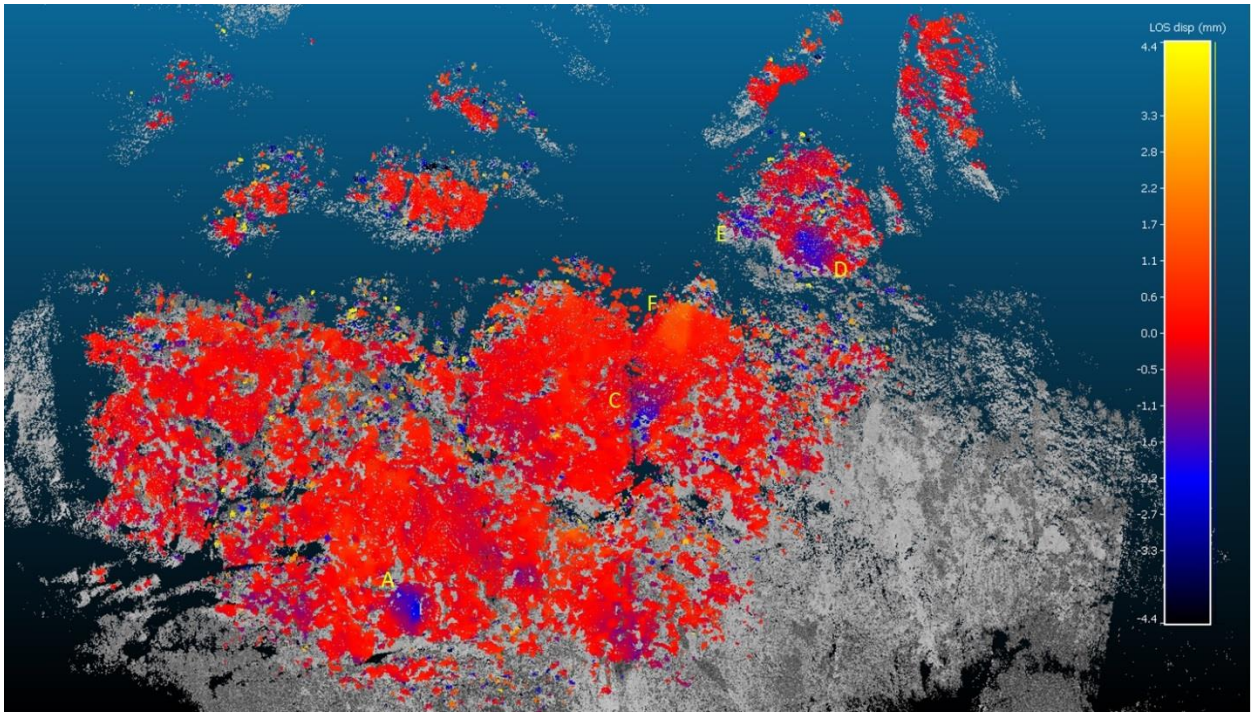



**Figura 51:** Indicazione delle aree in movimento (A,C,D,E,F) su mappa di spostamento in 3D per il periodo 22 Maggio - 11 Settembre 2022.

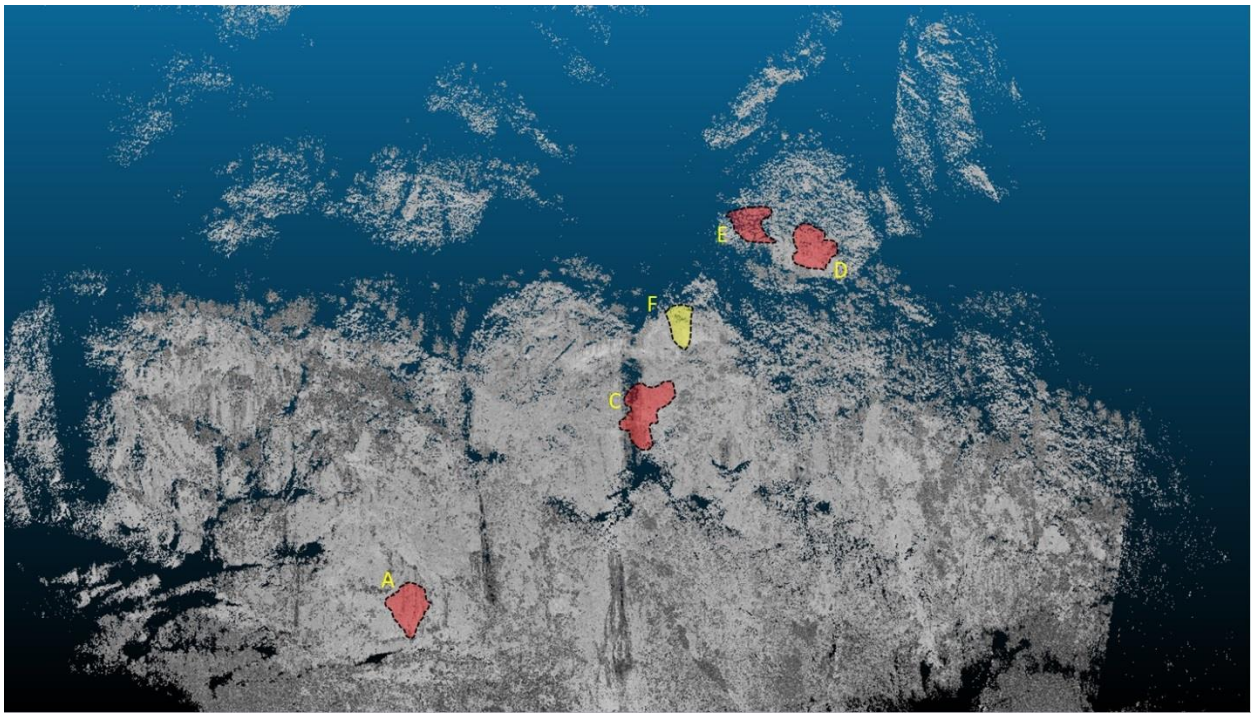


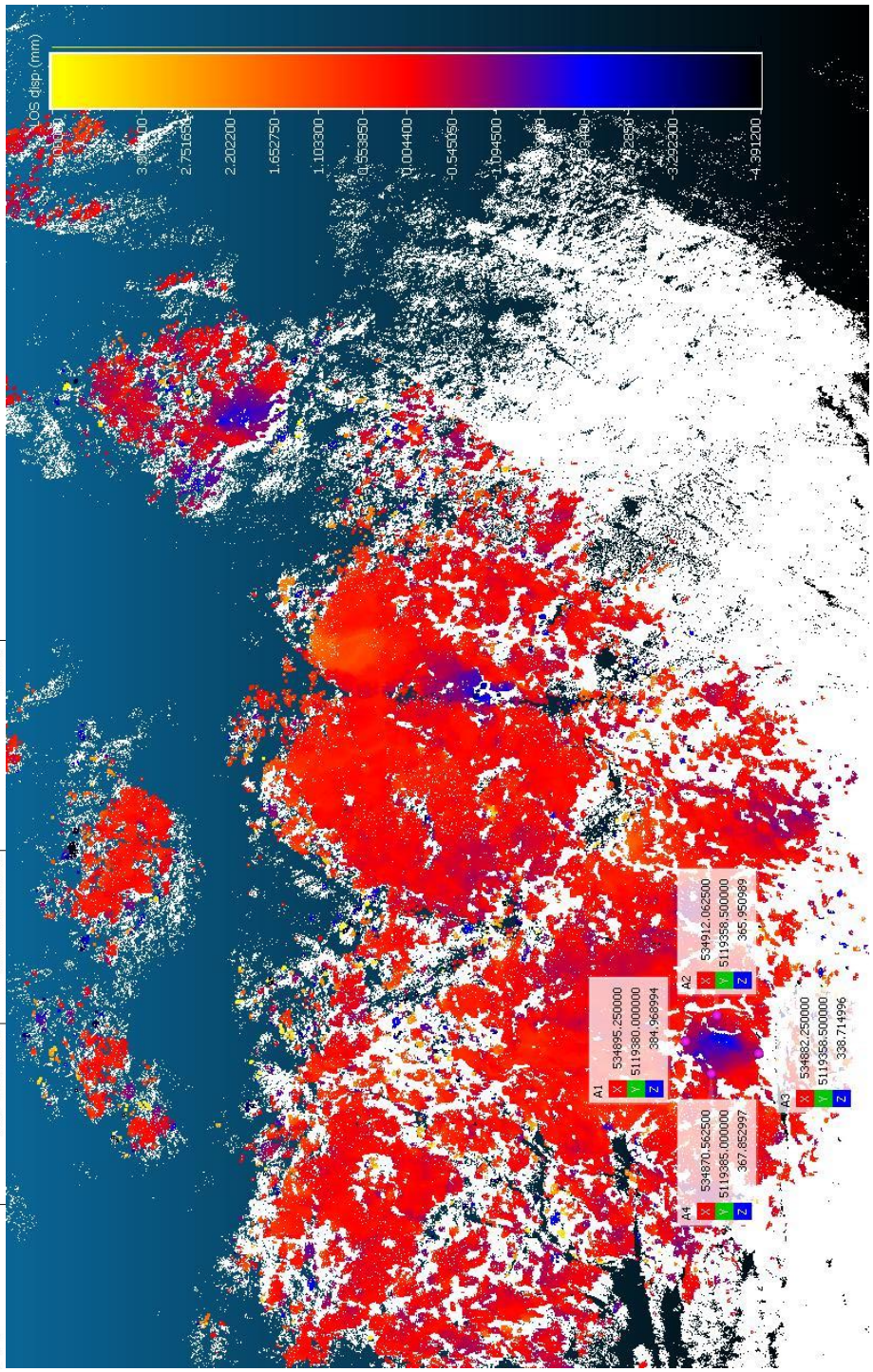

**Figura 52:** Indicazione delle aree in movimento (A,C,D,E,F) nel lungo termine, periodo 22 Maggio 2022 – 11 Settembre 2022, su Point Cloud 3D.

## Analisi quantitativa delle aree in movimento

Utilizzando le immagini delle mappe di spostamento georeferenziate su Point Cloud 3D è stato possibile, tramite l'utilizzo del software Cloud Compare, circoscrivere le aree in movimento, in allontanamento ed in avvicinamento, con dei romboidi (da Figura 53 a Figura 57) ed estrarre le coordinate geografiche dei vertici di queste figure per le aree appartenenti alla sottofinestra *Near.*

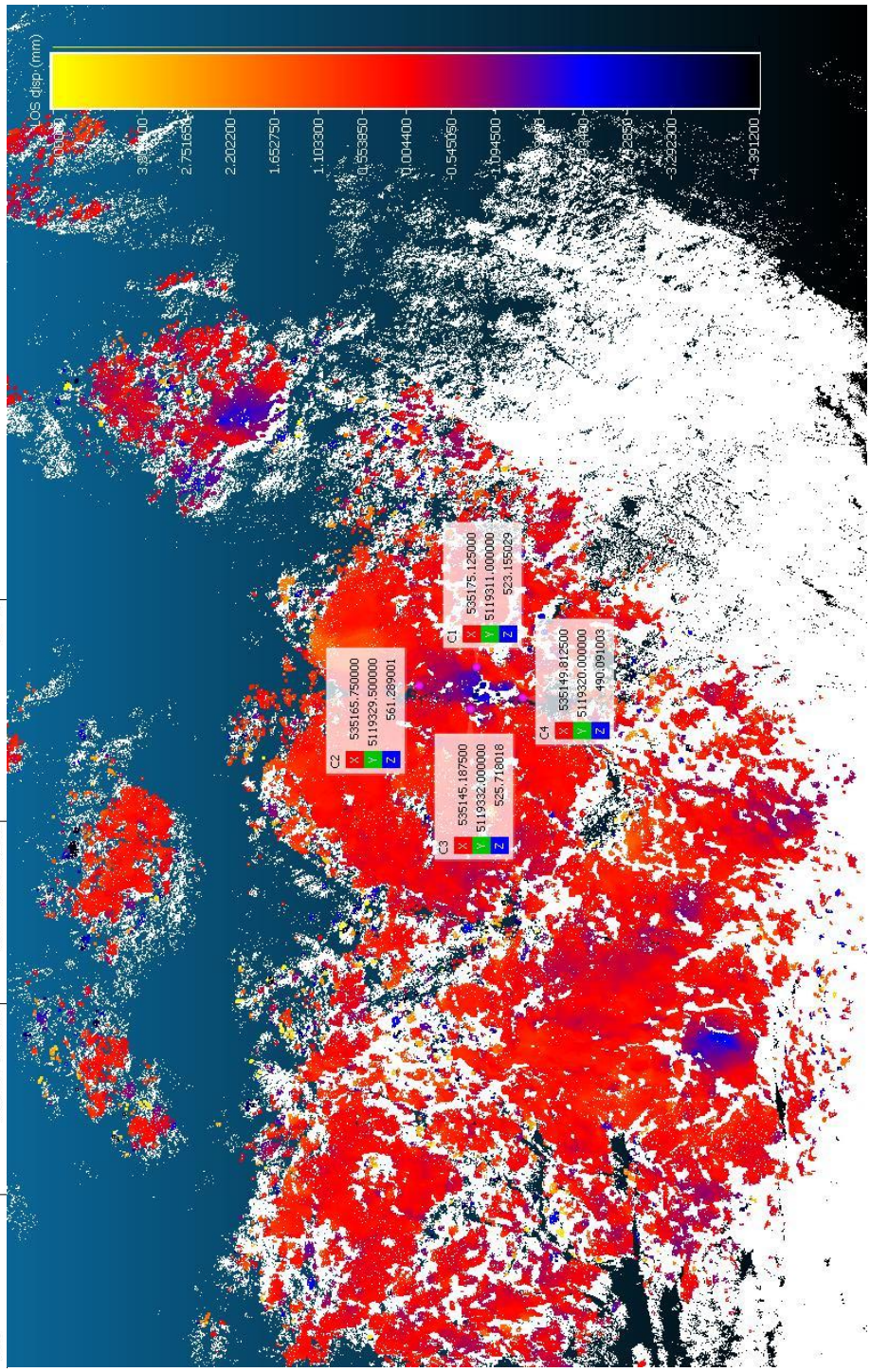
Avere tali valori tabellati è importante per poter ricollocare all'occorrenza, anche su altri supporti georeferenziati secondo il sistema UTM WGS84, le stesse aree in movimento.

Nelle figure seguenti viene mostrata l'immagine di ciascuna area con tabellate le coordinate dei vertici dei relativi romboidi.



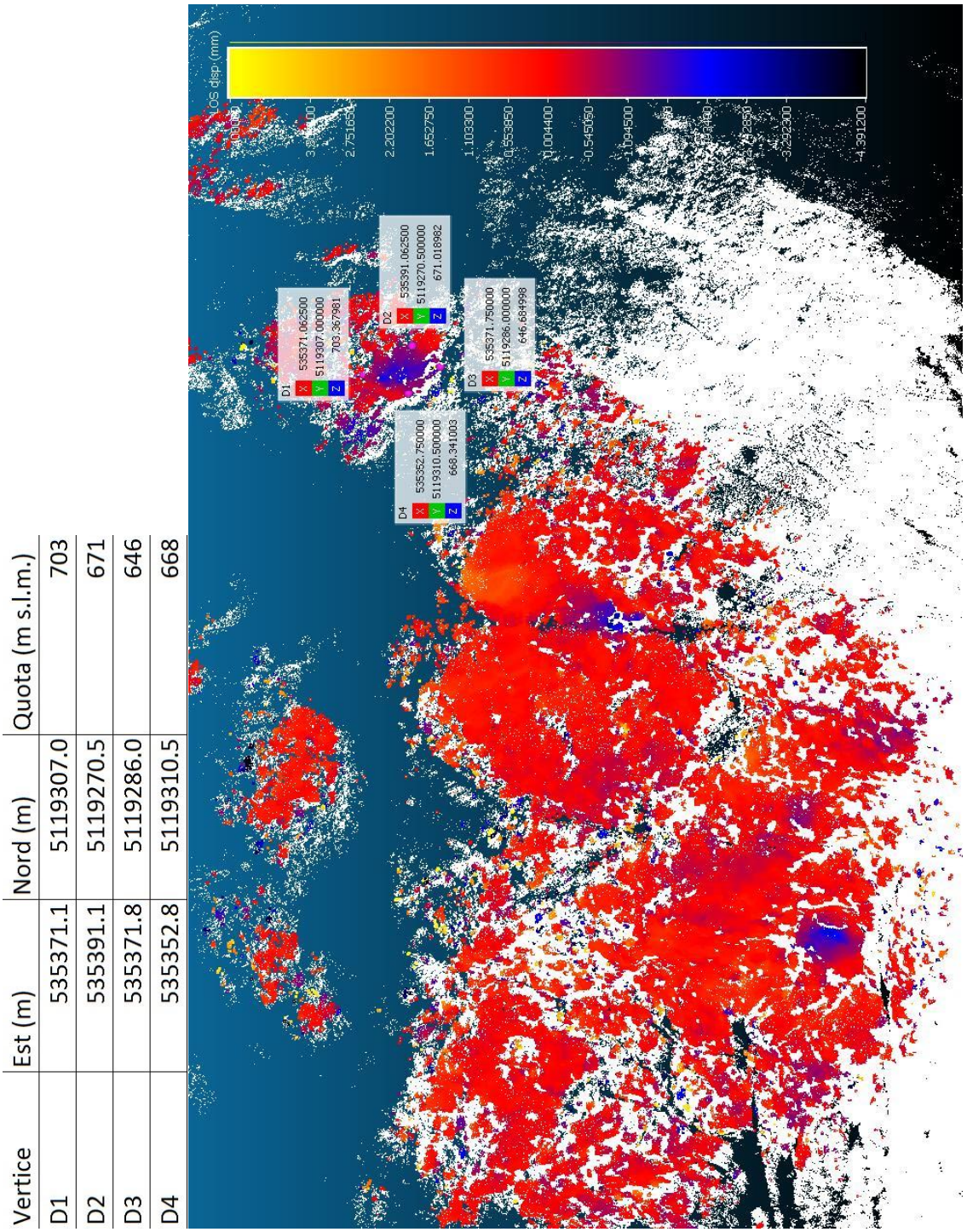

| Vertice | Est (m) | Nord (m) | Quota (m s.l.m.) |
|---|---|---|---|
| A1 | 534895.3 | 5119380.0 | 384 |
| A2 | 534912.1 | 5119358.5 | 365 |
| A3 | 534882.3 | 5119358.5 | 338 |
| A4 | 534870.6 | 5119385.0 | 367 |

**Figura 53:** Vertici del romboide relativo all'area A su Point Cloud 3D e rispettivi valori tabellati. Vista da postazione *Est*, sottofinestra *Near*.



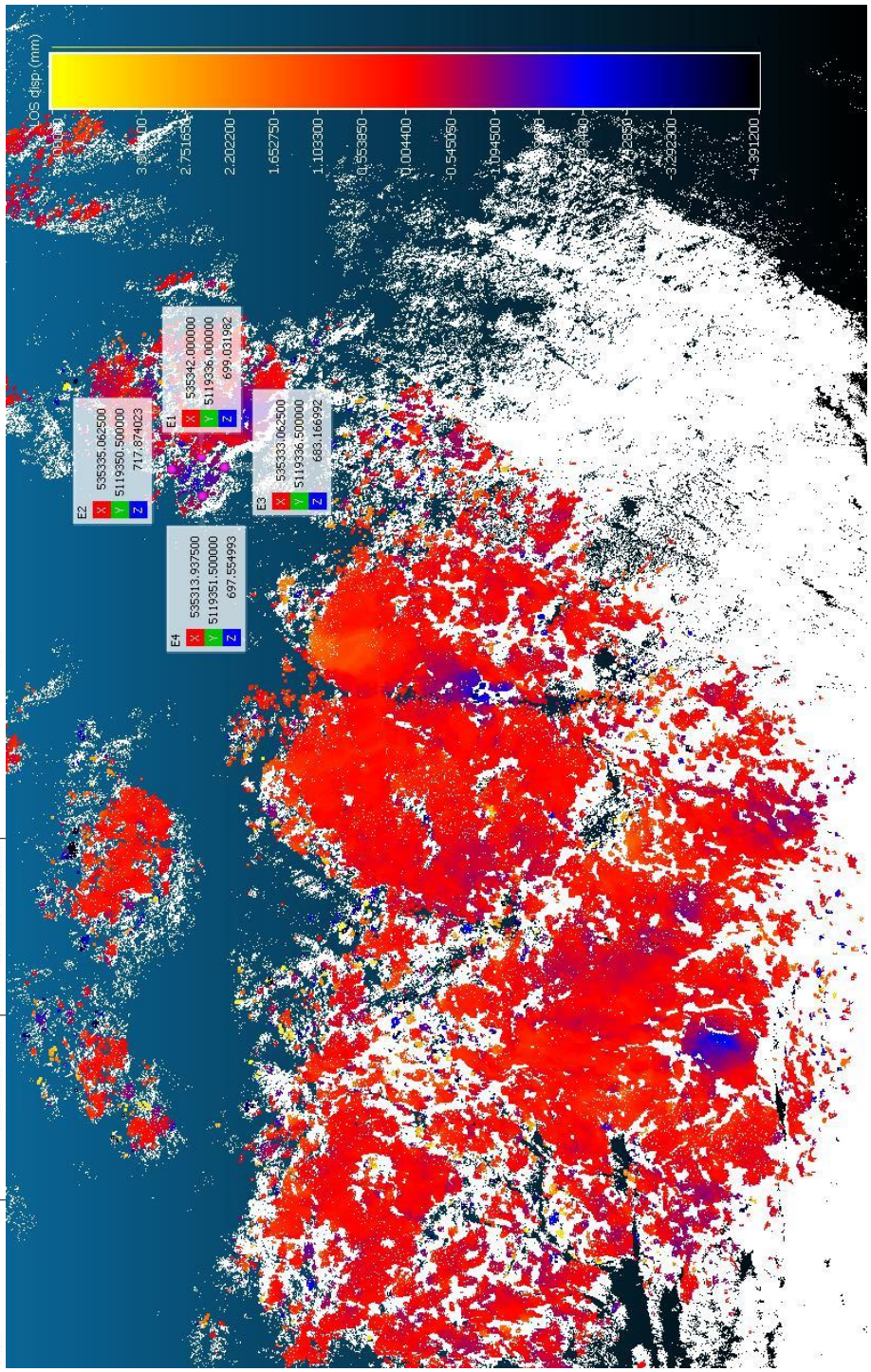

| Vertice | Est (m) | Nord (m) | Quota (m s.l.m.) |
|---|---|---|---|
| C1 | 535175.1 | 5119311.0 | 523 |
| C2 | 535165.8 | 5119329.5 | 561 |
| C3 | 535145.2 | 5119332.0 | 525 |
| C4 | 535149.8 | 5119320.0 | 490 |

**Figura 54:** Vertici del romboide relativo all'area C su Point Cloud 3D e rispettivi valori tabellati. Vista da postazione *Est*, sottofinestra *Near*.



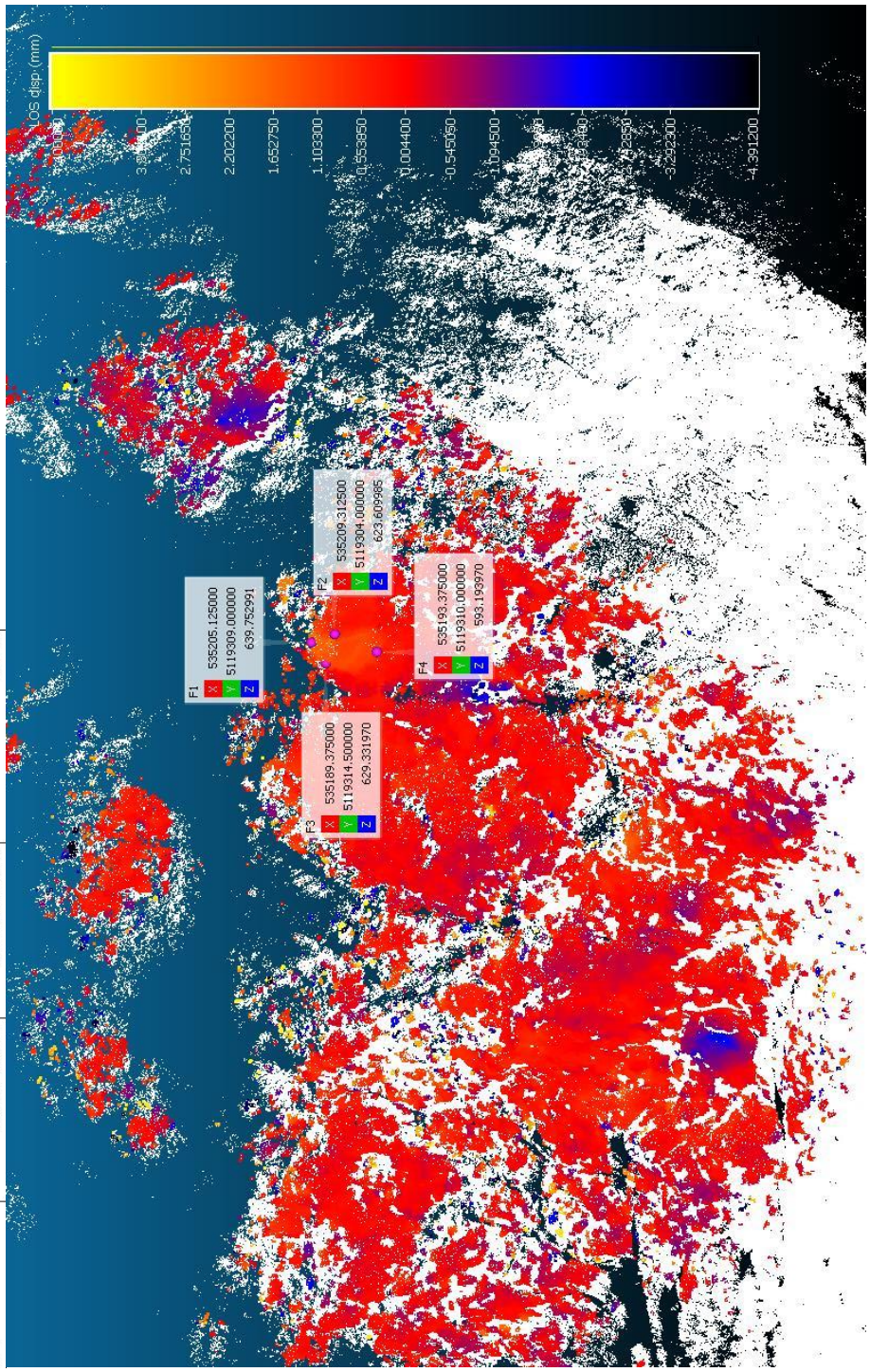

| Vertice | Est (m) | Nord (m) | Quota (m s.l.m.) |
|---|---|---|---|
| D1 | 535371.1 | 5119307.0 | 703 |
| D2 | 535391.1 | 5119270.5 | 671 |
| D3 | 535371.8 | 5119286.0 | 646 |
| D4 | 535352.8 | 5119310.5 | 668 |

**Figura 55:** Vertici del romboide relativo all'area D su Point Cloud 3D e rispettivi valori tabellati. Vista da postazione *Est*, sottofinestra *Near*.




| Vertice | Est (m) | Nord (m) | Quota (m s.l.m.) |
|---|---|---|---|
| E1 | 535342.0 | 5119336.0 | 699 |
| E2 | 535335.1 | 5119350.5 | 717 |
| E3 | 535333.1 | 5119336.5 | 683 |
| E4 | 535313.9 | 5119351.5 | 697 |

**Figura 56:** Vertici del romboide relativo all'area E su Point Cloud 3D e rispettivi valori tabellati. Vista da postazione *Est*, sottofinestra *Near*.




| Vertice | Est (m) | Nord (m) | Quota (m s.l.m.) |
|---|---|---|---|
| F1 | 535205.1 | 5119309.0 | 639 |
| F2 | 535209.3 | 5119304.0 | 623 |
| F3 | 535189.4 | 5119314.5 | 629 |
| F4 | 535193.4 | 5119310.0 | 593 |

**Figura 57:** Vertici del romboide relativo all'area F su Point Cloud 3D e rispettivi valori tabellati. Vista da postazione *Est*, sottofinestra *Near*.

Per facilitare l'identificazione delle aree in movimento riconosciute con l'analisi del dato radar, di seguito vengono riportate le mappe di deformazione anche elaborate sul DEM 2mx2m con sovrimposte le ortofoto dell'anno 2015 (Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61).

In particolare, nelle figure seguenti sono mostrati i risultati delle analisi a lungo termine dal momento che questi permettono di riconoscere gli spostamenti descritti precedentemente. I risultati delle immagini a breve termine non vengono riportati con questa visualizzazione poiché non mostrano evidenze di zone in movimento.

L'analisi sul lungo termine delle immagini radar proiettate sul DEM in formato raster ha permesso di ubicare con precisone l'area di movimento B di cui si è parlato nei paragrafi precedenti ma che non era visibile nel Point Cloud 3D. In particolare, l'area si trova a coronamento della parete, e si estende da quota 1282m a quota 1328m circa, sul settore *Ovest* del versante (Figura 61). Per meglio geolocalizzare l'area si forniscono le coordinate geografiche del punto baricentrico: 535009.37E 5120062.91N, quota 1300m s.l.m.. Questa area ha mostrato nel lungo termine spostamenti in avvicinamento di -0.9 mm, con deviazione standard di 0.1 mm, nel periodo compreso tra il 22 Maggio e l' 11 Settembre 2022.

Nello stesso settore dell'area B ma a quota inferiore (550m ca. s.l.m.) (contornato in verde in Figura 61) si riconosce sul 3D mostrato di seguito (Figura 61) il pilastro roccioso sopra la località Foppa particolarmente osservato per verificare la eventuale presenza di movimenti. In corrispondenza di questo pilastro non si evidenziano spostamenti superiori alla precisione strumentale del radar durante la presente campagna di misura e ciò permette di classificare l'area in oggetto come stabile nell'intervallo di tempo considerato dal presente report. Nelle future campagne si provvederà a tenere monitorata l'evoluzione di eventuali spostamenti su tale pilastro.

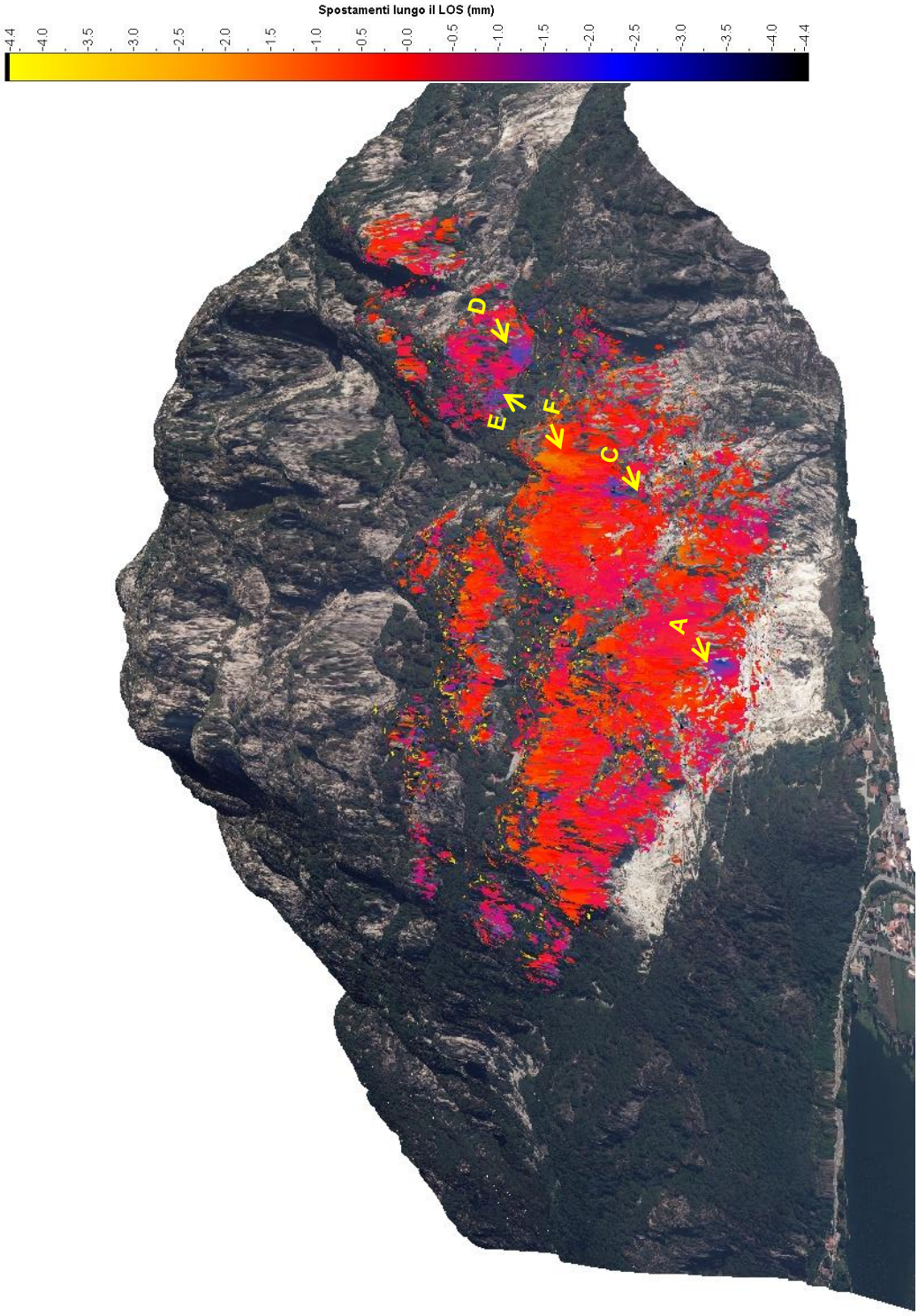



**Figura 58:** Mappa tridimensionale con gli spostamenti misurati nel lungo termine (periodo 22 Maggio - 11 Settembre 2022) lungo la LOS (dati da postazione *Est* e *Ovest,* sottofinestra *Near*).

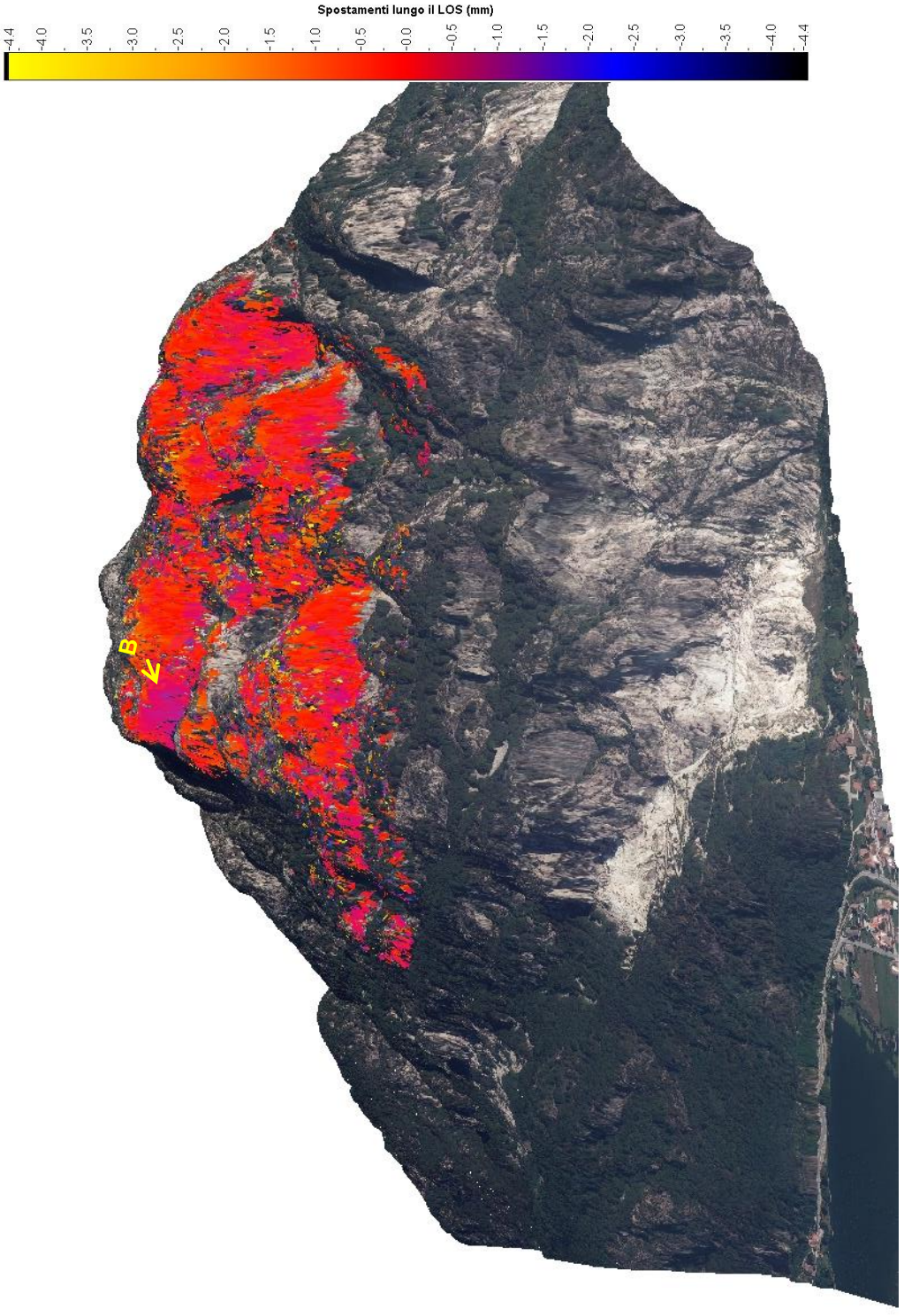



**Figura 59:** Mappa tridimensionale con gli spostamenti misurati nel lungo termine (periodo 22 Maggio - 11 Settembre 2022) lungo la LOS (dati da postazione *Est* e *Ovest*, sottofinestra *Far*).

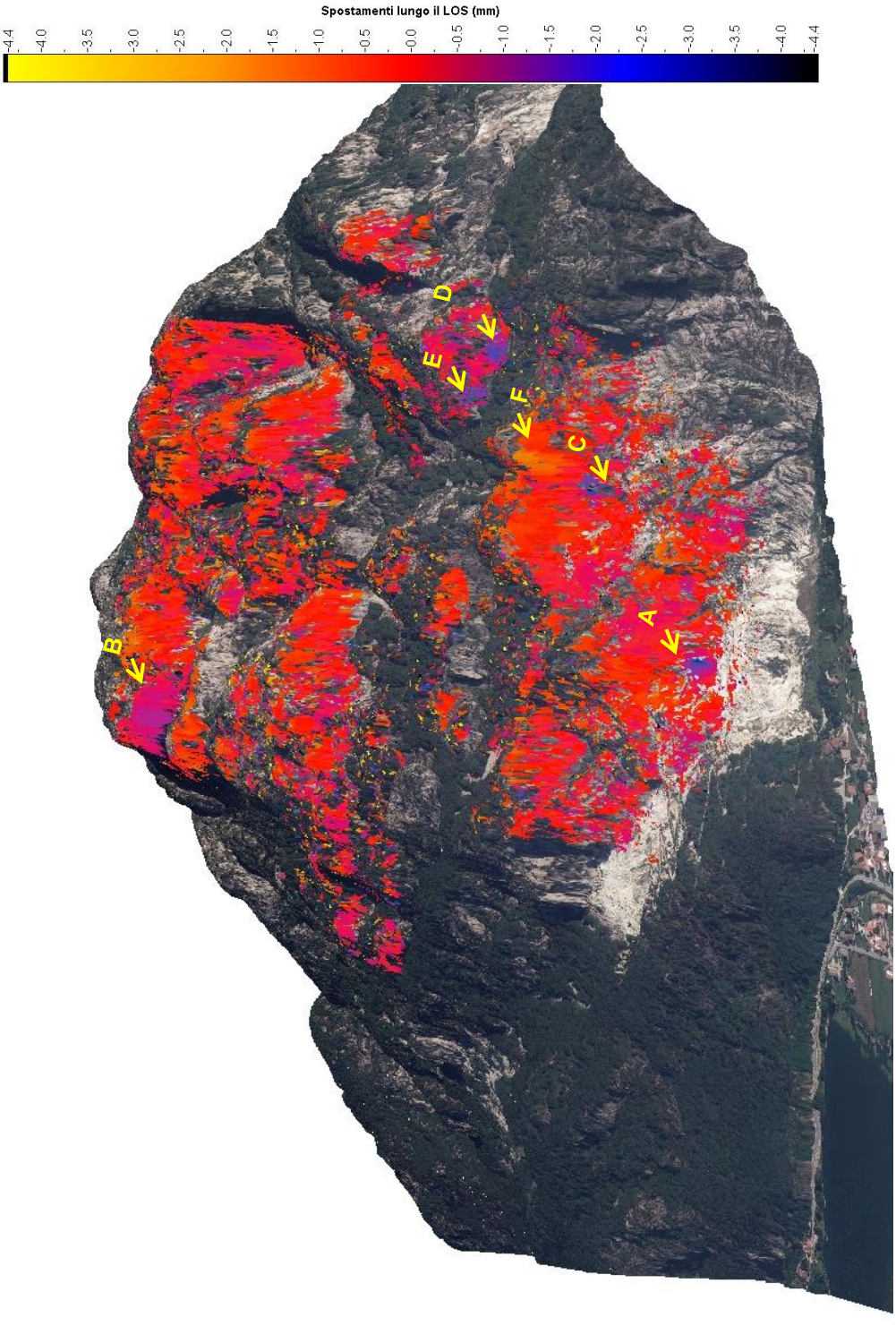



**Figura 60:** Mappa tridimensionale con gli spostamenti misurati nel lungo termine (periodo 22 Maggio - 11 Settembre 2022) lungo la LOS (dati da postazione *Ovest,* sottofinestra *Far* e da postazione *Est,* sottofinestra *Near*).

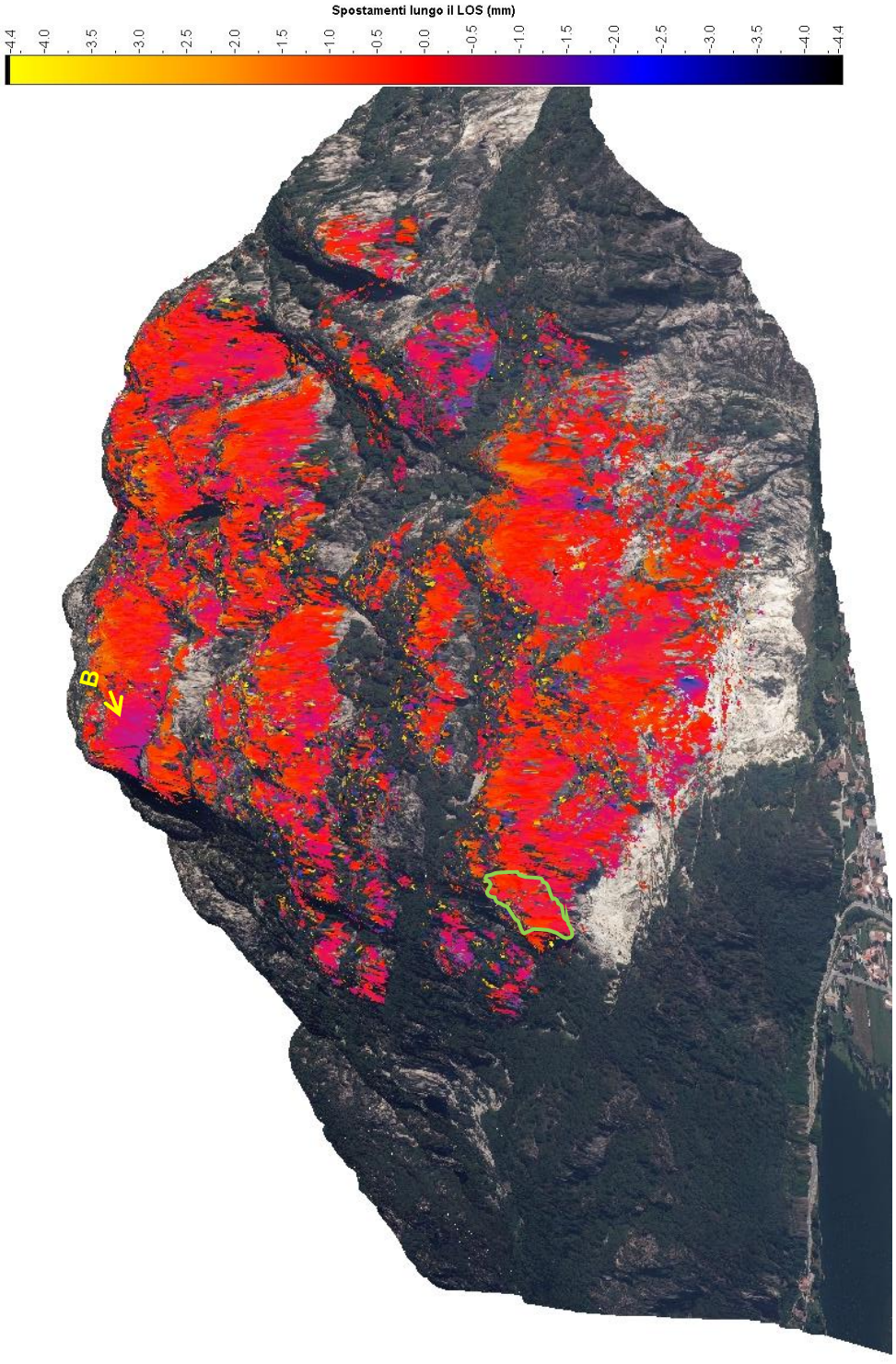



**Figura 61:** Mappa tridimensionale con gli spostamenti misurati nel lungo termine (periodo 22 Maggio - 11 Settembre 2022) lungo la LOS (dati da entrambe le postazioni, *Est* e *Ovest*, ed entrambe le sottofinestre, *Near* e *Far*).

# Conclusioni

Dopo aver analizzato i dati acquisiti nell'ultima campagna di misura (Settembre 2022), che rappresenta il II Periodical Check del rilievo con tecnologia GBInSAR LiSALab per il monitoraggio delle pareti rocciose del Monte Avedèe nel Comune di Novate Mezzola (SO), si può concludere che:

1. I due sistemi GBInSAR LiSALab installati nel Settembre 2022 nel Comune di Novate Mezzola (SO) hanno funzionato correttamente e continuativamente dal 9 Settembre 2022 fino al 13 Settembre 2022, acquisendo un totale di 683 e 716 immagini, rispettivamente dalla postazione *Est* e dalla postazione *Ovest*.

2. Lo scenario in esame si conferma visibile al radar da entrambe le postazioni, le aree che rispondono meglio sono quelle corrispondenti alle aree non vegetate. I dati acquisiti da entrambe le postazioni sono stati elaborati per due sottofinestre spaziali: una sottofinestra spaziale *Near* ha coperto le regioni più vicine alle postazioni di misura, una finestra spaziale *Far* ha coperto le aree poste a quote più elevate e quindi più lontane dal sistema radar.

3. Per migliorare la qualità dei risultati ed aumentare il rapporto segnale-rumore sono state elaborate delle immagini "mediate" su intervalli temporali di circa 24 ore. Dalle immagini così ottenute sono state prodotte delle mappe di spostamento per l'analisi a breve termine degli spostamenti misurati nel corso della campagna di misura.

4. L'analisi a breve termine che copre l'intervallo temporale dal 9 al 13 Settembre 2022 non ha evidenziato la presenza di aree interessate da spostamenti e/o riconducibili a movimenti generalizzati del versante.

5. Nel breve termine, la presenza di piccole aree caratterizzate da spostamenti di pochi pixel non desta alcuna preoccupazione in quanto rappresenta effetti locali riconducibili a fenomeni di disturbo che possono generare dati non affidabili, vista anche la presenza di vegetazione nella regione monitorata.

6. L'analisi a lungo termine, che copre l'intervallo temporale dal 22 Maggio 2022 al 11 Settembre 2022, ha evidenziato la presenza di cinque aree in avvicinamento definite come A, B, C, D ed E, ed una area in allontanamento nominata F. Le aree A, C, D, E, F, collocandosi a quote basse ed in posizione centrale sul versante sono visibili dalla postazione *Est*, con la sottofinestra *Near*. Viceversa, l'area B che si trova a quote più elevate ed appartiene al settore *Nord-Ovest* del versante risulta ben visibile dalla postazione *Ovest* con la sottofinestra *Far* ma anche dalla postazione *Est*.

7. Queste aree (A, B, C, D ed E) sono caratterizzate da valori medi di spostamento negativo, cioè in avvicinamento al sistema, di tutti i pixel compresi tra -0.9 mm e -1.4 mm, con deviazioni standard rispettivamente di 0.1 mm e 0.4 mm. La zona F è caratterizzata da sposamenti positivi, cioè in allontanamento dal sistema, con valore medio di +1.30 mm e deviazione standard di 0.25 mm nello stesso arco temporale.

8. Per ogni area caratterizzata da spostamento nel lungo termine (periodo 22 Maggio – 11 Settembre 2022), si presentano nella seguente tabella i valori medi degli spostamenti misurati nell'intervallo di tempo considerato, con relativa deviazione standard, e la stima dell'estensione areale di ciascuna zona interessata da movimento:

| AREA | SPOSTAMENTO MEDIO (mm) | DEV. STANDARD (mm) | ESTENSIONE AREALE ($m^2$) |
|---|---|---|---|
| A | -1.3 | 0.4 | 1077.0 |
| B | -0.9 | 0.1 | 7641.3 |
| C | -0.9 | 0.3 | 749.2 |
| D | -1.3 | 0.3 | 1346.0 |
| E | -1.4 | 0.4 | 869.2 |
| F | +1.3 | 0.2 | 613.5 |

9. I risultati ottenuti sono restituiti anche in 3D mediante l'utilizzo di due diversi DEM: un primo ottenuto da rilievi Lidar e in formato Point Cloud e un secondo ottenuto in formato raster e successivamente integrato con ortofoto che aiutano a localizzare la posizione del dato radar sul versante monitorato. Vengono fornite inoltre le coordinate geografiche dei punti baricentrici e l'elevazione minima e massima delle zone in movimento.
   Il DEM ottenuto da rilievo Lidar contiene poche informazioni nelle aree del versante poste alle quote più elevate e non copre a sufficienza l'area immediatamente sopra la località Foppa dove era stato individuato un pilastro roccioso considerato come attivo e dunque uno degli obiettivi del monitoraggio. Dall'elaborazione dei dati radar sul lungo termine, tuttavia, non si registra alcuno spostamento significativo riconducibile a questo oggetto nel periodo di tempo analizzato dal presente report.

# Allegati

Al presente report si allegano le seguenti mappe in formato elettronico:

a) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 9 e il 13 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Est*, finestra *Near*;
b) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 9 e il 13 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Est*, finestra *Far*;
c) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 9 e il 13 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Ovest*, finestra *Near*;
d) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 9 e il 13 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Ovest*, finestra *Far*;
e) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 22 Maggio 2022 e il 11 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Est*, finestra *Near;*
f) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 22 Maggio 2022 e il 11 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Est*, finestra *Far;*
g) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 22 Maggio 2022 e il 11 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Ovest*, finestra *Near;*
h) Risultati in formato elettronico della mappa in 3D di deformazione tra il 22 Maggio 2022 e il 11 Settembre 2022 ottenuta dalla Postazione *Ovest*, finestra *Far.*

# Note, Avvertenze e Limitazioni di Responsabilità

Nel presente report 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, lo slogan e LiSAmobile 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.