



Tecniche innovative per il monitoraggio di versante: stereofotogrammetria digitale terrestre per la gestione del rischio da frana

Lorenzo Brezzi, Simonetta Cola e Fabio Gabrieli

Convegno Ecomondo - AGI

**Monitoraggio geotecnico delle opere per la difesa del territorio
e la tutela dell' ambiente**

Rimini, 3 Novembre 2020

- Il monitoraggio geotecnico e la fotogrammetria
- Stereofotogrammetria e fotogrammetria
- Principi di funzionamento e calibrazione
- Casi studio
- Considerazioni e conclusioni

NTC2018 – 6.3.1

«*Lo studio della stabilità dei pendii naturali richiede **osservazioni e rilievi di superficie, raccolta di notizie storiche sull'evoluzione dello stato del pendio e su eventuali danni subiti dalle strutture o infrastrutture esistenti, la constatazione di movimenti eventualmente in atto e dei loro caratteri geometrici e cinematici, la raccolta dei dati sulle precipitazioni meteoriche, sui caratteri idrogeologici della zona e sui precedenti interventi di consolidamento.** [...]»*

Monitoraggio: insieme di azioni finalizzate al **controllo dell'evoluzione** di una grandezza variabile nel tempo, mediante opportuna strumentazione.

Il monitoraggio può essere:

- **Real-time:** i dati vengono raccolti in ogni istante ed inviati a remoto;
- **Periodico:** le acquisizioni sono effettuate periodicamente (con necessità di un operatore)

Il monitoraggio geotecnico

Scopi:

- identificazione della **superficie di scivolamento**
- stima dei **volumi** coinvolti
- misura di **spostamenti, direzioni e velocità** del dissesto
- Individuazione delle possibili **cause** del fenomeno
- selezione degli **interventi di mitigazione** più adeguati
- valutazione dell'**efficacia** di un intervento

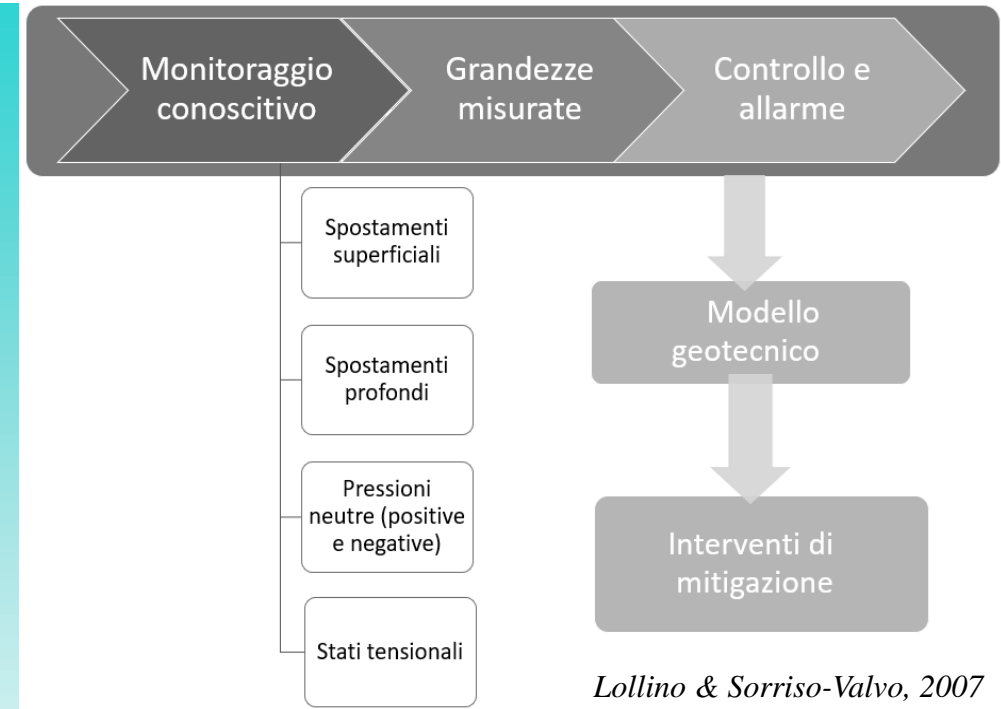
Le tecniche utilizzate sono:

1. Misure degli spostamenti superficiali:

1. rilievo topografico e rilevamento a distanza (*GPS*)
2. interferometria (*SAR, Laser Scanner*)
3. misure in corrispondenza di fratture (*estensimetri, clinometri, fessurimetri*)
4. **tecniche fotogrammetriche**

2. Misure degli spostamenti profondi: inclinometri, estensimetri in foro

3. Misure delle pressioni neutrali: piezometri, celle di pressione



Dati su posizione, forma e dimensioni di un qualsiasi oggetto

○ Tipo di presa:

- **Terrestre:** *da terra, distanze ≤ 200 m*
- **Aerea:** *da aereo, distanze ≥ 200 m*

○ Tipo di elaborazione:

- **Analogica**
- **Analitica**

○ Tipo di fotografia:

- **Classica:** *su pellicola*
- **Digitale:** *su sensore elettronico*

Si ottengono:

1. informazioni in termini matriciali
2. nuvole dense di punti
3. informazioni sulle posizioni di scatto



Vantaggi:

- Informazioni 3D da misure 2D
(*da pixel a metri*)
- No contatto con l'oggetto del rilievo
(*utile se monitoraggio di una zona non accessibile*)
- Misura spazialmente densa e distribuita
- Frequenza temporale *site-specific*
- Metodo rapido ed economico
- Installazione semplice e rapida

Comunemente permette:

1. **ricostruzione tridimensionale** di oggetti e superfici
3D in condizioni statiche
2. **misurazione degli spostamenti** sul piano dell'immagine
2D in condizioni cinematiche



1. Creazione di una **mappa di profondità della scena** (*da un'informazione 2D ad una 3D*); a partire da:
 - coppia di immagini rettificate (*stereofotogrammetria*)
 - rilievo fotogrammetrico del sito (nuvola di punti 3D) + posizione di scatto (*mono*)
 - rilievo con laser scanner (nuvola di punti 3D) + posizione di scatto (*mono*)
2. Identificazione del **campo di spostamento** (PIV) *sul piano dell'immagine, in pixel*
3. **Proiezione** delle misure in pixel sulla mappa di profondità della scena *per ottenere un campo di spostamenti 3D dimensionati e scalati*

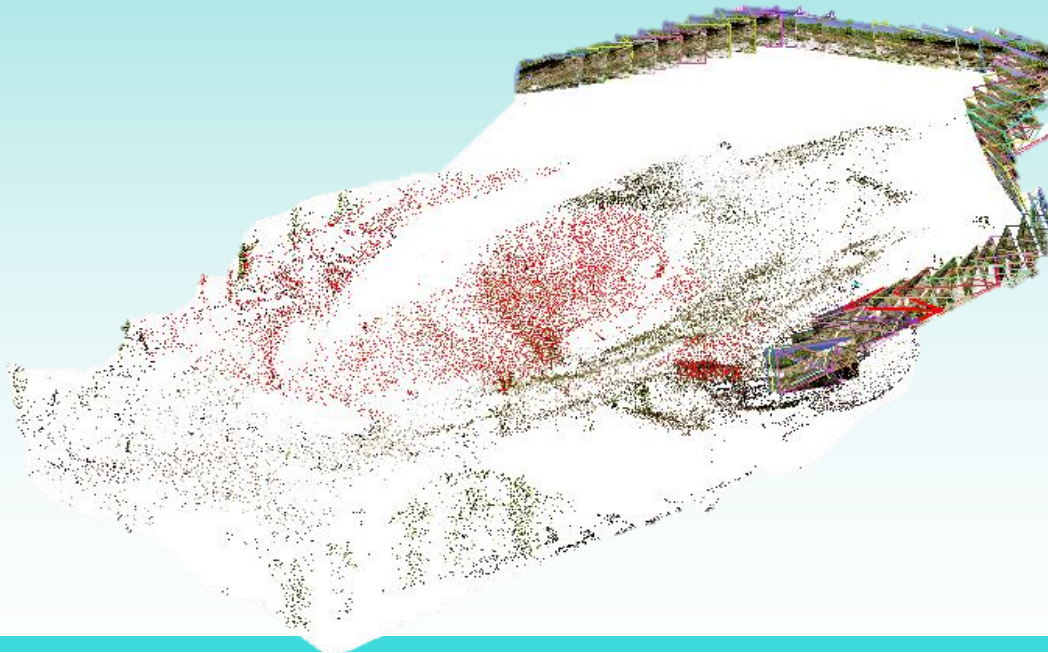
Scopo della calibrazione: *ottenere i parametri intrinseci ed estrinseci*

Metodo: eseguire scatti della scena, ottenere un modello fotogrammetrico 3D del sito ed analizzare i file di output creati.

PARAMETRI ESTRINSECI

informazioni geometriche fotografie

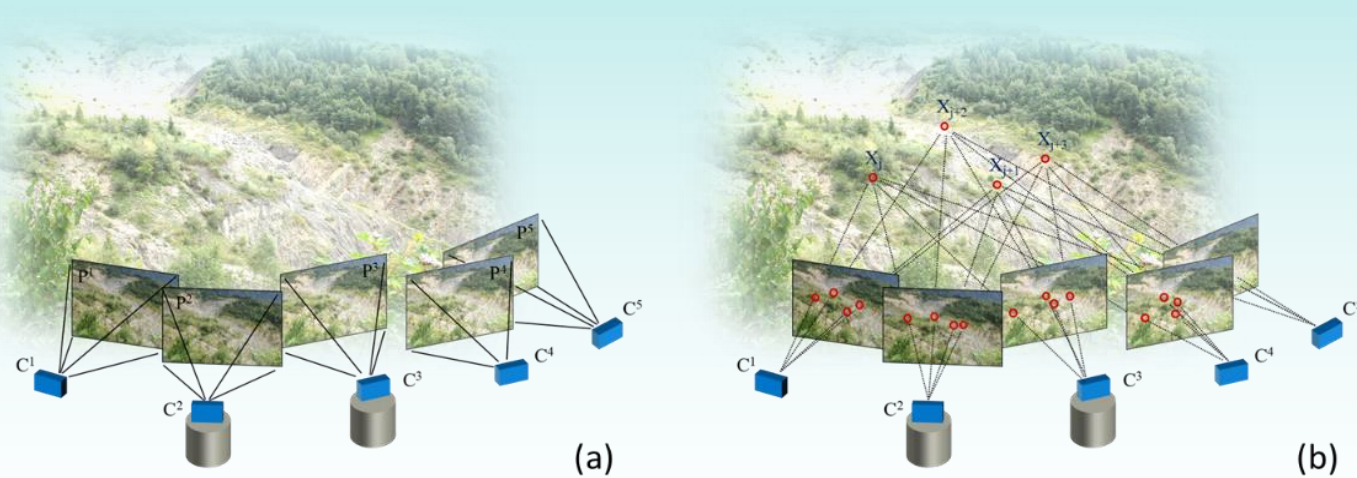
- *posizioni di scatto*
- *angoli relativi*



PARAMETRI INTRINSECI

caratteristiche fisiche e tecniche camera

- *lunghezza focale*
- *centro ottico*
- *distorsione delle lenti*



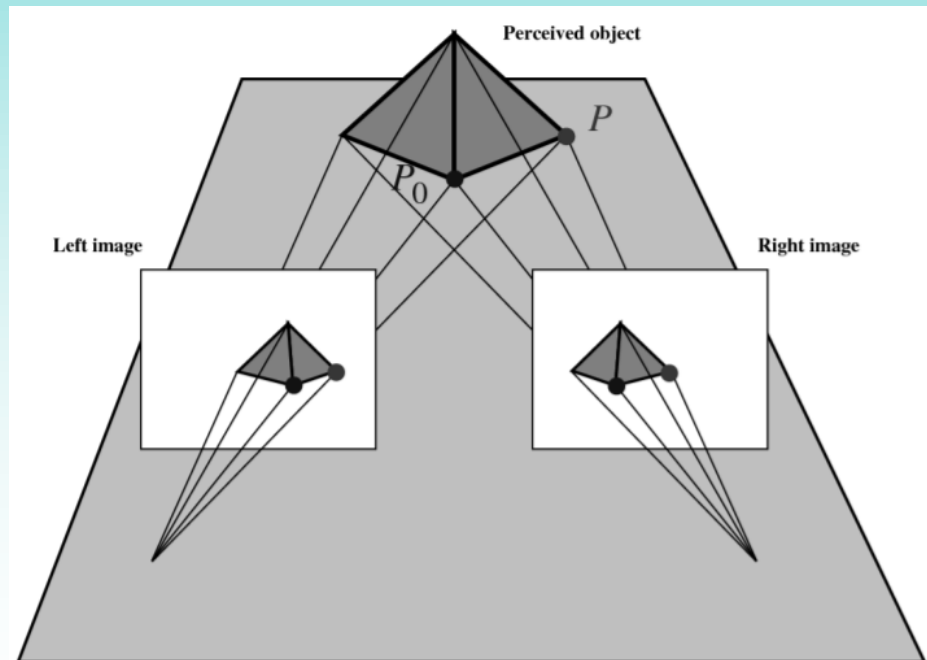
Analisi stereo

Si ricava la **profondità della scena** da **almeno due immagini** scattate da punti di vista lievemente differenti.

Si ispira alla **visione binoculare**:

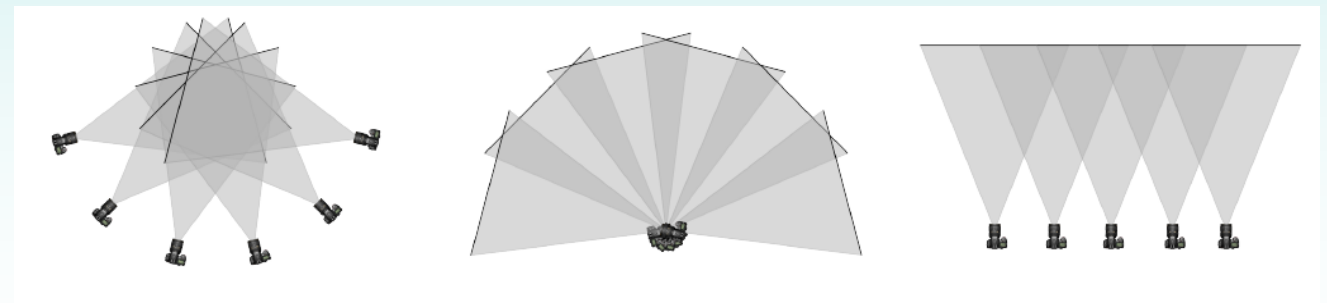
*la differenza tra le due visioni (**disparità**) viene sfruttata per informazioni sulla profondità della scena e sulla posizione spaziale dell'oggetto mirato.*

La distanza tra i due punti di vista è chiamata **baseline**.



La strategia consiste in:

1. **Calibrazione del sistema di presa;**
2. **Calcolo delle corrispondenze;**
3. **Triangolazione.**



Principi di funzionamento del sistema stereo

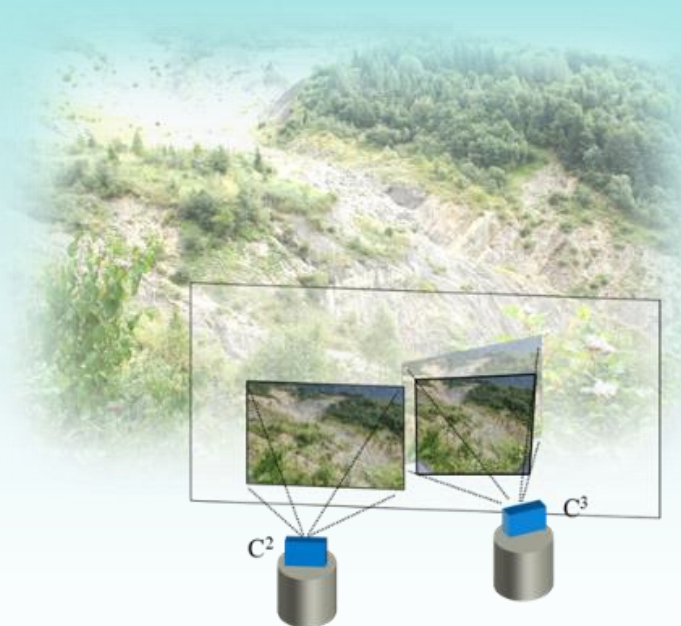
Le **posizioni di scatto** del monitoraggio si scelgono tra quelle usate nella **calibrazione**:
se ne conoscono i parametri intrinseci ed estrinseci.

È quindi possibile:

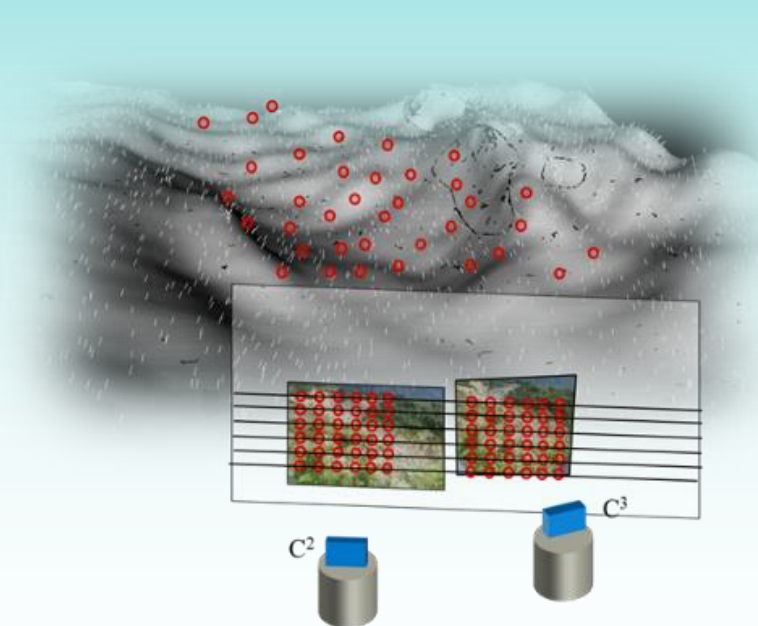
1. Rettificare le immagini (*piano comune*)
2. Cercare i punti omologhi nelle due inquadrature
3. Calcolare la mappa di disparità



**informazioni sulla
profondità della scena**

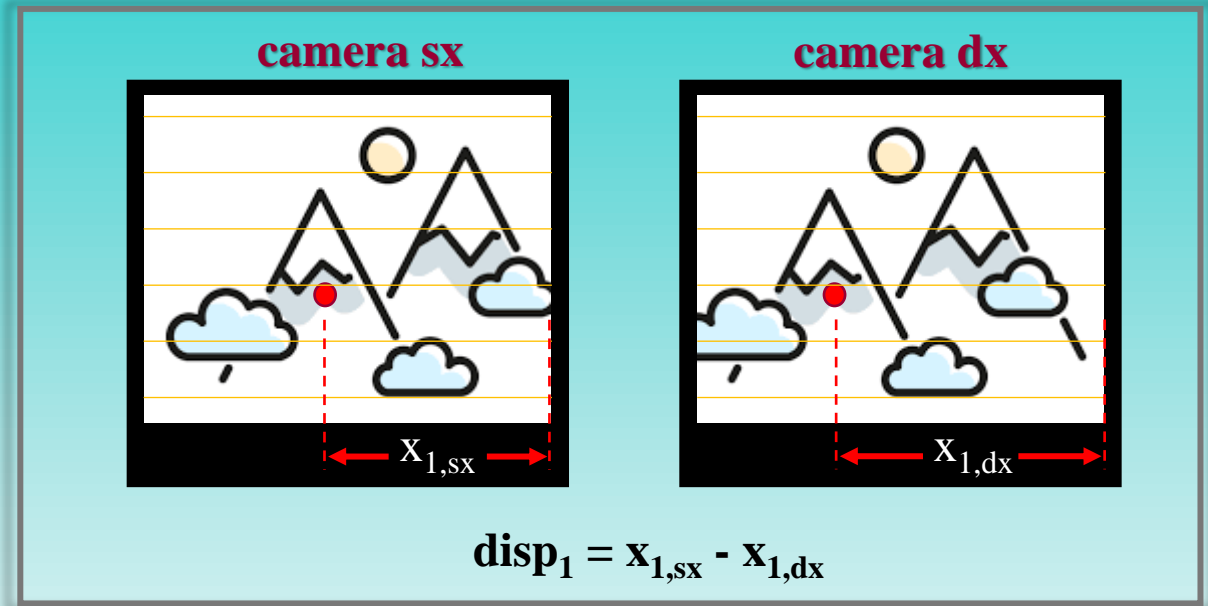
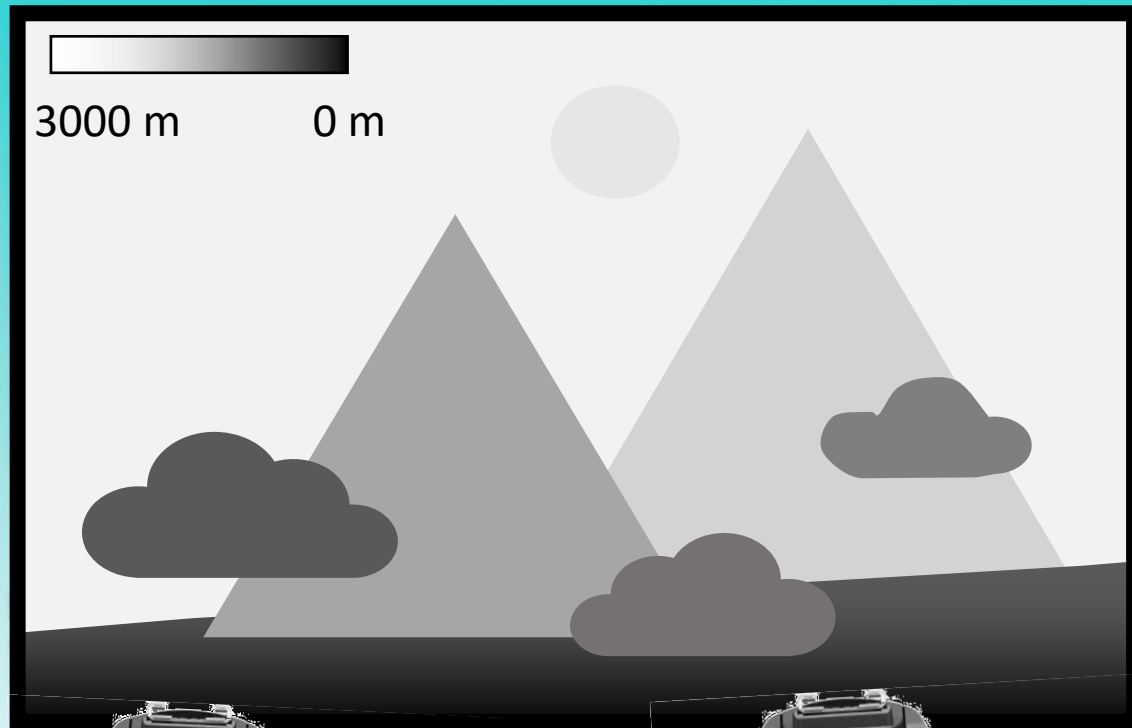


(c)



(d)

Principi di funzionamento del sistema stereo

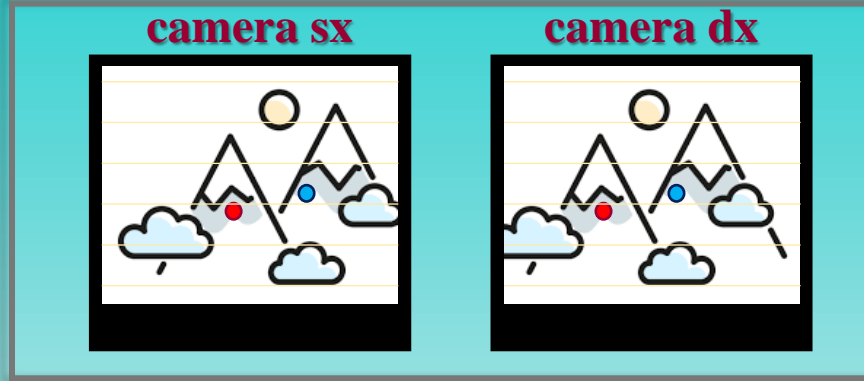


Dalla coppia di foto (stesso istante) si ottiene una nuvola 3D dei **punti omologhi** (*calcolo delle corrispondenze*)

mappa di disparità

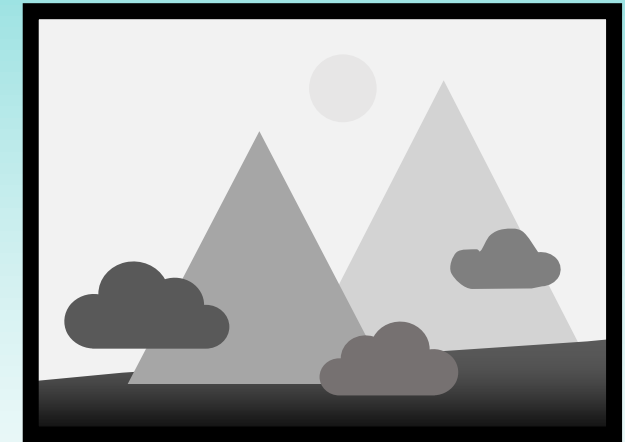
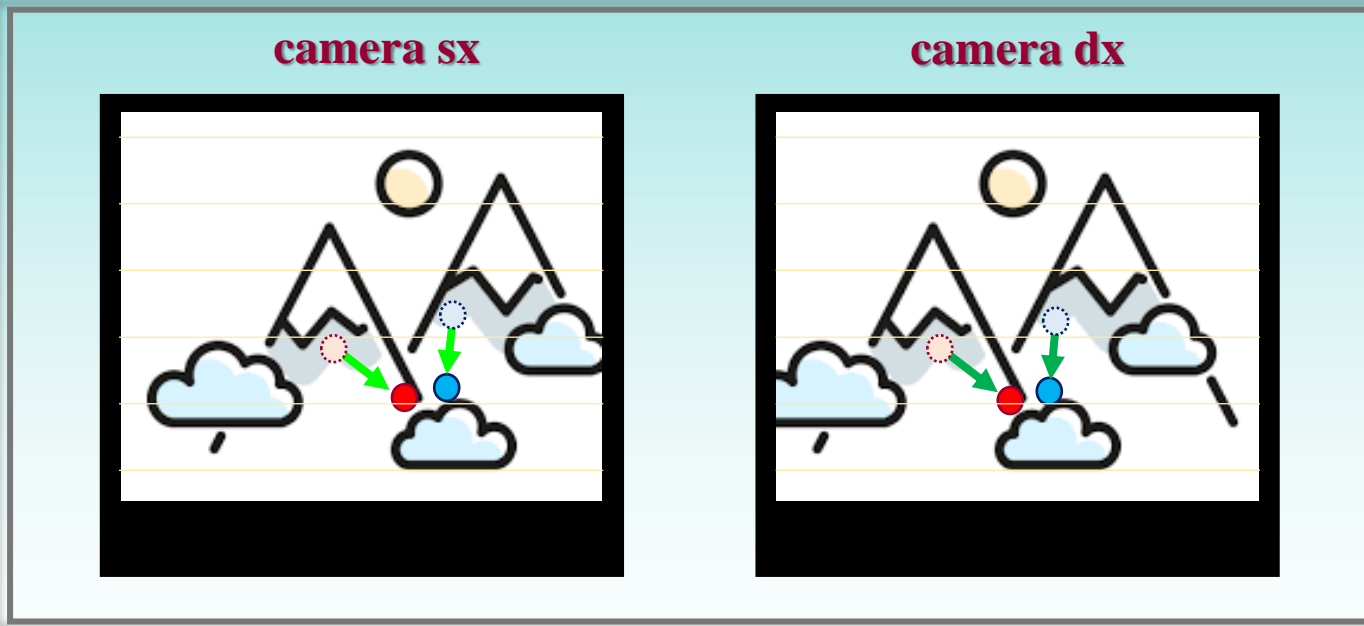
Principi di funzionamento del sistema stereo

giorno 1



1. Spostamento in pixel 2D della camera di sinistra
2. Spostamento della camera di destra
3. Mappa di disparità

giorno 2



Si proietta il dato 2D
ottenendo una **misura 3D**

In alternativa al metodo stereo, si può ottenere la mappa di profondità a partire da una **nuvola georeferenziata** del sito. Se conosco posizione e orientamento della camera, posso «inquadrare» la nuvola dal quel punto di vista.

Si ottiene *per ogni pixel* dell'immagine la relativa *informazione spaziale tridimensionale*.

SISTEMA STEREO

Vantaggi

1. Aggiorno la mappa di profondità in *qualsiasi momento*
2. Aggiorno la mappa *da remoto*, senza sopralluogo

Svantaggi

1. Devo disporre di una **coppia di immagini**
2. Devo controllare *baseline e orientazione* del sistema
3. Ottengo una mappa **meno precisa e meno densa**
4. Stessa **lunghezza focale** per entrambe le camere
5. Se sposto una camera, devo **ricalibrare il sistema**

SISTEMA MONO

Vantaggi

1. Mappa **molto densa e precisa**
2. Ogni camera lavora *indipendentemente* dalle altre
3. Posso settare **lunghezze focali diverse**
4. La mappa di profondità rimane utilizzabile anche se sposto una camera (*conoscendo i parametri estrinseci*)

Svantaggi

1. Per aggiornare la mappa, devo eseguire un nuovo rilievo (*fotogrammetrico o laser*)
2. L'aggiornamento della mappa non avviene da remoto

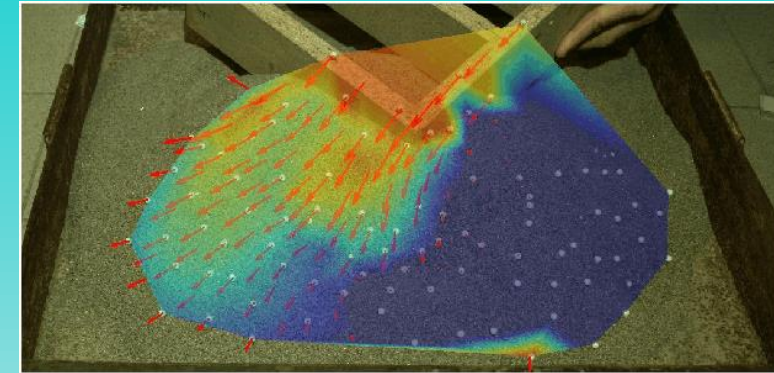
Particle Image Velocimetry - PIV

PIV: metodo ottico di misura del **campo di moto**
(comunemente utilizzato per seguire le deformazioni di un fluido)

- Spesso applicata in laboratorio - campi di deformazione 2D
(*fattore di scala unico per la conversione pixel-metri*)
- Se la profondità è differente, l'informazione 2D è proiettata in base alla profondità della scena
(*errori maggiori di proiezione se elevato gradiente di disparità*)

Il PIV può essere calcolato misurando:

- **Un campo Lagrangiano di deformazioni**
 - Monitoro solo alcuni punti
 - Maggiore tempo di calcolo
 - Misura diretta degli spostamenti
- **Un campo Euleriano di velocità**
 - Visione distribuita e complessiva del sito
 - Metodo più rapido
 - Post-elaborazione per avere gli spostamenti

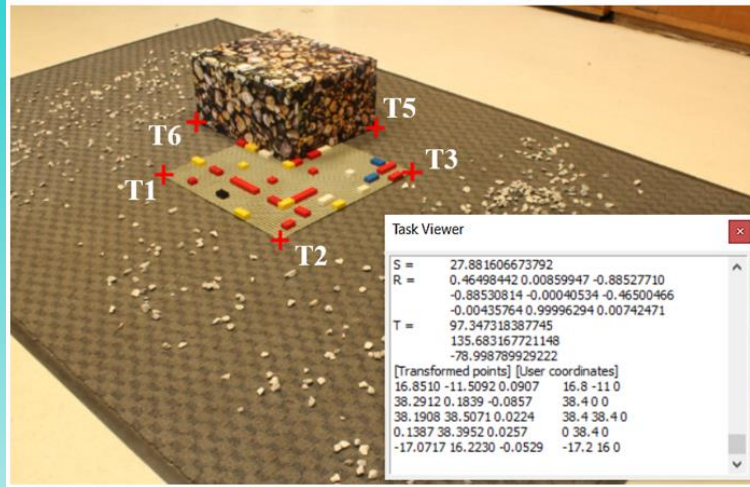


Gabrieli et al., 2011



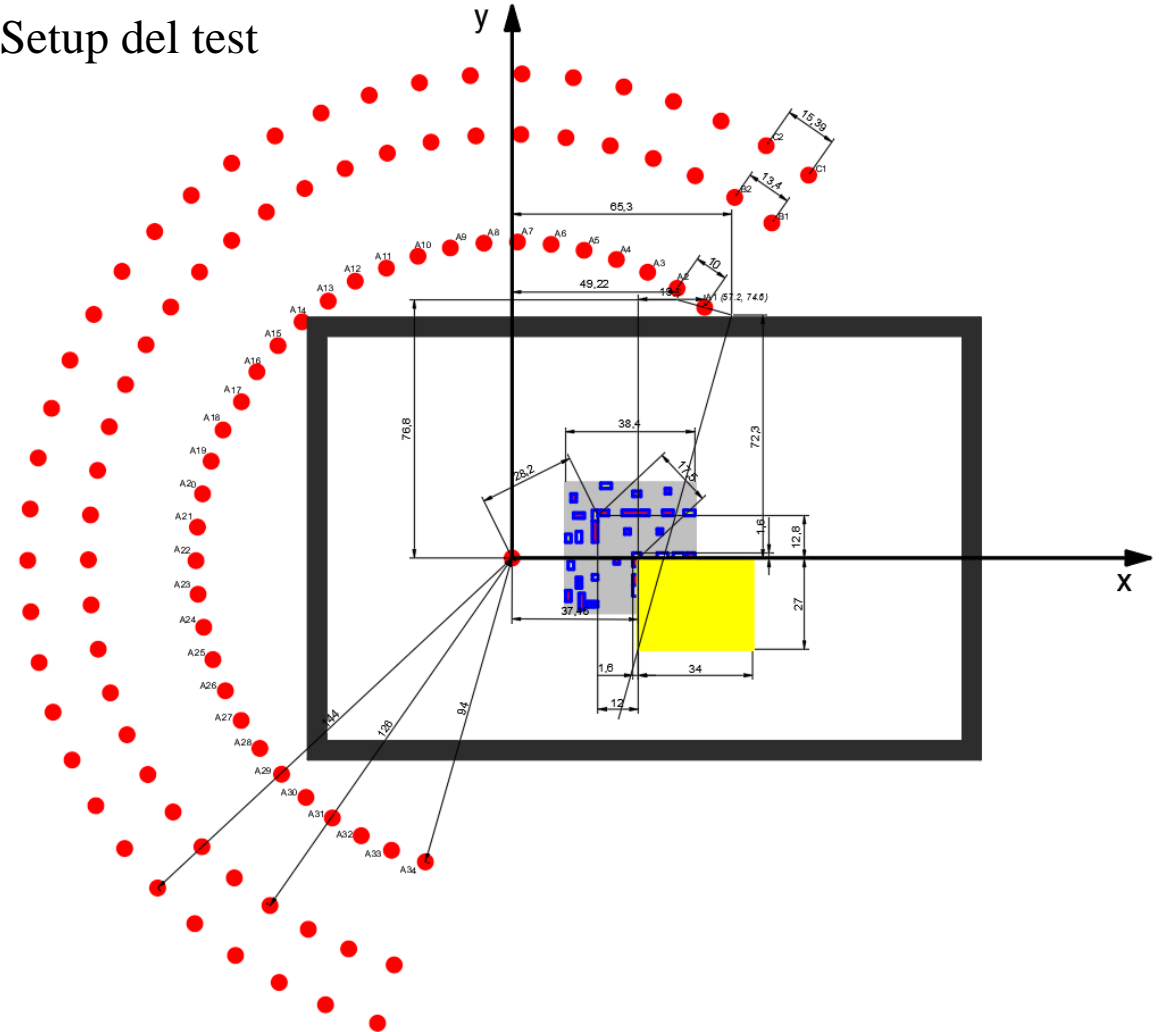
(Motta et al., 2013)

Caso 1: sistema stereo a test di laboratorio



● Posizioni di scatto

Setup del test



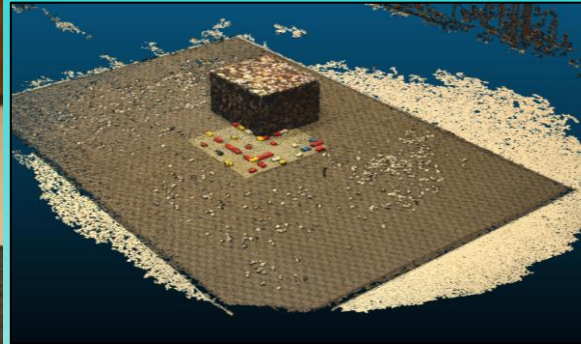
Processo di calibrazione



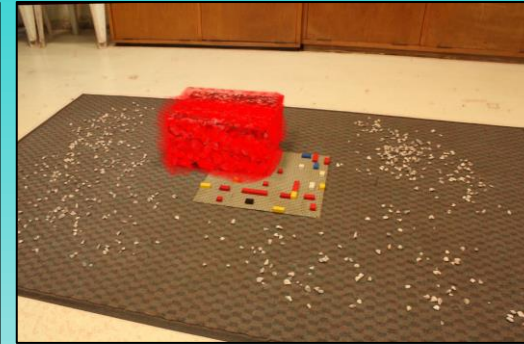
Caso 1: sistema stereo a test di laboratorio



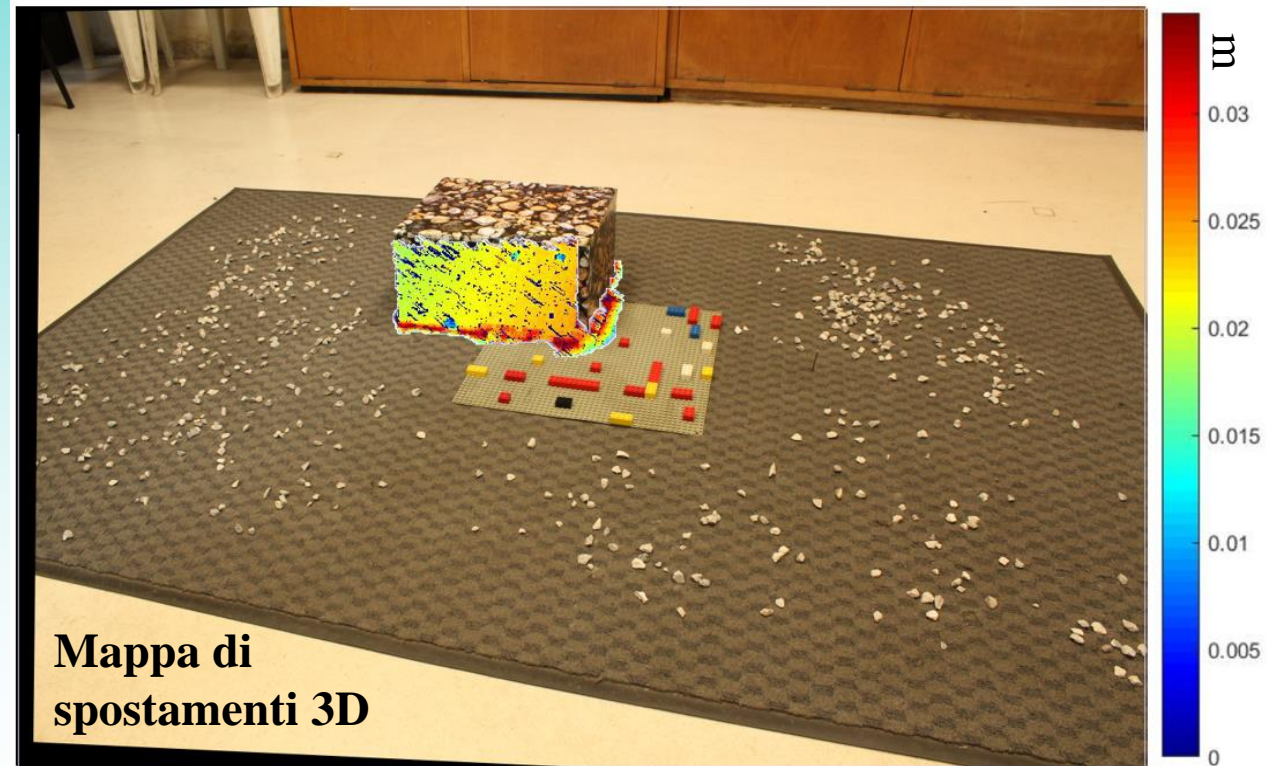
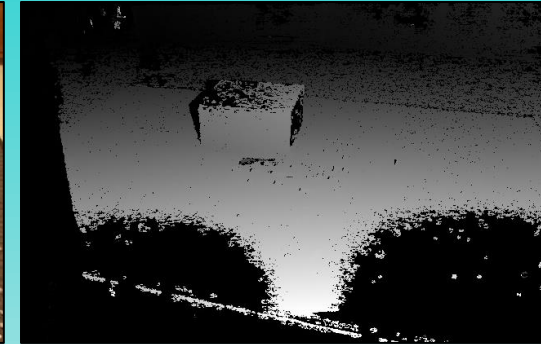
1. Calibrazione



2. PIV 2D



3. Mappa di profondità



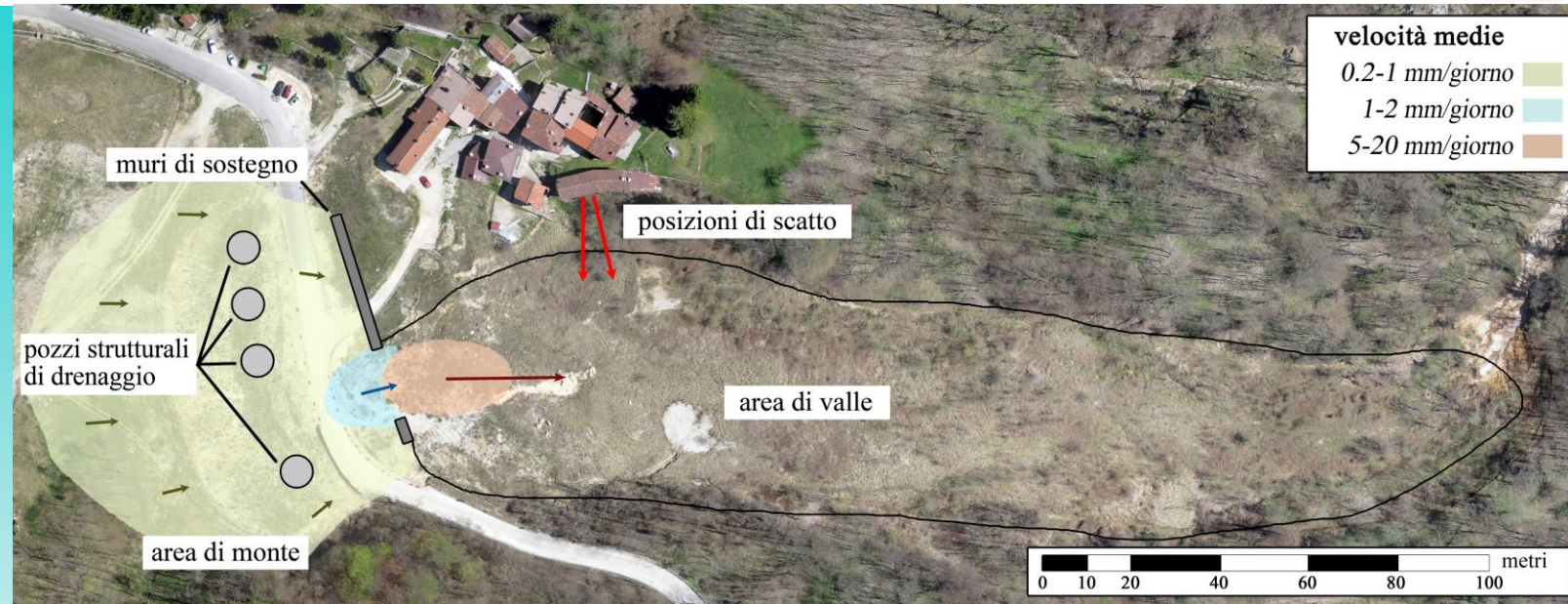
Caso 2: frana Fantoni

Comune: **Recoaro Terme (VI)**

Area: **57.000 m²**

SP 100 divide l'area in 2 parti:

- *a monte: instabilità roto-traslatoria*
- *a valle: movimento traslatorio*



Per aumentare la stabilità:

quattro pozzi strutturali + due muri di sostegno

Effetti: riduzione dei movimenti di monte (0.1-1 mm/giorno)
permanenza degli spostamenti di valle (5-20 mm/giorno)

Sistema di acquisizione di immagini deve:

- scattare periodicamente fotografie (*1 scatto/ora*)
- avere un'ottica adeguata (*18 mm*)

Sistema di interfacciamento automatico composto di:

- sistema di alimentazione
- temporizzatore di scatto
- modem per trasferimento immagini

L'intero sistema è inserito in un box in vetroresina impermeabile e resistente

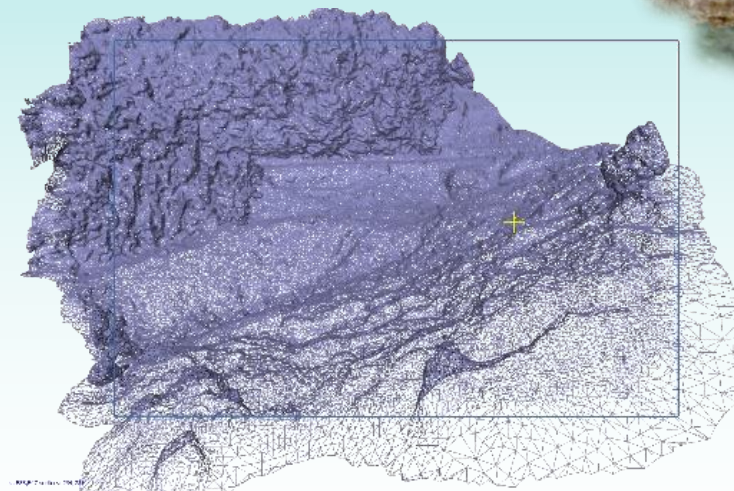


Mappa di profondità

1. Immagini rettificate per mappa di profondità da **sistema stereo**

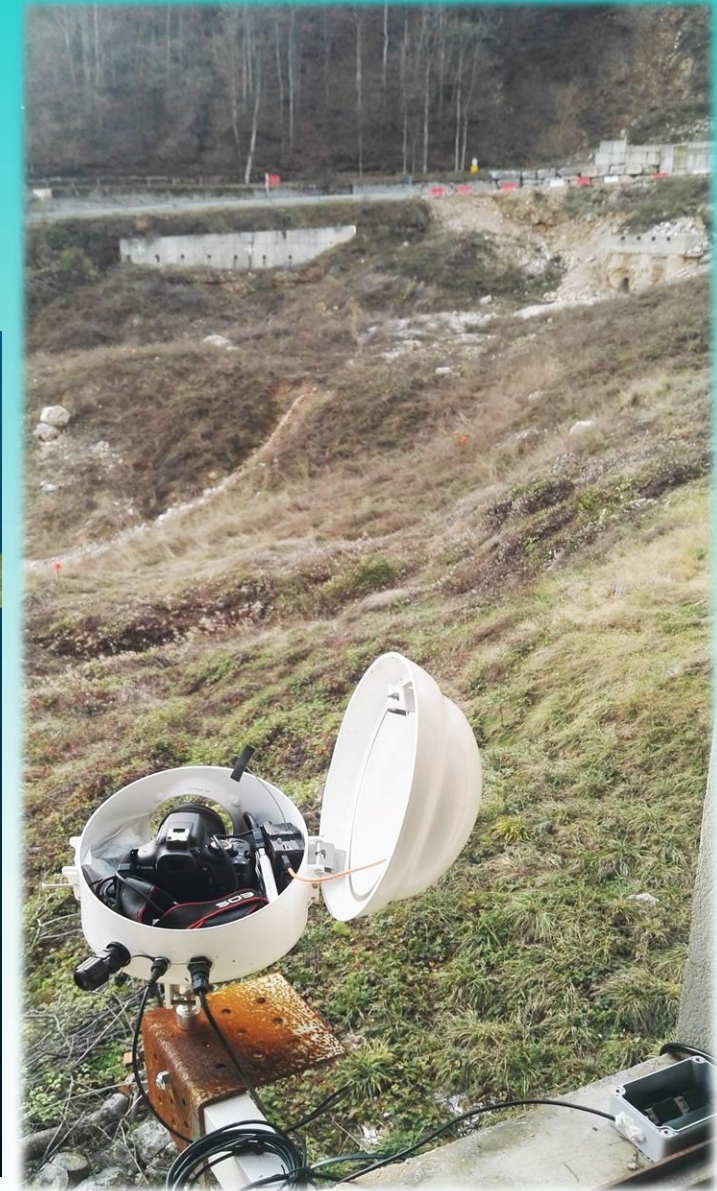


2. Nuvola 3D dei punti della superficie della frana



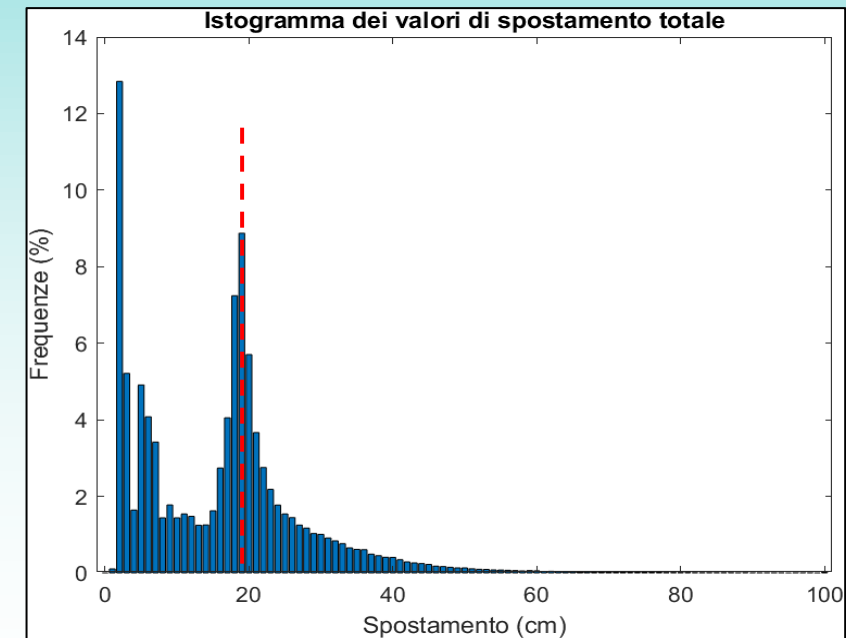
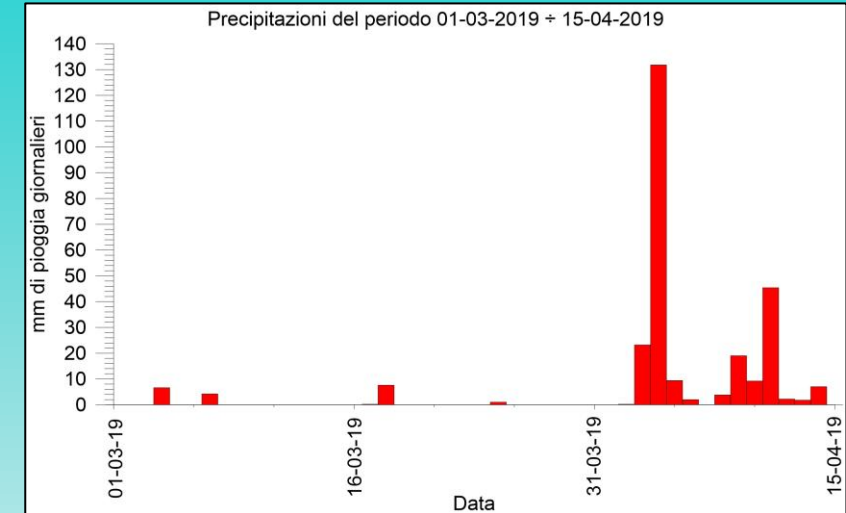
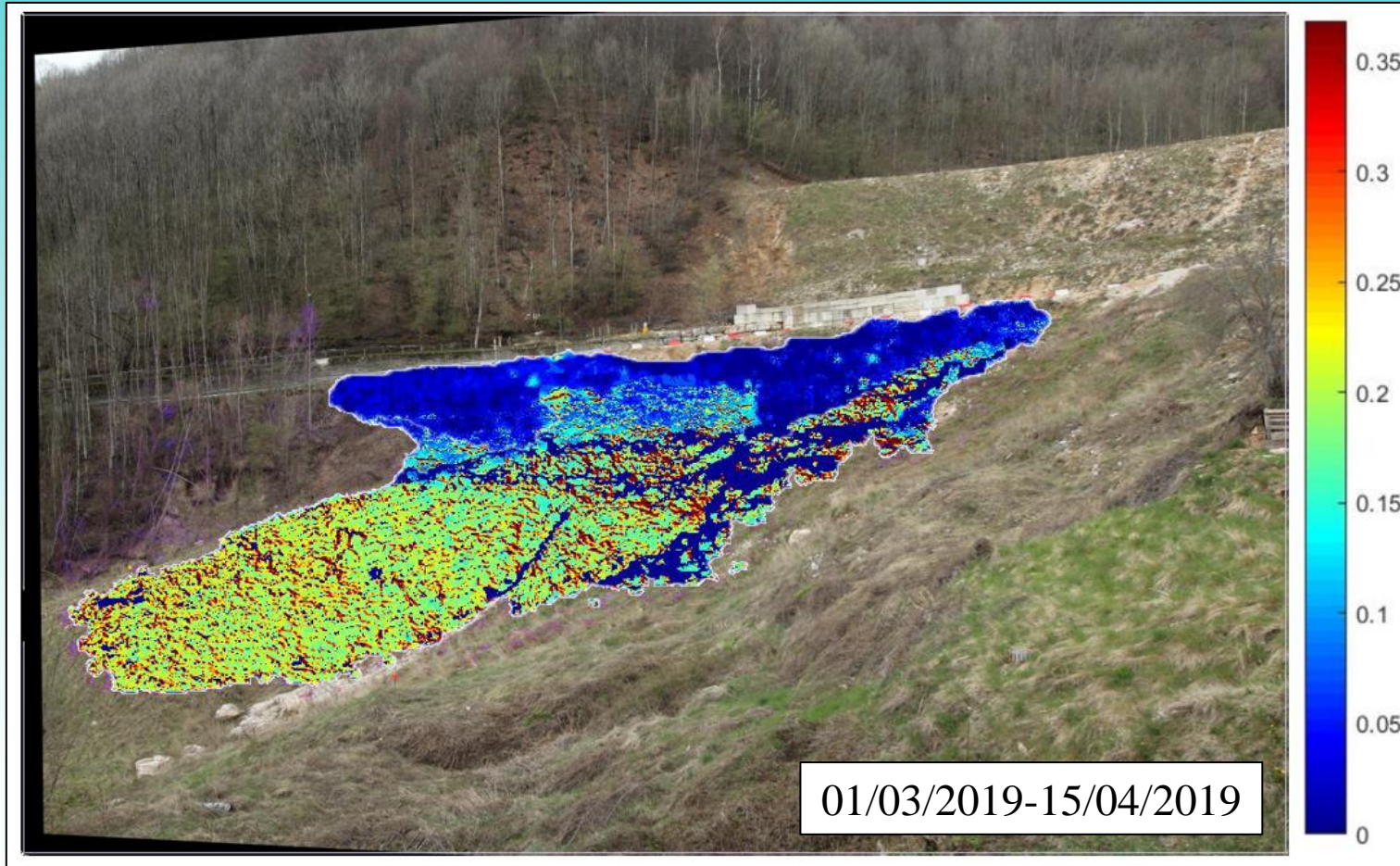
Il campo di spostamento 3D è ottenuto proiettando sulla **mappa di profondità** il flusso ottico 2D

Attività di monitoraggio: **Durata:** circa 2 anni
Frequenza: 8 scatti/giorno



Risultati stereo #1

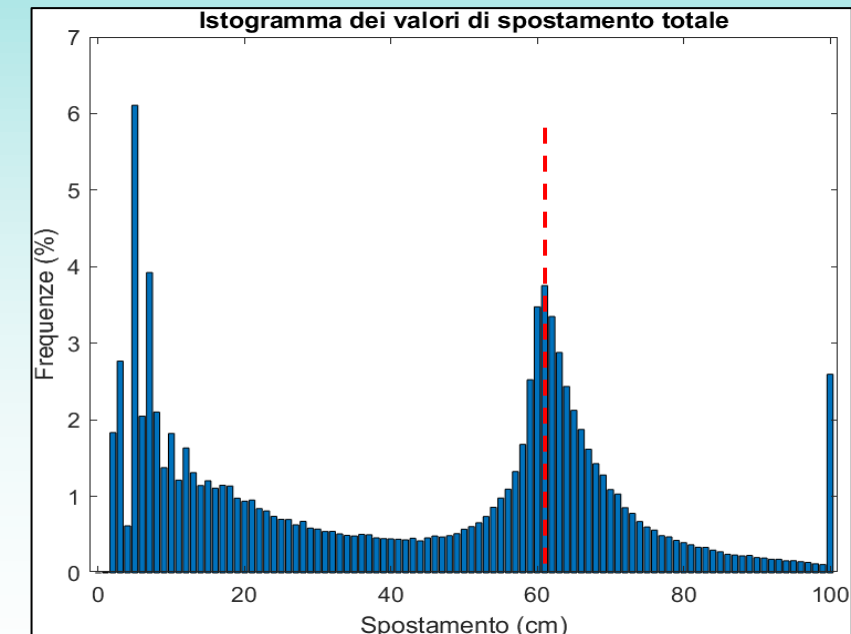
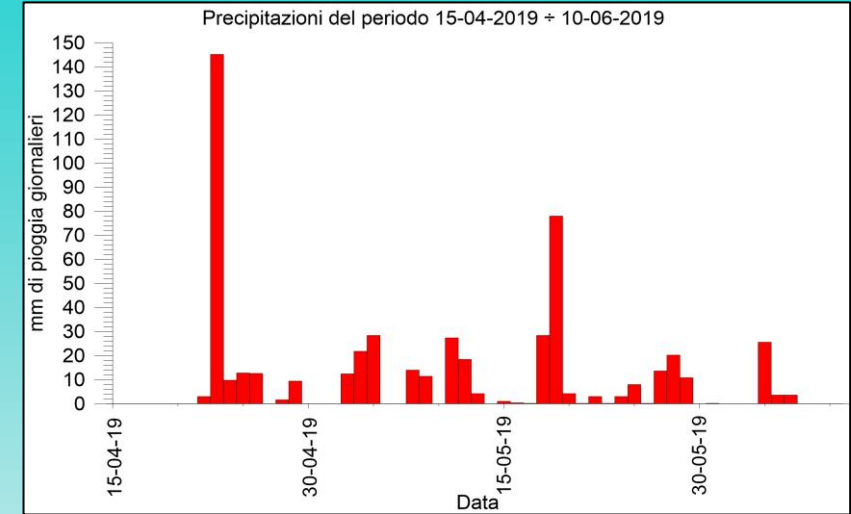
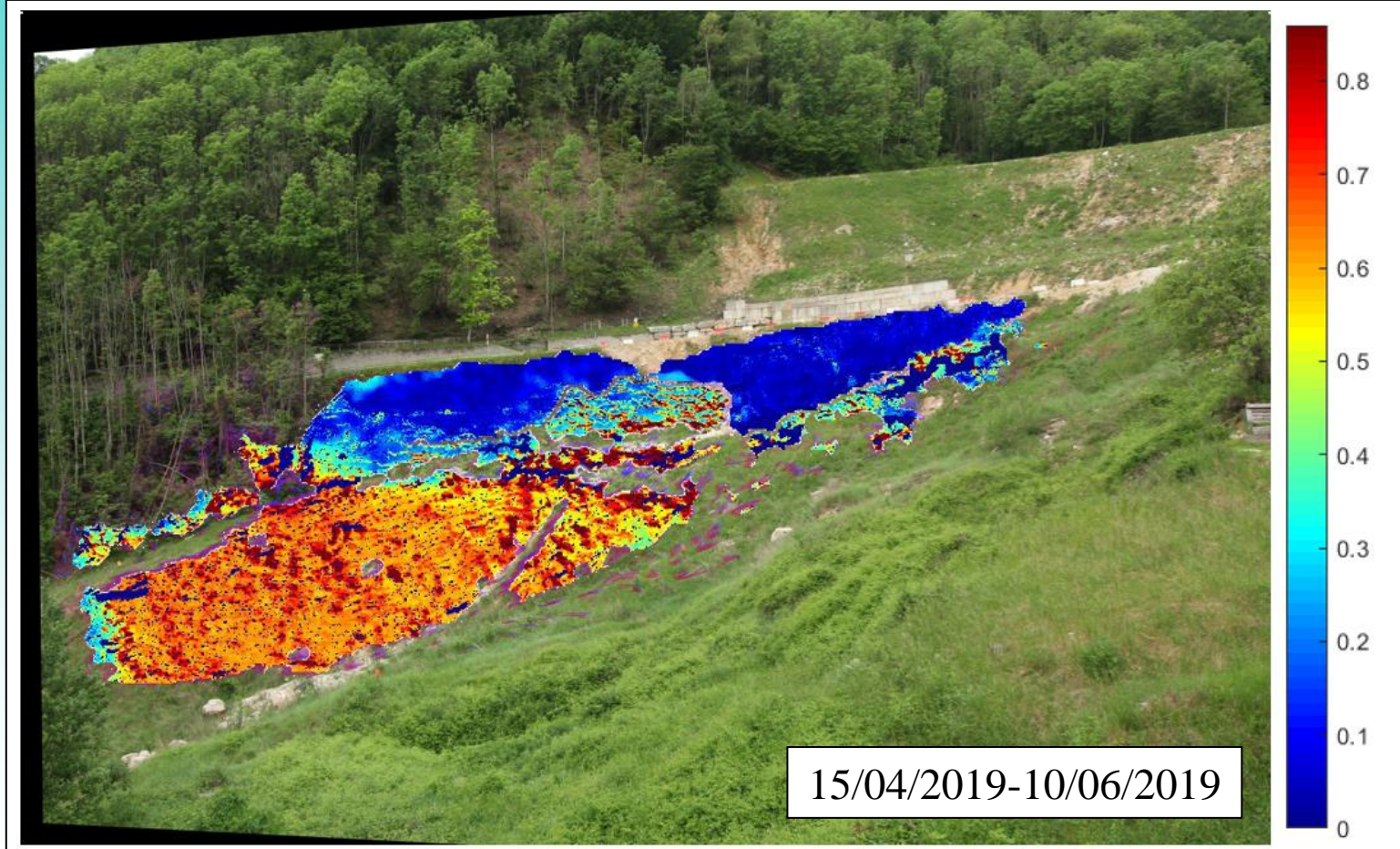
La cresta in primo piano si muove in maniera abbastanza uniforme, mostrando una *velocità omogenea*.



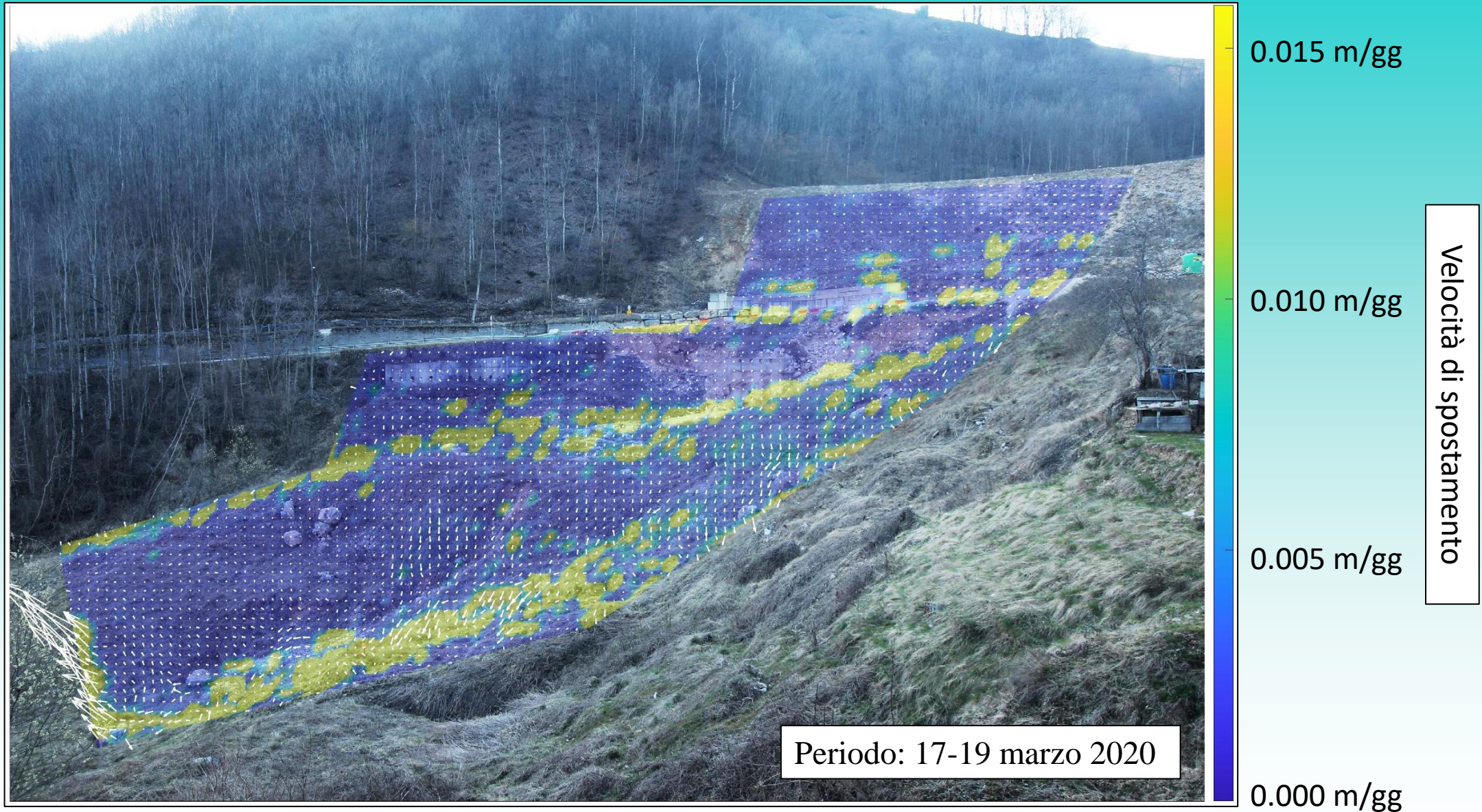
Risultati stereo #2

Anche in presenza di precipitazioni più importanti, la zona in prossimità delle berlinesi mostra una deformazione contenuta, se non nella zona tra le due strutture di sostegno.

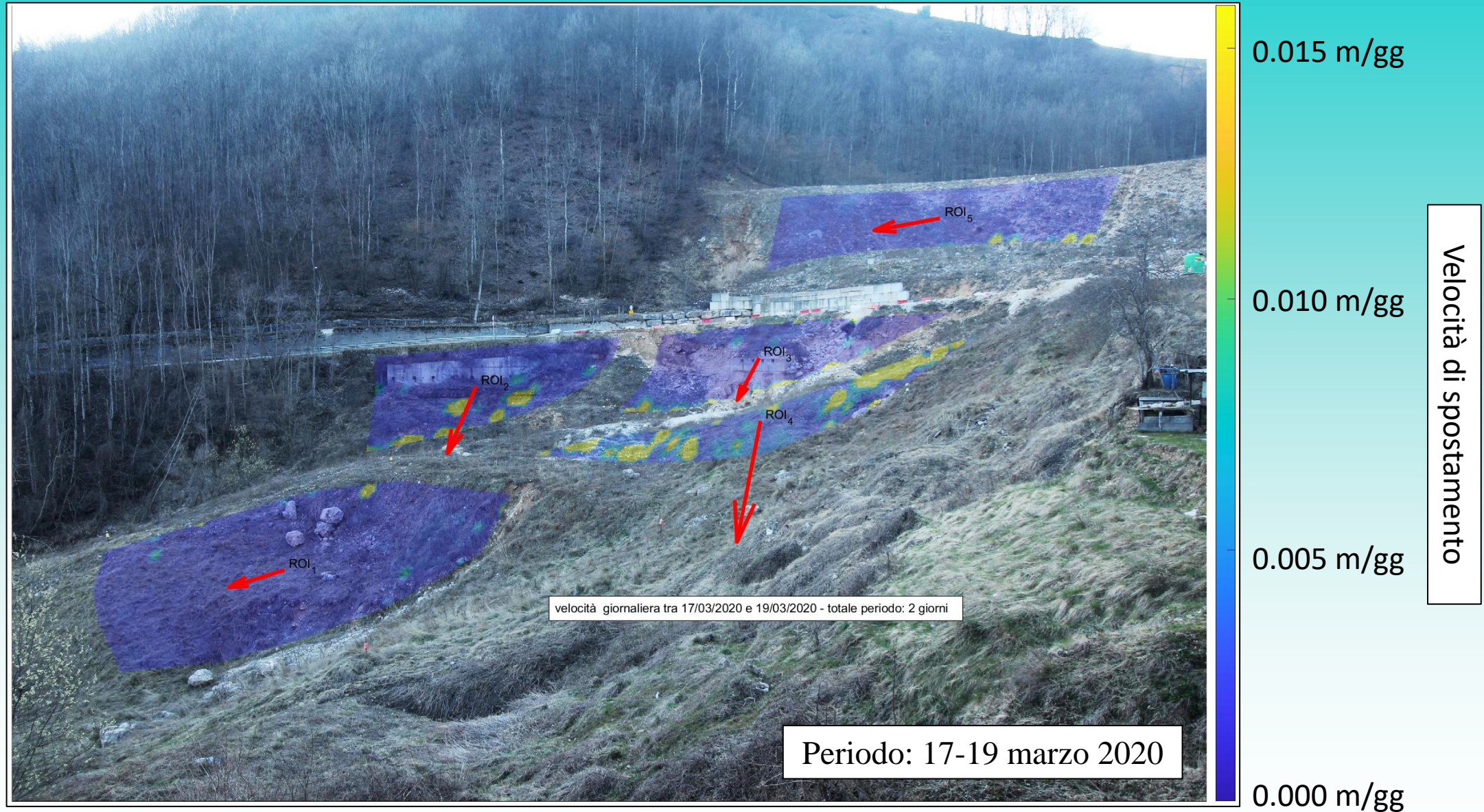
A valle, invece, si raggiungono movimenti di 60 cm.



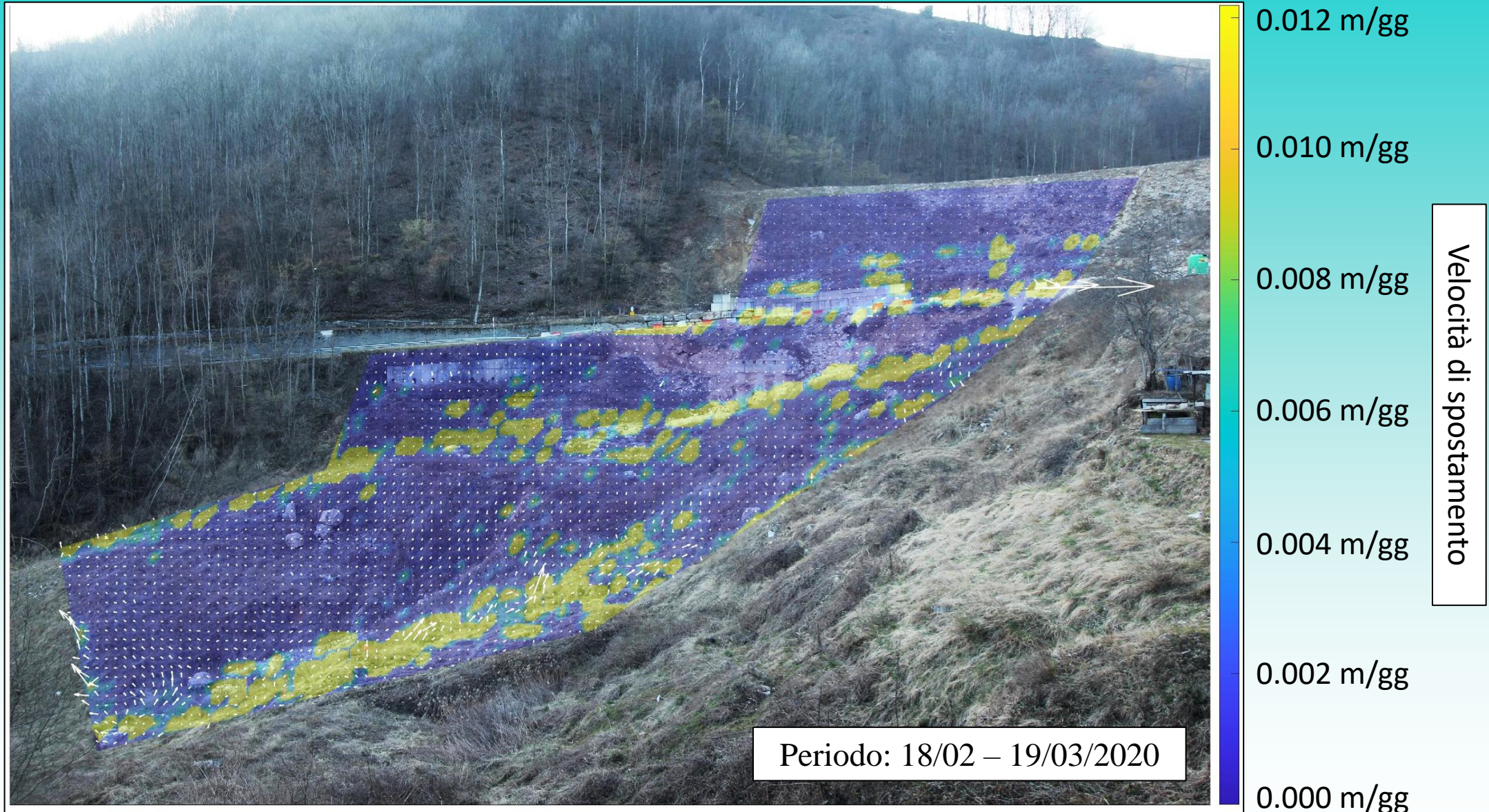
Risultati mono #1: andamento ultimi 2 giorni



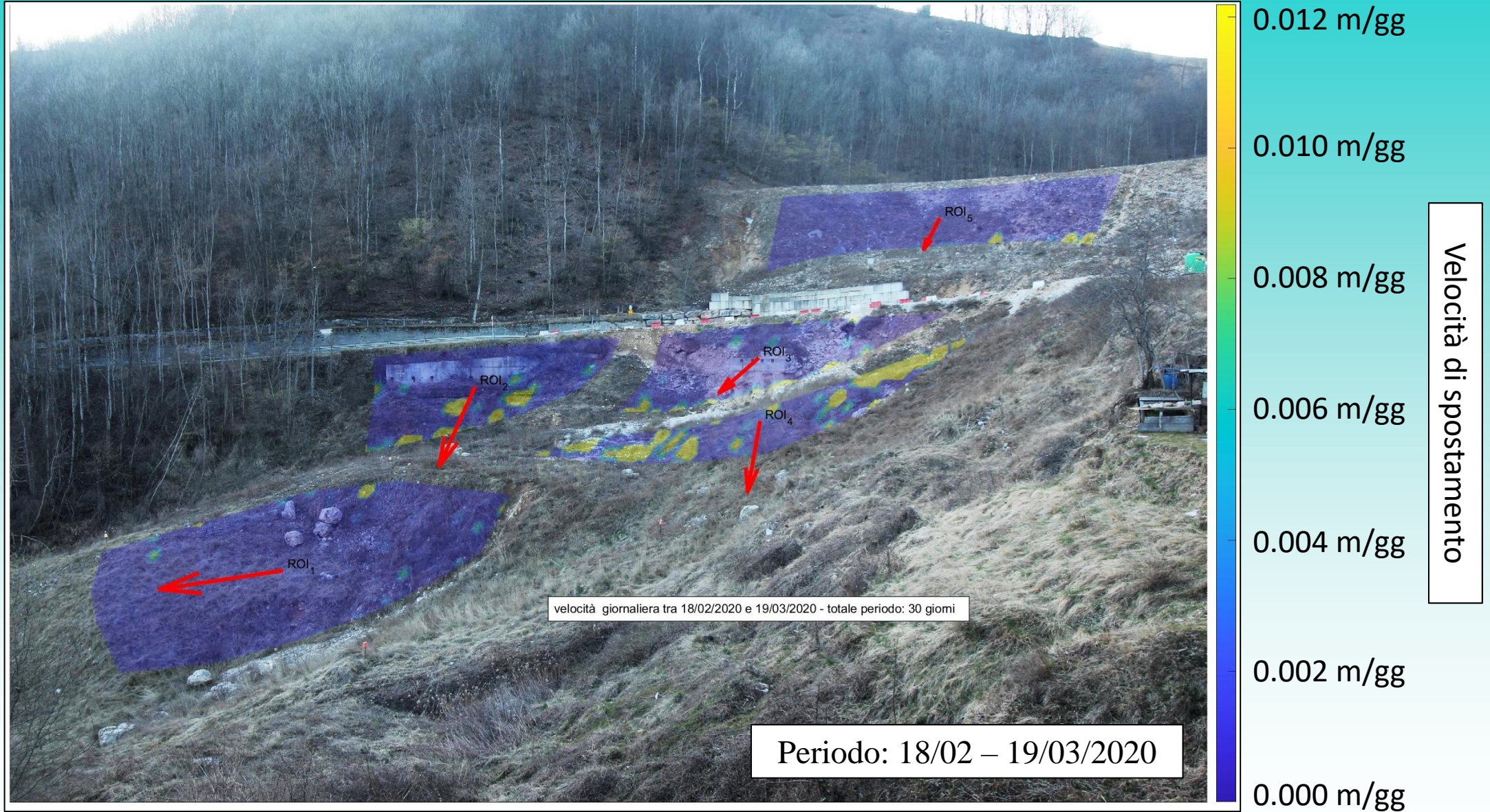
Risultati mono #1: andamento ultimi 2 giorni



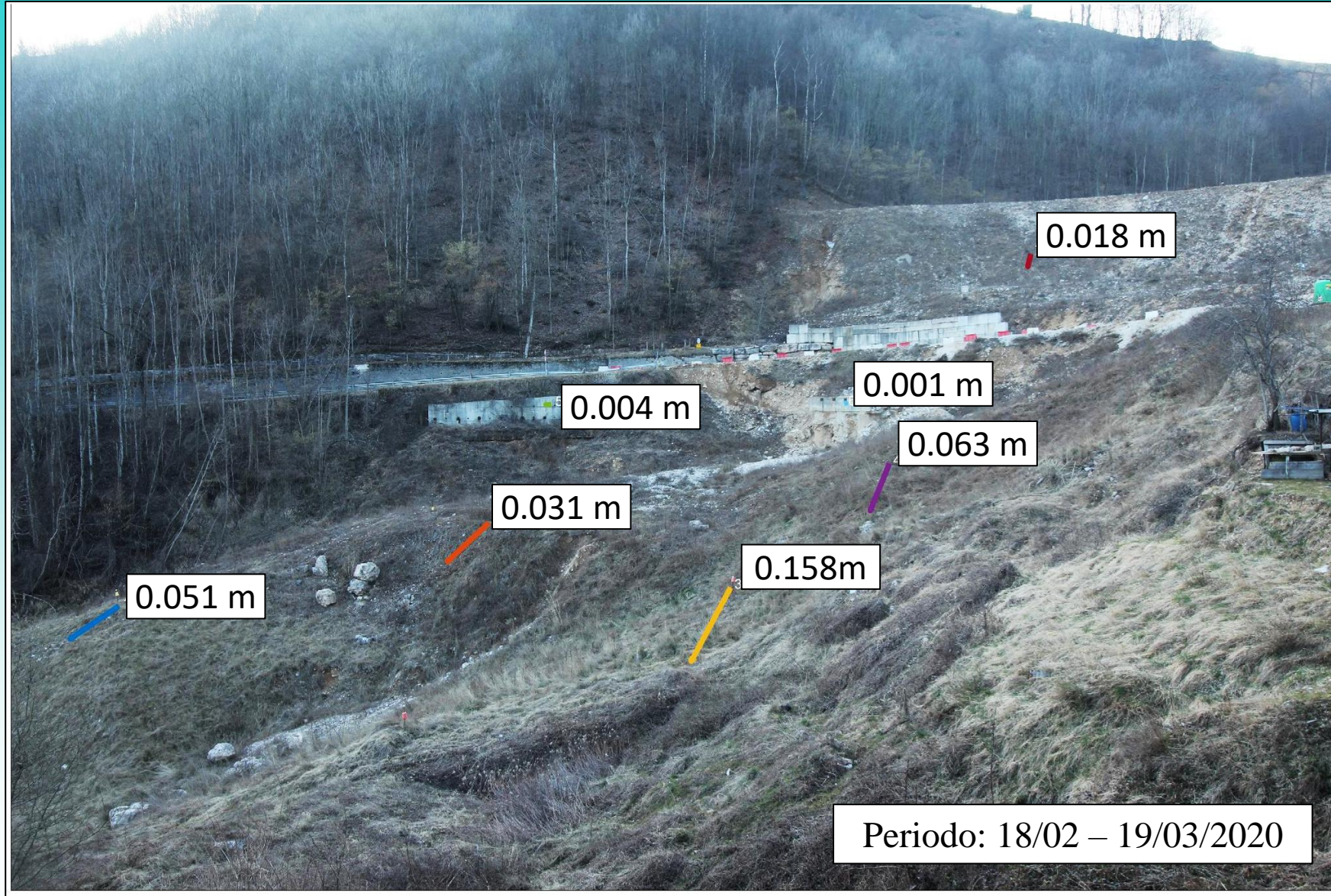
Risultati mono #2: media su 30 giorni



Risultati mono #2: media su 30 giorni



Risultati mono #2: spostamenti ultimi 30 giorni

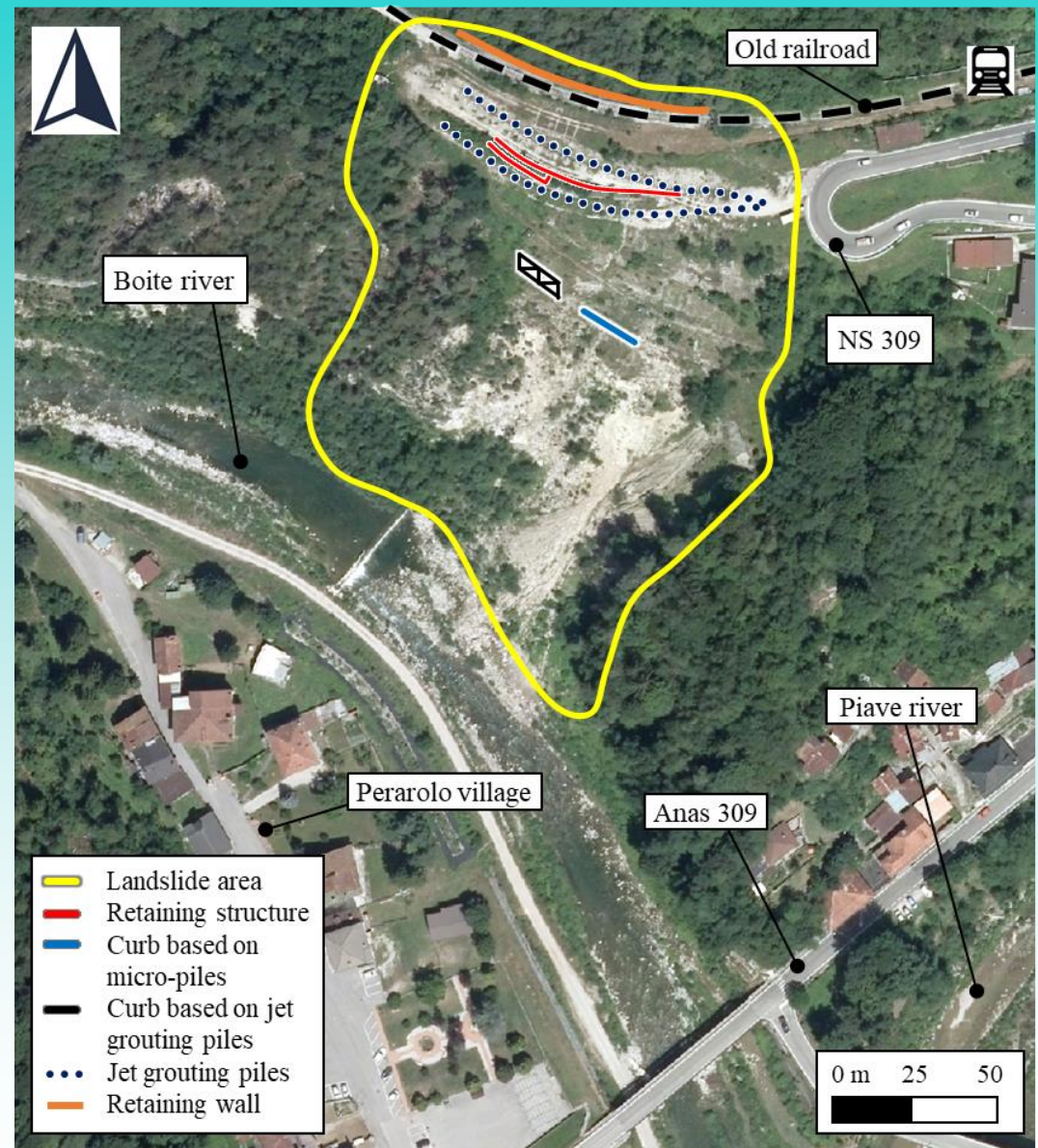
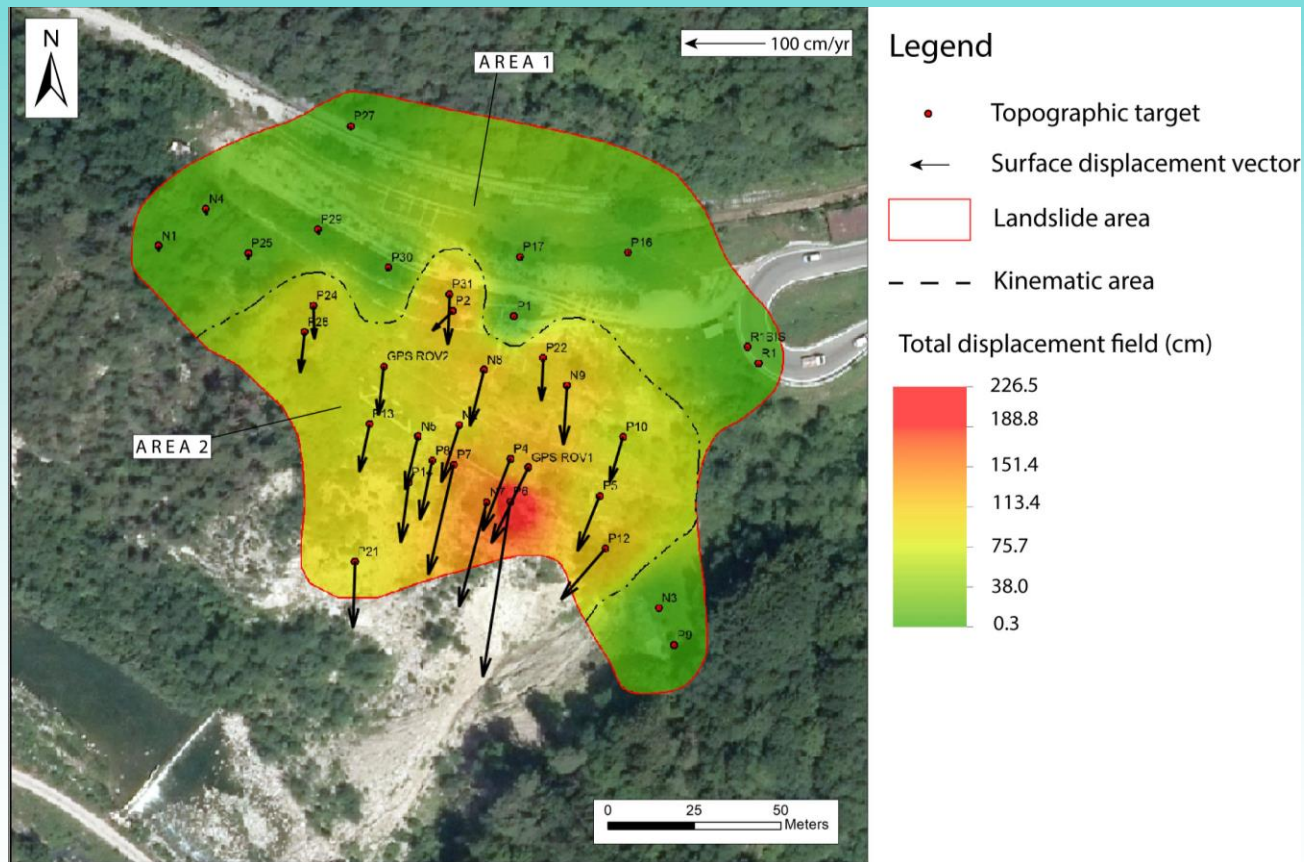


Caso 3: frana di Sant'Andrea

Comune: **Perarolo di Cadore (BL)**

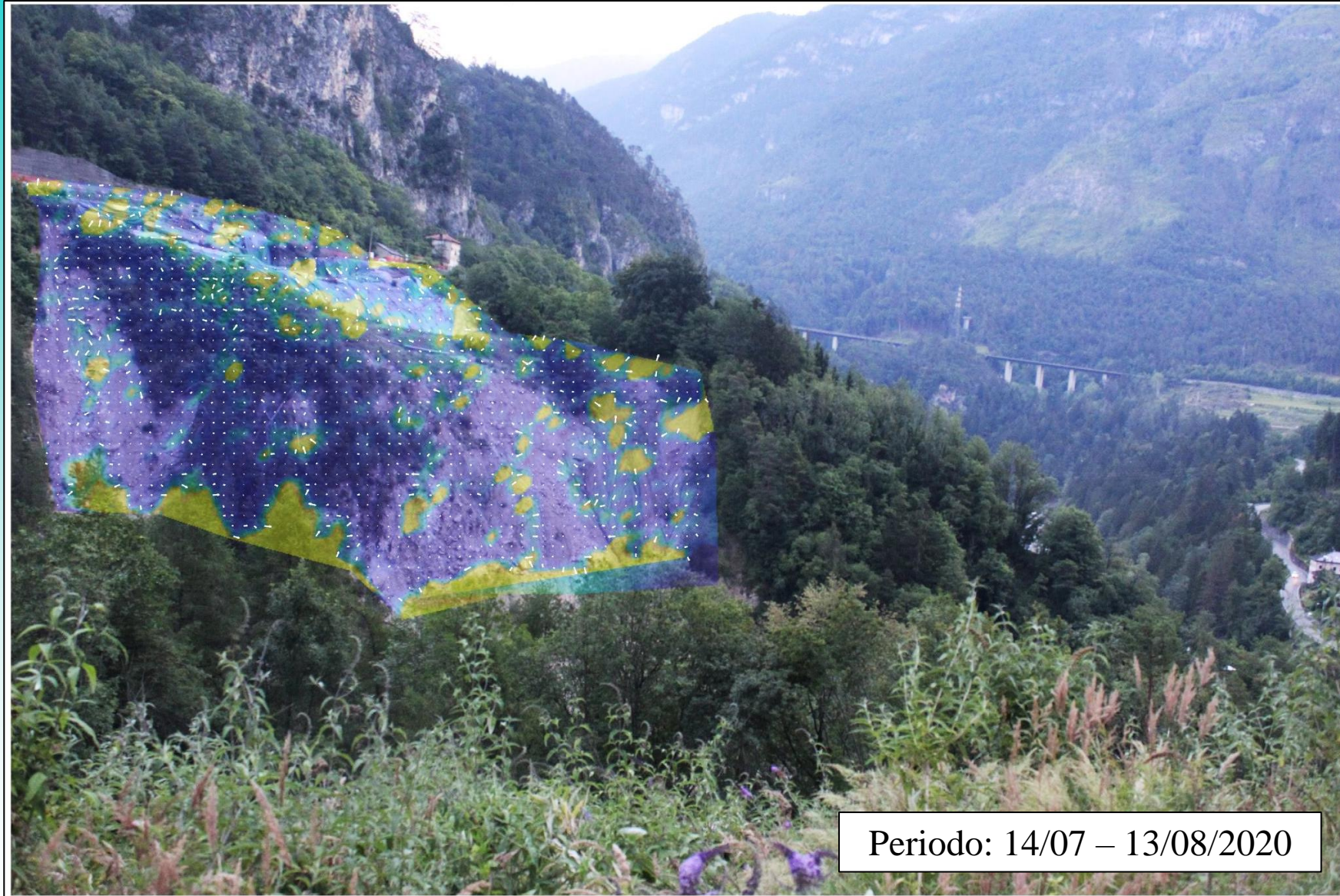
Area: **72.000 m²**

Movimento lento con una profondità media attorno ai 30 m



Risultati mono #1: media su 30 giorni

Camera 1



0.030 m/gg

0.025 m/gg

0.020 m/gg

0.015 m/gg

0.010 m/gg

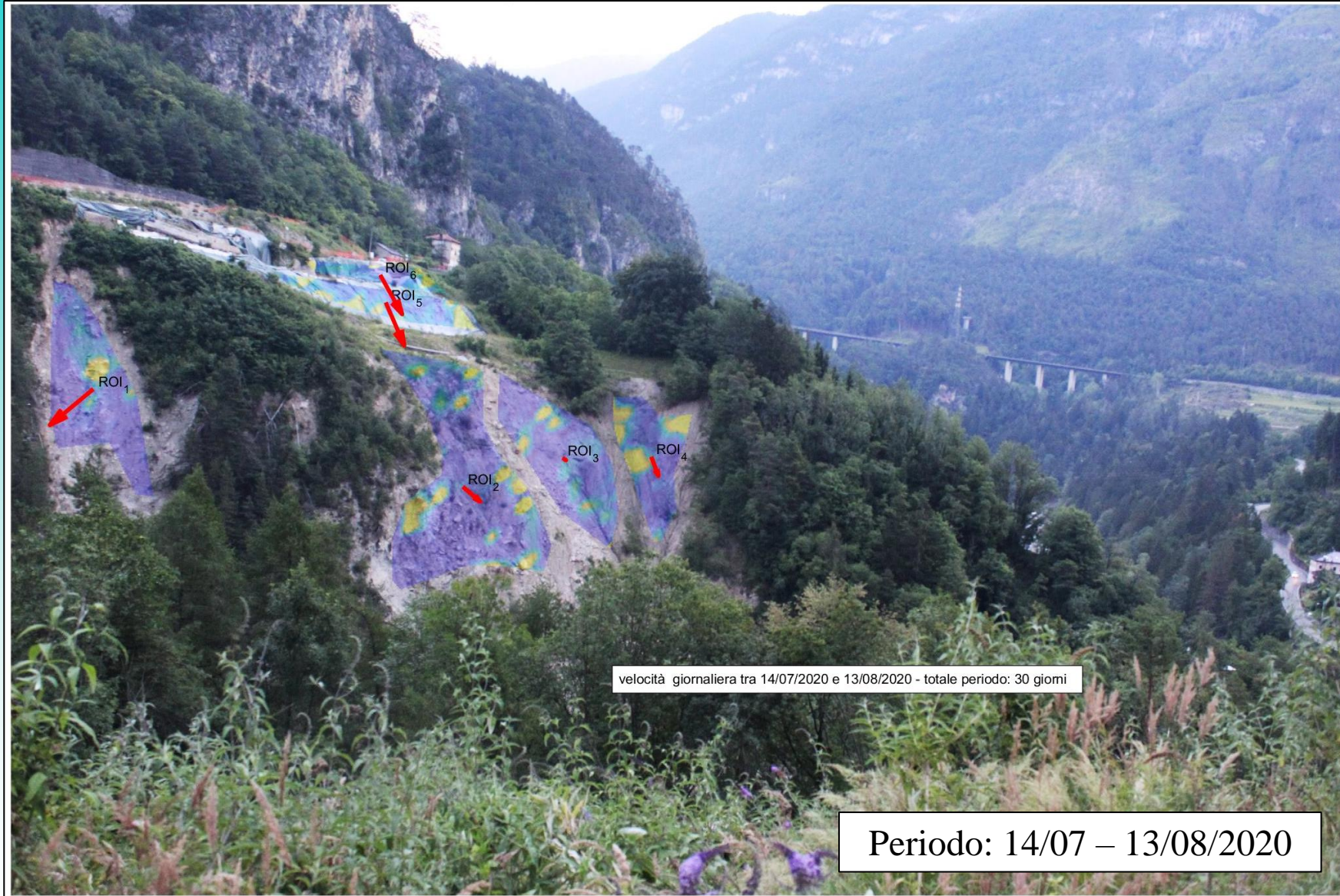
0.005 m/gg

0.000 m/gg

Velocità di spostamento

Risultati mono #1: media su 30 giorni

Camera 1



0.030 m/gg
0.025 m/gg
0.020 m/gg
0.015 m/gg
0.010 m/gg
0.005 m/gg
0.000 m/gg

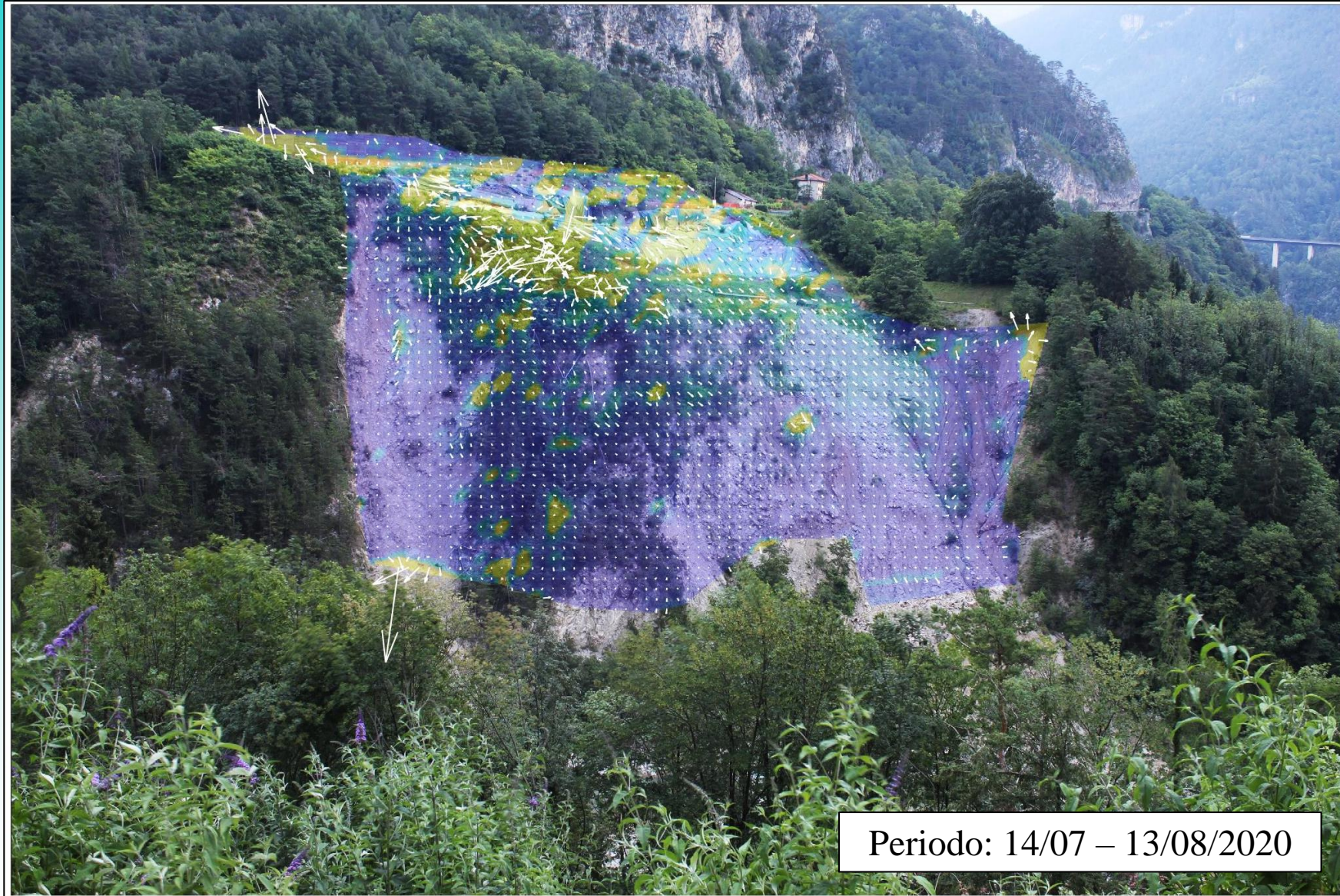
Velocità di spostamento

velocità giornaliera tra 14/07/2020 e 13/08/2020 - totale periodo: 30 giorni

Periodo: 14/07 – 13/08/2020

Risultati mono #1: media su 30 giorni

Camera 2



0.010 m/gg

0.008 m/gg

0.006 m/gg

0.004 m/gg

0.002 m/gg

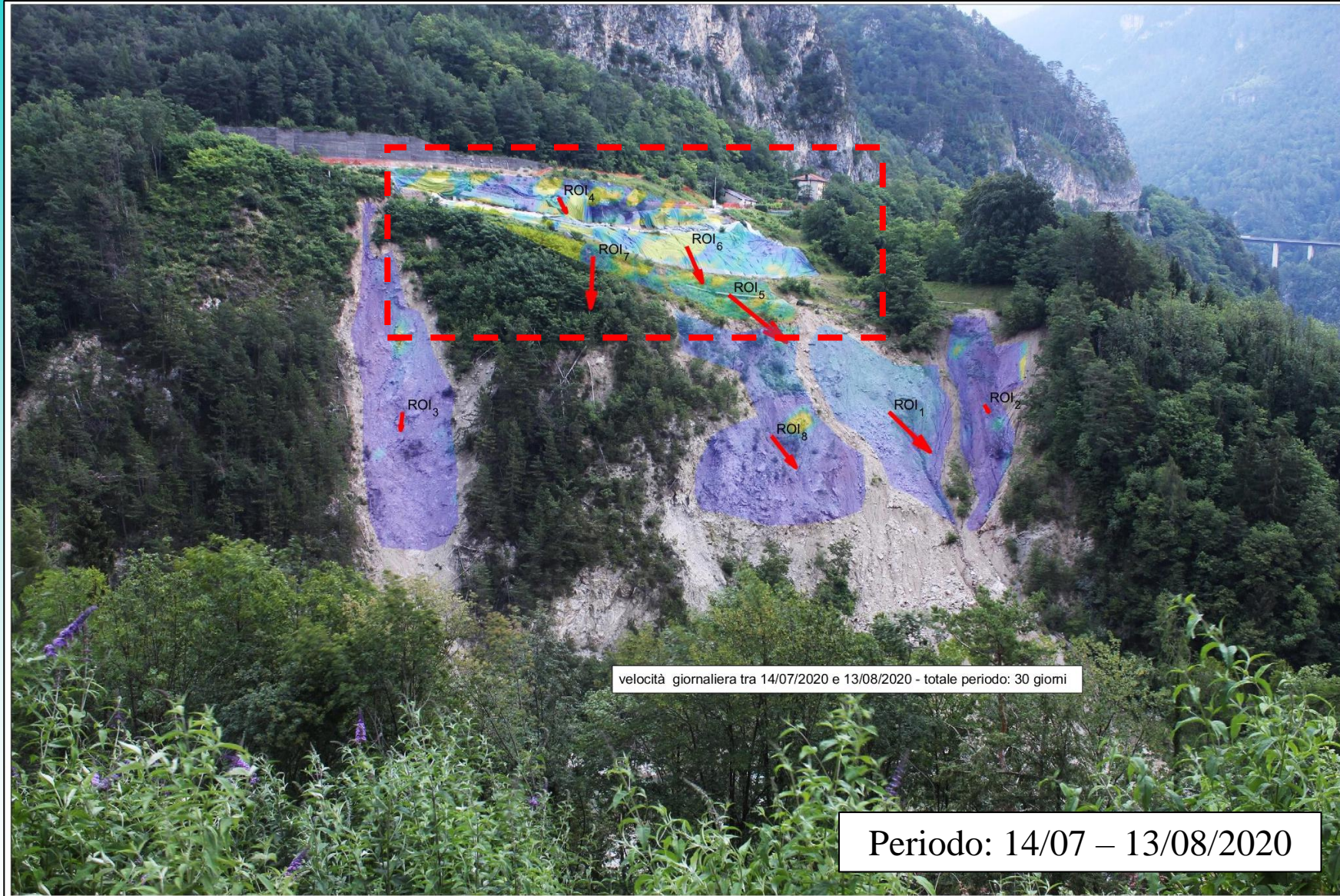
0.000 m/gg

Velocità di spostamento

Periodo: 14/07 – 13/08/2020

Risultati mono #1: media su 30 giorni

Camera 2



0.010 m/gg

0.008 m/gg

0.006 m/gg

0.004 m/gg

0.002 m/gg

0.000 m/gg

Velocità di spostamento

Risultati mono #1: spostamenti ultimi 30 giorni

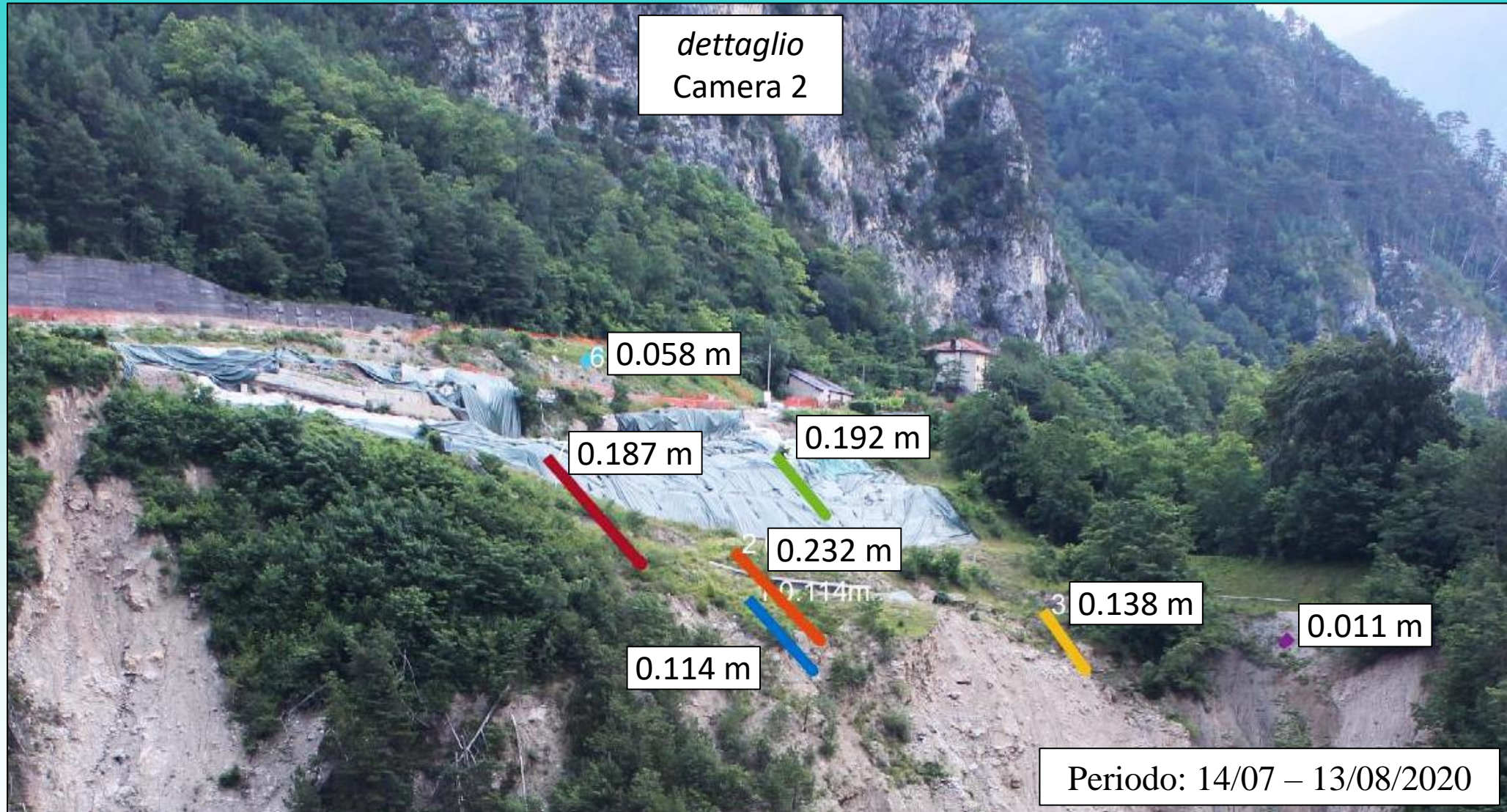
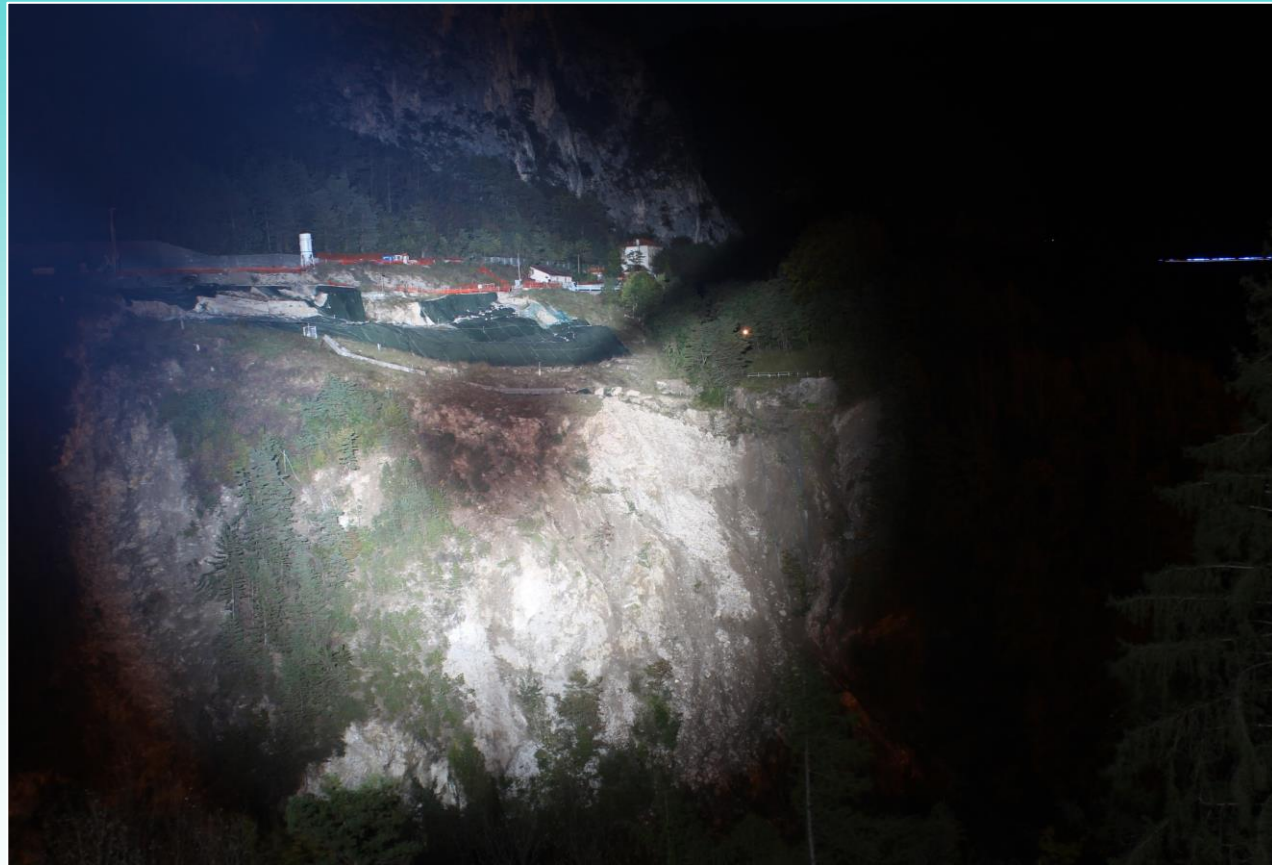


Foto in notturna con illuminatore per monitoraggio continuo



L'affidabilità dei risultati dipende:

- dalla mappa di profondità
- dal processo di calibrazione
- dalla qualità del PIV

La **precisione** delle misure diminuisce:

- in presenza di vegetazione
- con variazioni di luminosità e colore
- in caso di forte modifica delle condizioni ambientali (neve, nebbia, vegetazione, ecc.)





I punti di forza sono:

1. **adattabilità** della frequenza di monitoraggio alle condizioni specifiche
2. **continuità** nel tempo
3. **robustezza** del metodo all'eventuale mancanza di alcune foto
4. **convenienza** rispetto ad altri sistemi di monitoraggio

L'interpretazione automatica e continua dei risultati consente:

- di conoscere l'**evoluzione del fenomeno** e la sua dipendenza da altri fattori (piogge, falda,...)
- di costruire un *early warning system*

- l'accuratezza non è importante quanto la **disponibilità di informazioni dense** sul campo di spostamenti
- nonostante sia impossibile raggiungere precisioni centimetriche, è possibile ottenere informazioni **frequenti** e su **aree vaste**
- è più economica rispetto ad altre tecniche
- è adattabile alle condizioni del sito, sia in termini spaziali che temporali

La ***fotogrammetria terrestre*** risulta un'alternativa **conveniente** ed **interessante** per il monitoraggio di versanti instabili.





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
DEPARTMENT OF CIVIL, ENVIRONMENTAL
AND ARCHITECTURAL ENGINEERING



Prof. Simonetta Cola
Dip. ICEA



Dr. Lorenzo Brezzi
Dip. ICEA



Prof. Fabio Gabrieli
Dip. ICEA



Dr. Davide Vallisari
Dip. ICEA



Dr. Edoardo Carraro
Dip. Geoscienze



Dr. Antonio Pol
Dip. ICEA

Progetti:



Un moltiplicatore di opportunità.
Da non lasciarsi sfuggire.





Grazie per l'attenzione

Tecniche innovative per il monitoraggio di versante: stereofotogrammetria digitale terrestre per la gestione del rischio da frana

Lorenzo Brezzi, Simonetta Cola e Fabio Gabrieli

lorenzo.brezzi@unipd.it

Convegno Ecomondo - AGI

Monitoraggio geotecnico delle opere per la difesa del territorio e la tutela dell' ambiente

Rimini, 3 Novembre 2020