



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Alessandro Simoni
alessandro.simoni@unibo.it

Significato dei risultati delle analisi InSAR

campi di applicazione ed esempi

Egna (BZ), 7 Marzo 2025

Outline

InSAR, significato dei risultati

i risultati delle analisi InSAR sono vere e proprie misure di spostamento?

ruolo del dato SAR (lunghezza d'onda, frequenza di acquisizione e selezione degli ifgs)

ruolo delle tecniche di elaborazione, InSAR standard vs. InSAR multi-temporale

Campi di applicazione ed esempi

campo deformativo di un sisma

subsidenza dovuta a scavi in sotterraneo, estrazione fluidi, discariche

fenomeni deformativi di versante

orientazione linea di vista / versante

tipi di frane che possono essere investigate

possibilità di misura diversi trend di spostamento

analisi areale: mappatura fenomeni attivi, deformazioni pre-rottura

analisi sito-specifica: densità informazioni, serie temporali e confronto dati a terra

Applicabilità, vantaggi e limiti della tecnica



Analisi InSAR, significato dei risultati

i risultati delle analisi InSAR sono vere e proprie misure di spostamento?



Interferometria radar satellitare

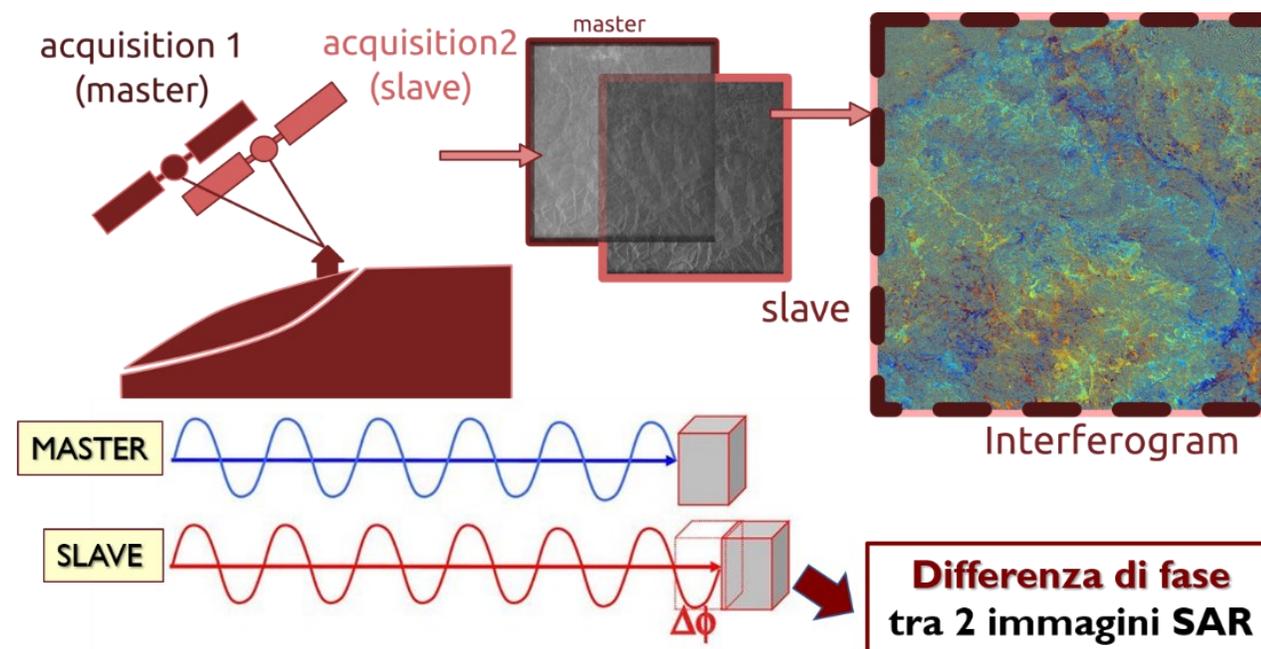
Il satellite passa periodicamente sull'area di interesse emettendo un'onda radar di cui si registra la riflessione.

L'InSAR ha l'obiettivo di ricostruire lo spostamento che può aver avuto luogo tra **due acquisizioni successive**: la loro differenza di fase è in relazione diretta con la differenza di percorso dell'onda radar.

Qualsiasi variazione della geometria di acquisizione e delle proprietà della superficie riflettente, possono influenzare la fase interferometrica.

Per giungere alla **misura dello spostamento** è necessario rimuovere:

- contributi di fase dovuti alla: topografia, atmosfera e geometria di acquisizione;
- fattori di decorrelazione temporale: qualsiasi variazione avvenuta nel tempo tra due successive acquisizioni (e.g., crescita vegetazione, aratura di un campo, presenza di un veicolo, effetti atmosferici).

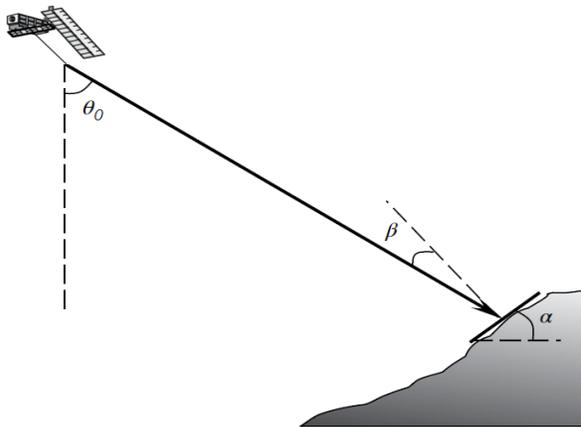


InSAR, separazione dei fattori di decorrelazione

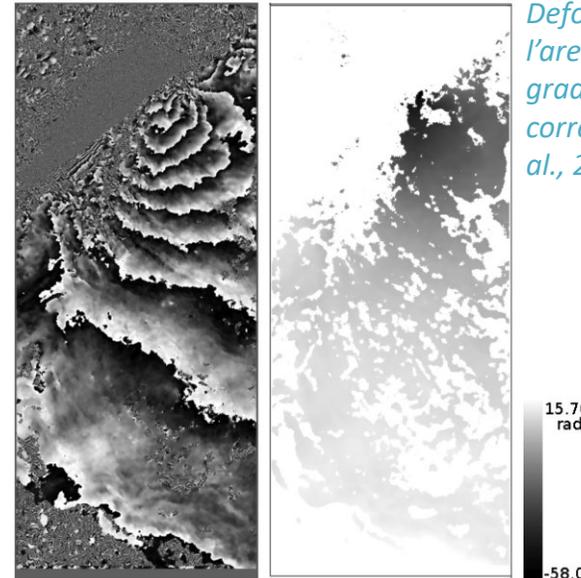
Le tecniche di interferometria differenziale debbono separare efficacemente l'effetto dei fattori di decorrelazione spaziali e temporali per poter raggiungere una misura dello spostamento al suolo.

In generale:

- l'incremento della baseline perpendicolare tende a diminuire la coerenza di un ifg (i.e., *correlazione spaziale tra due immagini SAR successive*);
- l'incremento della durata aumenta la possibilità di decorrelazione temporale (i.e., *le proprietà riflessive al suolo possono cambiare*);
- la diminuzione dell'angolo di incidenza influenza negativamente la risoluzione dell'immagine e la misura di spostamento (shadowing, layover);
- la fase interferometrica è conosciuta solamente in termini di frazione di 2π e l'interferogramma misura il corrispondente spostamento massimo pari a $\lambda/2$, per spostamenti superiori è necessario risolvere l'ambiguità di fase (unwrapping) che rimane problematica ove presenti forti gradienti deformativi.
- la misura che otteniamo è unidimensionale e relativa alla linea di vista (LOS).



Quando la superficie è perpendicolare all'impulso radar ($b=0$), la risoluzione di misura è massima.

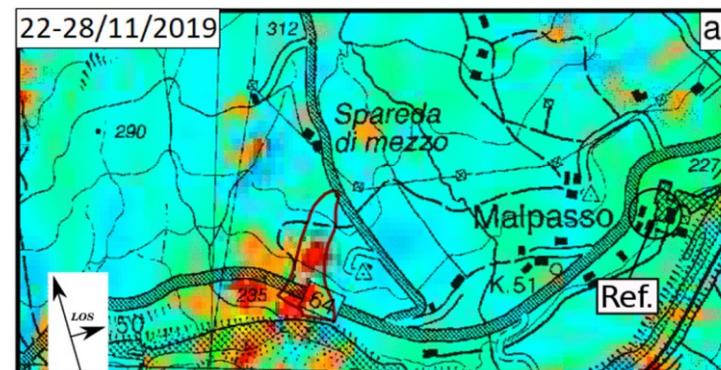


Deformazione superficiale indotta da sisma: l'area interessata è molto estesa e il moderato gradiente deformativo consentono di risolvere correttamente l'ambiguità di fase (da Tupin et al., 2014).

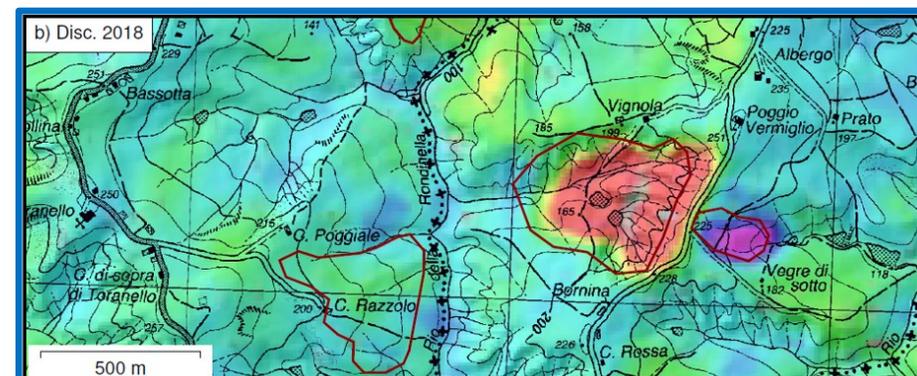


Strategie di elaborazione

Nonostante la rimozione degli effetti topografici e atmosferici, i singoli interferogrammi contengono rumore residuo che complica la loro interpretazione ed utilizzo come strumento di misura.

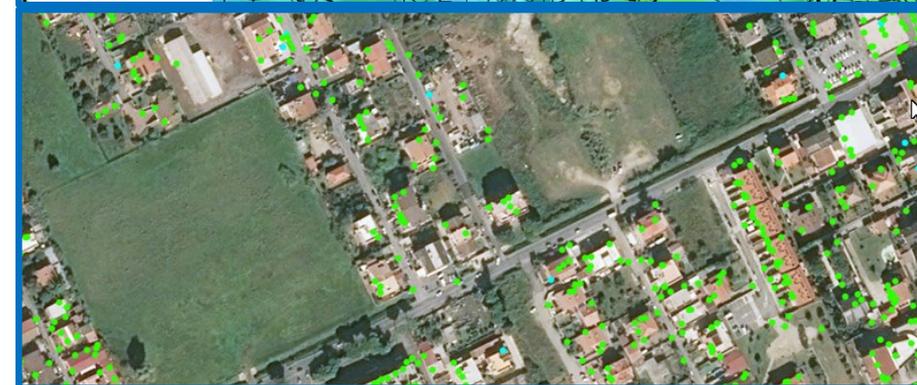


Possibile analizzare i singoli interferogrammi o combinarli in stack di varia durata (**InSAR standard**).



In alternativa, data la numerosità delle immagini radar disponibili, esistono metodologie per combinare le informazioni e aumentare l'accuratezza delle misure.

In questo modo si possono rilevare e quantificare spostamenti di piccolo entità (fino a mm/anno) ma diminuisce la copertura territoriale (**InSAR multi-temporale**).



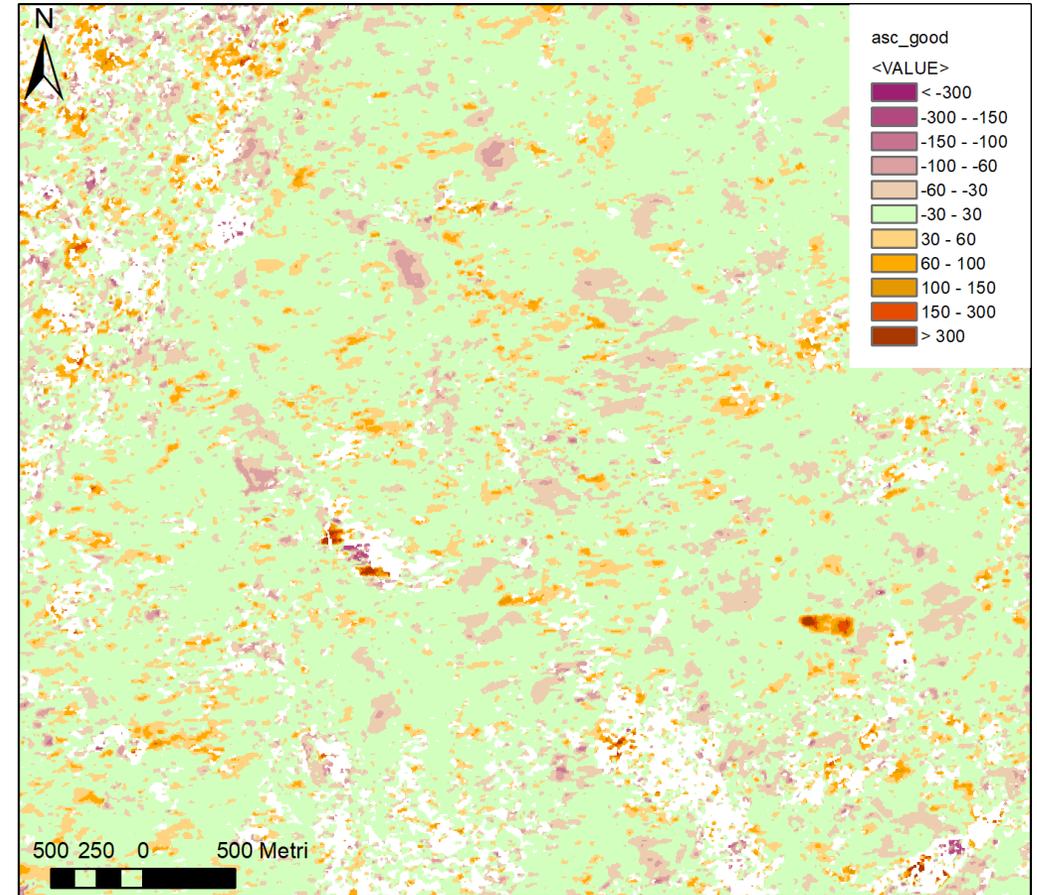
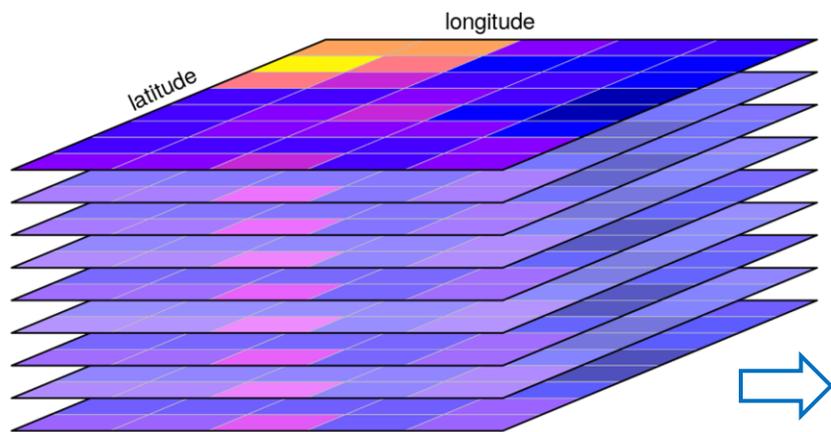
InSAR standard '2 passaggi'

L'InSAR standard ha acquisito maggior significato negli ultimi anni grazie alla qualità delle immagini SAR:

- minori baseline perpendicolari (> precisione orbitale);
- minori baseline temporali (< tempi di rivisitazione)

E' la tecnica più semplice ed 'antica' tra quelle basate sull'interferometria radar.

Fin dai tardi anni '90 utilizzata per mappare il campo deformativo dei terremoti o dei vulcani.



Lo stacking (sovrapposizione di interferogrammi, per ogni pixel calcolo il tasso di spostamento medio) incrementa il rapporto segnale-rumore e può essere utilizzato per evidenziare gli spostamenti persistenti.

InSAR standard

L'InSAR standard massimizza le informazioni di spostamento che possono essere estratte dalle immagini SAR con tecnica interferometrica.

Vantaggi:

- individuazione segnali deformativi in aree scarsamente urbanizzate;
- pattern spaziale di deformazione e sua evoluzione nel tempo;

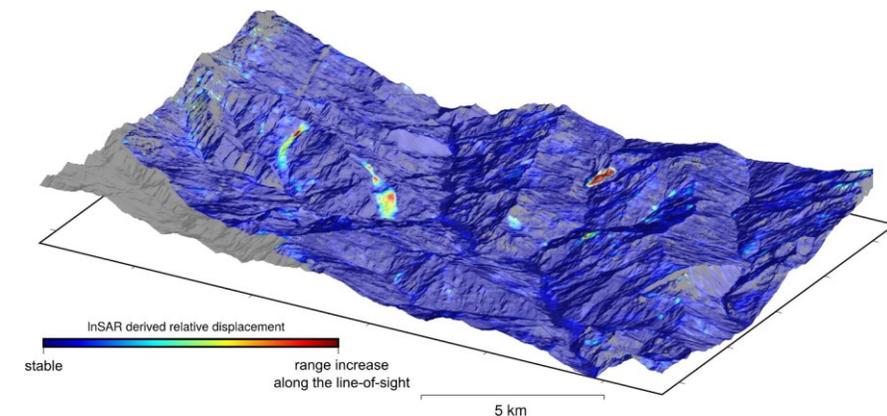
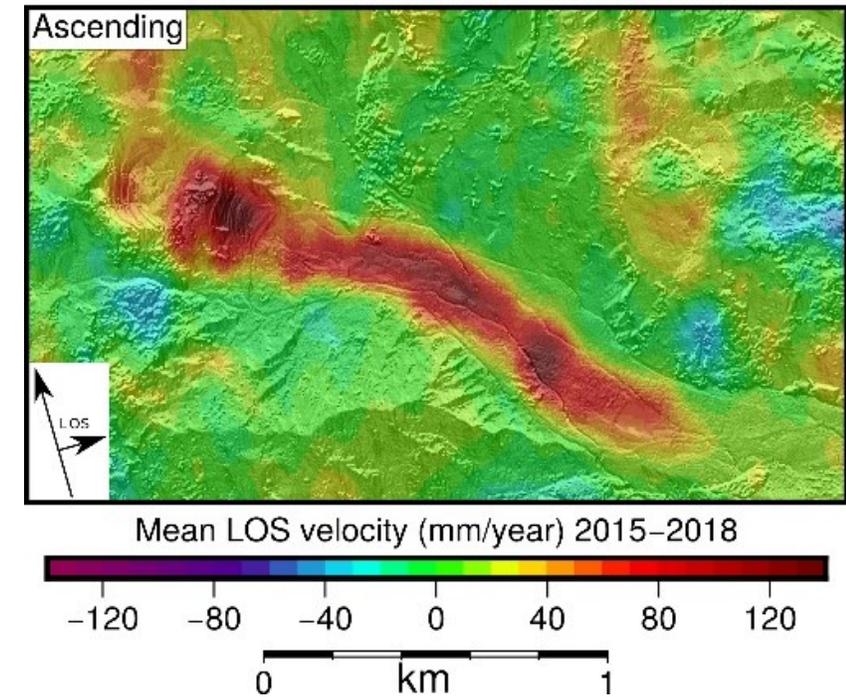
Limitazioni:

- il processamento non è automatico: selezione ifgs e filtraggio in funzione fenomeno indagato;
- i risultati non significato quantitativo solo approssimativo.

applicabilità: tassi di spostamento prossimi al limite teorico della tecnica (30 to 1000 mm/anno approx. con Sentinel 1).

cosa ottengo: mappe di spostamento quasi continue (richiedono interpretazione esperta ma contengono molte informazioni)

- confronto ai prodotti multi-temporali, mantengo molte più informazioni di spostamento ma anche molto più rumore residuo -



InSAR multi-temporale

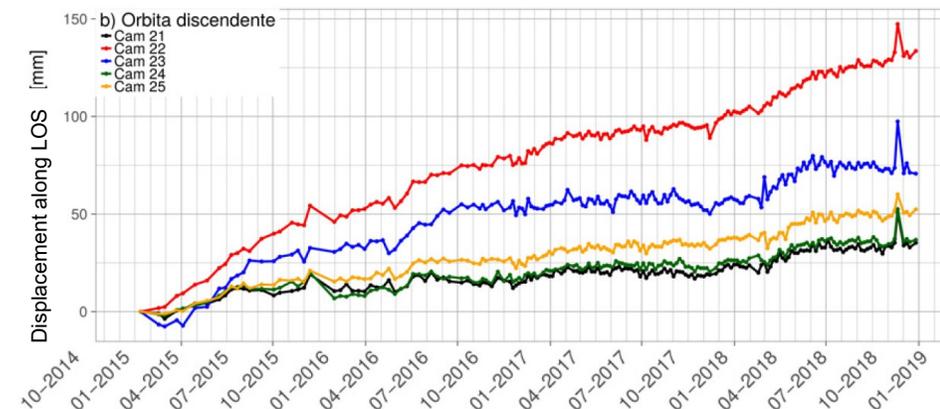
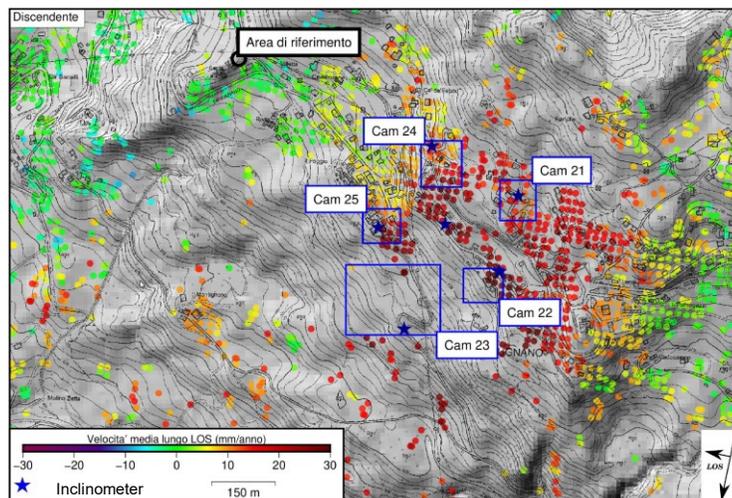
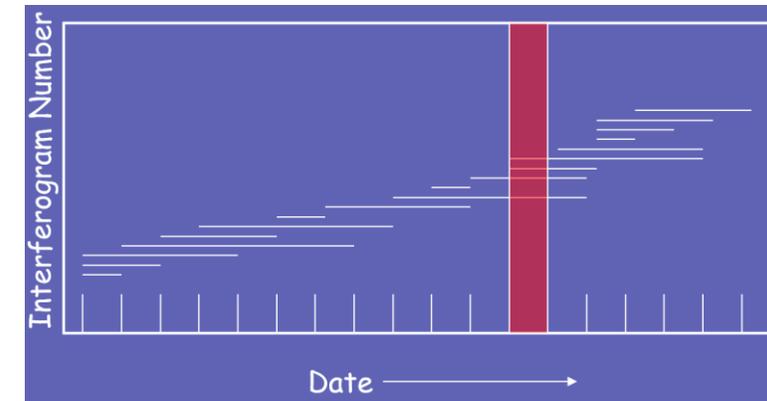
Data la numerosità delle immagini radar disponibili, sono stati sviluppati con successo metodi per sfruttare le serie temporali e aumentare l'accuratezza delle misure interferometriche. In questo modo si possono rilevare e quantificare spostamenti di piccolo entità (fino a mm/anno).

Esistono due principali strategie di analisi multi-temporale: i) approccio PS (permanent scatterers); ii) approccio SBAS (small baseline).

In generale, le analisi multi-temporali sono finalizzate all'estrazione di informazioni di spostamento per i punti (stable / permanent / persistent scatterers) che forniscono riflessioni stabili e coerenti nei successive interferogrammi.

- La numerosità e la durata degli ifgs utilizzati per l'analisi influenzano:**
- il range di velocità misurabili**
 - la possibilità di cogliere trend non lineari di spostamento.**

L'idea di base!



InSAR multi-temporale

Impiegando tecniche multi-temporali che utilizzano lunghe serie di immagini SAR, i problemi di decorrelazione degli interferogrammi sono mitigate.

Si individuano riflettori radar che forniscono segnale di fase misurabile nel tempo.

Vantaggi:

- precisione (risultati confrontabili con i dati misurati a terra);
- serie temporali di spostamento.

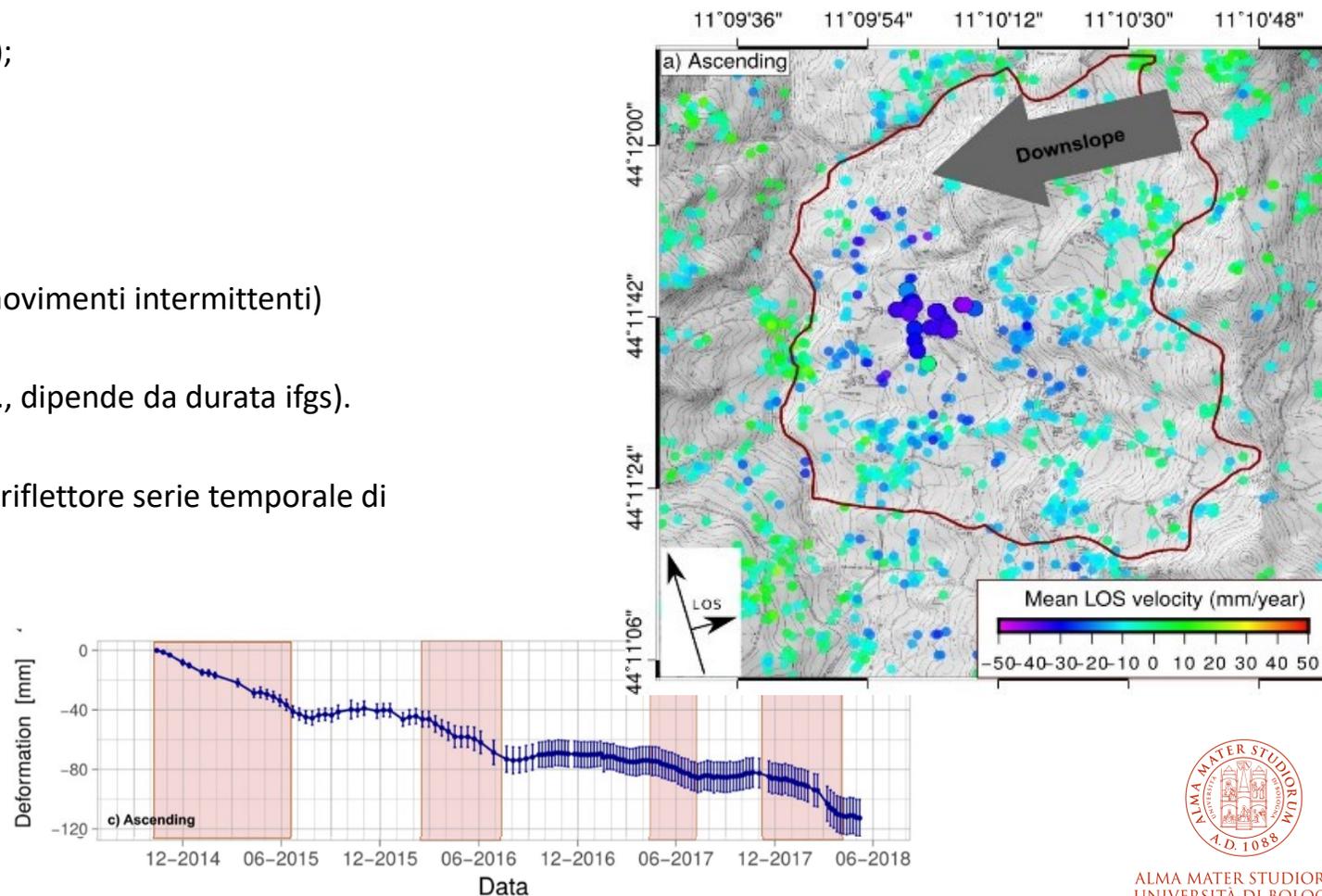
Limitazioni:

- i riflettori stabili offrono copertura territoriale discontinua;
- difficoltà nel rilevare trend non lineari (i.e, accelerazioni, movimenti intermittenti)

applicabilità: tassi di spostamento contenuti (100 mm/anno ca., dipende da durata ifgs).

cosa ottengo: Mappe con velocità dei riflettori stabili. Per ogni riflettore serie temporale di spostamento.

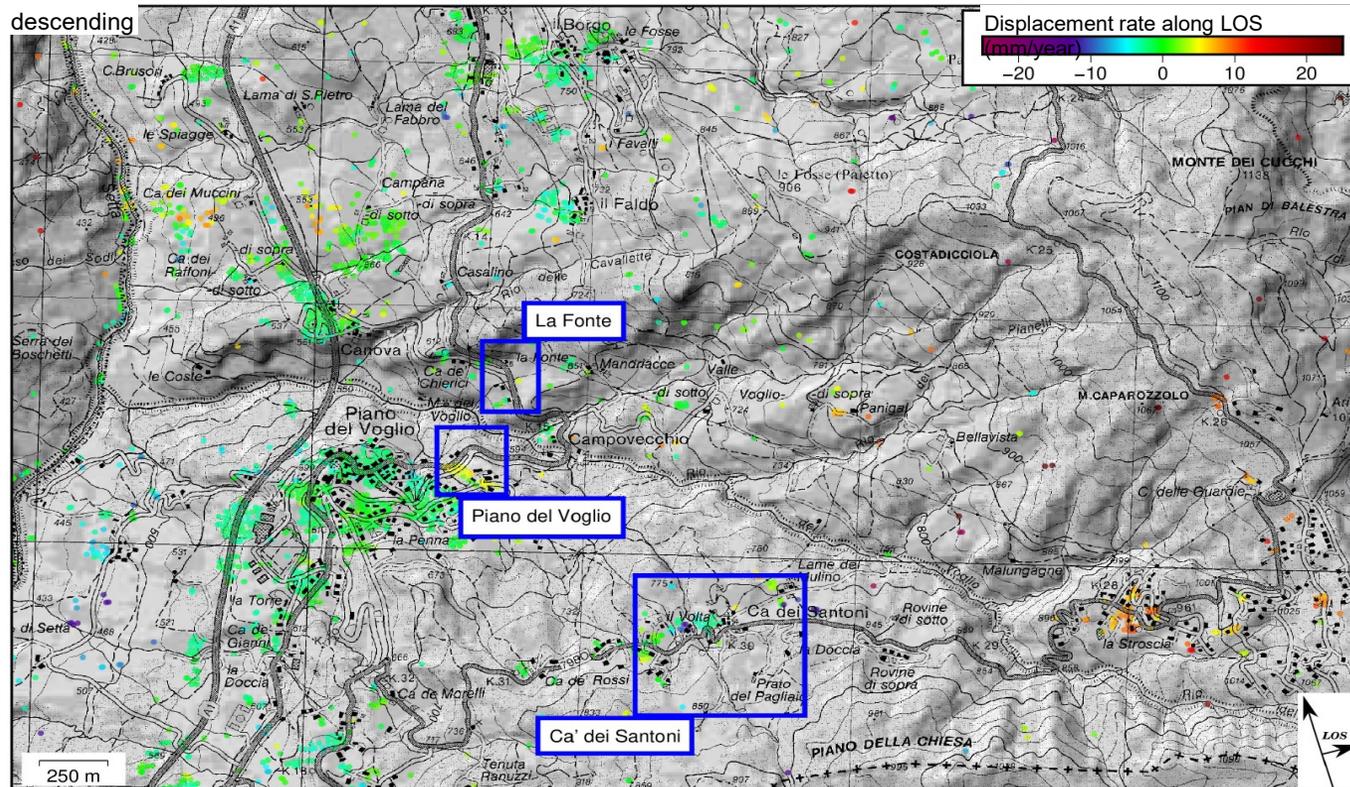
- confronto ai prodotti InSAR standard, ottengo serie temporali dettagliate (solo dove la riflessione è coerente), l'impiego di numerosi ifgs di diverse durate tende a regolarizzare il trend di spostamento -



InSAR multi-temporale

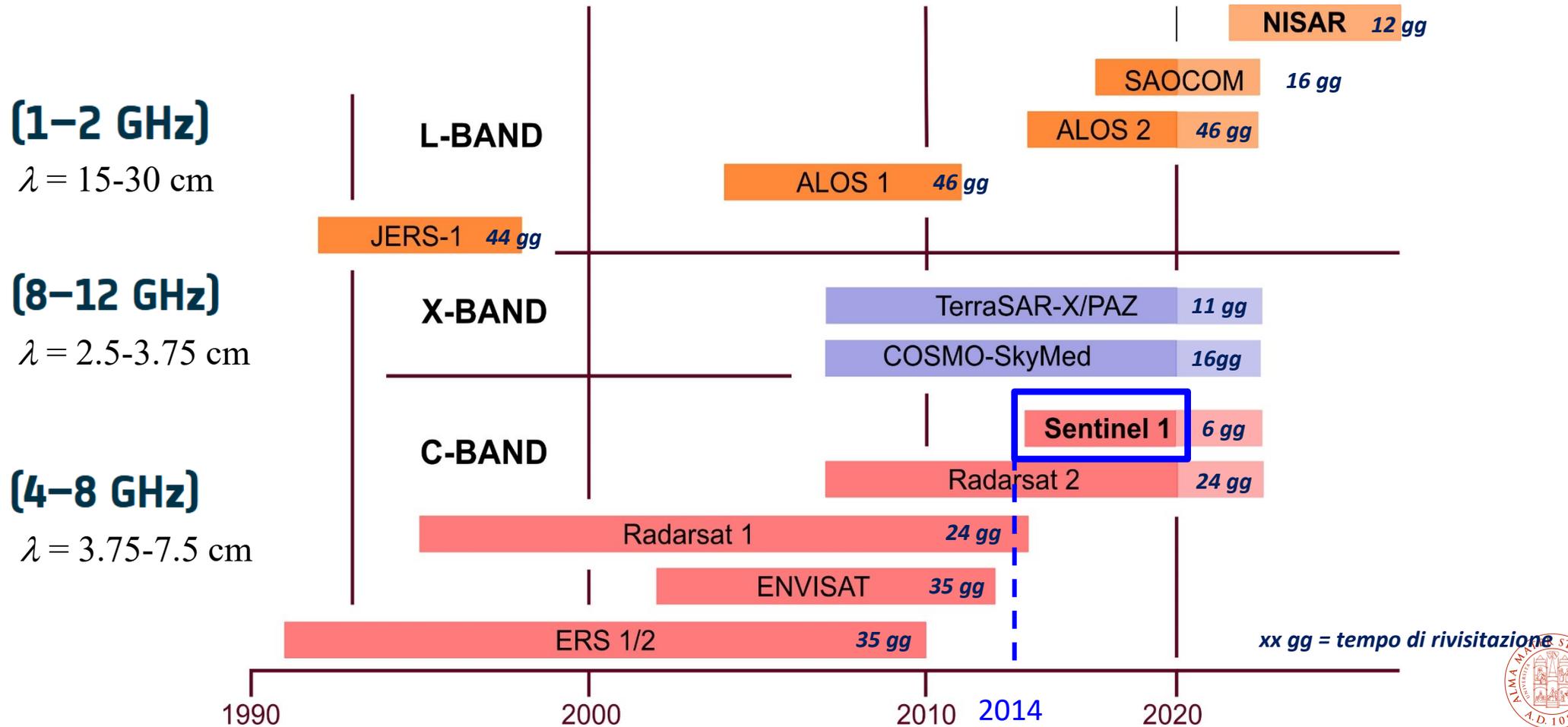
Nonostante gli sforzi per massimizzare il loro numero e la regolarità della loro distribuzione, i riflettori stabili vengono tipicamente selezionati dove:

- sono presenti strutture antropiche o affioramenti rocciosi;
- la vegetazione è scarsa o assente;
- in pianura o dove i versanti hanno acclività moderata e orientazione favorevole;
- la velocità di spostamento è bassa (< cm / sett.).



Il ruolo del dato SAR

Sistemi satellitari dotati di radar ad apertura sintetica.



Il ruolo del dato SAR, lunghezza d'onda e frequenza di rivisitazione

Riflessione del segnale.

Con lunghezze d'onda tipiche della banda L (23 cm ca.) la radiazione penetra il fogliame e raggiunge il terreno se gli alberi non sono troppo alti. La riflessione del segnale è generata da foglie, rami, tronchi e dalla superficie topografica. In aree costituiti da terreni privi di vegetazione, il radar banda L penetra il terreno per diversi decimetri. Lo stesso si verifica per il ghiaccio che costituisce i ghiacciai.

Le radiazioni che hanno lunghezza d'onda più corta (i.e., banda C) possono penetrare vegetazione arbustiva o non troppo fitta e gli strati più superficiali del terreno.

Radiazioni di banda ancora più corta (banda X) vedono le chiome degli alberi e la superficie sommitale della vegetazione, quando presente.

Velocità di spostamento misurabili.

Teoricamente →

velocità max $\approx 1/2 \lambda / \Delta T$

velocità min $\approx 1/10 \div 1/100$ velocità max.

n.b.: entrambi i valori si riferiscono alla velocità lungo la LOS e dipendono dall'orientazione relativa tra la LOS e il target (i.e., condizione ottimale se perpendicolari)

ATTENZIONE → la selezione degli interferogrammi e della loro baseline temporale (ΔT) influenza il campo delle velocità misurabili.

Se utilizzo interferogrammi che abbracciano un periodo di tempo lungo (e.g., mesi o 1 anno) posso misurare deformazioni che procedono molto lentamente. Se utilizzo interferogrammi brevi (e.g., 6 giorni) l'intervallo delle velocità misurabili cresce notevolmente.



InSAR standard vs. InSAR multi-temporale

	Vmin	Vmax	ΔT_{min}	ΔT_{max}	Precisione	Copertura spaziale
MT-InSAR	5 mm/anno	100 mm/anno	6 mesi	pluriennale	provata affidabilità	riflettori stabili
InSAR standard	30 mm/anno	100 mm/mese	6 giorni	pluriennale	interpretazione richiesta	quasi-continua

In generale, l'integrazione delle due tecniche di analisi porta (quasi sempre) ai migliori risultati e permette di ottenere informazioni sia sul pattern spaziale dei fenomeni deformativi che sull'andamento nel tempo degli stessi.

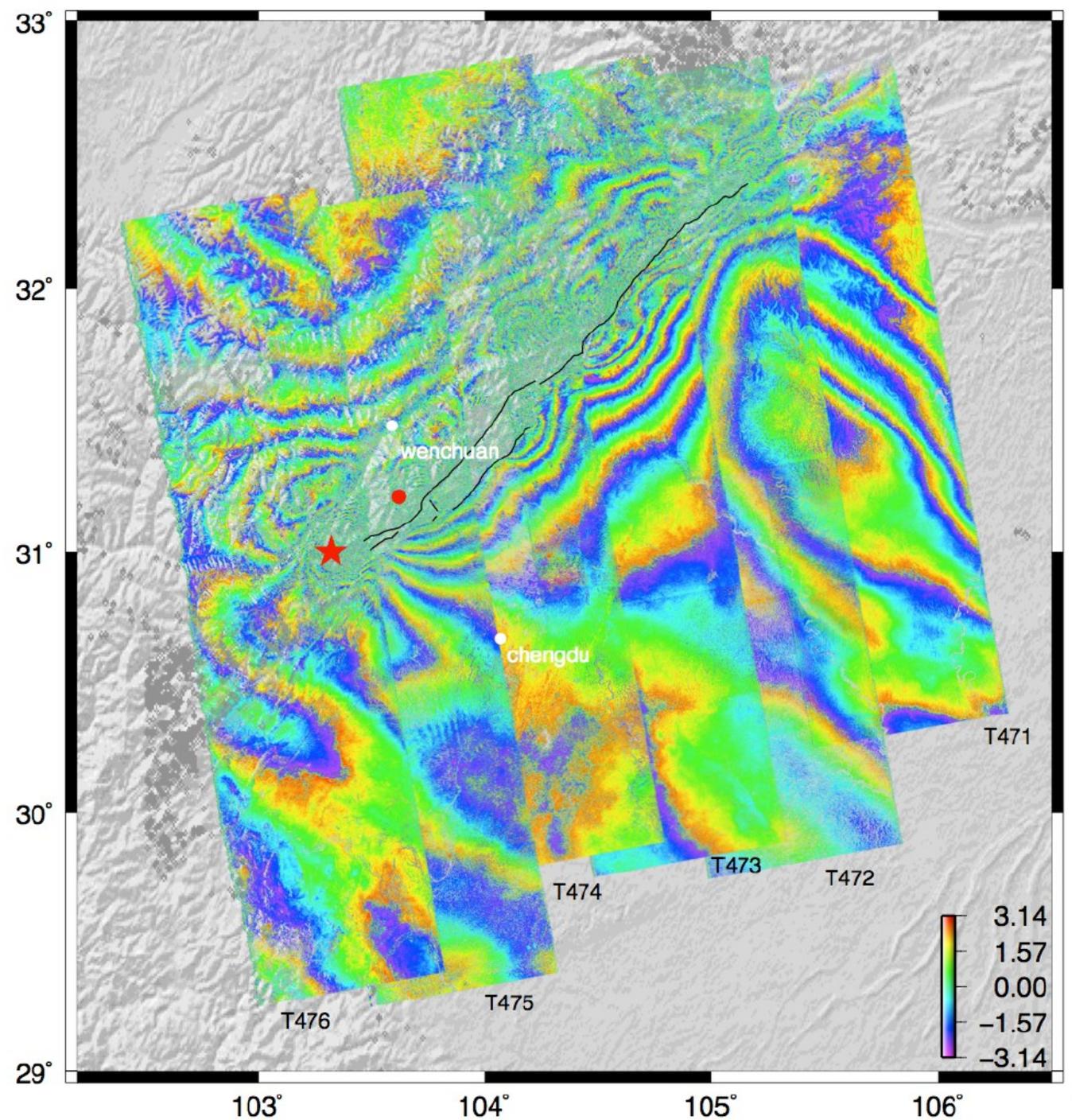


Analisi InSAR, campi di applicazioni ed esempi



InSAR, applicazioni campo deformativo di un sisma

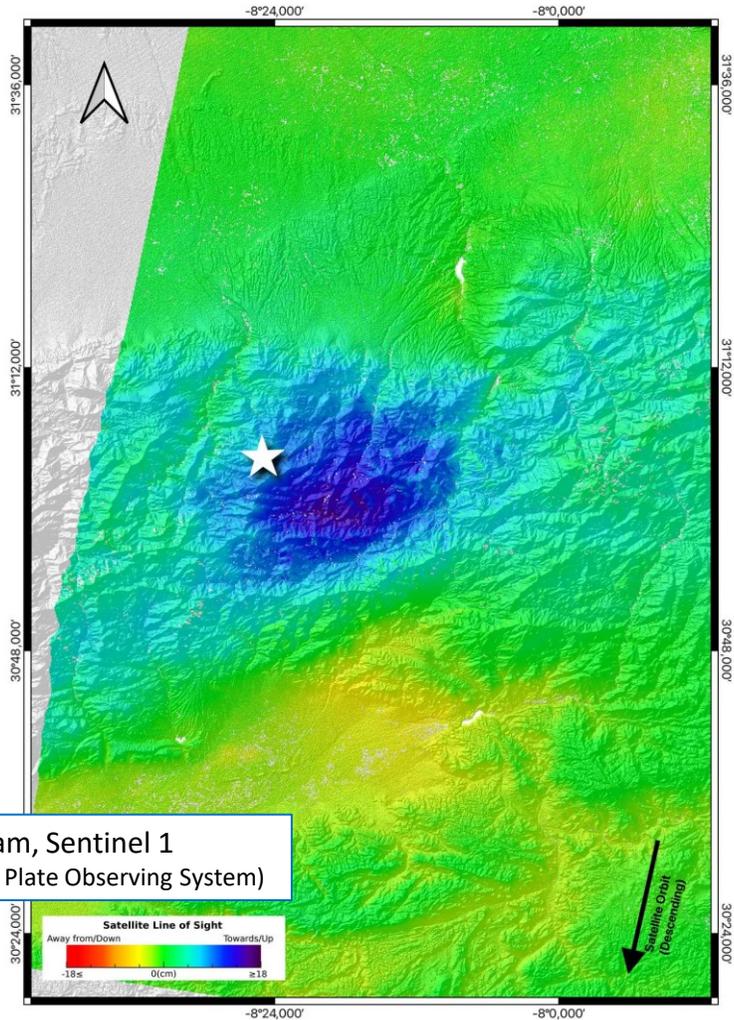
InSAR standard, utilizzo di due immagini SAR, una precedente ed una successiva al sisma



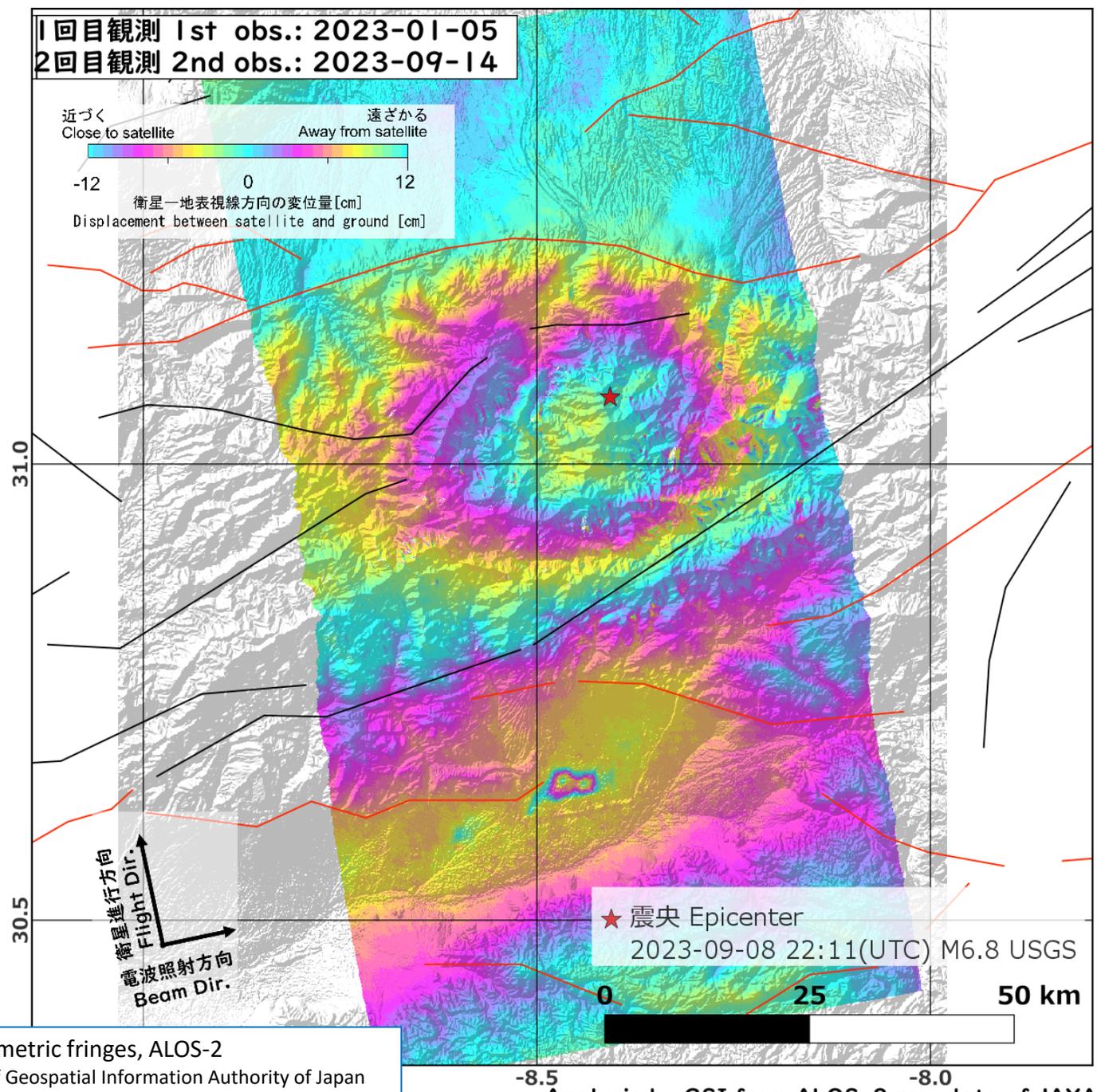
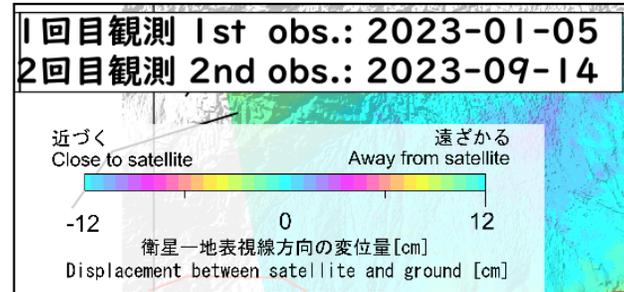
12 Maggio 2008, M7.9 Wenchuan, China. Interferogrammi da ALOS (Banda L). Una frangia è pari a 11.6 cm di spostamento lungo la LOS. Gli interferogrammi mostrano zone di completa decorrelazione (da Tong et al., 2010).

InSAR applicazioni, campo deformativo sisma

Terremoto del Marocco (Settembre 2023)



unwrapped interferogram, Sentinel 1
courtesy of EPOS (European Plate Observing System)

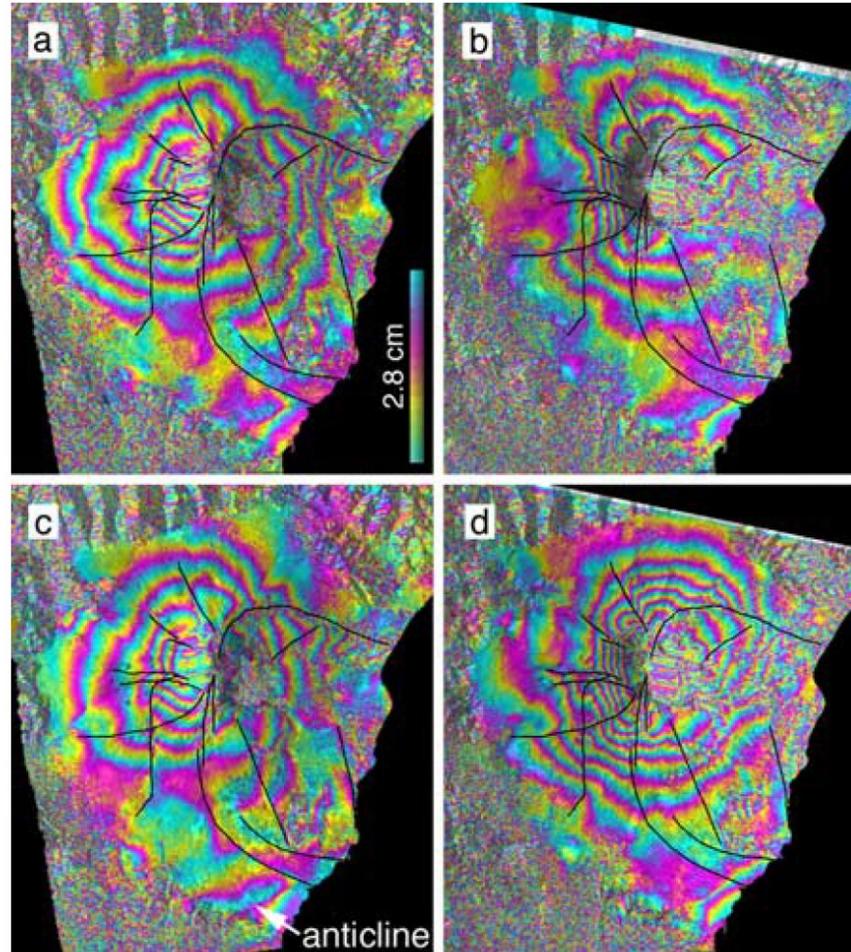
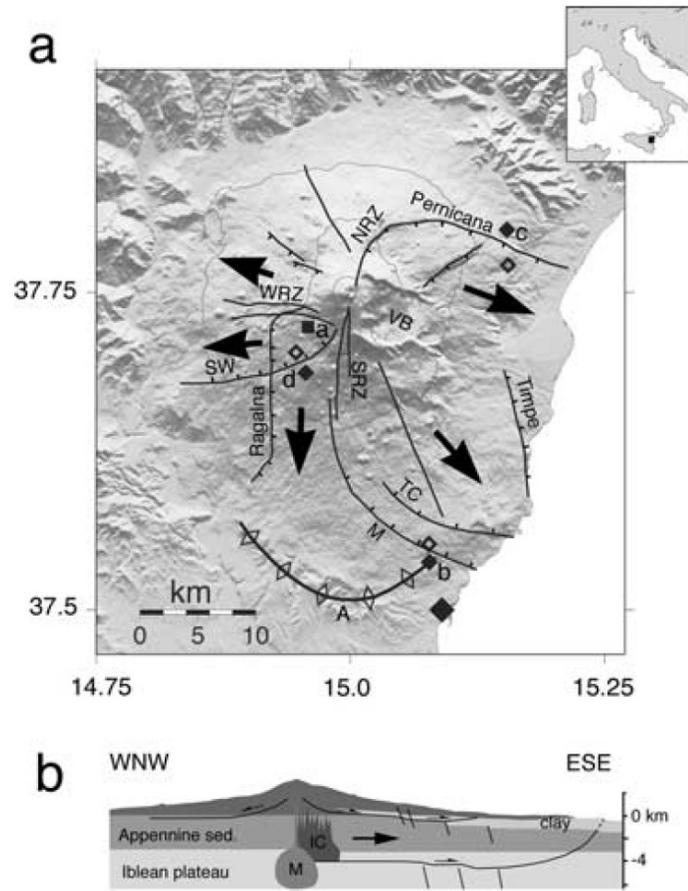


interferometric fringes, ALOS-2
courtesy of Geospatial Information Authority of Japan

Analysis by GSI from ALOS-2 raw data of JAXA

InSAR, applicazioni

Processi vulcanici: misura delle deformazioni associate con le eruzioni e con l'accumulo magmatico.



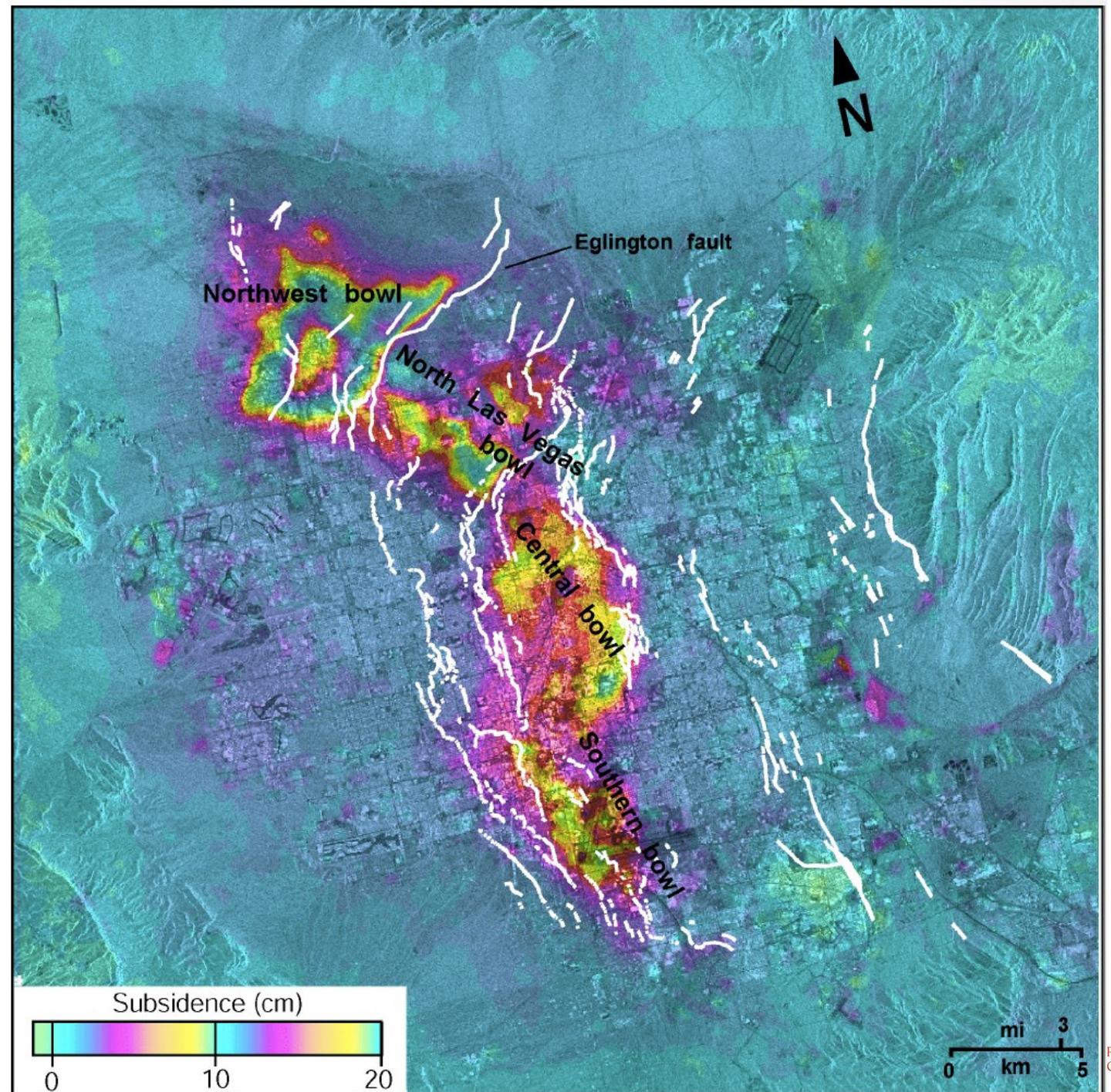
Interferogrammi dell'Etna che coprono un periodo di 6 anni ca. (1993-99). A sx, da orbite ascendenti (radar guarda a ENE) e a dx discendenti (radar guarda a WNW). Le linee nere indicano le strutture riportate nella figura di sx. (da Lundgren, 2004). ERS-1 e ERS-2.



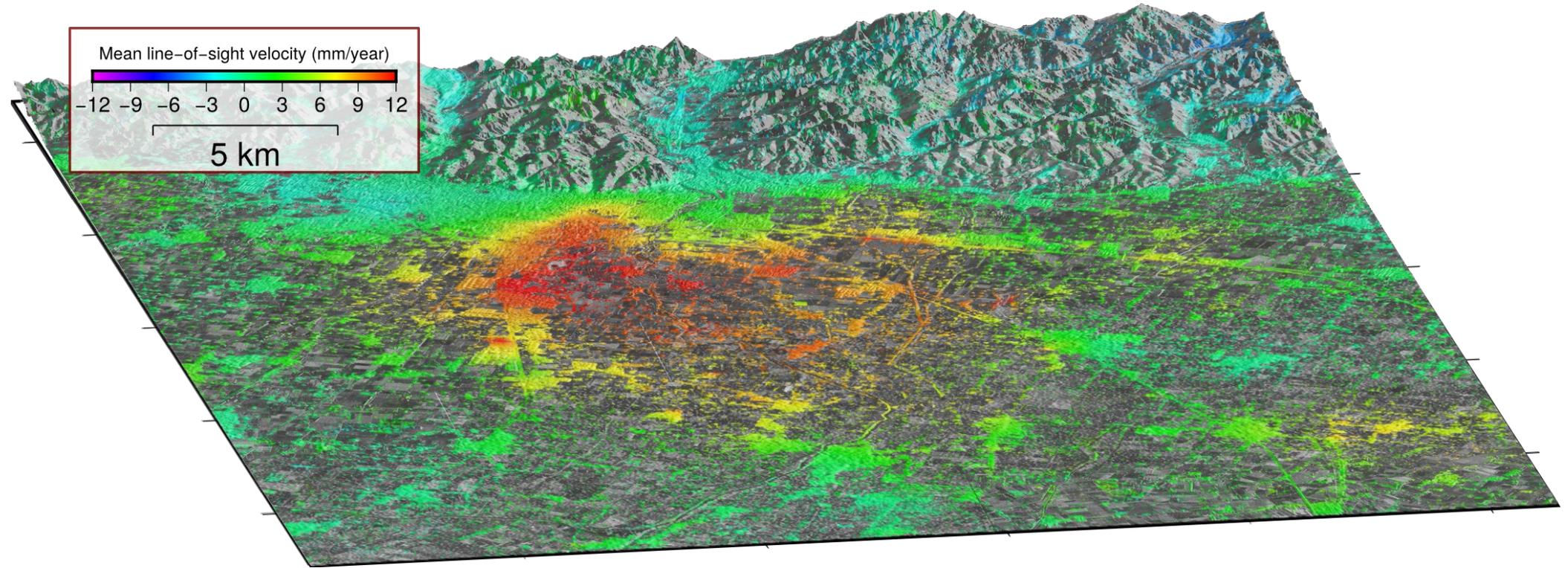
InSAR, applicazioni subsidenza dovuta a estrazione di fluidi

Subsidenza causata da sfruttamento delle
acque sotterranee.

*Subsidenza a Las Vegas, Nevada tra Aprile 1992 e Dicembre 1997
misurato tramite interferometria differenziale. Le mappe di
deformazione indicano chiaramente l'estensione spaziale del
fenomeno la cui forma è condizionata dalle strutture geologiche e
dalla natura dei depositi sedimentari (spessore depositi fini) (da
Amelung et al., 1999). Dati ERS, baseline temporali = 1 anno ca..*



Esempi applicativi, subsidenza dovuta a estrazione fluidi



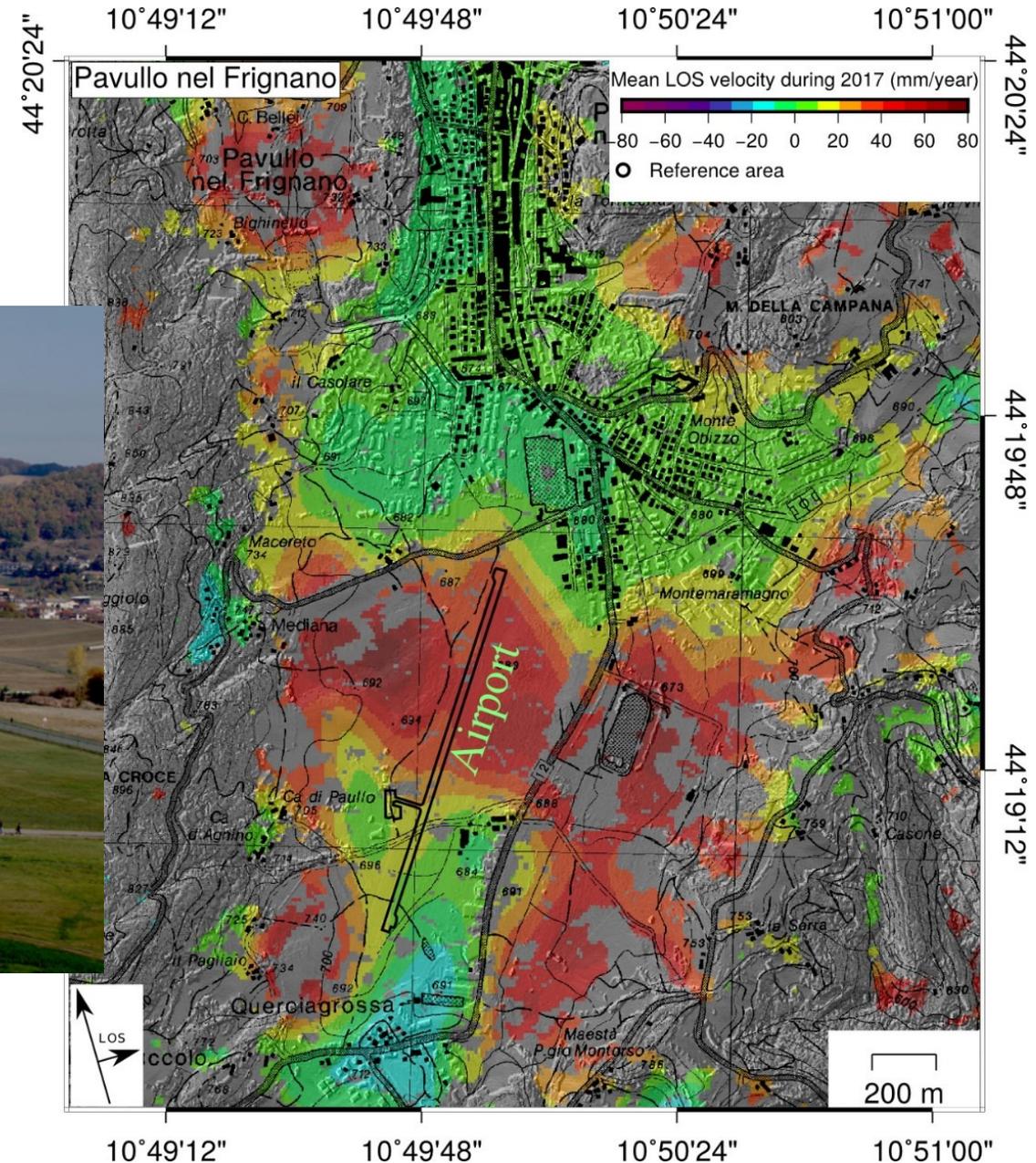
La subsidenza è un fenomeno 'ideale' per il monitoraggio InSAR:

- i) spostamenti verticali;
- ii) aree interessate vaste;
- iii) tassi di spostamento solitamente modesti (compresi nel range misurabile);
- iv) trend di spostamento regolare.

Esempi applicativi, subsidenza naturale depositi quaternari

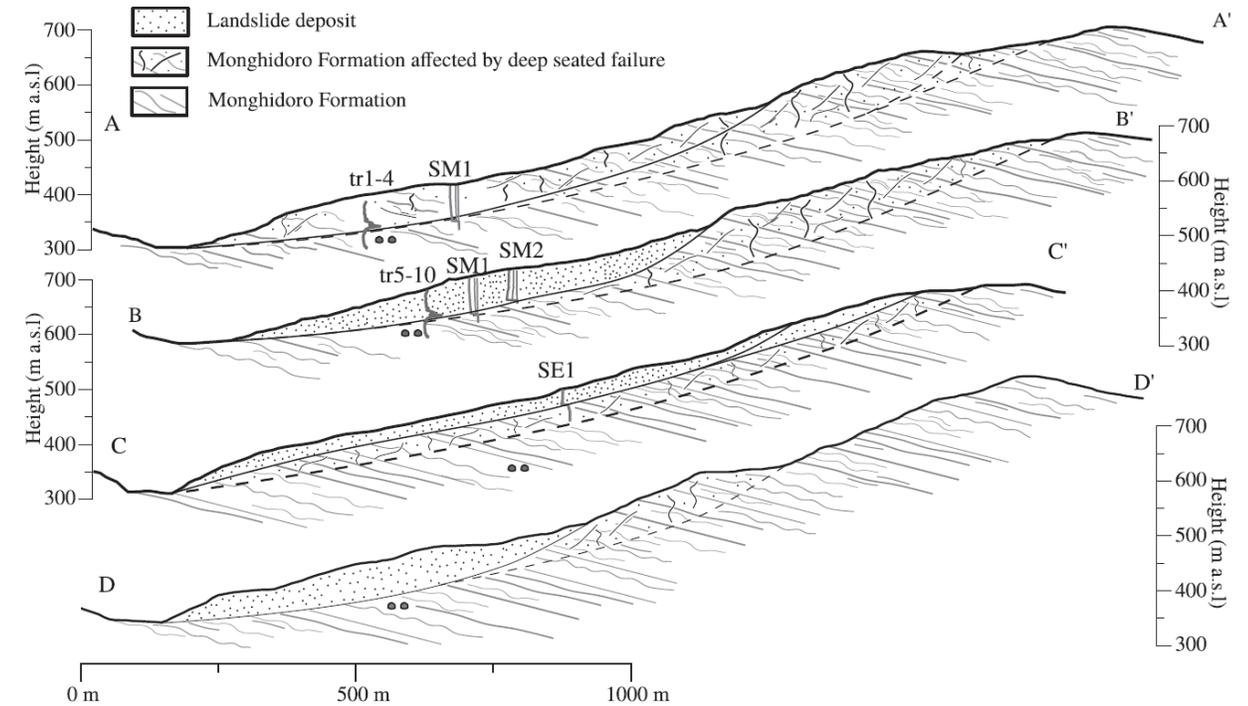
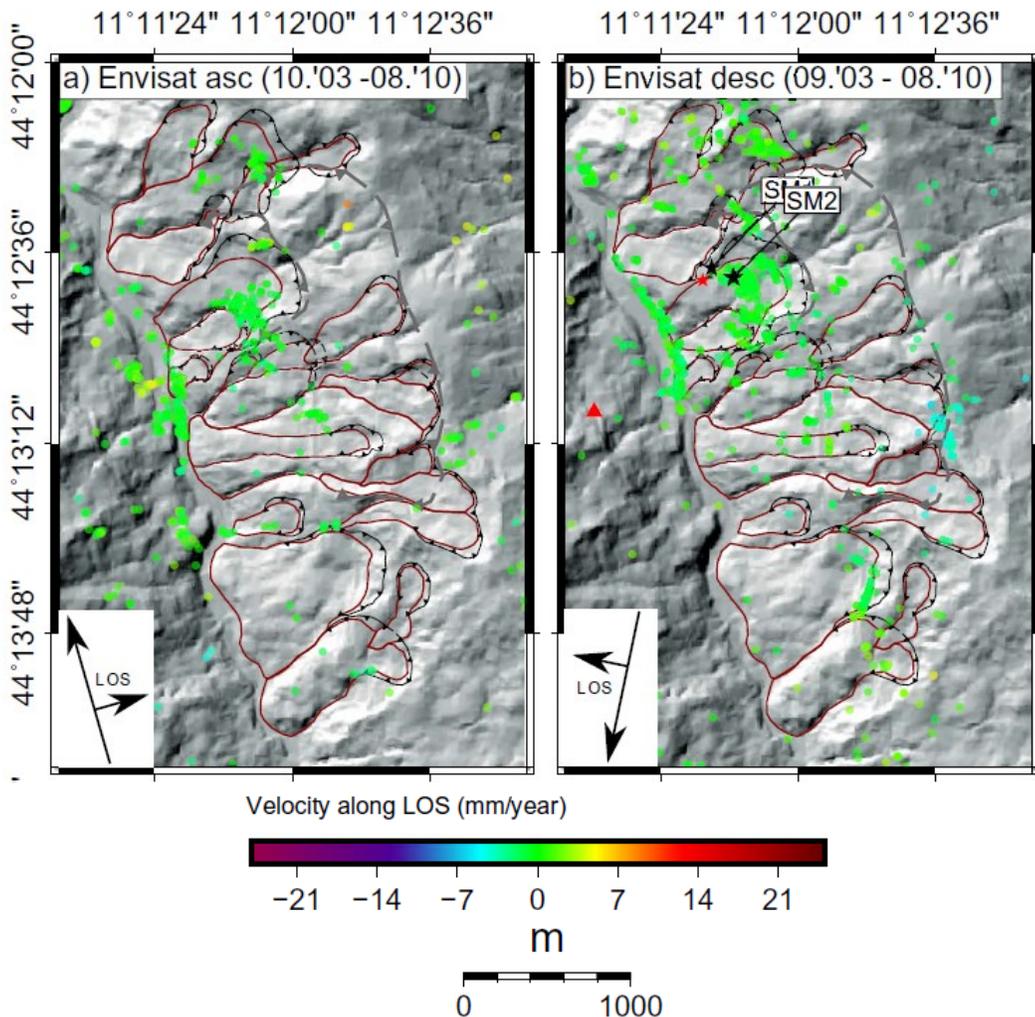


Aeroporto di Pavullo (MO), depressione di origine tettonica
con depositi palustri quaternari ricchi di torba



Esempi applicativi, deformazioni indotte da scavi in sotterraneo

variante di valico Bo-Fi (A1) – galleria Val di Sambro



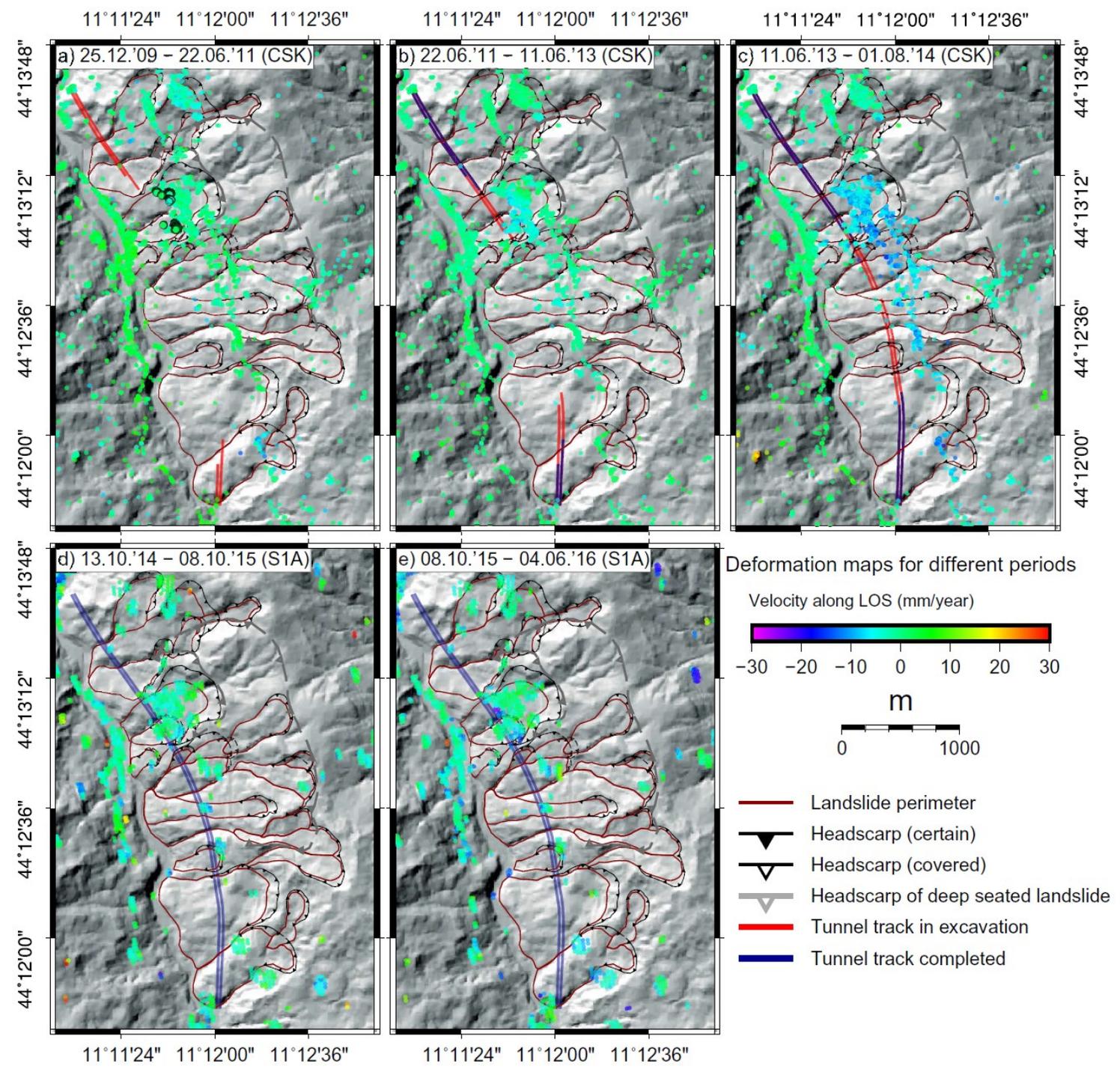
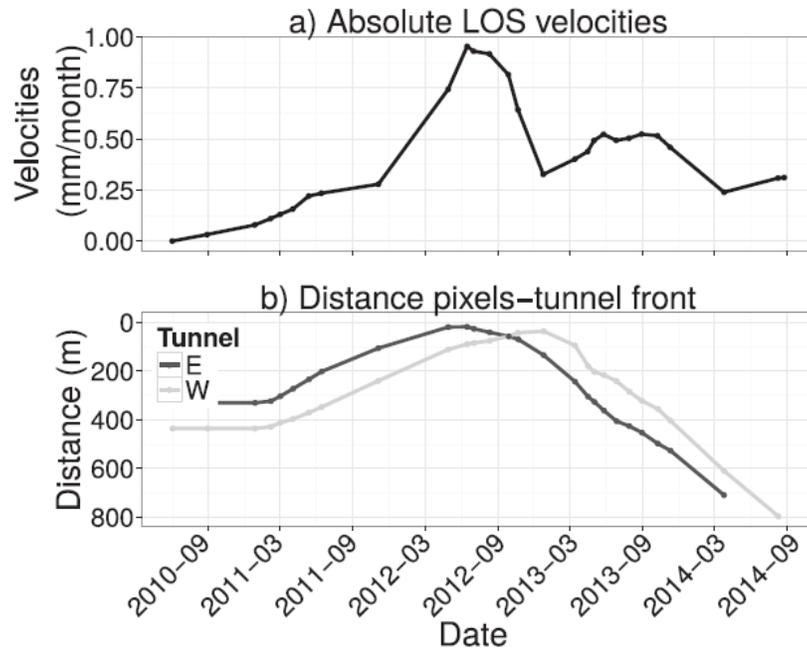
numerosi depositi di frana quiescenti sopra al tracciato della galleria
 deformazioni pressoché assenti prima dello scavo



Esempi applicativi, deformazioni indotte da scavi in sotterraneo

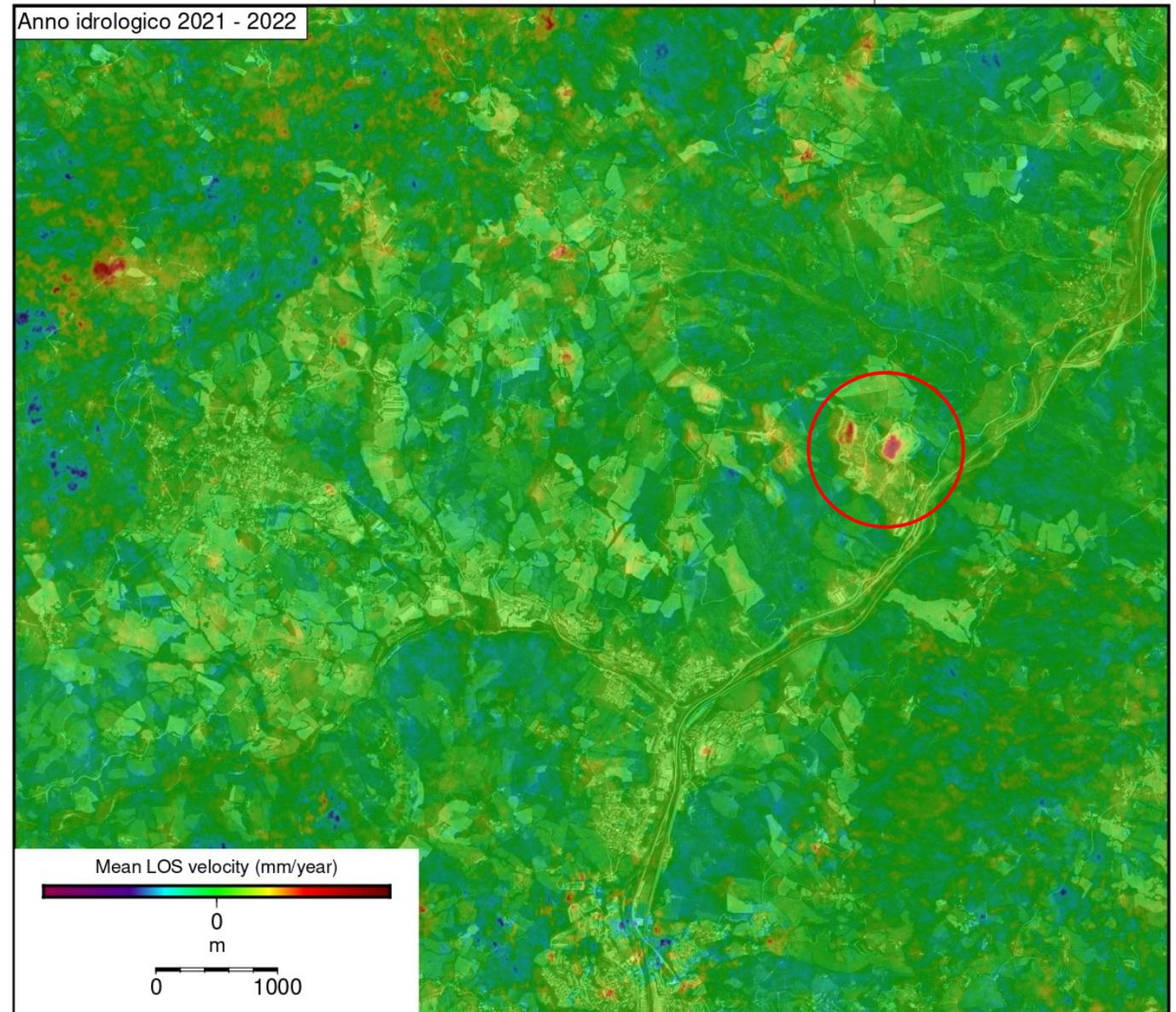
progressione dei fenomeni deformativi di superficie legata all'avanzamento dello scavo

(da Bayer et al., 2017)



InSAR applicazioni, discariche

Mappa di spostamento anno idrologico 2021-2022,
piccola scala,
vista d'insieme media Valle del fiume Reno

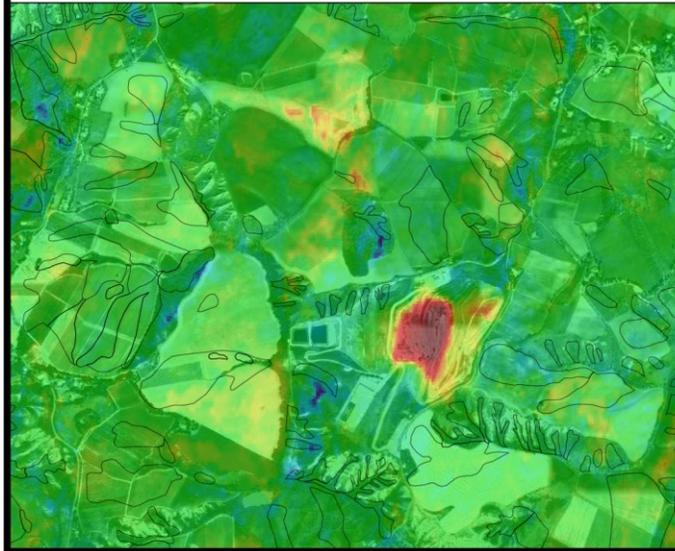


InSAR applicazioni discariche

Mappa di spostamento annuale



b) Desc - Anno idrologico '20 - '21'



Mean LOS velocity (mm/year)



0

m

0

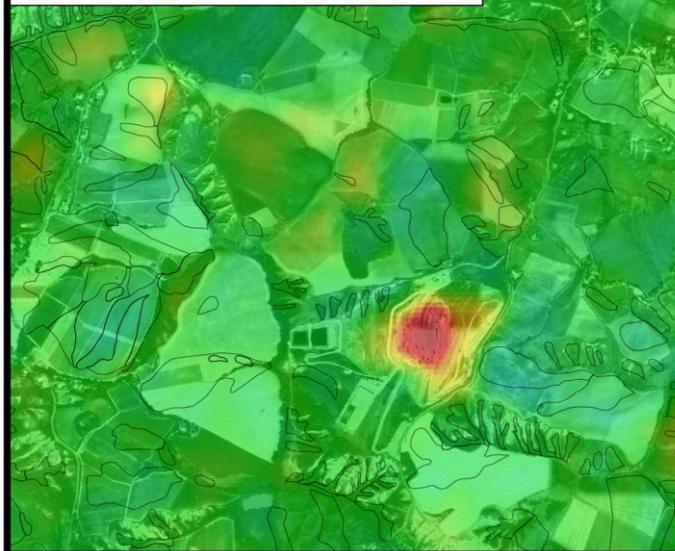
1000

Deposito di frana

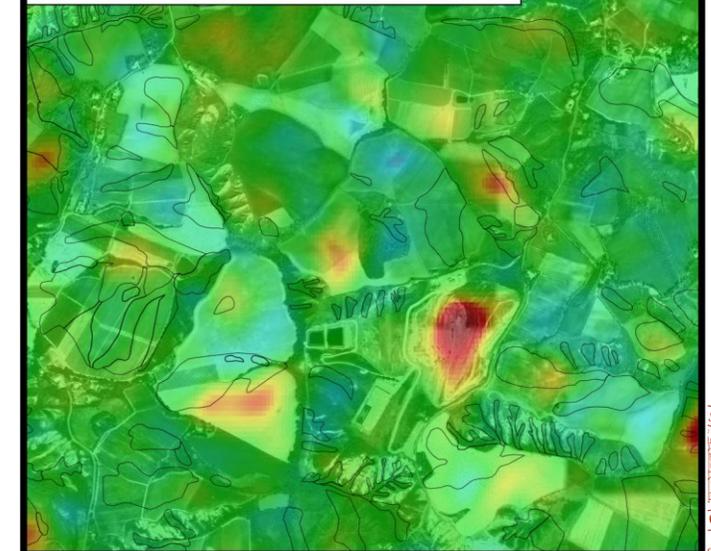
Mappe di spostamento mensile



b) Desc - Gennaio 2022



b) Desc - Dicembre 2024



*in entrambi i casi il raster riporta un valore medio della
velocità di spostamento durante il periodo di
osservazione*

InSAR applicazioni: discariche

analisi InSAR scala Continentale
European Ground Motion Service

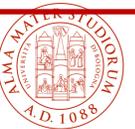
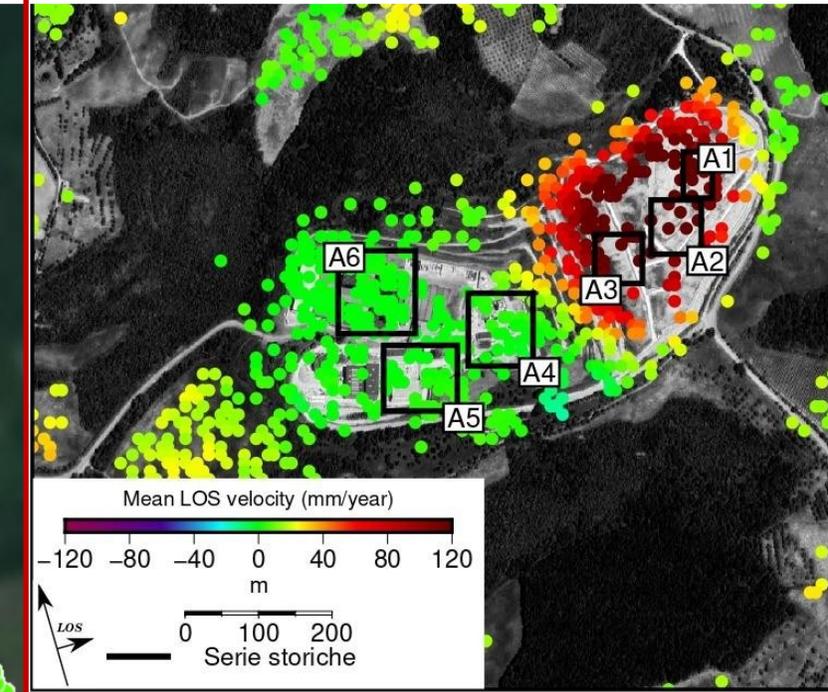


analisi InSAR scala Regionale
Regione Toscana, geoportale LaMMA



analisi InSAR (MT-SBA) sito-specifica

FRAGILE
EARTH-SURFACE MONITORING



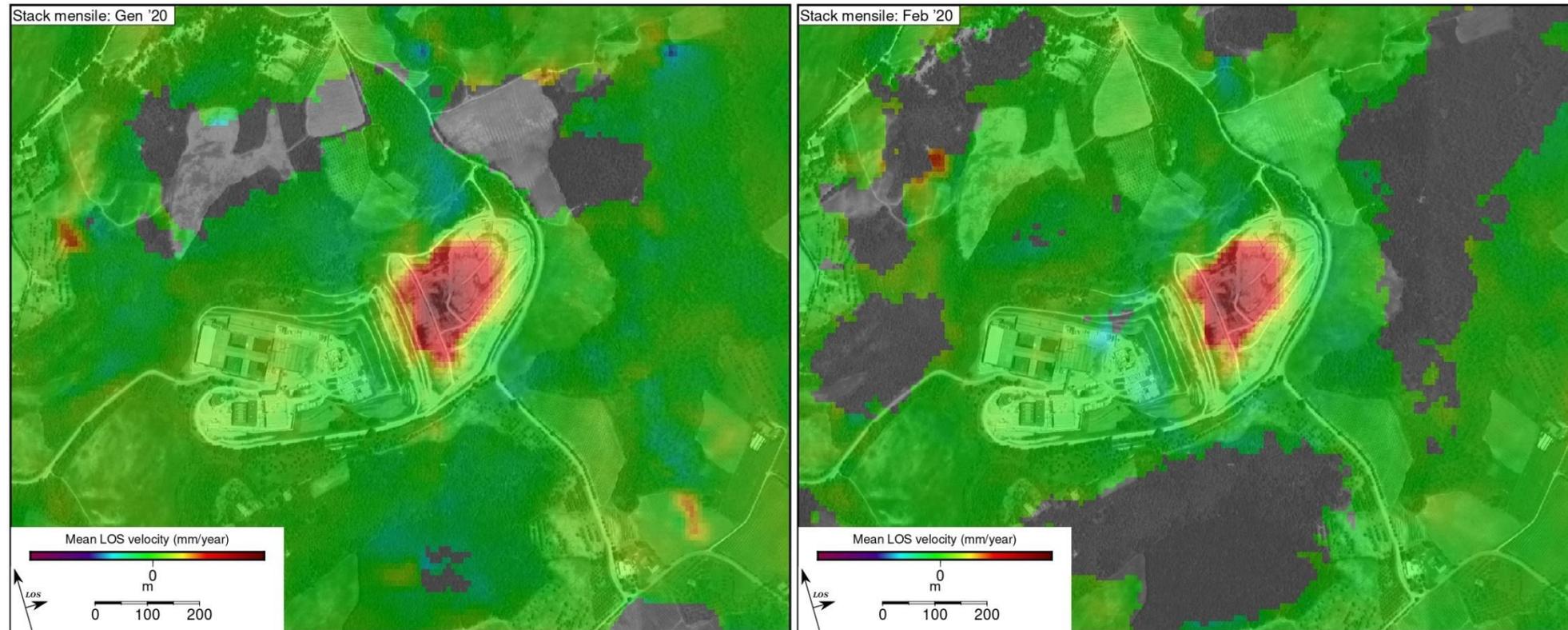
InSAR applicazioni: discariche

MAPPE DI DEFORMAZIONE PERIODICHE (es. mensili, bimestrali, semestrali, annuali)

InSAR standard: Mappe quasi continue nello spazio

Ad ogni pixel è associato un valore di **velocità di spostamento** (qualitativo)

Perimetrazione aree soggette a deformazione

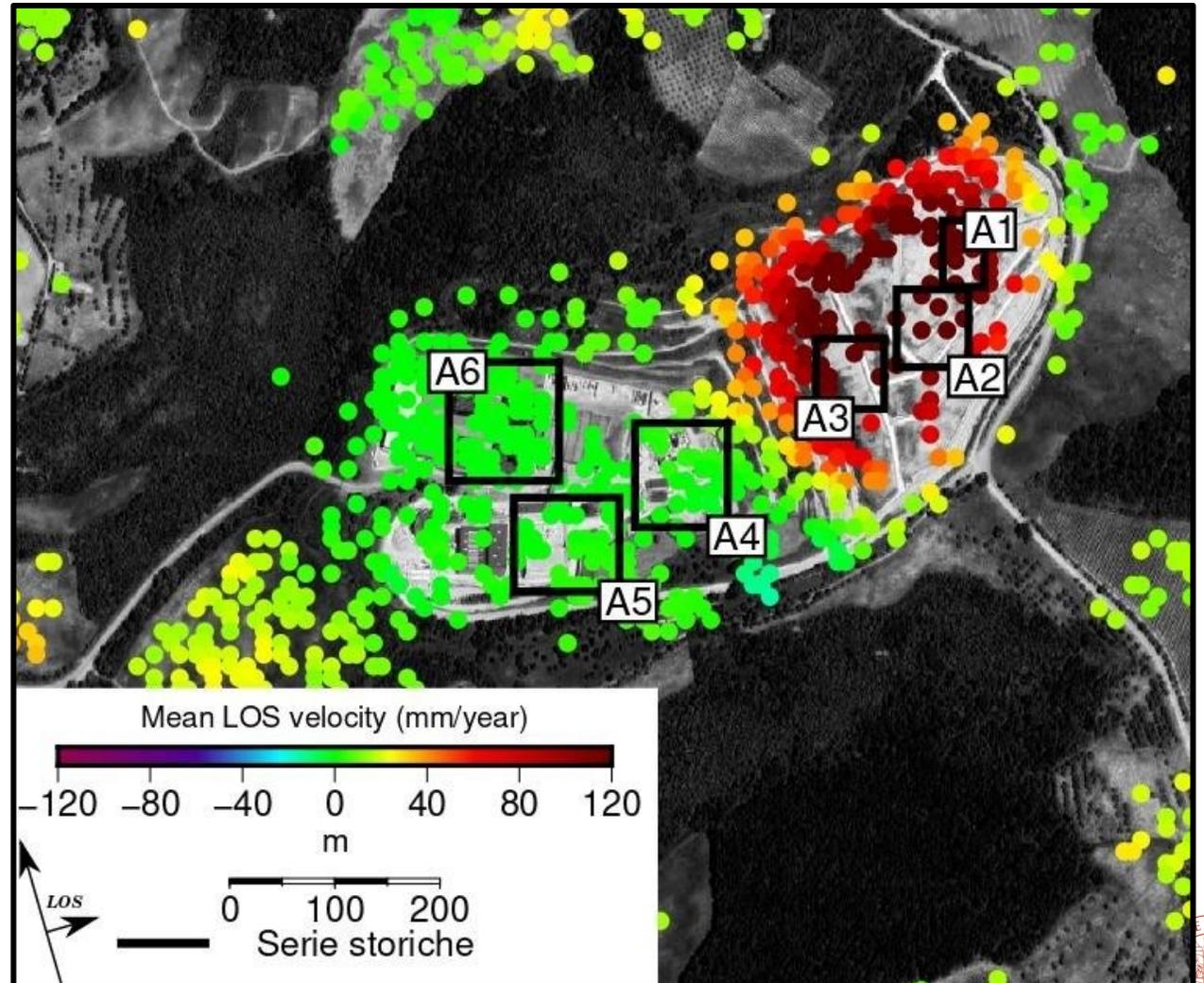


InSAR applicazioni: discariche

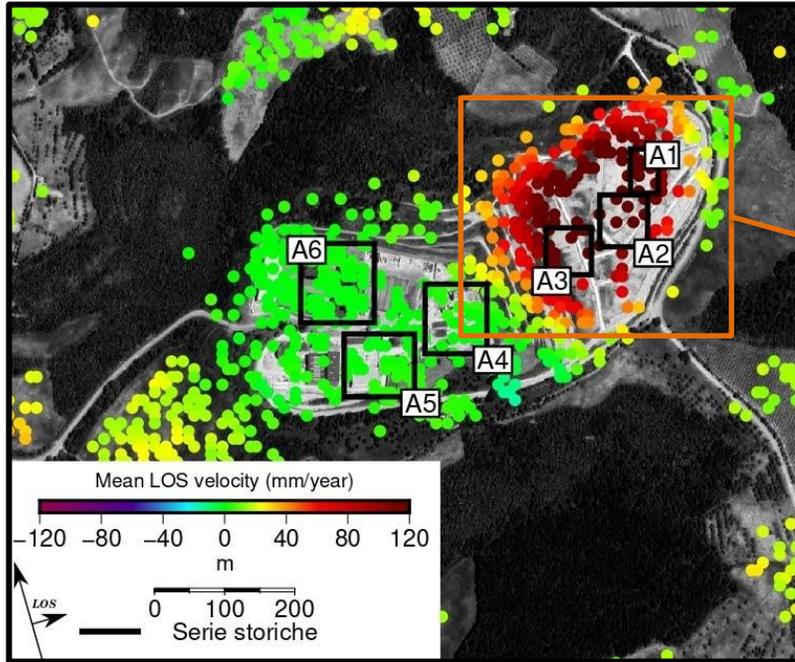
GEN '20 – DIC '21

InSAR multi-temporale: differenti colori indicano valori di velocità media (mm/anno) rilevati per ogni riflettore stabile durante il periodo di analisi.

I rettangoli neri indicano le aree selezionate per l'estrazione di valori medi di spostamento (slide successive)



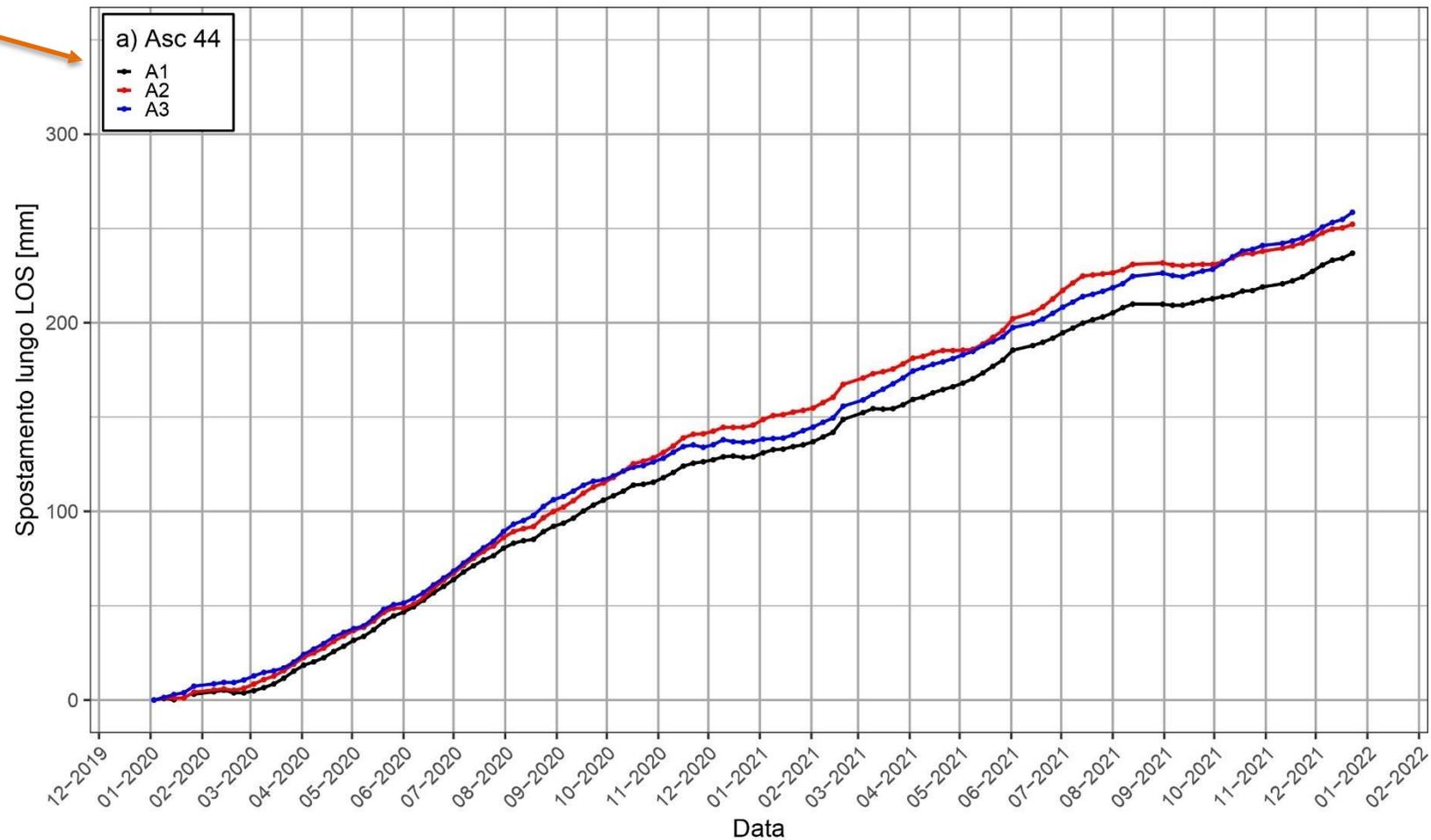
InSAR applicazioni: discariche



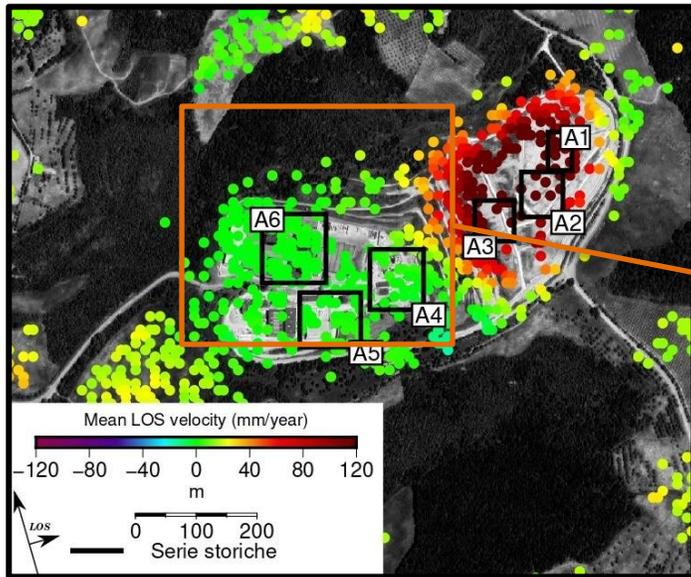
Serie storiche di spostamento cumulado in corrispondenza dei riflettori stabili individuati sulla discarica in A1, A2 ed A3

Spostamenti cumulati di circa 250 mm durante il periodo di analisi con **trend deformativo lineare**

ANALISI MT-SBA GEN '20 – DIC '21



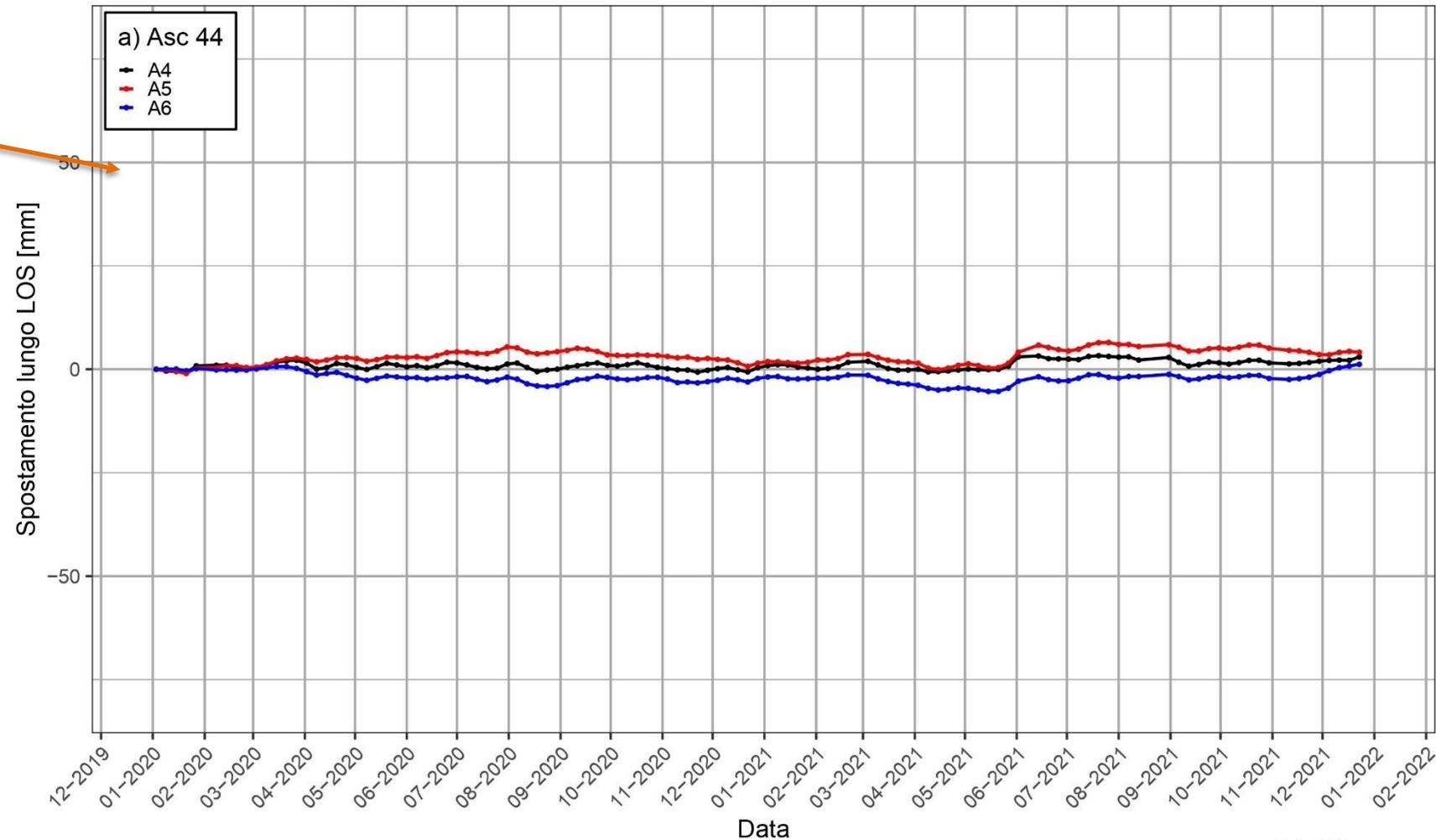
InSAR applicazioni: discariche



Spostamento medio riflettori stabili nei poligoni di estrazione A4, A5 e A6

Spostamenti cumulati inferiori al limite di sensibilità della tecnica (5 mm/anno), **aree stabili**

ANALISI MT-SBA GEN '20 – DIC '21

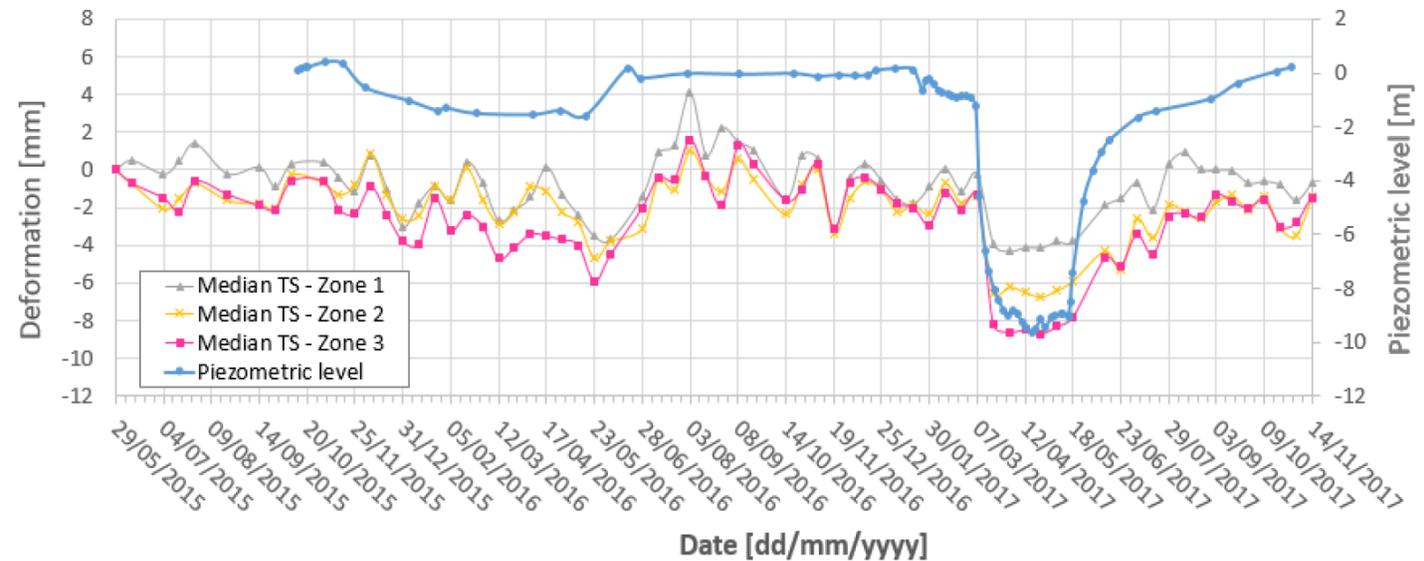
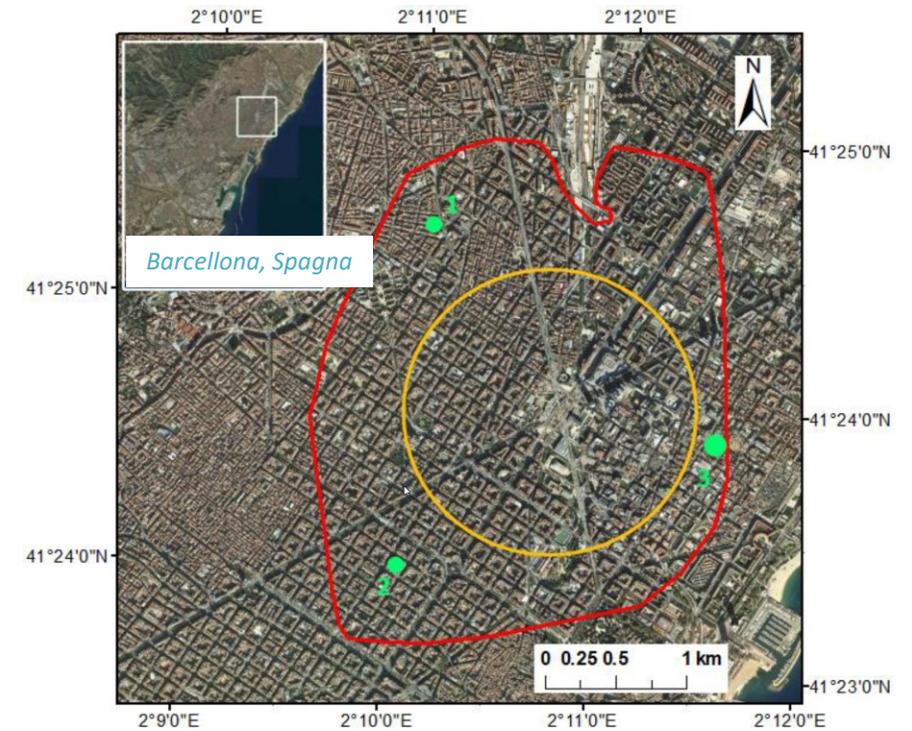


InSAR applicazione, monitoraggio edifici

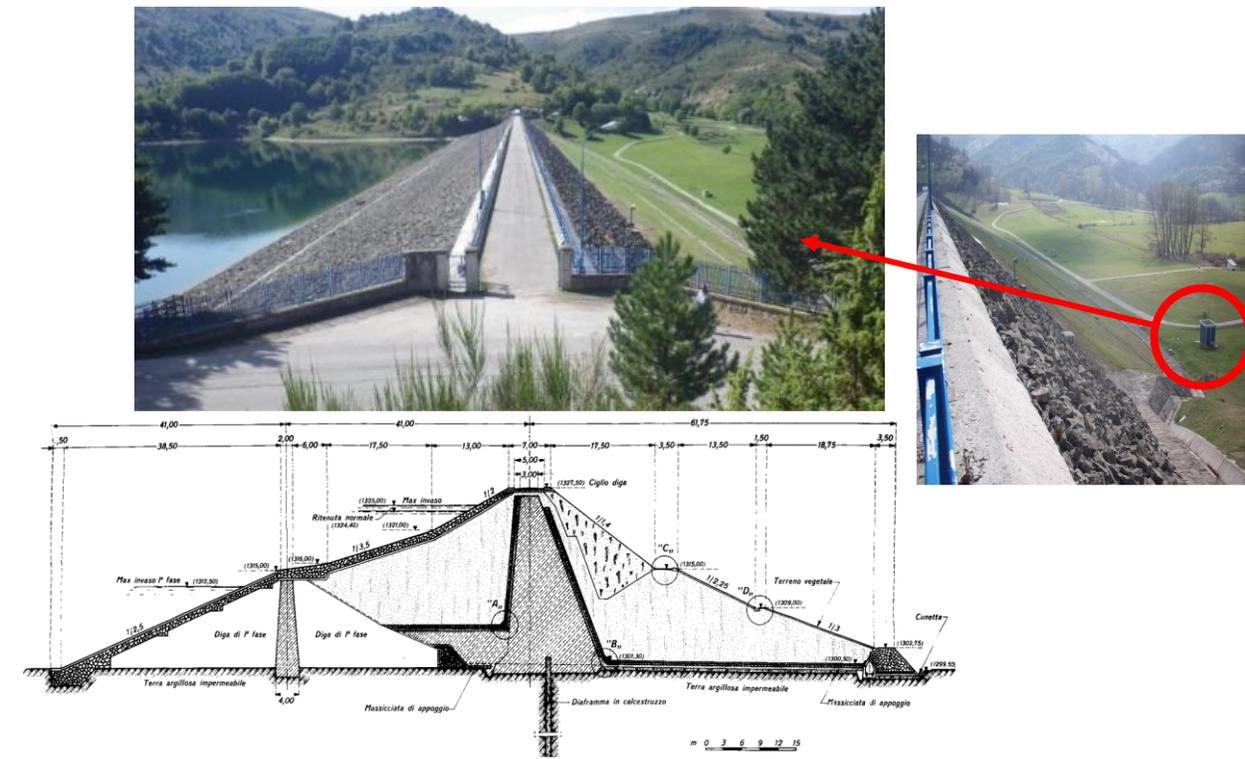
Monitoraggio strutture: aree urbane, infrastrutture di trasporto, ponti, dighe, monumenti di grande interesse.



Interferometria multi-temporale PS in area urbana per la misura di deformazioni indotte da abbassamento piezometrico eseguito per le esigenze costruttive di un sottopasso ad uso stradale (da Crosetto et al., 2018). Dati Sentinel 1.



InSAR applicazioni: monitoraggio infrastrutture



da Sbarigia et al., 2023.

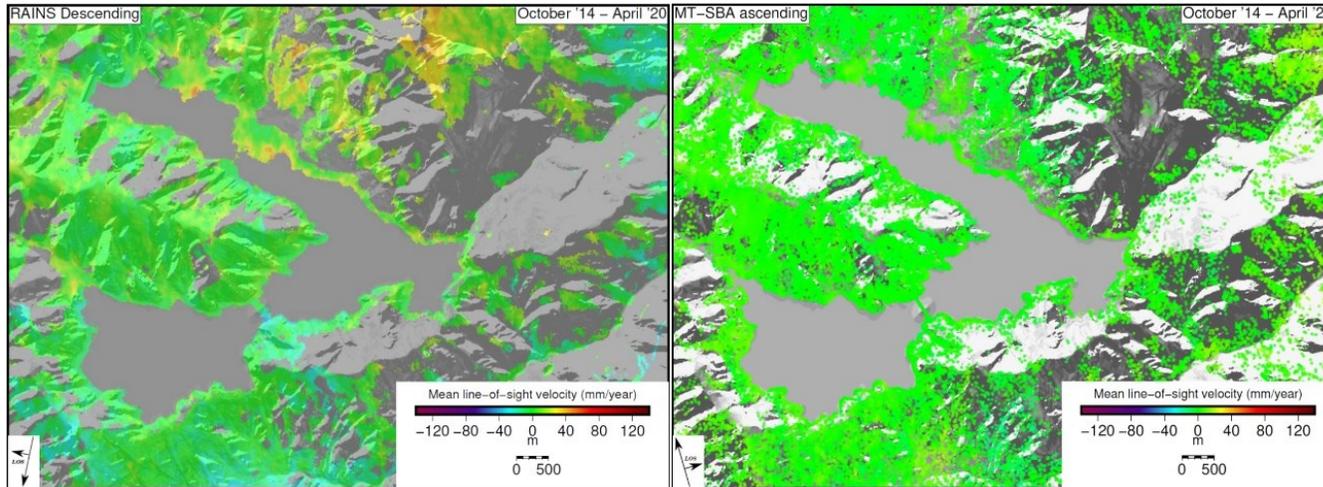
The Campotosto Lake is one of the biggest reservoirs of Europe, with a storage capacity exceeding 200 million of m^3 .

In the recent past, the lake and the dams have been subjected to a series of seismic events known as the seismic sequence of L'Aquila in 2009 and the seismic sequence of Central Italy in 2016-17. Between August 2016 and January 2017, four major earthquakes occurred in Central Italy.

Poggio Cancelli embankment dam: the settlements of the infrastructure and surrounding areas were investigated by a site-specific InSAR analysis whose results show good agreement with available ground-based measurements and supply additional information about the spatial pattern of displacements.



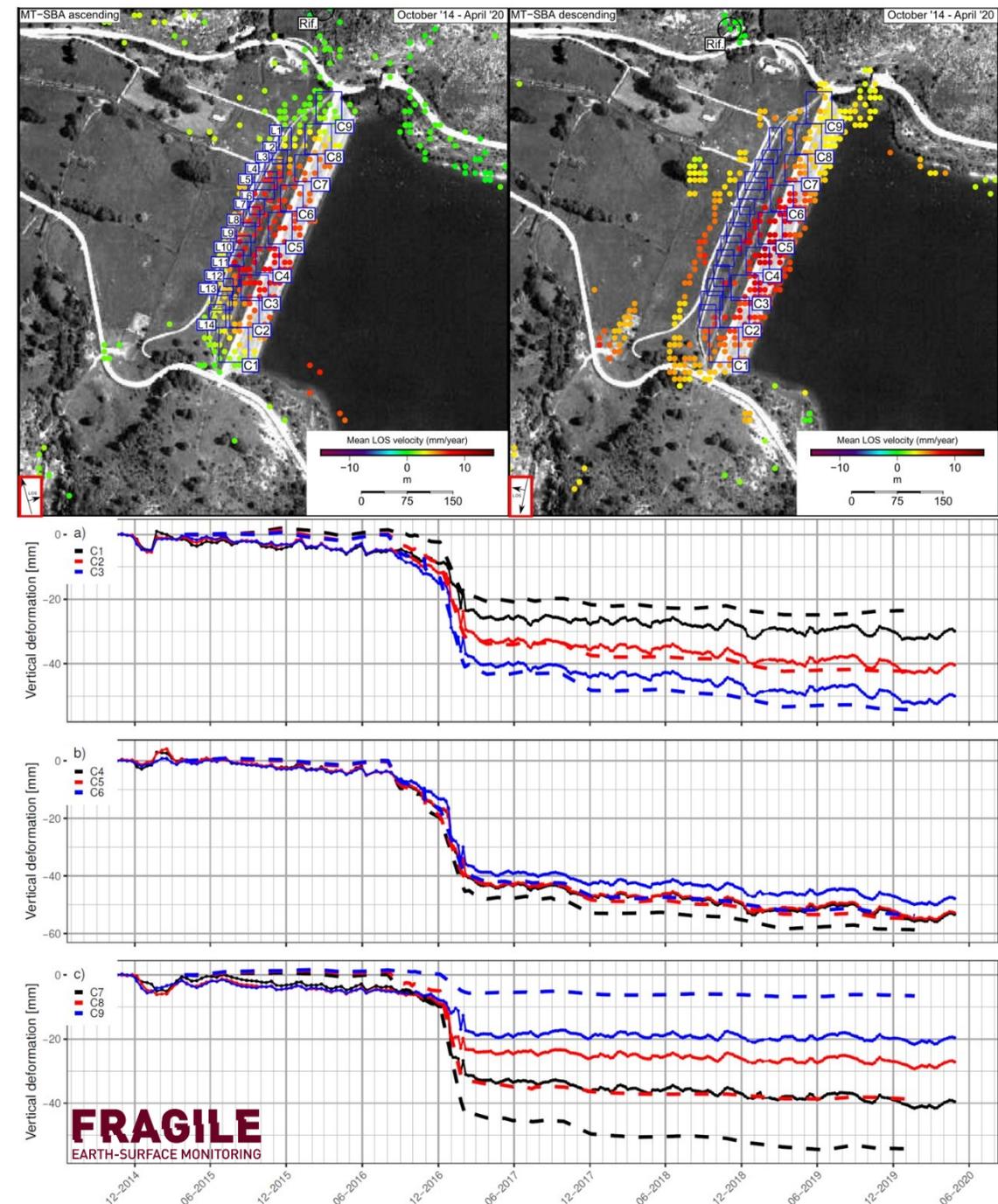
InSAR applicazioni: monitoraggio infrastrutture



Analisi InSAR tradizionale (sx) e multi-temporale (dx) che illustrano l'assenza di fenomeni gravitative di rilievo lungo i versanti che insistono sull'invaso.

Analisi multi-temporale sito-specifica relativa alla diga di Poggio Cancelli: piccoli cedimenti indotti dal terremoto di Amatrice (Agosto 2016) e cedimenti più marcati indotti dal terremoto di Campotosto (Gennaio 2017), in confronto con i dati misurati a terra (line tratteggiate).

(da Sbarigia et al., 2023)

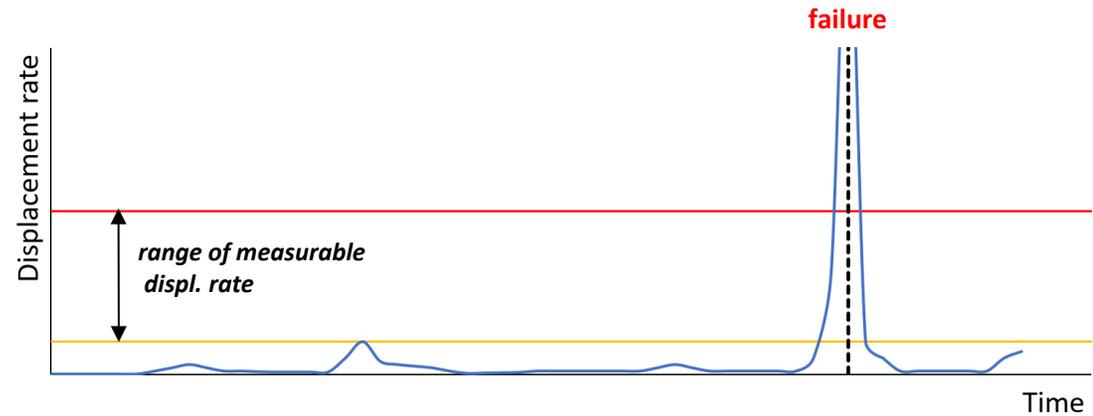


InSAR per indagare e monitorare deformazioni gravitative di versante

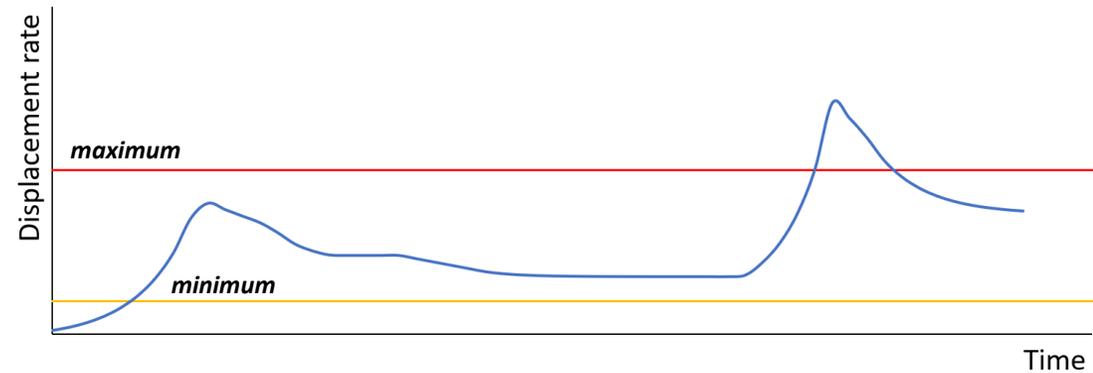
Grande varietà di deformazioni gravitative di versante che si distinguono per dimensioni, materiale, cinematismo e velocità

Differenti tipi di frana mostrano differenti trend di spostamento nel tempo.

Alcune frane possono risultare non identificabili con l'InSAR



...altre possono essere monitorate quando le condizioni sono favorevoli



InSAR, quali frane possono essere indagate?

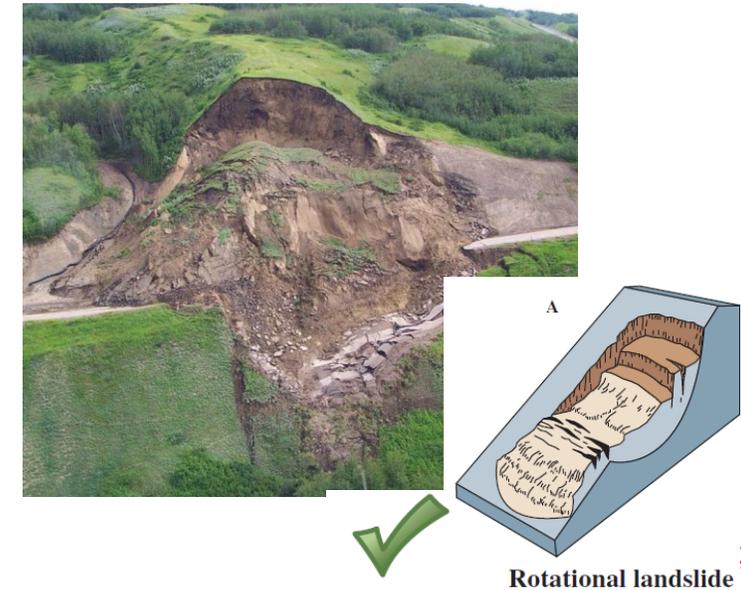
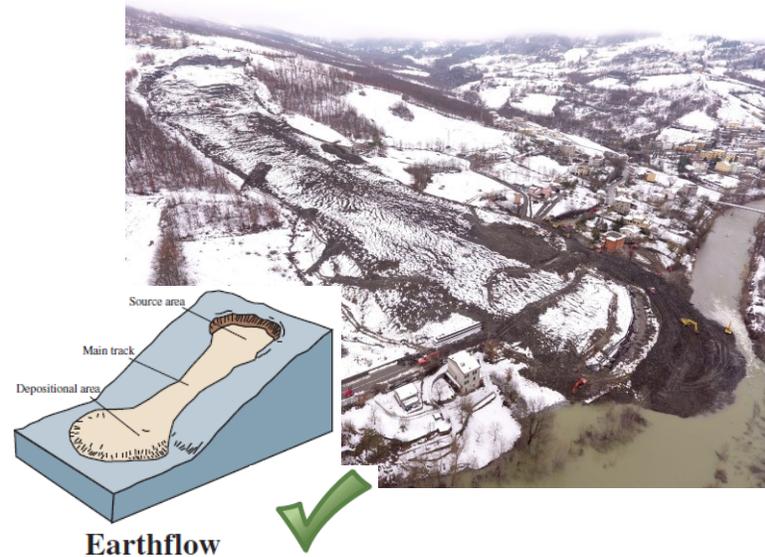
tipi di frana:

Rock falls, debris flows e piccoli scivolamenti superficiali non sono solitamente rilevabili;



Le frane soggette a deformazioni continue nel tempo, che coinvolgono volumi significativi (e.g., scivolamenti, colate lente) possono essere solitamente riconosciute e monitorate.

Le fasi parossistiche sono solitamente associate a salti di fase che risultano spesso irrisolvibili.

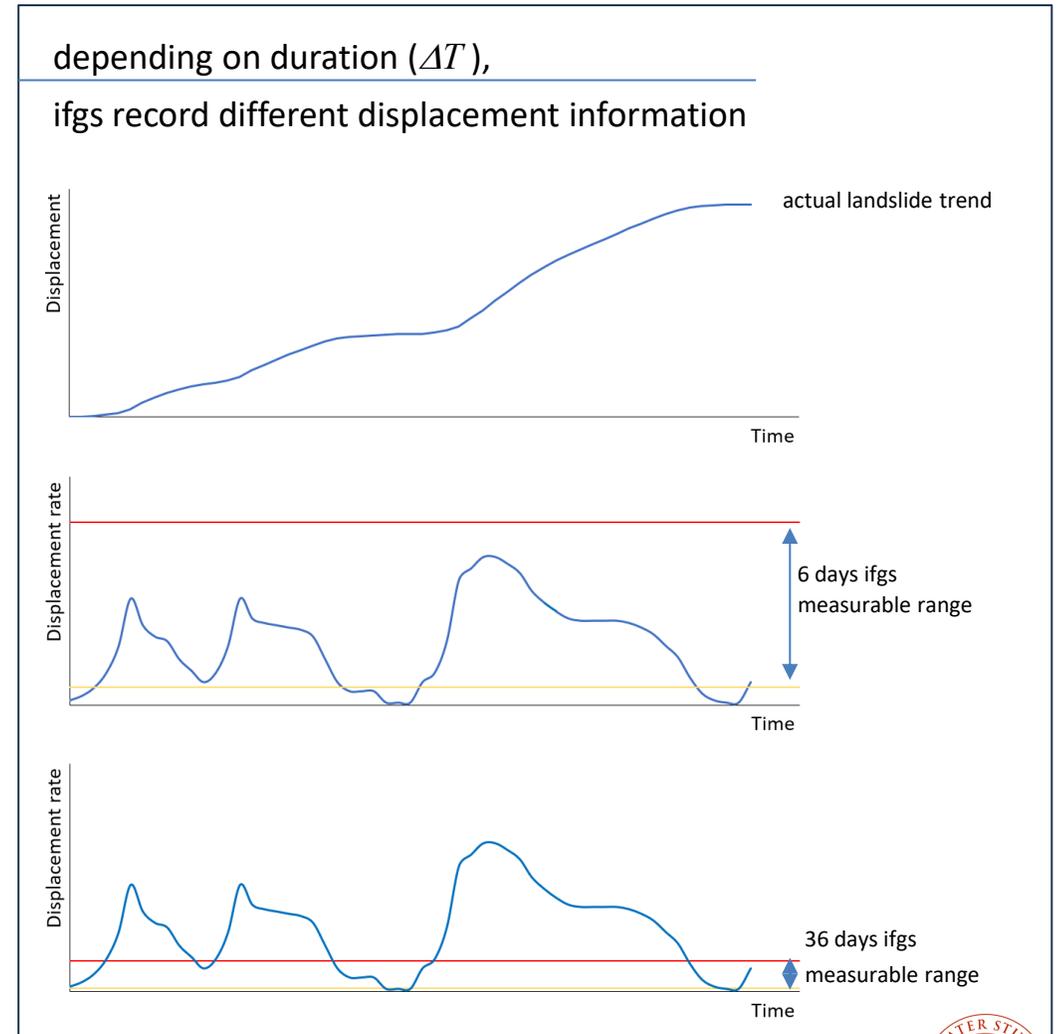
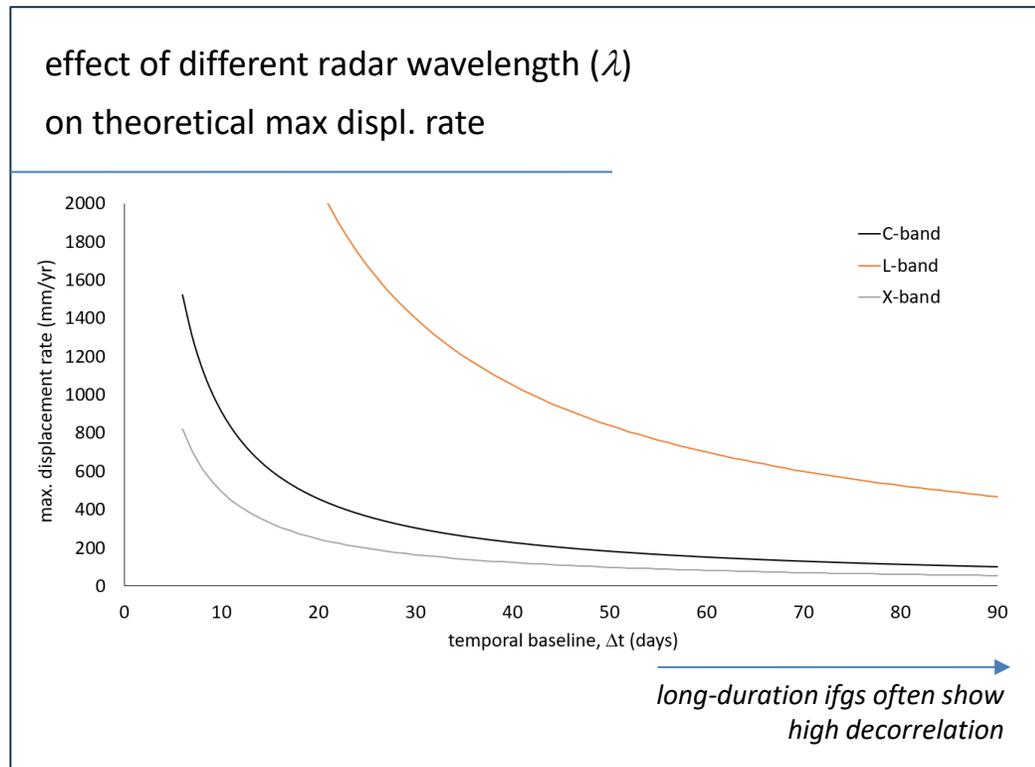


InSAR per indagine frane, il ruolo della lunghezza d'onda e della durata ifg

Tassi di spostamento misurabili

massimo $\approx \lambda / 2\Delta T$

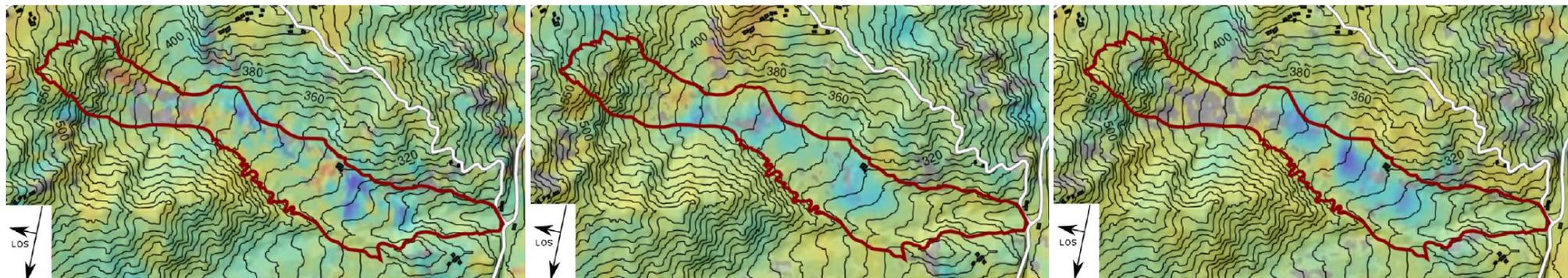
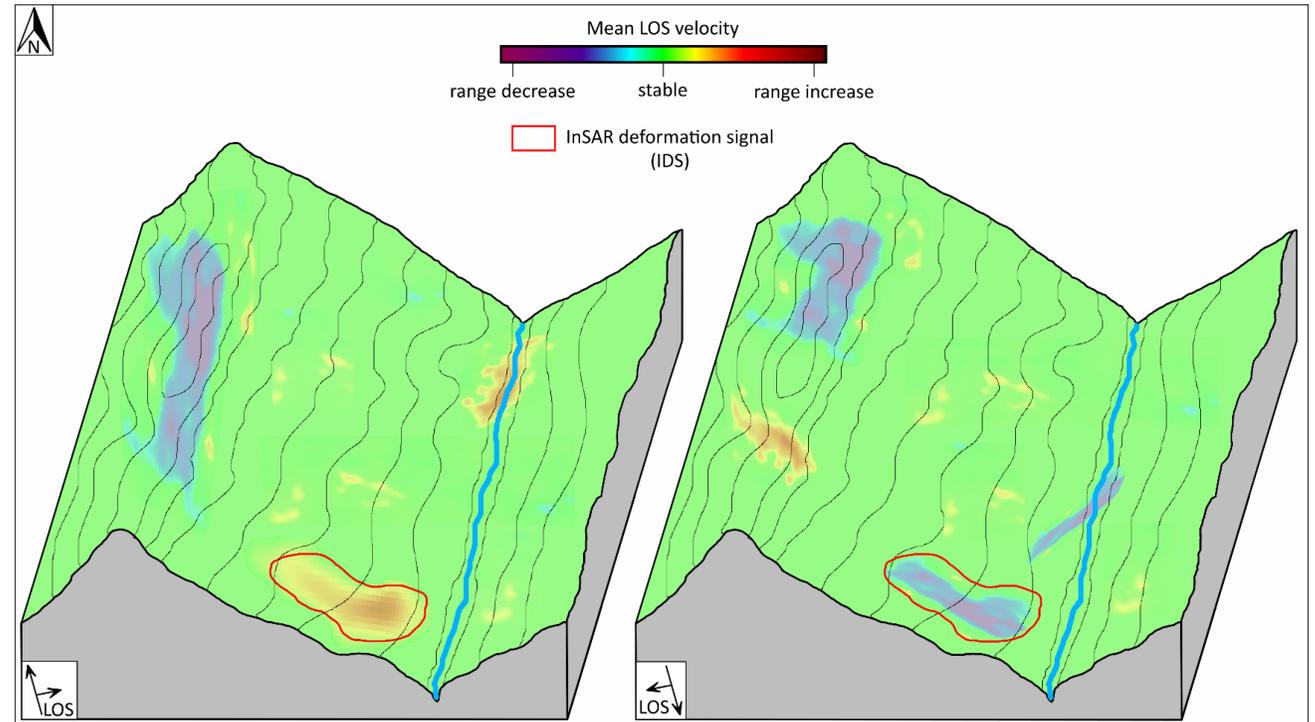
minimo $\approx 1/10 \div 1/100$ del massimo



InSAR per indagine frane, aspetti interpretativi

Riconoscimento dei segnali deformativi possibilmente associati a fenomeni gravitativi di versante

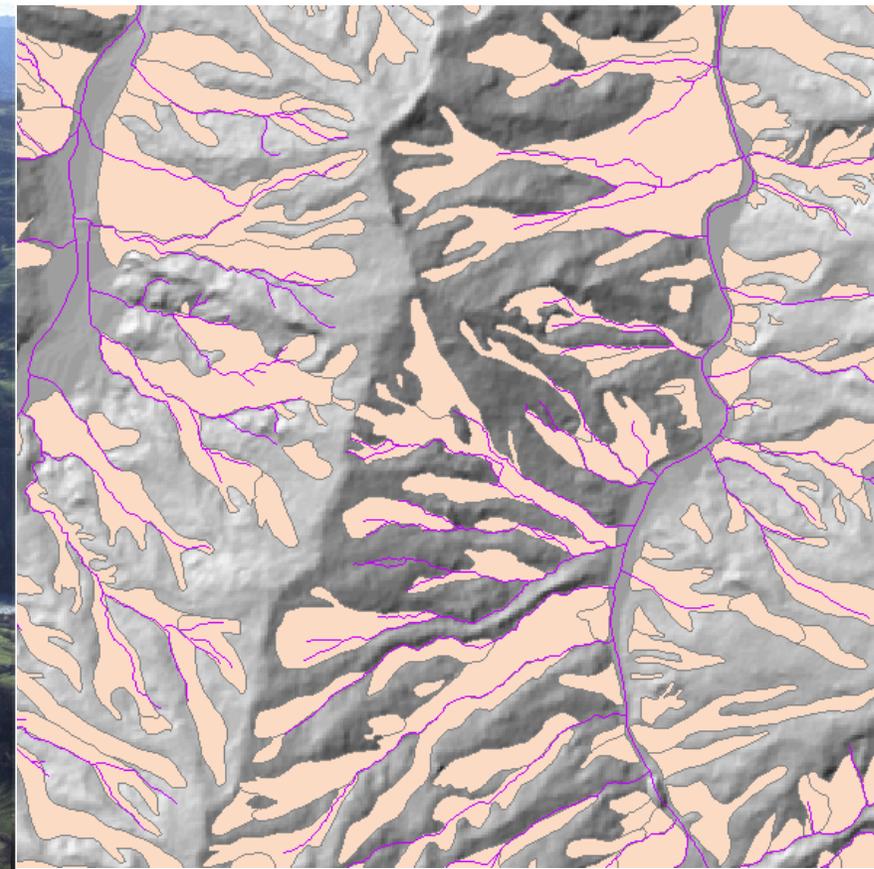
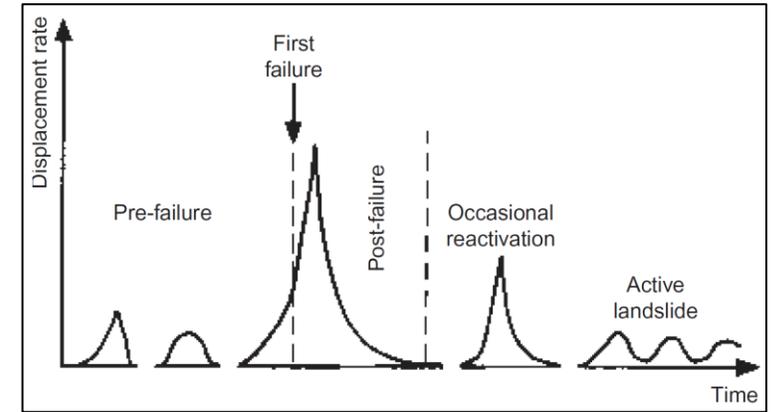
- segnale coerente con assetto geomorfologico e caratteristiche geologiche del versante (e.g., *il segnale non attraversa un crinale o un fondovalle*);
- visibile da entrambe le geometrie, mostra possibilmente un'inversione del segno;
- ricorrente in multipli ifgs / stack interferometrici.



InSAR per indagine frane, esempi applicativi

Le frane lente, caratterizzate da movimento persistente e periodiche accelerazioni o riattivazioni, sono molto comuni.

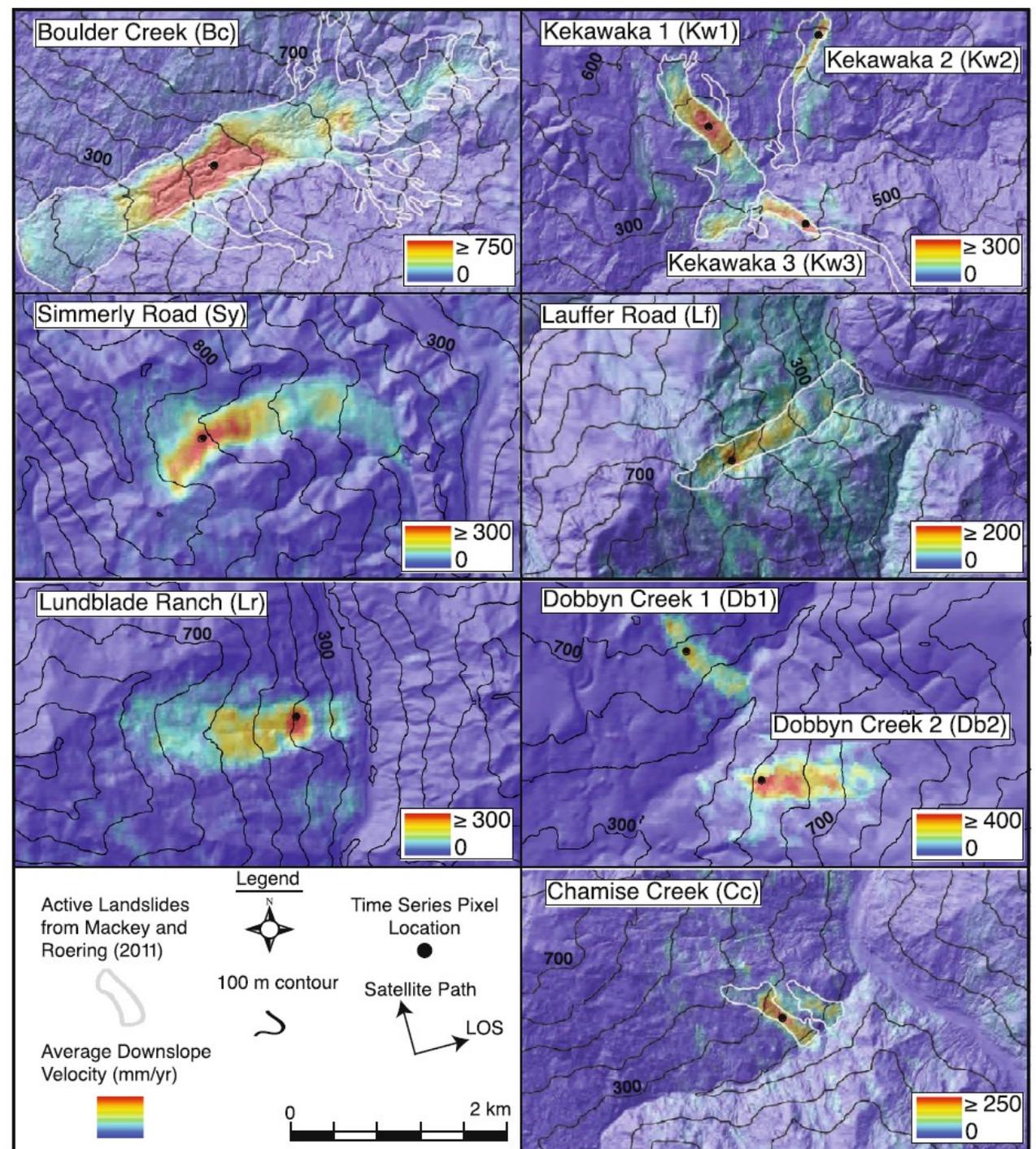
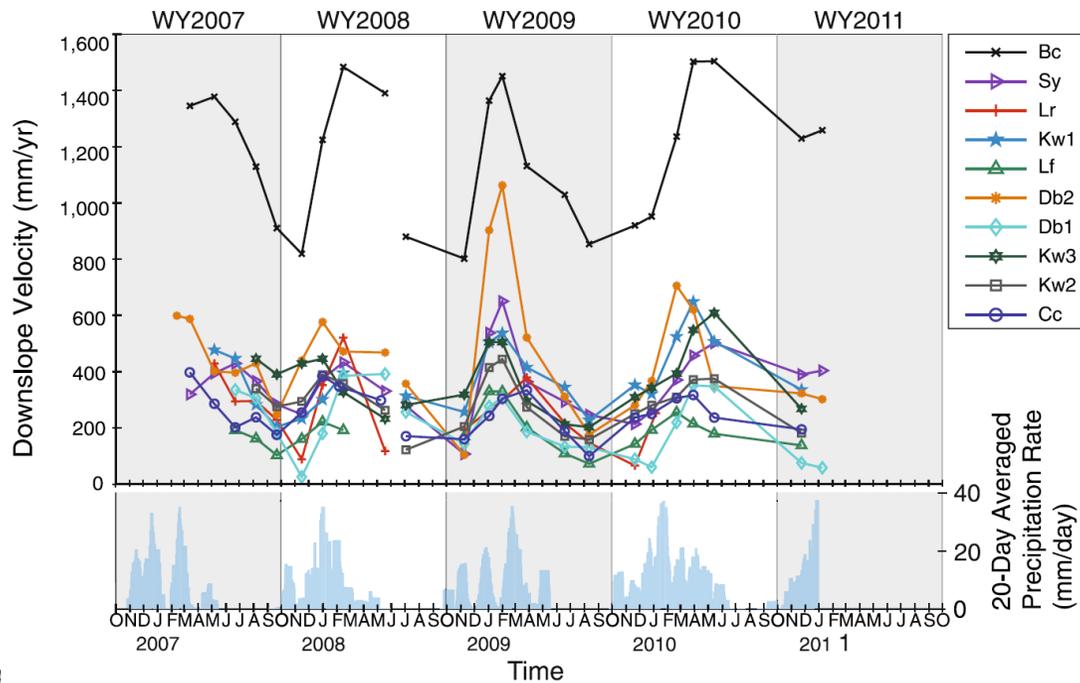
L'InSAR può essere utile per identificare i fenomeni attivi, monitorarne l'evoluzione e, forse, anticipare le riattivazioni parossistiche.



InSAR per indagine frane

Pericolosità da frana: insieme alle informazioni geologico-geomorfologiche e ai dati di misura e monitoraggio a terra, le misure InSAR rappresentano un potente strumento di indagine e monitoraggio.

Stack interferometric quadriennali di movimenti franosi nel bacino del fiume Eel, California settentrionale e andamento stagionale delle velocità medie (da Handwerger et al., 2015). Dati ALOS.



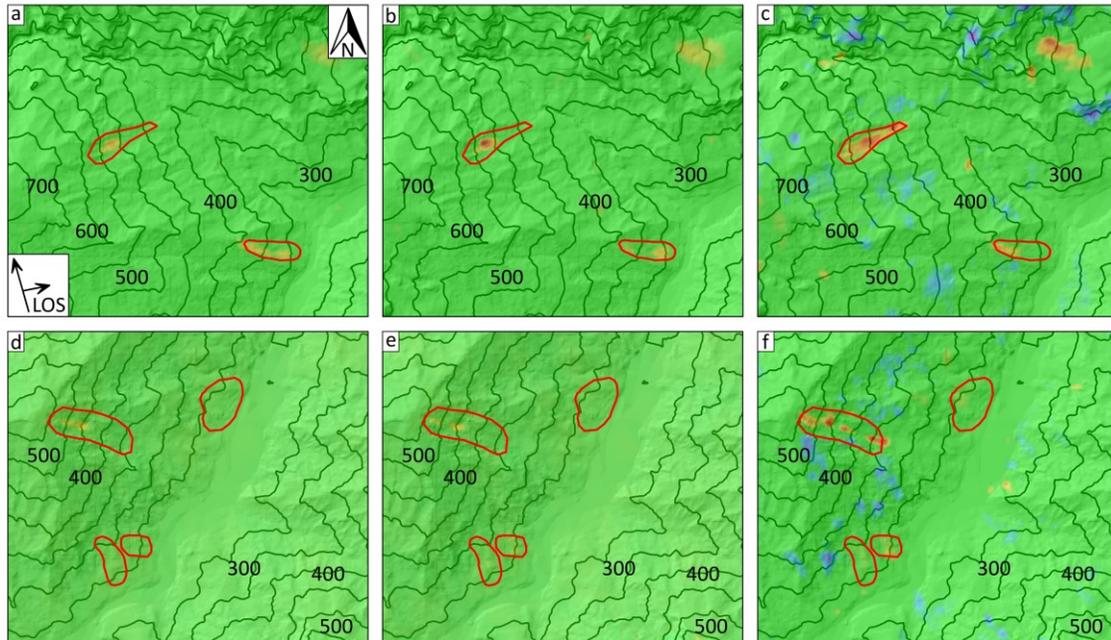
analisi areale con InSAR standard

Obiettivi:

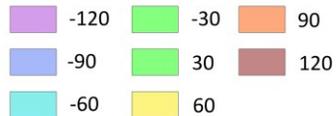
- identificare e mappare le frane attive

Background:

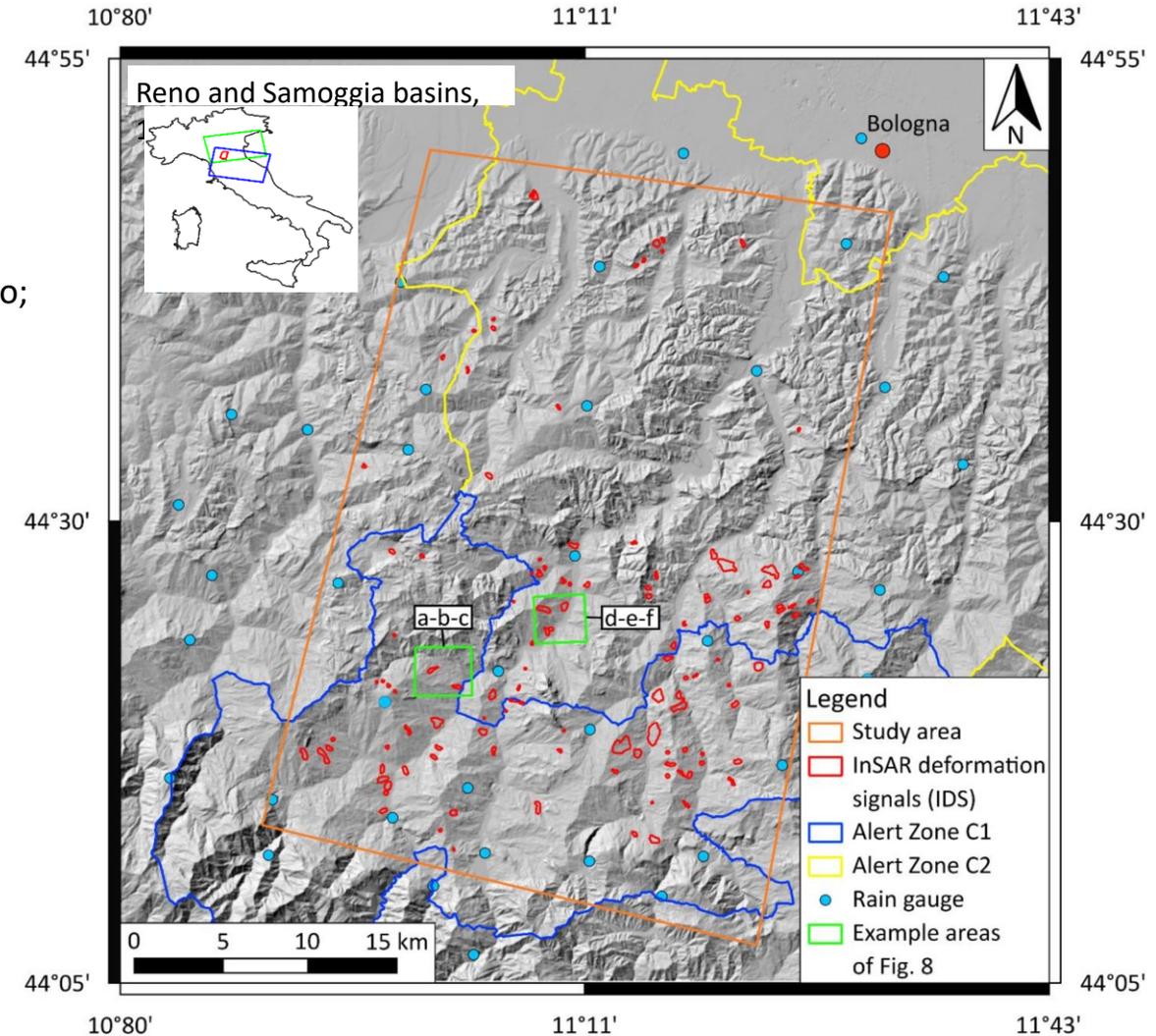
- gran parte dei fenomeni franosi avvengono dove sono già avvenuti in passato;
- gran parte dei fenomeni di rottura di tipo catastrofico è preceduto da deformazioni che si manifestano con settimane, mesi o anni di anticipo.



Displacement rate along LOS (mm/yr)



InSAR deformation signal



Sono identificate 118 frane attive (> 30 mm/anno ca.), corrispondono all'1.3% dei depositi di frana mappati nell'inventario.



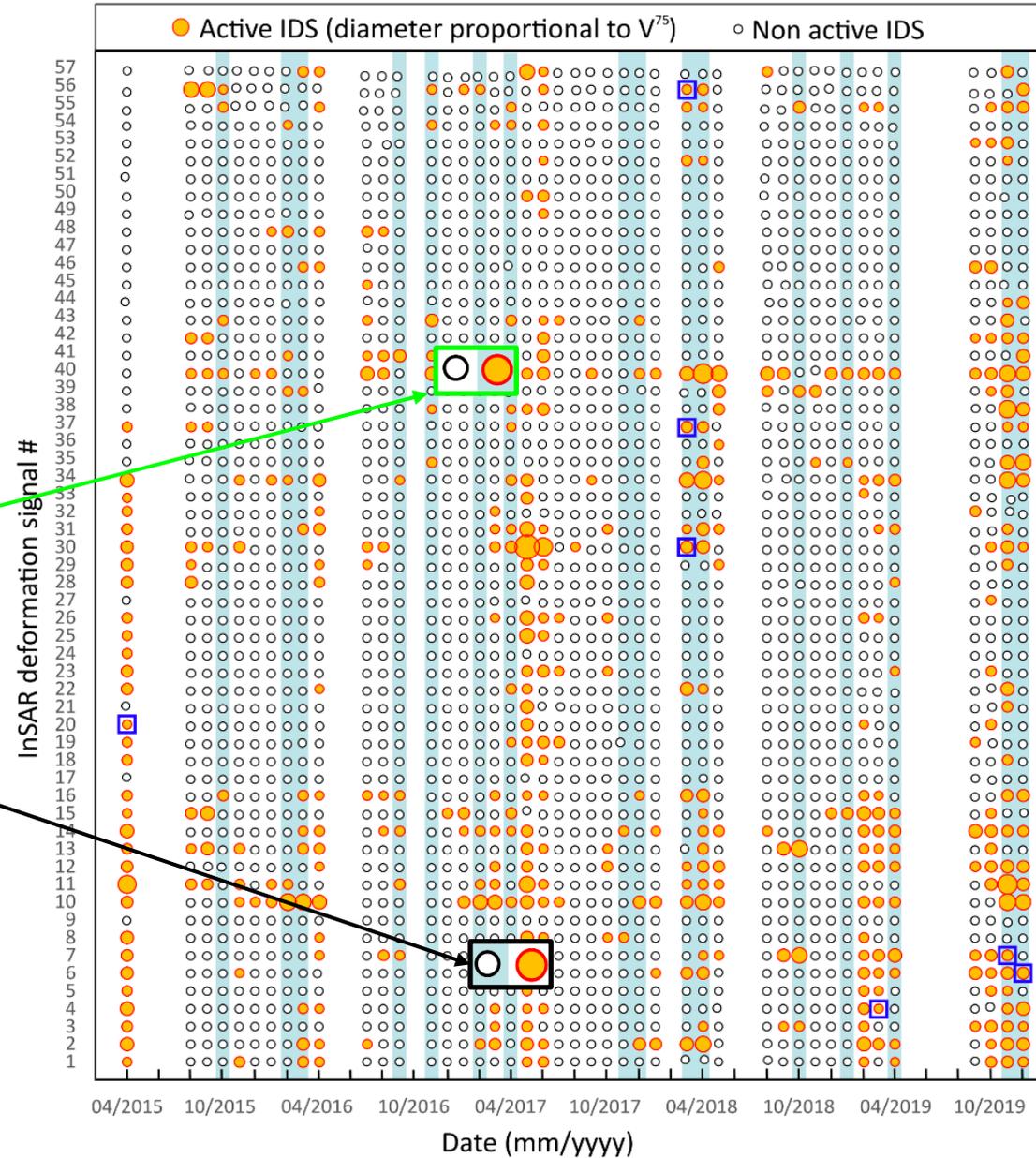
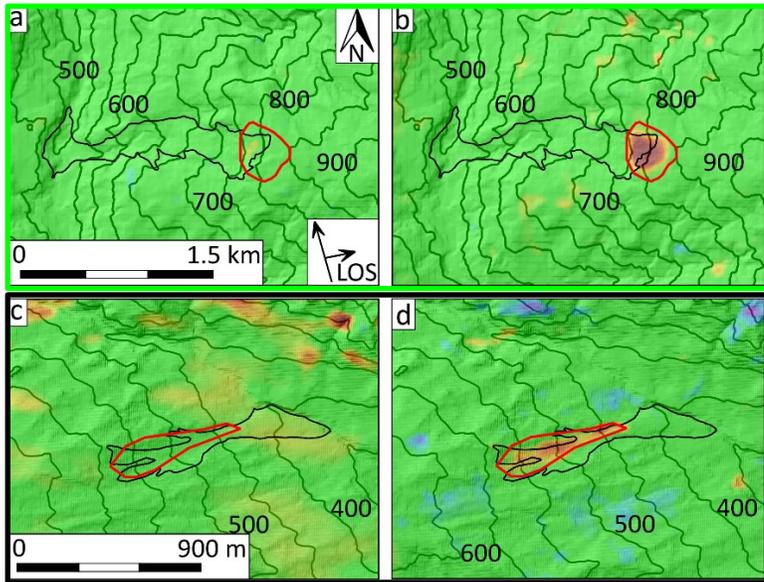
analisi areale con InSAR standard

Obiettivo:

- monitorare l'evoluzione nel tempo delle frane attive

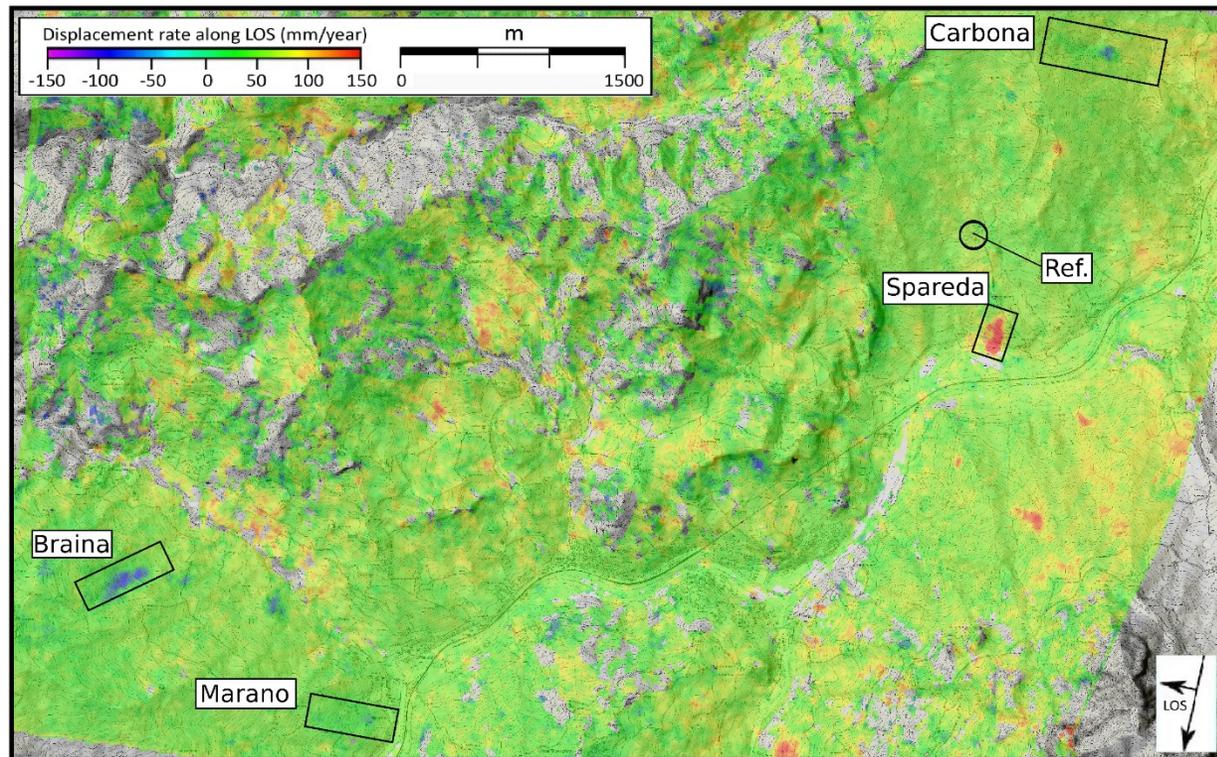
stack interferometrici mensili sono utilizzati per stimare la velocità dei fenomeni (V_{75}) e per classificare lo stato di attività

(da Ciuffi et al., 2017)



**analisi areale con InSAR standard:
identificazione frane attive e anticipo rotture catastrofiche**

2019



Dicembre 2019



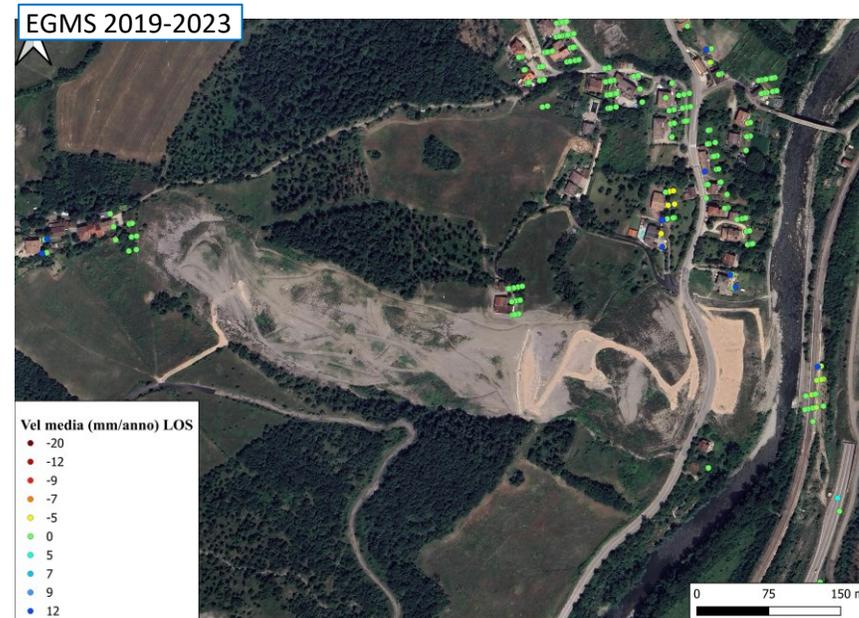
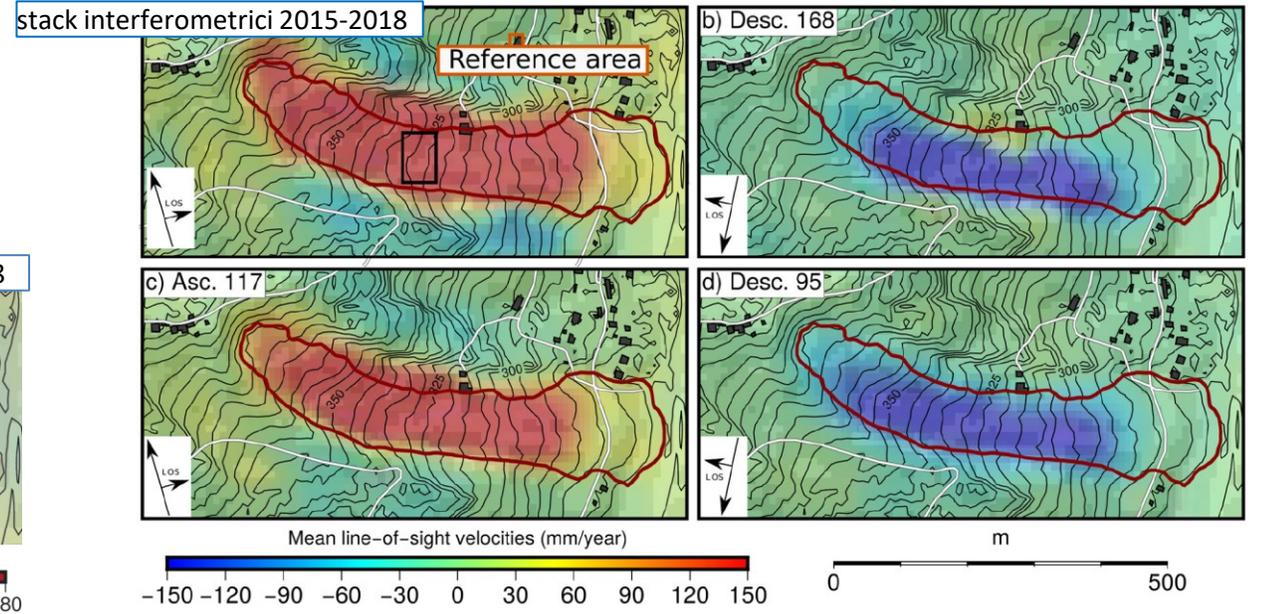
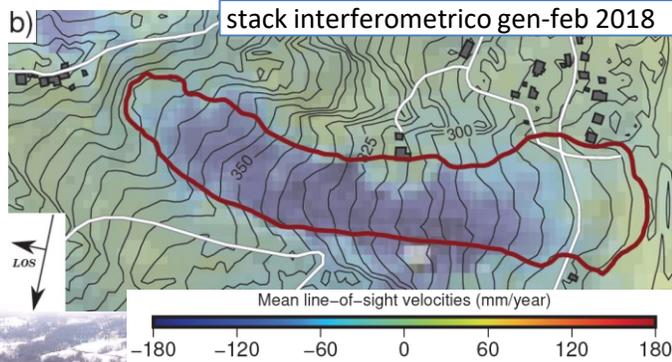
Braina, rottura
parossistica
parziale



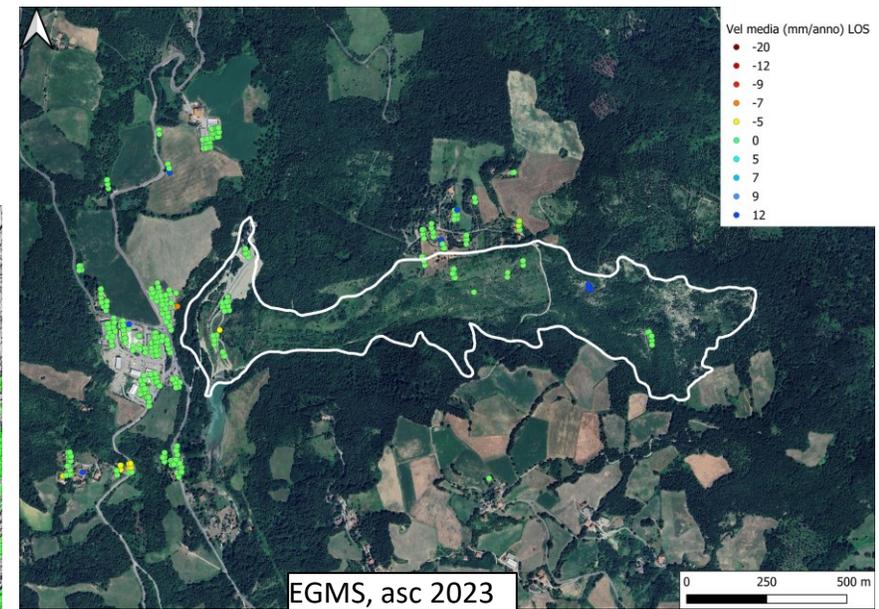
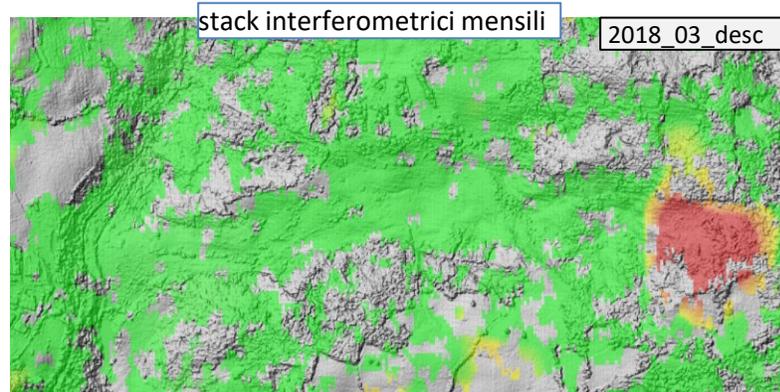
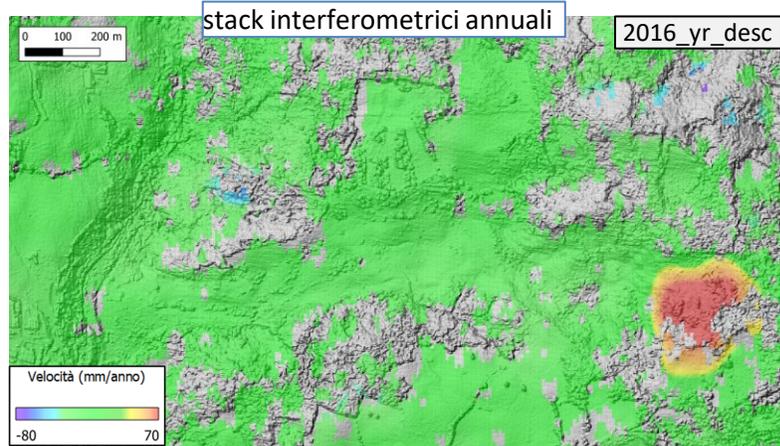
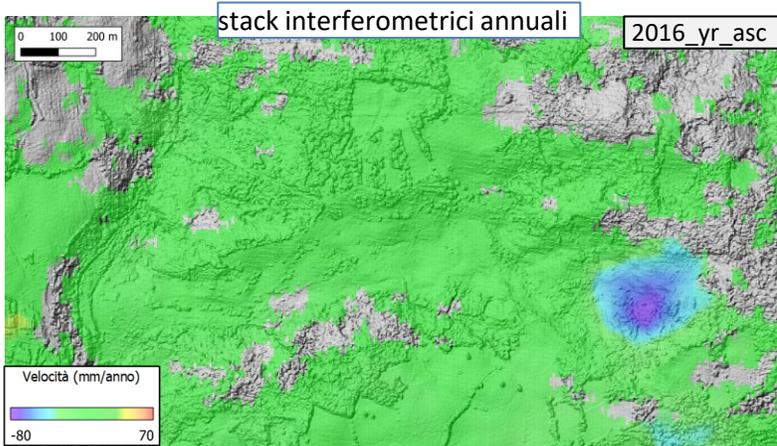
analisi areale con InSAR standard

- identificazione fenomeni franosi attivi + evoluzione
- deformazioni pre-rottura
- supporto indagini e gestione rischio

(da Squarzoni et al., 2020)



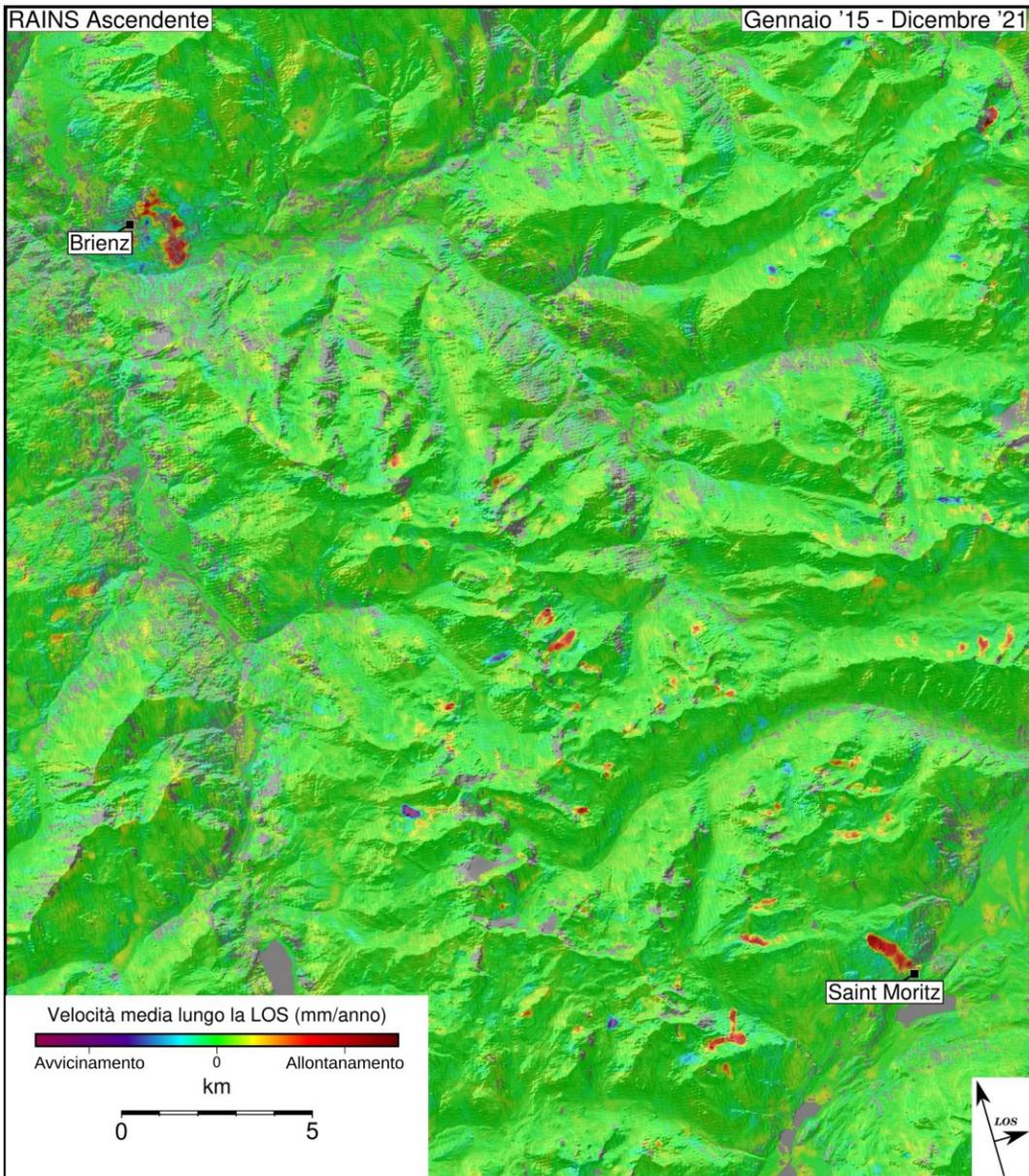
analisi areale con InSAR standard: anticipo rotture catastrofiche



20 Ottobre 2024, riattivazione parossistica rapidamente propagata dalla parte sommitale del versante fino al fondovalle con sbarramento fluviale
pioggia 01/09/2024 – 20/10/2024 : 540 mm

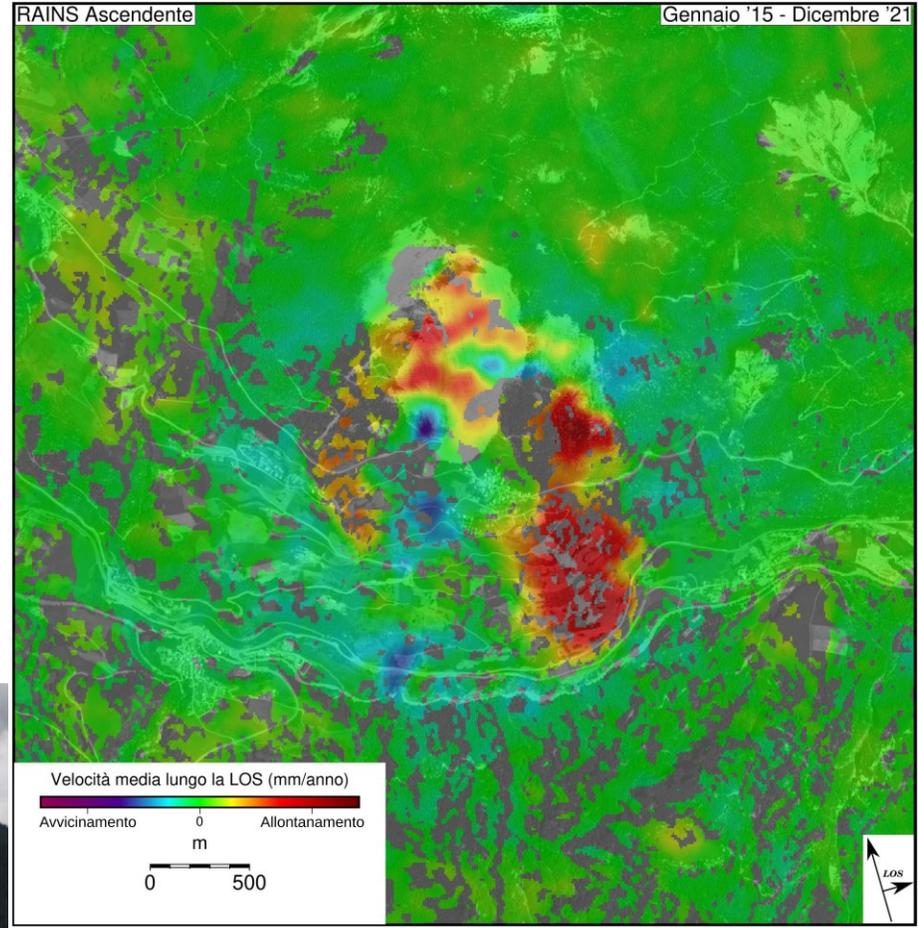
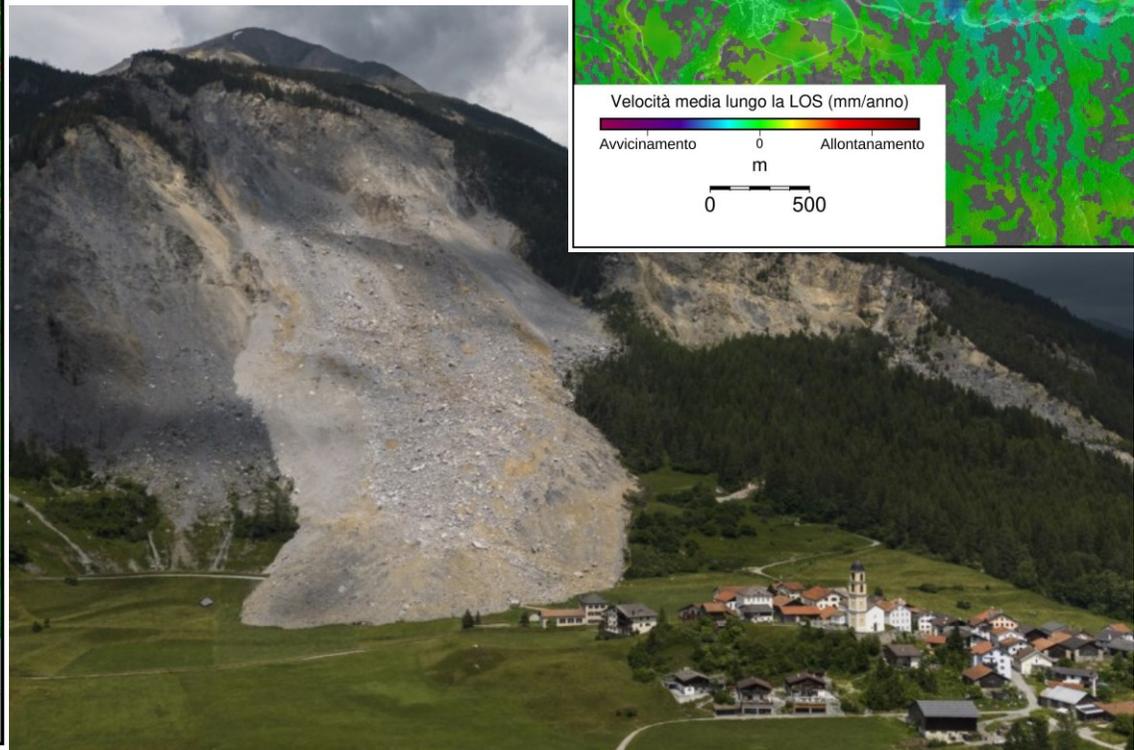


analisi areale con InSAR standard, applicazione in ambiente alpino

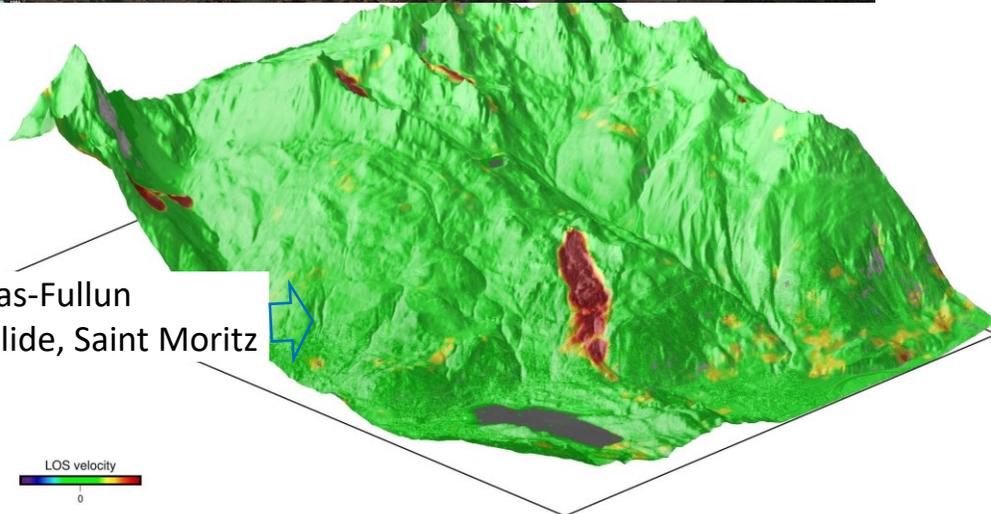


mappe regionali

villaggio di Brienz
evacuazioni Maggio 2023
e Novembre 2024
per accelerazione
movimento franoso



analisi areale InSAR, applicazione in ambiente alpino

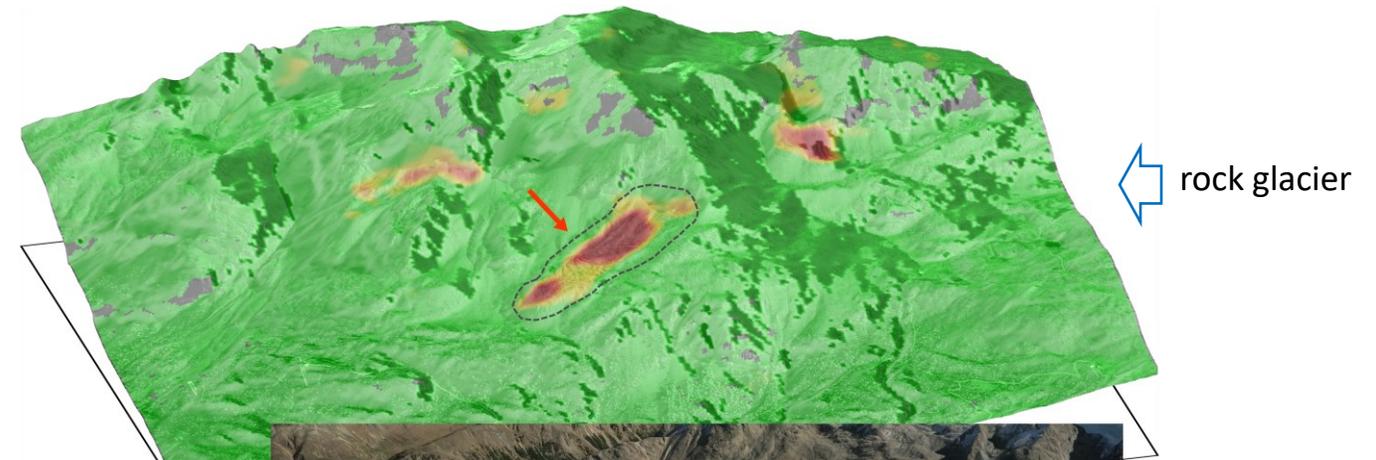


fattori favorevoli:

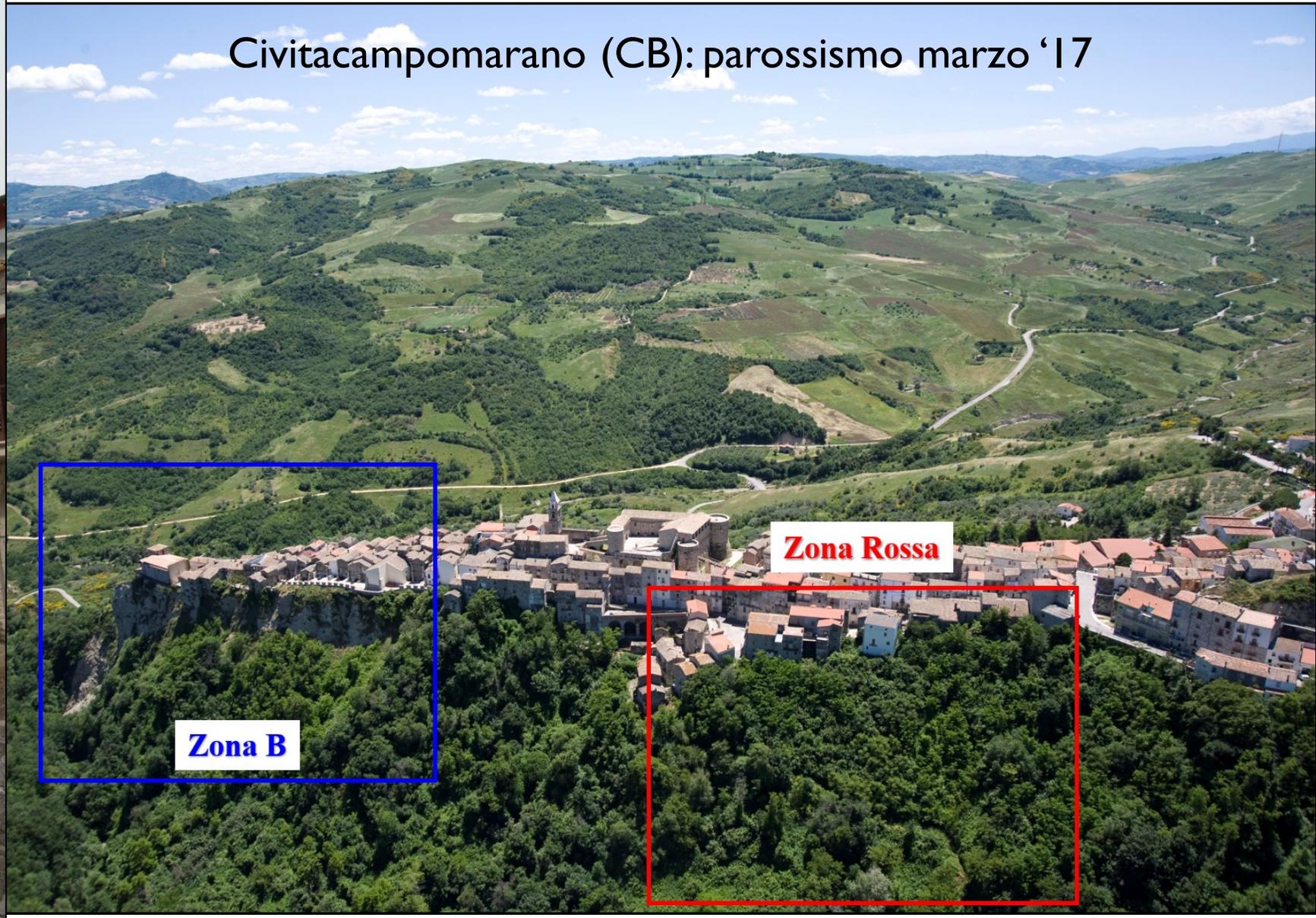
- scarsa vegetazione in alta quota;
- numerose frane a cinematica complessa (e.g., *profonde, lente con periodiche accelerazioni*);
- elevato grado di antropizzazione;
- rock glaciers

fattori sfavorevoli:

- copertura nevosa;
- conifere (sempreverdi)
- pendenza versanti talvolta molto elevata.

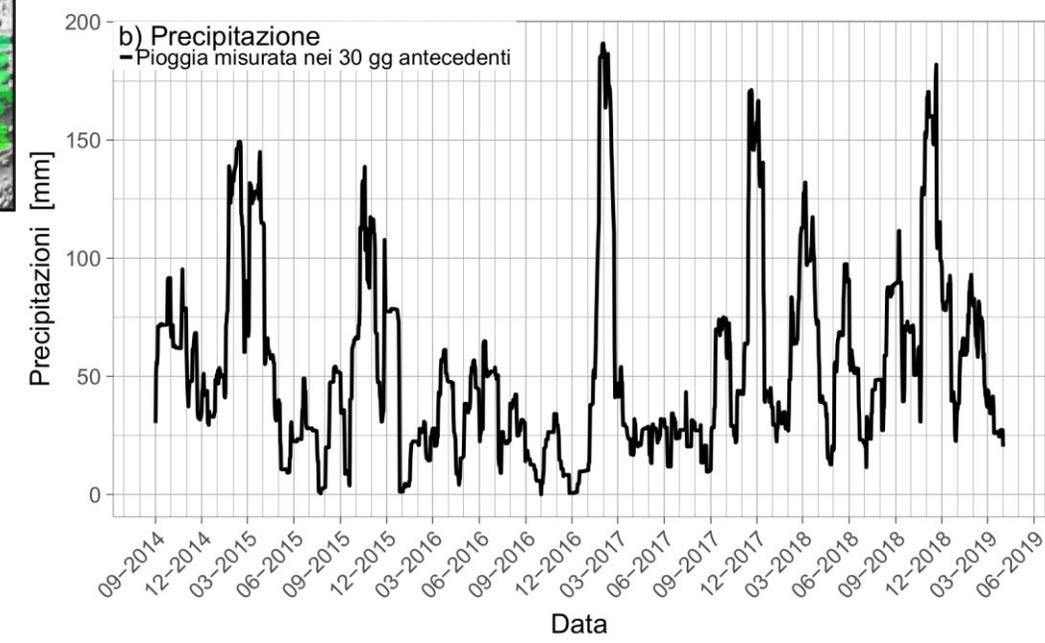
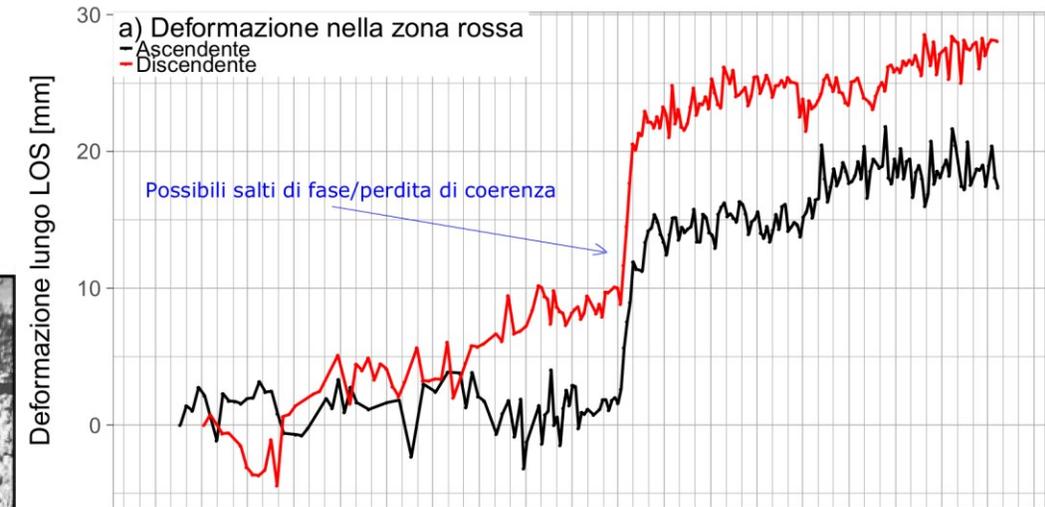
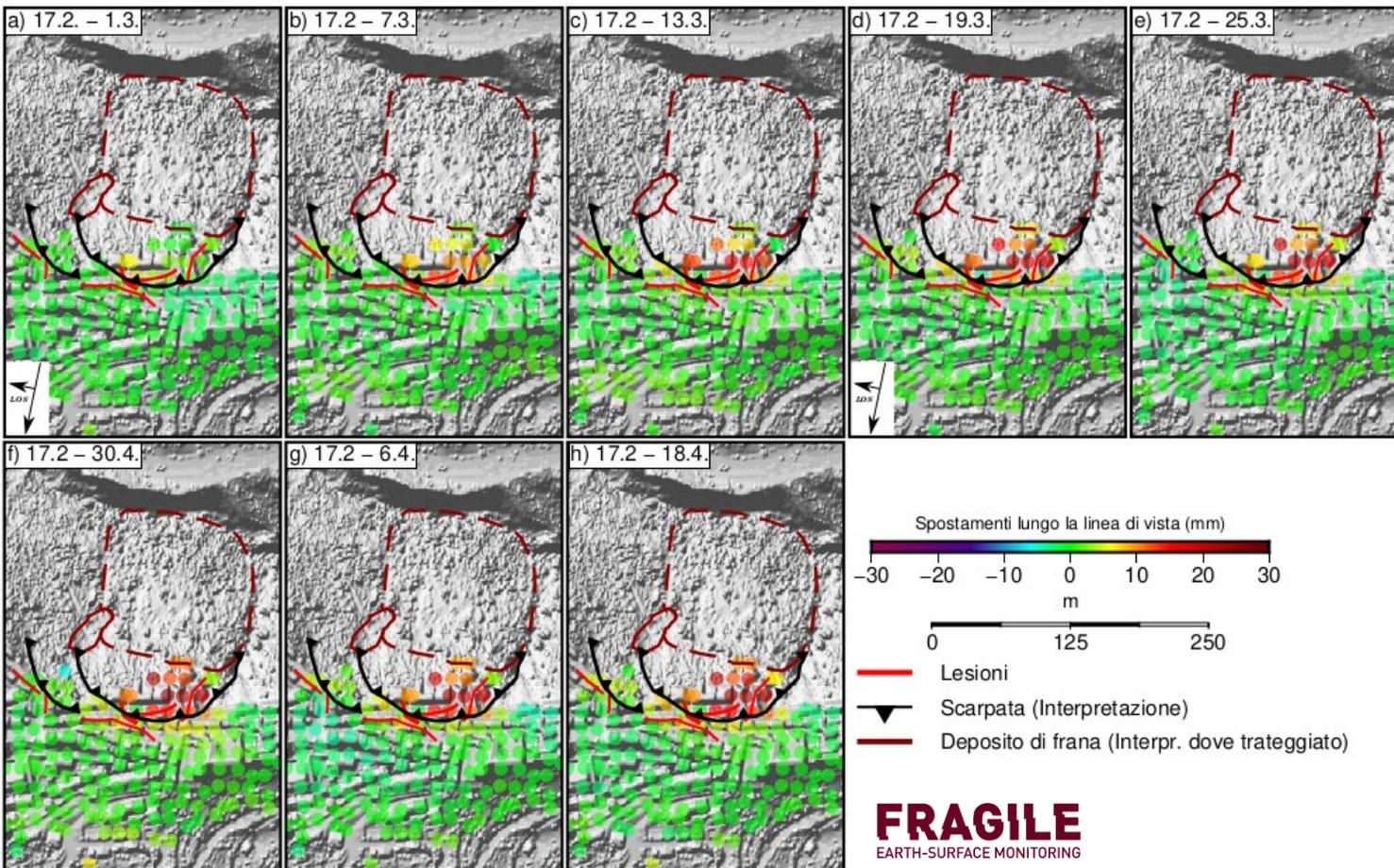


Analisi sito-specifiche, Civitacampomarano (CB)



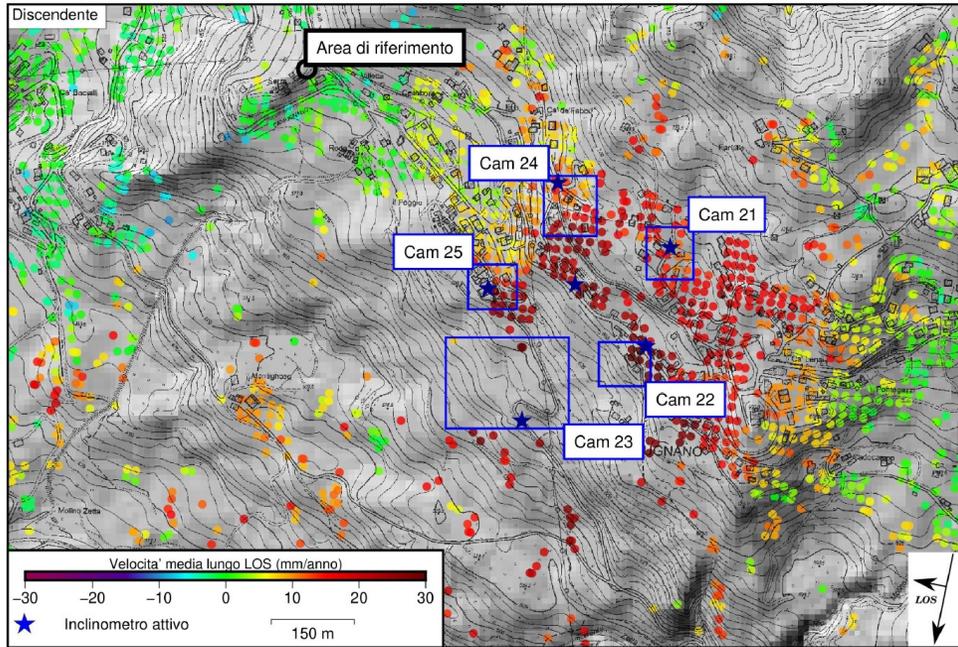
Analisi sito-specifiche, Civitacampomarano (CB)

- dettaglio e precisione
- evoluzione dei processi deformativi
- individuazione fasi di accelerazione

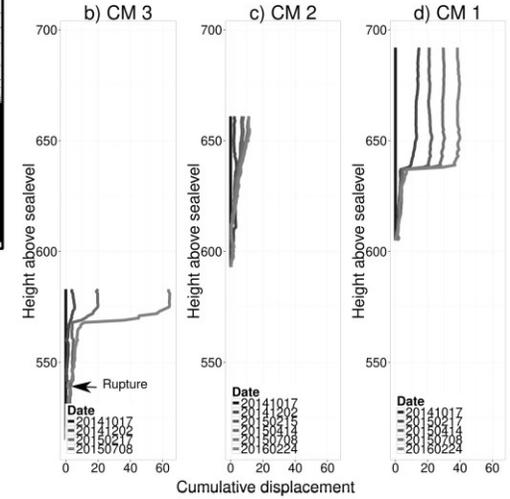
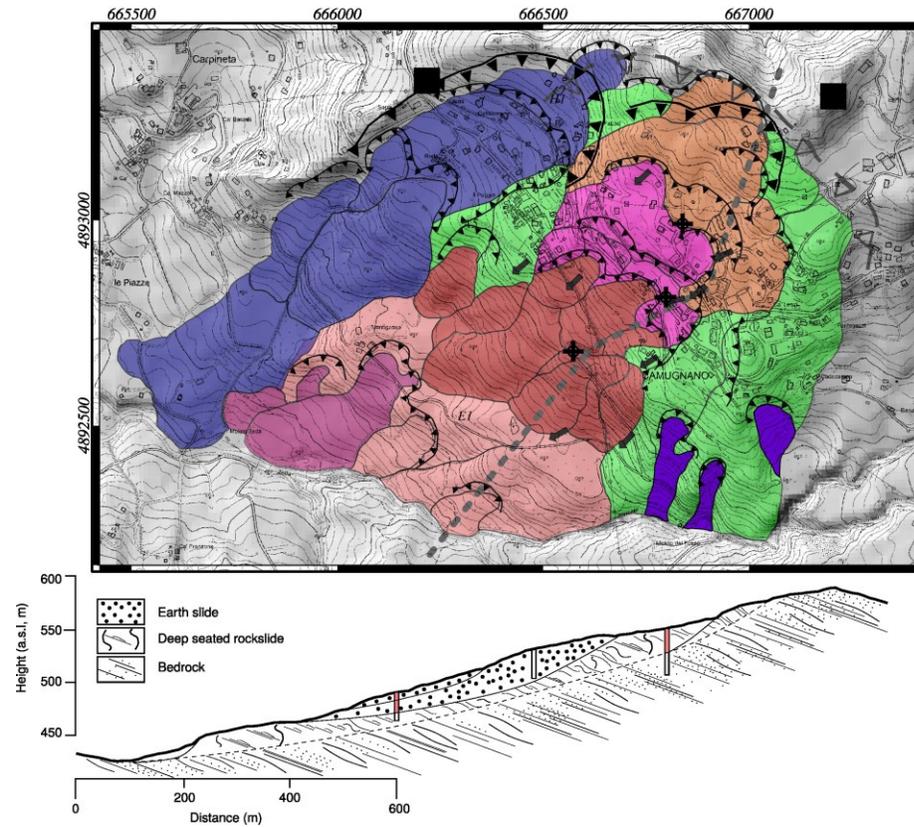
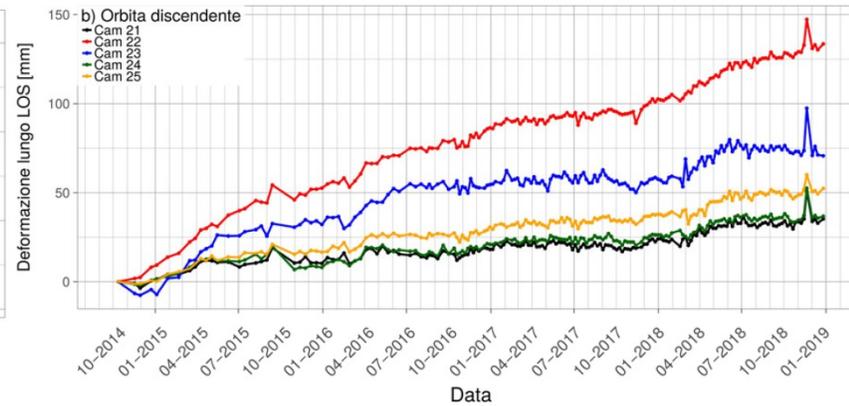
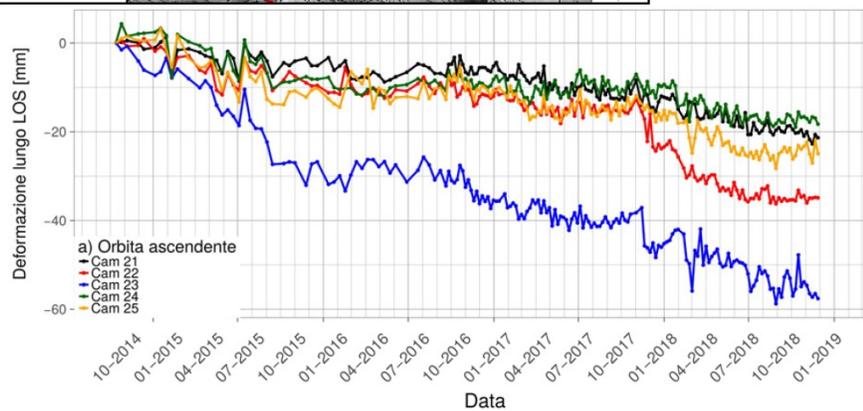


Analisi sito-specifiche, Camugnano (BO)

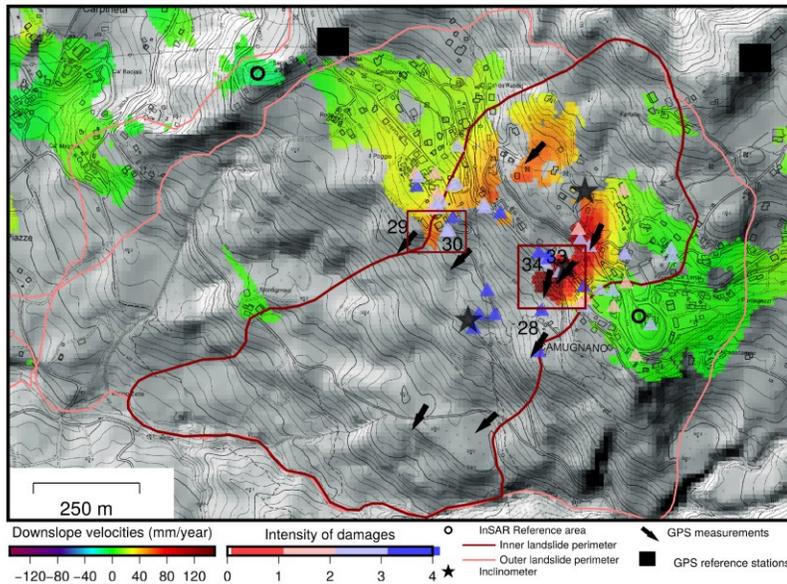
- dettaglio e precisione
- evoluzione dei processi deformativi
- individuazione fasi di accelerazione



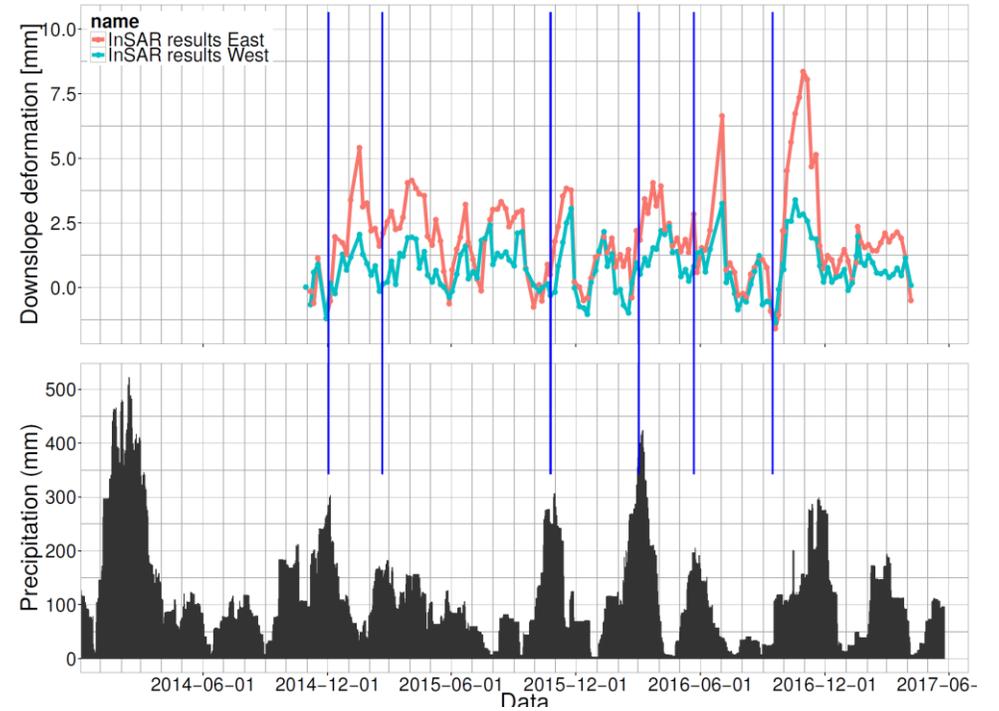
FRAGILE
EARTH-SURFACE MONITORING



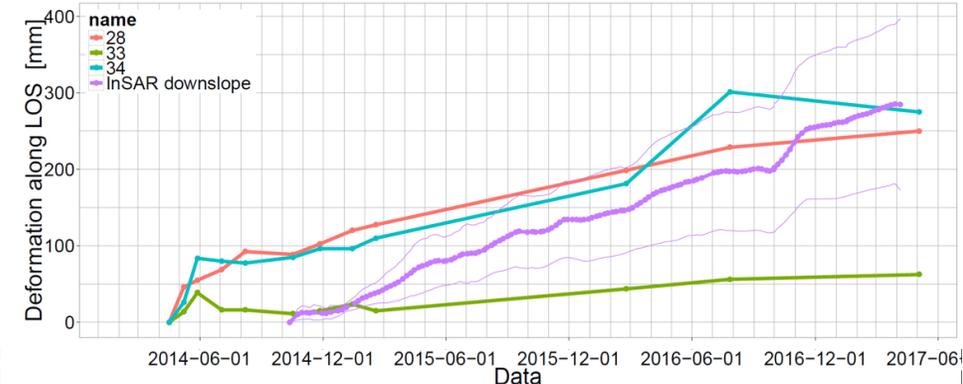
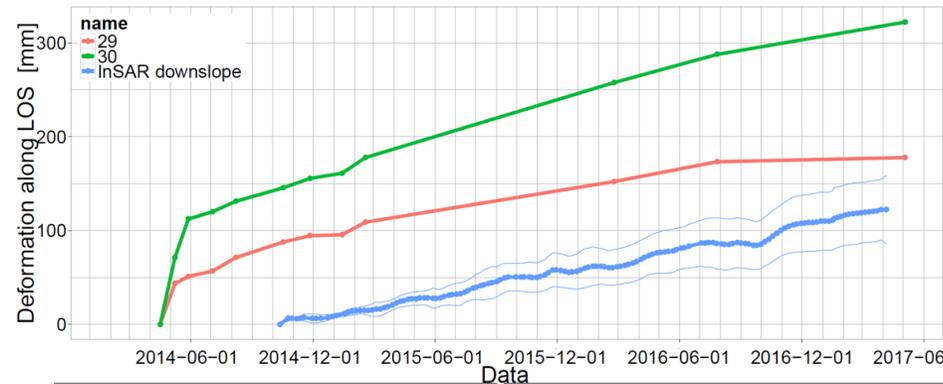
Analisi sito-specifiche, Camugnano (BO)



confronto spostamenti (lungo pendio) e piogge



confronto dati InSAR (proiettati lungo pendio) e dati GPS



InSAR, vantaggi e limiti della tecnica



Limiti delle tecniche InSAR

Le tecniche InSAR hanno limiti intrinseci dovuti al ridotto campionamento temporale.

Le misure sono monodimensionali (lungo la LOS). La combinazione dei risultati da orbite diverse compensa parzialmente.

Le fonti di errore sono numerose e vanno oltre la decorrelazione interferometrica:

- "layover" e "shadowing" a causa della geometria inclinata di acquisizione del segnale;
- errore del DEM;
- imprecisa definizione orbitale e delle coordinate radar;
- riflessioni multiple all'interno di una cella e tra le celle;
- effetto della ionosfera e dell'atmosfera;
- "unwrapping";
- definizione dell'area di riferimento.



Vantaggi delle tecniche InSAR

Le tecniche InSAR offrono vantaggi del tutto peculiari:

- sono imbattibili in termini di copertura spaziale
 - anche aree remote;
 - anche con copertura nuvolosa;
 - prospettiva regionale;
 - pattern di deformazione spaziale dei processi;
- offrono la possibilità di studiare a posteriori il fenomeno deformativo grazie all'archiviazione delle immagini radar e risalire alle sue fasi iniziali per le quali raramente si dispone di dati di monitoraggio a terra (strumenti installati solitamente dopo la manifestazione del fenomeno).



Qualità e significato dei risultati

Buoni dati di partenza (immagini SAR) hanno un grosso impatto sulla qualità dei risultati:

- lunghezza d'onda e risoluzione adeguati al problema in esame;
- frequenza di rivisitazione elevata;
- ripetibilità orbitale del satellite (piccole baseline spaziali).

Le tecniche multi-temporali nascono per superare i limiti e le incertezze della tecnica.

- forniscono misure precise e affidabili specie per fenomeni deformativi lenti e regolari;
- comportano una inevitabile perdita di informazioni (densità spaziale);
- hanno difficoltà a seguire processi con andamento irregolare e/o impulsivo (accelerazioni, scatti, etc..).

Le tecniche differenziali standard acquiscono significato e potenzialità grazie al miglioramento qualitativo dei dati SAR.

- consentono di sfruttare al massimo i segnali deformativi negli interferogrammi;
- i "rumori" vengono rimossi con difficoltà e l'informazione quantitativa associata al segnale di spostamento è incerta;
- richiedono interpretazione esperta e conoscenze geologiche adeguate



e le altre misure di spostamento?

Metodo	Punti di forza	limitazioni
GB-InSAR	misure 2D molto dense e precise, tutte le stagioni, frequenza di misura elevata	costo e ingombro strumento, necessità di visuale adatta, grande mole di dati da analizzare
GPS	precisione (mm) specie in orizzontale, monitoraggio continuo, sensibile agli spostamenti orizzontali	monumentazione, misure puntuali, costo
Misure topografiche	precisione (mm) specie in verticale	tempo (misure manual), costo (misure automatiche), misure puntuali (anche numerose)
LiDaR (aereo o da terra)	mappe ad alta densità spaziale, anche zone inaccessibili	accuratezza verticale (cm), richiede bel tempo, meglio se vegetazione non fitta, scarsa frequenza
Estensimetri in foro	accuratezza verticale, misura continua	misura puntuale



Riferimenti bibliografici

- Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27, 6, 483–486.
- Bayer B., Simoni A., Schmidt D., Bertello L. (2017). Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology* 226 (2017) 20–32.
- Ciuffi P., Bayer B., Berti M., Franceschini S., Simoni A. (2021). Deformation Detection in Cyclic Landslides Prior to Their Reactivation Using Two-Pass Satellite Interferometry. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3156.
- Ciuffi P., Bayer B., Berti M., Franceschini S., Simoni A. (2024), InSAR stacking to detect active landslides and investigate their relation to rainfalls in the Northern Apennines of Italy. *Geomorphology*, 457, 109242.
- Crosetto M., Devanathéry N., Monserrat O., Barra A., Cuevas-González M., Mróz M., Botey-Bassols J., Vázquez-Suñé E., Crippa B., 2018. A Persistent Scatterer Interferometry Procedure Based on Stable Areas to Filter the Atmospheric Component. *Remote Sens.* 2018, 10, 1780.
- Handwerger, A., Roering J., Schmidt, D., 2013. Controls on the seasonal deformation of slow-moving landslides. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 377, 239-247.
- Liu J.G., Mason P.J., 2016. *Image Processing and GIS for Remote Sensing. Second edition.* Wiley Blackwell.
- Lundgren, P., F. Casu, M. Manzo, A. Pepe, P. Berardino, E. Sansosti, and R. Lanari (2004), Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04602
- Parcharidis I., Kourkouli P., Karymbalis E., Foumelis M., Karathanassi V., 2013. Time Series Synthetic Aperture Radar Interferometry for Ground Deformation Monitoring over a Small Scale Tectonically Active Deltaic Environment (Mornos, Central Greece). *Journal of Coastal Research*, 29, 2, 325–338.
- Raspini F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Soldato M., Montalti R., Solari L., Tofani V., Casagli N., 2019. Persistent Scatterers continuous streaming for landslide monitoring and mapping: the case of the Tuscany region (Italy). *Landslides*, 16, 2033–2044.
- Sbarigia M., Carcione M., Previtali R., Lanzo G., Simoni A. (2023). The safety assessment of Campotosto Lake dams following 2016-2017 seismic sequence in Central Italy. Focus on Poggio Cancelli embankment dam. Proc. of the Symposium “Management for Safe Dams” - 91st Annual ICOLD Meeting – Gothenburg 13-14 June 2023.
- Squarzoni G., Bayer B., Franceschini S., Simoni A. (2020). Pre- and post-failure dynamics of landslides in the Northern Apennines revealed by space-borne synthetic aperture radar interferometry (InSAR). *Geomorphology* 369 (2020) 107353.
- Tong, X., D. T. Sandwell, and Y. Fialko, 2010. Coseismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS, and field data, *J. Geophys. Res.*, 115, B04314.
- Tupin F., Inglada J., Nicolas J-M., 2014. *Remote Sensing Imagery.* John Wiley & Sons, Inc..





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Alessandro Simoni

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali
BiGeA

alessandro.simoni@unibo.it

www.unibo.it