

## Nuovo Sito Sperimentale di Monitoraggio Geotecnico: la Frana di Poggio Baldi (Santa Sofia, FC)

Paolo Mazzanti <sup>1,2</sup>, Paolo Caporossi <sup>2</sup> & Francesco Ismail Mohammadi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> NHAZCA S.r.l., Spin-off di Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

<sup>2</sup> Università degli Studi di Roma “La Sapienza” - Dipartimento di Scienze della Terra

### Introduzione

Il presente lavoro tratta la caratterizzazione di un grande fenomeno franoso che ha interessato l'abitato di Poggio Baldi (in sinistra idrografica del fiume Bidente, nel comune di Santa Sofia, provincia di Forlì-Cesena), il 18 marzo 2010. Si presentano di concerto le attività di ricerca e sviluppo svolte sul sito a partire dal 2015.

La frana del marzo 2010 ha causato numerosi danni alle abitazioni private circostanti e alle infrastrutture, provocando inoltre lo sbarramento naturale del Fiume Bidente.

Considerato come la riattivazione di un più antico movimento franoso, avvenuto nel marzo 1914, l'evento del 2010 è stato innescato dall'incremento della pressione dell'acqua nel terreno, probabilmente correlata ad un rapido scioglimento della copertura nevosa accumulatasi nel periodo invernale.

Dal 2010, subito dopo l'evento, rilievi geologici, geomorfologici e geomeccanici di sito, sono stati effettuati al fine di approfondire la conoscenza della complessa cinematica della frana. Sono state inoltre condotte diverse attività di monitoraggio, impiegando sia tecniche di campo (inclinometri, estensimetri, piezometri), sia da remoto (laser, radar, fotogrammetria e GPS).

Grazie al contributo congiunto di NHAZCA S.r.l., spin-off Sapienza- 'Università di Roma, il Dipartimento di Scienze della Terra Sapienza - Università di Roma, il Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi, Monte Falterona e Campigna, il comune di Santa Sofia e Romagna Acque – Società delle Fonti S.p.A., è stato possibile instaurare un vero e proprio **Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana** nell'area di Poggio Baldi.

Qui, attività di monitoraggio ed avanzate tecniche di telerilevamento si fondono in un vero e proprio laboratorio di campo.

Dal 2015, molti ricercatori e aziende leader nella produzione di strumentazione di monitoraggio geotecnico e geomatico, incontrano annualmente la comunità tecnica e scientifica per dimostrazioni dal vivo, sul campo, delle proprie tecnologie.

### Inquadramento geologico

L'area di studio ricade nell'Appennino Forlivese, nel settore Tosco-Romagnolo, nella porzione centrale dell'Appennino Settentrionale. La valle superiore del Fiume Bidente è impostata nella Formazione Marnoso-Arenacea [Miocene], costituita da depositi torbiditici pelitico-arenacei, siltiti e arenarie (Ricci Lucchi, 1975, 1981, Martelli et al, 2002, Conti et al., 2009).

Il versante coinvolto nella frana di Poggio Baldi è parte del tetto di tale sistema di sovrascorrimenti (San Benedetto in Alpe). Un debole piegamento della stratificazione è presente nella parte inferiore del versante: la tendenza degli strati ad immergere di circa 45° nella porzione più a monte, tende progressivamente a decrescere fino a raggiungere angoli di immersione di circa 15-20°. Il complesso strutturale è completato da una serie di faglie normali ad alto angolo orientate quasi perpendicolarmente al sovrascorrimento principale (Ricci Lucchi, 1981, Feroni et al., 2001).

La geomorfologia di questo settore è fortemente controllata dall'assetto strutturale e dalla recente attività tettonica. I processi di instabilità gravitativa, caratterizzati da diverse tipologie di frana, sono uno dei principali fattori morfogenetici dell'area (Fig. 1).

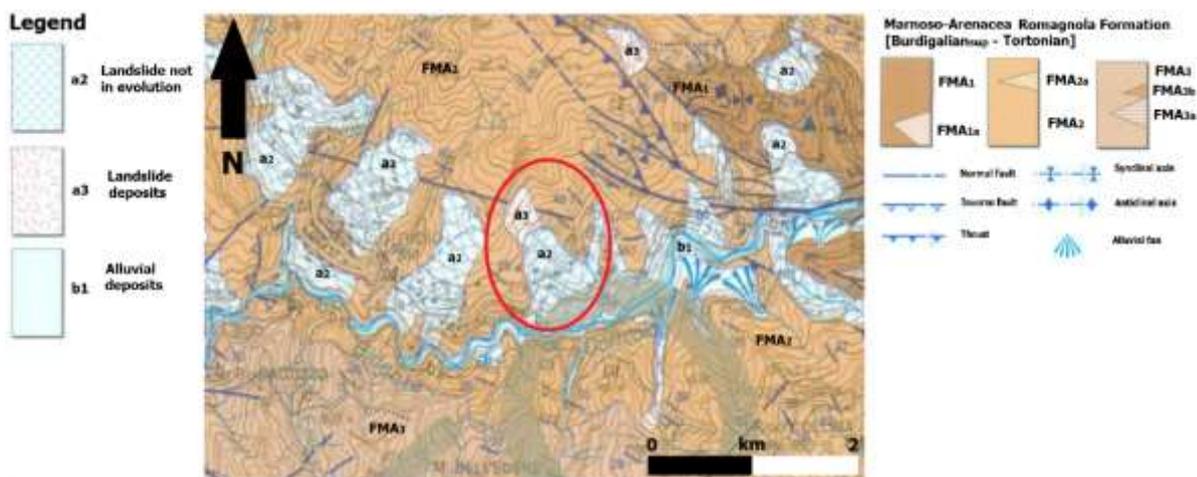


Fig. 1 Carta geologica dell'area circostante il Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana presso Poggio Baldi. In rosso, è evidenziata la Frana di Poggio Baldi, situata in prossimità dell'abitato di Corniolo (Martelli et al., 2002).

### 19 Marzo 2010: la Frana di Poggio Baldi

La frana di Poggio Baldi è uno dei più grandi fenomeni franosi in roccia e detrito dell'Appennino Emiliano - Romagnolo. Con un volume stimabile in 4 milioni di metri cubi, può essere considerata una frana tutt'oggi attiva, caratterizzata da una frequenza di accadimento di circa 100 anni. La prima attivazione documentata risale al 25 Marzo 1914. In quell'occasione, l'area di distacco fu sovrainposta su un versante del Monte Val dell'Abeto.

Al 19 Marzo 2010 è datata l'ultima grande riattivazione. Un ampio movimento di versante è andato ad ostruire il fiume Bidente, con la conseguente formazione di un lago. La stima del materiale mobilizzato si aggira intorno ai 4 milioni di m<sup>3</sup>. La frana ha causato inoltre l'interruzione di una strada di pertinenza regionale ed importanti lesioni ad abitazioni private. Dall'analisi delle immagini e dei video che hanno riportato l'avanzamento della frana durante la sua attività e sviluppo, usufruendo inoltre dei dati gentilmente concessi dalle autorità locali (servizio tecnico regionale), è stato possibile ricostruire l'evoluzione dell'evento franoso.

Dopo circa due giorni di "segnali di allarme" (come, ad esempio, aperture di fratture nel terreno), la frana si è innescata in maniera dilazionata, sviluppandosi in circa 3 ore, coinvolgendo un'area estesa circa 160.000 m<sup>2</sup>, con un'ampiezza media di circa 200 m e una lunghezza massima di circa 850 m. Secondo la classificazione di Varnes (1978) e in base alle evidenze morfologiche, la frana può essere classificata come un movimento complesso inizialmente impostato come uno scorrimento rotazionale e poi evoluto in un

earthflow. In relazione ai fattori scatenanti, un ruolo importante è stato giocato dall'incremento delle pressioni interstiziali legato allo scioglimento delle nevi, come conseguenza dell'improvviso aumento delle temperature avvenuto dopo un intenso periodo di intense piogge e nevicate.

Basandosi sui log stratigrafici, derivati dai carotaggi effettuati subito dopo l'evento, la superficie di rottura della frana del 2010 ha raggiunto una profondità che varia tra i 29 m (nella parte superiore) e i 42 m (parte inferiore).

La scarpata principale si presenta sub-verticale e con un'altezza di circa 100 metri ed un larghezza di 250 metri ed è caratterizzata dalla presenza di frequenti processi di rock-fall. Quest'ultima, assieme all'estesa e spessa copertura detritica presente alla sua base, rappresenta uno degli elementi morfologici principali che caratterizzano l'area della frana di Poggio Baldi. Altri fattori principali riconoscibili sono la zona di deplezione e quella di accumulo dell'evento del 2010 (rispettivamente zona D e A in Fig. 2).

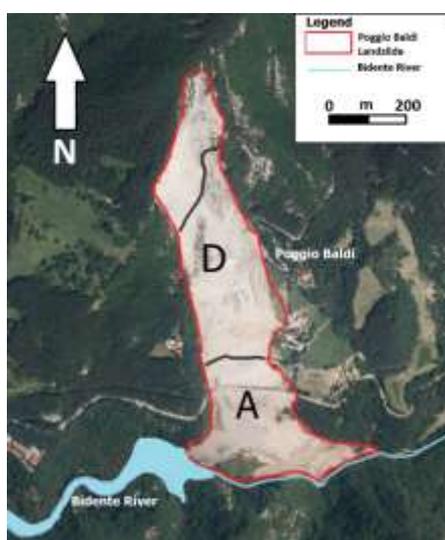


Fig. 2 In rosso, l'area coinvolta nella Frana di Poggio Baldi, il 19 Marzo 2010, vicino al paese di Corniolo.

È importante sottolineare il fatto che ogni importante riattivazione della frana principale si traduce in un espandimento della scarpata a monte, la quale mostra chiare evidenze di instabilità (come la presenza di fratture e/o trincee aperte approssimativamente in modo parallelo alla scarpata stessa).

Durante gli ultimi cinque anni, la scarpata è stata interessata da un'alta frequenza di crolli e ribaltamenti, mentre non sono state osservate evidenze di movimento nel detrito di frana presente alla base della ripida scarpata. Tuttavia, il sistema globale della frana deve essere considerato come attivo.

### [Il Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana di Poggio Baldi](#)

La frana di Poggio Baldi è monitorata sin dal 2010. In particolare, strumenti di monitoraggio geotecnico classici, quali inclinometri, piezometri ed estensimetri, sono stati permanentemente installati nell'area, costantemente supervisionati dal Servizio Area Romagna (ex Servizio Tecnico di Bacino) di Forlì-Cesena. Alcuni dei sopra menzionati strumenti sono controllati in da remoto in maniera semi-automatica, mentre altri a cadenza periodica con letture manuali.

Nell'immediato post frana, inoltre, il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna ha effettuato un rilievo LiDAR aereo e alcune campagne di monitoraggio DGPS.

La combinazione di tali attività e tecniche risulta particolarmente utile al fine di approfondire la conoscenza del sistema versante e prevederne la futura evoluzione.

Negli ultimi 2 anni nell'area di Poggio Baldi è stato effettuato un gran numero di rilievi ed indagini mediante moderne tecniche di telerilevamento, in modo tale da acquisire quante più informazioni possibili riguardo il Sito Sperimentale. Nello specifico le attività svolte sono state le seguenti:

- Rilievi con Laser Scanner Terrestre (TLS) multi-temporale e multi-stazione (2015 – 2016);
- Rilievi con Global Positioning System (GPS) (2015 – 2016);
- Rilievo fotogrammetrico su piattaforma SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) (2016);
- Rilievi da stazione permanente con la tecnica di Digital Image Correlation (DIC) (2015-2016);
- Rilievi con Interferometria SAR Terrestre (TInSAR) (2015-2016).

In Fig. 3 si evidenzia il panorama complessivo delle stazioni di monitoraggio da remoto e la distribuzione degli strumenti di contatto.

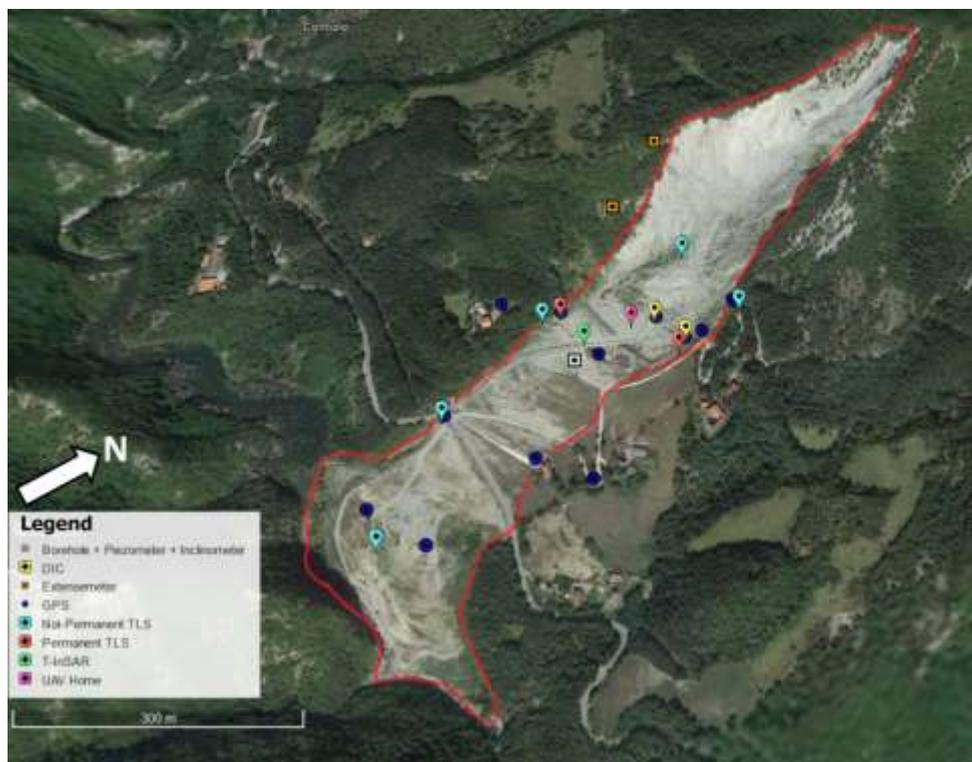


Fig. 3 Panorama planimetrico della Frana di Poggio Baldi con la distribuzione della strumentazione installata.

La facile accessibilità che garantisce il Sito Sperimentale, rende tale area particolarmente propensa all'installazione e l'utilizzo di diverse tipologie di strumenti di monitoraggio, anche e soprattutto al fine di valutare il rischio residuo.

Lo sviluppo di un Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana è stato possibile grazie agli interventi di stabilizzazione portati a termine in un periodo di 5 anni dal Servizio Tecnico di Bacino di Forlì-Cesena e la Regione Emilia-Romagna, con il supporto della società Romagna Acque – Società delle Fonti S.p.A. Grazie a tali attività, l'area principale della frana è stata messa in sicurezza, rendendola accessibile, così da permettere attività sperimentali direttamente in loco. A partire dal 2015, con cadenza annuale, si organizzano escursioni tecniche/dimostrative offrendo così a professionisti, ricercatori, studenti e autorità

locali la possibilità di imparare ed approfondire direttamente sul campo le conoscenze relative alle pratiche e alle tecnologie impiegate nel monitoraggio di frana.

Nello specifico, tra le opere di stabilizzazione effettuate nell'area di Poggio Baldi, rientrano alcuni terrapieni realizzati ai fini di controllo di eventi da rock-fall provenienti dalla sovrastante scarpata principale, essendo quest'ultima ancora particolarmente attiva.

A tal proposito l'applicazione dei sistemi di monitoraggio da remoto risulta oltremodo utile ed efficace.

### Attività di monitoraggio: risultati preliminari

#### **Rilievo Laser Scanner Terrestre (TLS)**

Il Laser Scanner Terrestre (TLS) è un innovativo sistema di rilievo topografico che consente di acquisire le coordinate geografiche (x, y e z) di una nuvola di punti dello scenario oggetto di indagine attraverso la misura del "time of flight" (TOF), ovvero il tempo necessario perché un impulso laser venga emesso, riflesso da un oggetto e ricevuto di ritorno dal sensore. Grazie a uno specchio prismatico, ad ogni impulso corrisponde una posizione angolare azimutale e zenitale che, combinata con il TOF, consente di identificare le coordinate dei punti rilevati, con una frequenza temporale di campionamento massima di 300 kHz (circa 300.000 punti al secondo) e con una risoluzione angolare massima (passo di campionamento) tra gli impulsi laser nell'ordine del centesimo di grado (sia lungo il piano orizzontale che quello verticale) (Andreoni *et alii*; 2002).

Grazie all'integrazione con una fotocamera ad alta risoluzione, è possibile, inoltre, acquisire immagini ottiche calibrate con il sensore laser. Il risultato del rilievo è, pertanto, una nuvola di punti ad altissima risoluzione e in colori RGB reali sulla quale è possibile eseguire le comuni operazioni di misura spaziale (calcolo di distanze, superfici e volumi) ed estrarre profili su tracce di sezioni definite dall'utente.

Le attività di monitoraggio TLS sono state eseguite nei mesi di aprile-maggio 2015 e nel mese di maggio 2016, utilizzando un sensore RIEGL VZ-1000, abbinato ad una fotocamera NIKON D700, installata su di esso per determinare l'informazione dei colori reali RGB (trattasi di una fotocamera da 12,1 MPx, con un sensore FF di dimensioni 36 x 24 mm, equipaggiata con un obiettivo da 20 mm).

Due stazioni permanenti sono state realizzate su entrambi i lati della frana (Fig. 3). Al fine di poter effettuare rilievi periodici, è stato progettato un accurato sistema di riposizionamento. Inoltre, altre cinque stazioni temporanee sono state pianificate in sito per permettere la completa copertura e ricostruzione della frana in 3D (Fig. 4 - 5).

L'obiettivo dell'attività è stato quello di acquisire, grazie al sistema di riposizionamento esatto del sensore laser, delle nuvole di punti della scarpata di frana, e del settore di versante al piede di essa, dalle medesime postazioni di misura impiegate in occasione dei rilievi TLS eseguiti nel mese di aprile 2015; i modelli 3D così generati a distanza di tempo (circa un anno), sono stati poi confrontati rigorosamente al fine di identificare eventuali variazioni geometriche e/o morfologiche riconducibili a fenomeni di crollo intercorsi nel periodo compreso tra le sessioni di rilievo (Mohammadi, 2016).



Fig. 2 A sinistra si nota la postazione di monitoraggio TLS 1; mentre a destra, la postazione di monitoraggio TLS 2.



Fig. 5 Ubicazione, su immagine ottica satellitare, delle postazioni di monitoraggio permanenti con tecnica TLS.

### **Rilievo con tecnica Digital Image Correlation (DIC)**

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica di telerilevamento ottico-numerica che permette la misura di spostamenti e deformazioni “a tutto campo” sulla superficie di oggetti. Tale misura è ottenuta attraverso il confronto e l’elaborazione, con algoritmi di correlazione, di fotogrammi acquisiti con una fotocamera ad alta risoluzione in diversi intervalli temporali (pre e post-evento deformativo) (Pan et alii, 2008, Lava et alii, 2009) (Fig. 6).

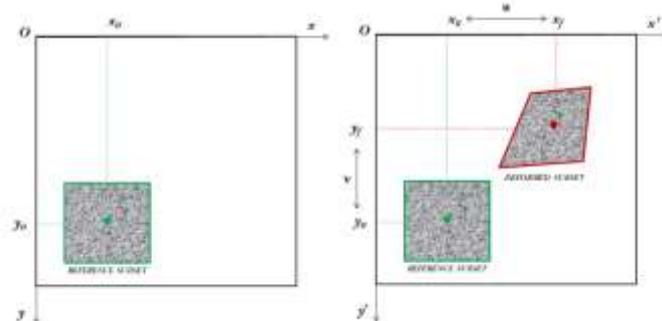


Fig. 6 – Schema semplificato relativo al principio di funzionamento della DIC.

Per consentire la misura degli spostamenti e delle deformazioni superficiali del terreno o di strutture, senza la necessità di installare riflettori artificiali a contatto, è importante che in tutti i fotogrammi acquisiti vengano riconosciuti gruppi di pixel corrispondenti. In tal modo si rende possibile il riconoscimento dei medesimi settori dello scenario investigato in tutti i fotogrammi, consentendo quindi di eseguire analisi multi-temporali. Al fine di ottenere un risultato spazialmente continuo ed accurato sull'area oggetto di monitoraggio, è opportuna una distribuzione casuale di tono, contrasto e colore sulla superficie del target (detta speckle) (Fig. 7). In questo modo si viene a creare un pattern irregolare che permette il riconoscimento univoco della superficie da analizzare.

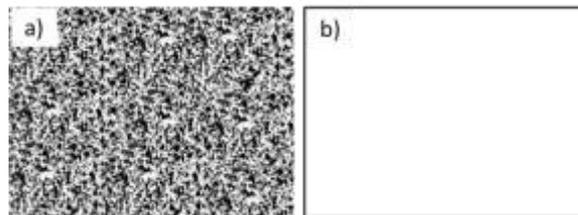


Fig. 7 Differenza tra una superficie con pattern irregolare (speckle) (a) e una superficie omogenea e regolare (b).

L'accuratezza nella misura degli spostamenti raggiungibile con la tecnica DIC è strettamente dipendente dal tipo di sensore impiegato (tipo di fotocamera, dimensione e qualità del sensore, risoluzione del sensore, obiettivo fotografico ecc.) e alla distanza tra la fotocamera e lo scenario oggetto di monitoraggio. Generalmente l'accuratezza può variare da pochi mm fino ad alcuni cm, in funzione delle caratteristiche tecniche della fotocamera e delle condizioni logistiche sito-specifiche. Sicuramente, il progresso riscontrato nei sensori da remoto, con i loro dati derivati (immagini terrestri, da drone o satellitari ottiche e radar), ha portato, negli ultimi anni, all'ampliamento delle potenzialità di queste tecniche per la misura di serie temporali di spostamento di versanti in frana (Leprince et alii, 2007, Niethammer et alii, 2010, Travelletti et alii, 2012, , Lucieer et alii, 2014). Le attività relative al monitoraggio tramite tecnica DIC hanno previsto l'installazione di due stazioni permanenti nel mese di aprile 2015. Entrambe le stazioni, di cui la prima con una vista frontale della scarpata principale, mentre la seconda con una vista laterale, sono state realizzate con lastre di Plexiglas, equipaggiate con sistemi di ancoraggio fotografici professionali, fissati saldamente al terreno (Fig. 8 – 9)

Nei mesi di aprile-maggio 2015 e maggio 2016, e' stata eseguita una campagna di acquisizione immagini, impiegando una fotocamera NIKON D3200, con un sensore da 24,2 MPx di dimensioni 23,2 x 15,4 mm, equipaggiata con un obiettivo da 18 mm.



Fig. 8 Installazione della stazione di monitoraggio permanente DIC in sito.



Fig. 9 postazioni di monitoraggio DIC-1 (a) e DIC-2 (b).

### **Rilievo con Interferometria SAR Terrestre (TInSAR)**

La tecnica TInSAR consente di ottenere immagini bidimensionali di spostamento dello scenario irradato dal sensore fino a 4 km di distanza, con pixel (punti di misura) di dimensioni variabili in base alla strumentazione utilizzata e ai parametri imposti. Attraverso la tecnica SAR (*Synthetic Aperture Radar*), infatti, è possibile sintetizzare un'antenna di grandi dimensioni, combinando i segnali retro diffusi dallo scenario e ricevuti dal radar, mentre questo si sposta lungo un apposito binario (Fig. 10).

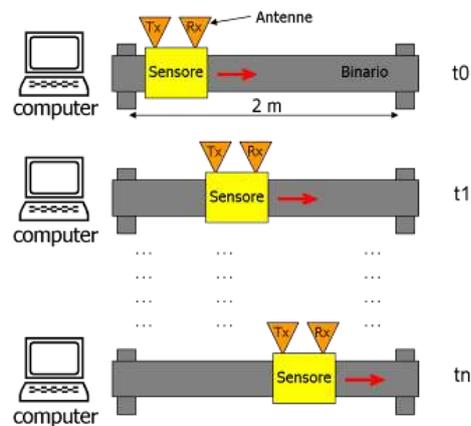


Fig. 10 schema di acquisizione TInSAR.

L'output strumentale così ottenuto è una mappa bidimensionale degli spostamenti dello scenario lungo la linea di vista dello strumento (*Line Of Sight - LOS*). Gli spostamenti vengono calcolati confrontando il valore di fase di tutti i pixel che costituiscono mappe acquisite in tempi diversi (principio dell'interferometria), con accuratezza massima nell'ordine del centesimo di mm in condizioni ideali (elevati valori di rapporto segnale rumore).

Attraverso la proiezione dei dati TInSAR sulla nuvola di punti 3D ad alta risoluzione dello scenario (acquisita mediante rilievi Laser Scanner) è possibile ottenere mappe di spostamento tridimensionali per la precisa

individuazione dei settori instabili e la corretta interpretazione dei fenomeni osservati (Mazzanti P., Brunetti A, 2010) .

E' così possibile, ottenere la serie temporale di spostamento di ogni singolo pixel che costituisce la mappa SAR ed integrarla con eventuali altri dati (dati meteo, dati acquisiti da altre strumentazioni ecc.).

Le attività di monitoraggio con Interferometria SAR Terrestre (TInSAR) sono state eseguite nei mesi di giugno 2015 e giugno 2016, utilizzando gli apparati IDS IBIS-FM e FastGBSAR Metasensing, Inc. (Fig. 11 – 12).



Fig. 11 Stazione di monitoraggio con FastGBSAR.



Fig. 12 Stazione di monitoraggio con IDS IBIS-FM.

Grazie all'alta frequenza di campionamento del sistema FastGBSAR, il quale è stato programmato per garantire un'acquisizione dati in continuo nell'arco di 24 ore, si è potuto identificare e localizzare alcuni eventi di crollo avvenuti nella parte superiore della scarpata principale (Fig. 13).

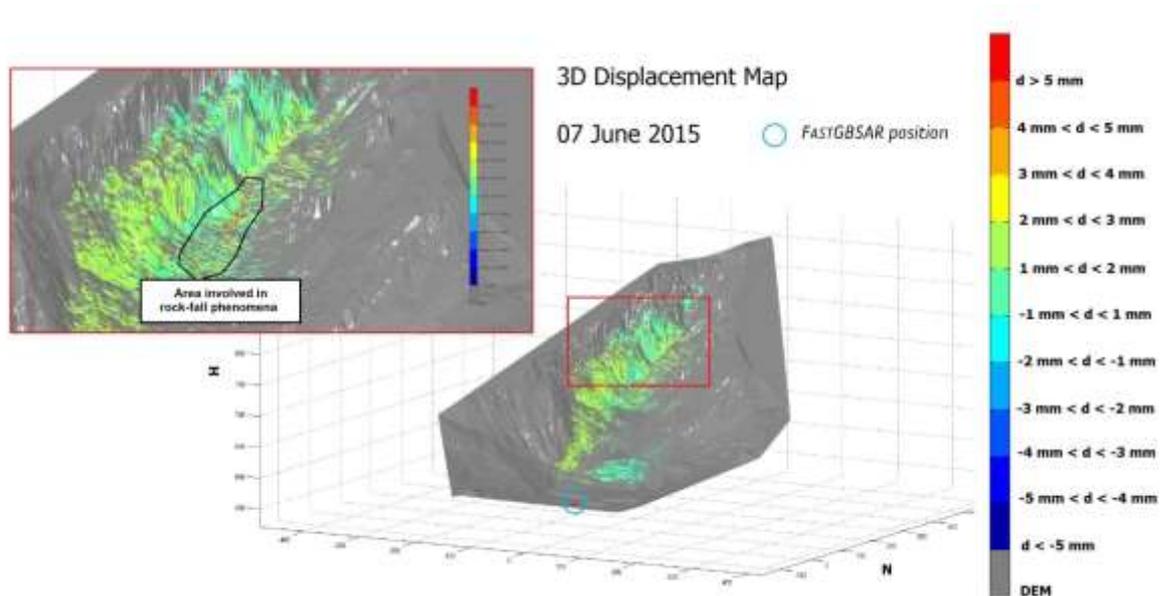


Fig. 13 Mappa di spostamento TInSAR. Lo zoom a sinistra mostra il settore coinvolto dai fenomeni di crollo.

### Rilievo GPS

Il GPS (Global Positioning System - Sistema di Posizionamento Globale) è un sistema di navigazione basato sulla ricezione a terra di segnali radio emessi da satelliti. Nato per scopi strettamente militari, questo strumento è stato abilitato per usi civili, guadagnando in sviluppo e tecnologia. Il principio di funzionamento si basa su un metodo di posizionamento sferico, che consiste nel misurare il tempo impiegato da un segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore. Conoscendo la distanza satellite ricevitore si applica il principio trigonometrico di trilaterazione. Il rilevamento mediante GPS può essere svolto in varie modalità, a seconda della strumentazione e della precisione che si richiede. Strumenti di precisione DGPS (Differential GPS), in prossimità di stazioni trasmettenti, consentono misure di elevata precisione.

Nel mese di aprile 2016 è stato effettuato un rilievo GPS, come attività' di campo a supporto di un rilievo fotogrammetrico, effettuato da piattaforma SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto). Durante tale campagna, sono stati registrati dodici punti di controllo a terra, utilizzando un GeoMax Zenith 25 Pro GPS/GNSS Base and RTK Rover Station (Fig. 14).



Fig. 14 GeoMax Zenith 25 Pro GPS/GNSS Base and RTK Rover Station.

## Rilievo fotogrammetrico da piattaforma SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto)

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche (forma, dimensioni e posizione) di oggetti tridimensionali mediante interpretazione e misura di immagini fotografiche (tradizionali o digitali), ripresi da punti di vista diversi (Cannarozzo et alii, 2012). Possono essere usate varie tipologie di camere, fra cui DSLR, mirrorless o integrate nella struttura dell'aeromobile. La ricostruzione tridimensionale viene effettuata tramite software basati su algoritmi Structure from Motion (SfM; Spetsakis & Aloimonos, 1991; Boufama et alii, 1993; Szeliski & Kang, 1994).

I risultati di tale operazione sono:

- i) una dense point cloud (nuvola di punti densa) in colori RGB reali, georeferenziata in un sistema di riferimento geografico assoluto, su cui è possibile effettuare operazioni di misura spaziale;
- ii) un modello tridimensionale ottenuto dalla triangolazione dei punti della dense point cloud.

Il rilievo con tecnica aerofotogrammetrica SAPR è stato eseguito nel mese di aprile 2016 e si è articolato secondo le seguenti attività (Mohammadi, 2016):

- i) progettazione del rilievo (identificazione dell'area di rilievo, definizione dei parametri strumentali ecc.);
- ii) installazione temporanea di n°13 Ground Control Points (GCPs). Per la materializzazione dei GCPs, sono stati impiegati pannelli di PVC di dimensioni pari a 35x35 cm per lato (Fig), opportunamente installati ed orientati al fine di essere chiaramente identificabili dalle riprese fotogrammetriche SAPR. I GCPs sono stati distribuiti quanto più omogeneamente possibile nella zona oggetto di rilievo (compatibilmente con le condizioni logistiche sito-specifiche), come riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.. 15**;
- iii) acquisizione delle coordinate plano-altimetriche dei GCPs mediante rilievo topografico di supporto (eseguito con stazione D-GPS, modello GeoMax Zenith 25 Pro Base & RTK Rover);
- iv) ripresa aerofotogrammetrica eseguita mediante un APR modello DJI Phantom 4 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.. 16**), dotato di camera integrata. In particolare, sono stati effettuati 3 voli che hanno consentito di rilevare tutti i settori del versante;
- v) elaborazione dati mediante software basato su algoritmi SfM per la realizzazione di una nuvola di punti 3D densa e di un modello tridimensionale spazialmente continuo del versante in colori RGB reali (Fig. 17 - 18);
- vi) realizzazione di un modello digitale di elevazione (Digital Elevation Model, DEM) del versante, sulla base della dense point cloud (Fig. 19);
- vii) realizzazione di un'ortofoto del versante sulla base della mesh.



Fig. 14: Uno dei 13 target (GCPs) posizionati all'interno dell'area di rilievo.



Fig. 15: Ubicazione dei GCPs su immagine ottica satellitare.



Fig. 16: APR modello DJI Phantom 4 utilizzato per la presa delle immagini aeree.



Fig. 17 Modello tridimensionale del versante derivato dal rilievo fotogrammetrico da piattaforma SAPR. Vista Sud-Nord.



Fig. 18 Modello tridimensionale del versante derivato dal rilievo fotogrammetrico da piattaforma SAPR. Vista Nord-Sud.

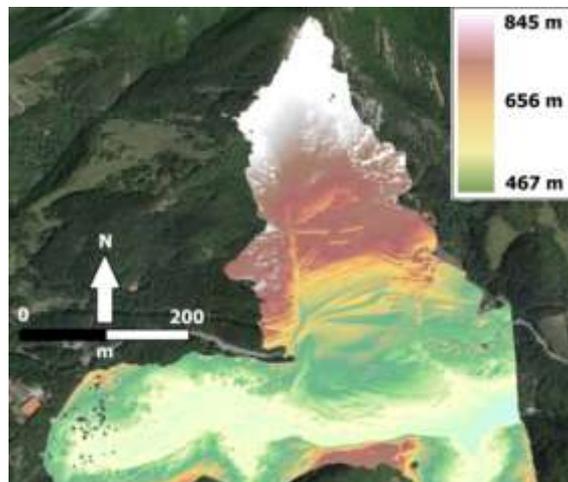


Fig. 3 DSM derivato dal rilievo fotogrammetrico da piattaforma SAPR.

## Conclusioni

Grazie all'impiego di diverse tipologie di strumenti di monitoraggio, negli ultimi anni la Frana di Poggio Baldi (Santa Sofia, FC) e' stata approfonditamente studiata ed analizzata, permettendo così non solo di definire il suo assetto evolutivo dal punto di vista geomorfologico, tettonico e geomeccanico, ma anche di approfondire la conoscenza della complessa cinematica della frana, durante le sue ultime riattivazioni, rispettivamente nel 1914 e 2010 (Baleani, 2017; Calderone, 2015).

Subito dopo la riattivazione della frana nel marzo 2010, sono state condotte alcune misure di bonifica e mitigazione, specialmente nella parte principale del corpo di frana. Considerando la rilevante dimensione ed il volume della frana, non sono del tutto escluse potenziali riattivazioni, sia a breve che a lungo termine. Ne e' a totale testimonianza la parte superiore della scarpata, la quale è interessata da un'evoluzione geomorfologica molto attiva con frequenti eventi di crollo. Questi ultimi, a lungo termine, potrebbero causare un sovraccarico della parte superiore della massa di detriti, formatasi durante la riattivazione del marzo 2010.

Le peculiari caratteristiche del sito, così come la facile accessibilità all'intera area, ha permesso di istituire un vero e proprio **Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana** permanente, grazie al contributo congiunto di NHAZCA S.r.l., spin-off Sapienza Università di Roma, il Dipartimento di Scienze della Terra Sapienza - Università di Roma, il Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi, Monte Falterona e Campigna, il comune di Santa Sofia e Romagna Acque – Società delle Fonti S.p.A.

Il **Sito Sperimentale di Monitoraggio Frana** rappresenta, quindi, una grande opportunità sia per scopi di ricerca che di formazione, in quanto esso si presta perfettamente ad attività quali corsi di formazione, Summer School, escursioni tecniche e workshop a livello nazionale ed internazionale. In tal modo, la diffusione e l'incremento della cultura e della sensibilità delle attività dedicate al monitoraggio di frana, come un'efficace opzione per la mitigazione del rischio associato, saranno rese possibili, anche grazie al libero accesso e partecipazione di ricercatori, professionisti, società leader nel settore, istituzioni pubbliche e private.

## Bibliografia

- Boufama B., Mohr R., Veillon F. (1993). Euclidean constraints for uncalibrated reconstruction, *International Journal of Computer Vision* 4 (2).
- Cannarozzo R., Cucchiaroni L., Meschieri W. (2012). *Misure, rilievo e progetto*, Quarta edizione, Tecnologia Zanichelli.
- Conti P., Pieruccini P., Bonciani F., Callegari I. (2009) Explanatory notes of the Geological Map of Italy, scale 1:50.000, sheet 266 "Mercato Saraceno".
- Andreoni Conforti D., Massari G., Potleca M. *Generazione di Modelli Digitali del Terreno dalla combinazione di dati LiDAR da piattaforma Aerea e Terrestri*, Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2002.
- Baleani M. (2017). *Modello Geologico-Tecnico della frana di Poggio Baldi*. Tesi sperimentale di laurea magistrale.
- Calderone F. (2014). *Studio geologico-tecnico della frana di Poggio Baldi, Corniolo (FC)*. Tesi sperimentale di laurea magistrale.
- Feroni A. C., Leoni L., Martelli L., Martinelli P., Ottria G., Sarti G. (2001) The Romagna Apennines, Italy: an eroded duplex. *Geol. J.*, 36: 39–54. doi:10.1002/gj.874.
- Leprince S., Barbot S., Ayoub F., Ayoub J.P. (2007). Automatic and precise orthorectification, co-registration, and sub-pixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007, 46, 1529–1558.
- Lucieer A., De Jong S. M., Turner D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Prog. Phys. Geogr.* 2013, doi: 10.1177/0309133313515293.
- Martelli L., Camassi R., Catanzariti R., Fornaciari E., Peruzza L., Spadafora E. (2002) Explanatory notes of the Geological Map of Italy, scale 1:50.000, sheet 265 "Bagno di Romagna".
- Mazzanti, P., A. Brunetti. (2010). *Assessing rockfall susceptibility by Terrestrial SAR Interferometry.*" *Proceedings of the Mountain Risks International Conference*, edited by: Malet, JP, Glade, T., and Casagli, N. Firenze, Italy.
- Mohammadi F. I. (2016). *Modellazione tridimensionale di versanti in frana attraverso elaborazioni fotogrammetriche di immagini acquisite da Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR)*. Tesi sperimentale di laurea magistrale.
- Niethammer U., Rothmund S., James M. R., Travelletti J., Joswing M. (2010). UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010.
- Spetsakis M. E., Aloimonos J. (1991). Structure from motion using line correspondences, *International Journal of Computer Vision* 4 (3), pp. 171-183.
- Szeliski R., Kang S. B. (1994). 3-D Scene Data Recovery Using Omnidirectional Multibaseline Stereo, *International Journal of Computer Vision* 25.
- Travelletti J., Delacourt C., Allemand P., Malet J. P., Schmittbuhl J., Toussaint R., Bastard M. (2012). Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 70 (2012) 39–55.
- Varnes D. J. (1978) Slope movements, type and process. Schuster R.L., Krizel R.J., eds., *Landslides analysis and control*. Transp. Res. Board., Special report 176, Nat. Acad. Press., Washington, D.C., 11-33.
- Lava P., Cooreman S., Coppieters S., De Strycker M., Debruyne D. (2009). Assessment of

measuring errors in DIC using deformation fields generated by plastic FEA. *Opt. Las. Eng.* 47 (2009): 747-753. Pan B., Xie H., Wang Z., Qian K., Wang Z. (2008). Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. 12 May 2008 / Vol. 16, No. 10 / *OPTICS EXPRESS* 7037. Optical Society of America.