



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DST**  
DIPARTIMENTO DI  
SCIENZE DELLA TERRA

## Studio geologico-tecnico della frana di Pian dei Sisi nel Comune di Abetone Cutigliano (PT) per la valutazione degli interventi di mitigazione del rischio



Prestazione conto terzi tra Regione Toscana e Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze

Firenze, 14 gennaio 2020

## Responsabile scientifico del progetto

Prof. Nicola CASAGLI  
Professore di Geologia Applicata  
Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Scienze della Terra  
Via G. La Pira n.4  
50121 FIRENZE (Italy)  
Tel: 055 2757523  
Fax: 055 2756323  
Cell: 329 3811085  
Email: nicola.casagli@unifi.it

## Responsabili tecnici delle attività

Dott. ssa Silvia BIANCHINI  
Dott. Federico RASPINI

## Gruppo di lavoro

Dott. ssa Benedetta Elena MASI  
Dott. ssa Veronica PAZZI  
Dott. Lorenzo SOLARI  
Dott. ssa Veronica TOFANI  
Dott. Pietro VANNOCCI

**In copertina:** frana di Pian dei Sisi ripresa tramite sorvolo drone effettuato nella mattina del 20 febbraio 2018. Sono visibili, sulla sinistra dell'immagine, la località (ora rudere) "Casa Giardino" e le cospicue venute di acqua sia all'interno del canale di colata che a monte del rudere stesso.

## TAVOLA DEI CONTENUTI

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>SINTESI DELLE ATTIVITÀ EFFETTUATE</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>ESAME DELLA DOCUMENTAZIONE ESISTENTE</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>LA FRANA DEL 19 FEBBRAIO 2018</b>	<b>10</b>
4.1	MORFOMETRIA E MECCANISMO	10
4.2	LE RIPRESE DRONE DEL 20 FEBBRAIO 2018	14
<b>5</b>	<b>CRONOLOGIA DEGLI EVENTI</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>ANALISI DATI PLUVIOMETRICI</b>	<b>21</b>
6.1	ANALISI DATI PLUVIOMETRICI ANTECEDENTI LA FRANA DEL 19 FEBBRAIO 2018	22
6.2	ANALISI DATI PLUVIOMETRICI ANTECEDENTI IL SOPRALLUOGO IL SOPRALLUOGO DEL 7 MAGGIO 2019	26
<b>7</b>	<b>SOPRALLUOGHI EFFETTUATI</b>	<b>27</b>
7.1	SOPRALLUOGO DEL 7 MAGGIO 2019	27
7.2	SOPRALLUOGO DEL 17 LUGLIO 2019	31
<b>8</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO E GEOLOGICO</b>	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>ANALISI DEI DATI DI MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI</b>	<b>37</b>
9.1	INCLINOMETRI	37
9.2	PIEZOMETRI	41
9.3	FESSURIMETRI	41
9.4	STAZIONE TOTALE	48
9.5	DATI RADAR SATELLITARI INTERFEROMETRICI	52
<b>10</b>	<b>INDAGINI GEOFISICHE</b>	<b>56</b>
10.1	TOMOGRAFIE ELETTRICHE 2D	56
10.2	MISURE DI MICROTREMORE SISMICO	57
10.3	INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI	58
<b>11</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DEL VERSANTE</b>	<b>61</b>
11.1	SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA	61
11.2	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI COINVOLTI NEL FENOMENO	62
11.2.1	<i>Analisi granulometrica e proprietà indici</i>	63
11.2.2	<i>Determinazione dei parametri di resistenza al taglio (<math>\varphi'</math> e <math>c'</math>)</i>	63
11.2.3	<i>Determinazione della permeabilità satura (<math>K_s</math>) attraverso prove in situ</i>	64
<b>12</b>	<b>ANALISI DELLE CONDIZIONI DI INNESCO DELLA FRANA</b>	<b>66</b>
12.1	ANALISI DI FILTRAZIONE	66
12.1.1	<i>Definizione della geometria della sezione e del modello geologico-tecnico</i>	67
12.1.2	<i>Assegnazione delle caratteristiche dei materiali</i>	68
12.1.3	<i>Definizione delle condizioni iniziali;</i>	71
12.1.4	<i>Assegnazione delle condizioni al contorno</i>	71
12.2	ANALISI DI STABILITÀ	72
12.3	RISULTATI	73
<b>13</b>	<b>CONSIDERAZIONI SULL'INNESCO DELLA FRANA</b>	<b>78</b>
<b>14</b>	<b>SUGGERIMENTI PER GLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO</b>	<b>81</b>
<b>15</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>82</b>

<b>16 BIBIOGRAFIA.....</b>	<b>85</b>
<b>17 ALLEGATI .....</b>	<b>86</b>

## 1 Introduzione

Nell'ambito del servizio relativo allo *"Studio geologico-tecnico della frana di Pian dei Sisi nel Comune di Abetone Cutigliano (PT) per la valutazione degli interventi di mitigazione del rischio"*, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI) ha effettuato analisi e studi dell'area interessata dalla frana avvenuta il 19 febbraio 2018, con lo scopo di approfondire le conoscenze della frana stessa anche al fine di supportare le necessarie misure di mitigazione del rischio.

Il servizio è stato disposto dal dirigente del settore Assetto Idrogeologico, Codice Identificativo di Gara (CIG) 7956234BFD, con decorrenza dal 1 ottobre 2019 e affidato con Decreto n. 15727 del 12 settembre 2019 e certificato in data 27 settembre 2019.

Ai sensi del Regolamento di Ateneo per lo svolgimento di attività di ricerca o didattica commissionate da soggetti pubblici e privati emanato con D.R. 451/2018, Prot. 63016 del 16 aprile 2018, la presente convenzione rientra nella tipologia A4: servizi tecnologici e organizzativi non a tariffa (consulenze, monitoraggio, progetti esecutivi/commerciali, sponsorizzazioni, ecc.) ai sensi dell'art. 3, comma 1, punto A del suddetto Regolamento.

Il 19 febbraio 2018 si è verificata una frana in località Pian dei Sisi nel Comune di Abetone Cutigliano (PT) sul versante boschivo a valle di un piccolo invaso di proprietà ENEL che costeggia la strada SS12 dell'Abetone e del Brennero. I sopralluoghi effettuati in data 20 e 21 febbraio 2018 dal personale del Genio Civile territorialmente competente hanno evidenziato la presenza di lesioni a carico di alcuni edifici. A seguito del movimento franoso l'amministrazione comunale ha deciso in via precauzionale l'evacuazione degli abitanti residenti in 20 abitazioni della località colpita e la chiusura temporanea della strada SS12.

Il 21 Febbraio 2018 il Sindaco del Comune Abetone-Cutigliano ha organizzato un tavolo tecnico con gli esperti di ENEL Green Power e di Getas Petrogeo, quest'ultima in veste di consulente del Comune, col compito di valutare le condizioni di stabilità degli edifici evacuati per poter consentire il rientro degli interessati in assoluta sicurezza. In quella sede fu concordato un programma di indagini, affidando a ciascun attore compiti precisi. Le attività iniziarono pochi giorni dopo.

Il programma di indagini e il sistema di monitoraggio, alle cui risultanze subordinare il rientro degli abitanti degli edifici e la revoca della delibera di evacuazione degli edifici ubicati a monte della frana, includono 8 sondaggi (3 equipaggiati con piezometri e 5 con inclinometri), fessurimetri a griglia installati nelle abitazioni evacuate, una stazione topografica per il controllo della stabilità degli edifici nel tempo e una campagna geofisica per accertare la stratigrafia dei terreni del sottosuolo del settore abitativo.

A supporto ed integrazione del sistema di monitoraggio basato a terra e, soprattutto, per determinare l'evoluzione dei movimenti del terreno e lo scenario deformativo pregresso e post-evento dell'area coinvolta, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze ha svolto, nel corso di tutto il 2018, un'analisi dei dati interferometrici satellitari disponibili acquisiti dai satelliti Sentinel-1 nell'ambito dell'accordo *"Attività di monitoraggio del rischio idrogeologico nel territorio della Regione Toscana"*. A seguito dell'evento, sfruttando la disponibilità di dati aggiornati sistematicamente ogni 12 giorni, sono stati redatti e inviati 4 rapporti e 12 note di aggiornamento al direttore della Difesa del Suolo e della Protezione Civile della Regione Toscana.

Si ricorda che tale accordo è stato stipulato in data 24 ottobre 2016 ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 6 della legge 24 febbraio 1992, n. 225 tra il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, la Regione Toscana e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze e prevede un monitoraggio in continuo delle deformazioni del terreno del territorio regionale toscano tramite interferometria *radar* satellitare. Tale accordo, di durata annuale, è stato poi rinnovato il 6 dicembre 2017 per una ulteriore annualità, il 5 dicembre 2018 per ulteriori tre mesi e infine il 6 marzo 2019.

Il presente documento costituisce l'integrazione al rapporto sulle attività svolte dal DST-UNIFI nell'ambito del servizio relativo allo *"Studio geologico-tecnico della frana di Pian dei Sisi nel Comune di Abetone Cutigliano"*

*(PT) per la valutazione degli interventi di mitigazione del rischio”* consegnato il 15 novembre 2019. In aggiunta alla descrizione della frana del 19 febbraio 2018 e delle attività a supporto alla gestione dell'emergenza (compresi i dati di monitoraggio delle deformazioni, sia basati a terra sia telerilevati), questo documento include la caratterizzazione dei terreni coinvolti nella frana per la costruzione di un modello geologico e geologico-tecnico e la determinazione, mediante analisi combinata filtrazione-stabilità, delle condizioni di innesco della frana.

Nel presente documento non sono inclusi i rapporti e le note di aggiornamento del dato *radar* satellitare per la frana di Pian dei Sisi, già trasmessi dal DST-UNIFI alla Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione Toscana nel corso del 2018.

## 2 Sintesi delle attività effettuate

Le attività effettuate all'interno del presente servizio hanno riguardato l'approfondimento delle conoscenze della frana di Pian dei Sisi del 19 Febbraio 2018, al fine di ottenere una caratterizzazione della frana e dei terreni coinvolti, determinarne le cause di innesco e supportare le necessarie misure di mitigazione del rischio.

In particolare, sono state svolte le seguenti attività:

- 1) Raccolta, analisi e sintesi della documentazione esistente, ovvero i rapporti prodotti da Getas Petrogeo, ENEL e del Consulente Tecnico del Pubblico Ministero del Tribunale di Pistoia e i filmati disponibili (Capitolo 3);
- 2) Caratterizzazione morfometrica della frana di Pian dei Sisi e identificazione dei diversi settori. Definizione della tipologia di frana secondo la classificazione comunemente in uso (Capitolo 4);
- 3) Definizione della cronologia degli eventi, a partire dalla frana avvenuta nella notte tra il 19 e il 20 febbraio 2018 fino alla revoca, nel settembre 2018, dell'ordinanza di evacuazione degli edifici più prossimi all'area in frana (Capitolo 5);
- 4) Analisi dei dati pluviometrici antecedenti la frana del 19 febbraio 2018 e confronto con le soglie di innesco delle frane superficiali per la zona di "allerta A3" (Alto bacino del Serchio) (Capitolo 6);
- 5) Verifica dello stato dei luoghi dopo un anno dalla frana del 19 febbraio 2018. Nello specifico sono stati eseguiti due sopralluoghi dagli scriventi in data 7 maggio 2019 e 17 luglio 2019 (Capitolo 7);
- 6) Raccolta, analisi e interpretazioni dei dati derivanti dal programma di indagini effettuato per la definizione, anche attraverso ulteriori sopralluoghi e attività *in situ*, di un quadro conoscitivo geologico, idrogeologico e geomorfologico dell'area interessata dalla frana (Capitolo 8);
- 7) Raccolta, analisi e interpretazioni dei dati derivanti dal sistema di monitoraggio basato a terra che include inclinometri, fessurimetri a griglia e stazione totale. Aggiornamento e interpretazione delle misure di spostamento superficiale ottenute mediante elaborazione delle immagini *radar* satellitari Sentinel-1. Analisi dello scenario deformativo recente, anche attraverso l'analisi delle serie temporali, che consentono di ricostruire l'andamento degli spostamenti indietro nel tempo fino alla data dell'ultima acquisizione (Capitolo 9);
- 8) Campagna di misure geofisiche (tomografie elettriche 2D e misure di *noise* sismico) condotta in data 17 luglio 2019 dal personale del DST-UNIFI, affiancato dal personale del Genio Civile Toscana Nord (Capitolo 10);
- 9) Creazione del modello geologico: caratterizzazione geotecnica *in situ* dei terreni di copertura, determinazione dei parametri di coesione, resistenza al taglio e permeabilità (Capitolo 11);
- 10) Modellazione numerica idrologica-geotecnica tramite analisi combinata filtrazione-stabilità (utilizzando i codici SEEP e SLOPE) al fine di caratterizzare le condizioni di innesco della frana avvenuta il 19 febbraio 2018 (Capitolo 12);
- 11) Considerazioni sulle condizioni e sui fattori che hanno determinato l'innesco della frana e sul ruolo giocato dalla fuoriuscita dell'acqua a seguito della rottura delle tubature della condotta forzata di proprietà ENEL (Capitolo 13);
- 12) Definizione e proposta di interventi di mitigazione del rischio per l'abitato di Pian dei Sisi e per la SS12 dell'Abetone e del Brennero che lo attraversa. Definizione di suggerimenti circa la prosecuzione del monitoraggio delle deformazioni del terreno e della stabilità degli edifici (Capitolo 14).

### 3 Esame della documentazione esistente

Con lo scopo di individuare tutte le informazioni utili per l'approfondimento delle conoscenze della frana di Pian dei Sisi del 19 Febbraio 2018, anche al fine di pianificare le necessarie misure di mitigazione del rischio, sono state raccolti ed esaminati nel dettaglio i seguenti documenti esistenti:

- 1) Relazione preliminare di progresso del 16 giugno 2018 a firma del Dott. Geol. Paride Antolini, Consulente Tecnico della Procura della Repubblica di Pistoia nel procedimento n.1331/18 RGNR (Registro Generale delle Notizie di Reato), la quale a sua volta include documenti consegnati al Consulente Tecnico da: Consulente di parte Eros Aiello, Consulente di parte Raffaele Lombardi, Consulente di parte Paolo Tognelli, GAIA SpA e Comune di Cutigliano (Allegato 1);
- 2) Relazione Getas Petrogeo, in veste di consulente del Comune di Abetone Cutigliano, del 10 settembre 2018 a firma del Dott. Geol. Giuseppe Ghezzi sullo *"Stato di avanzamento delle indagini per la sicurezza del sito abitativo"* (Allegato 2);
- 3) Tre filmati eseguiti con il drone la mattina del 20 febbraio 2018 (Allegato 3, Allegato 4, Allegato 5);
- 4) Un filmato eseguito all'interno della condotta forzata a valle della vasca di carico ENEL: tale video mostra all'interno della condotta forzata un'evidente rottura (*"distaccamento"* nell'istanza depositata dalla Sig.ra Maila Sisi il 5 marzo 2018) (Allegato 6);
- 5) Documenti (rapporti e note tecniche di aggiornamento) consegnati dal DST-UNFI a seguito della frana a Pian dei Sisi al direttore della Difesa del Suolo e della Protezione Civile della Regione Toscana come specificato in Tabella 1, per verificare l'evoluzione dei movimenti del terreno coinvolti nella frana e lo scenario deformativo progressivo e post-evento dell'area coinvolta.

Data	Documento consegnato
1 marzo 2018	Rapporto sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
18 marzo 2018	Rapporto sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
4 aprile 2018	Rapporto sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
19 maggio 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
24 maggio 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
5 giugno 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
21 giugno 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
26 giugno 2018	Rapporto sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
9 luglio 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
17 luglio 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
26 luglio 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
9 agosto 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
22 agosto 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
6 settembre 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)
17 settembre 2018	Nota tecnica di aggiornamento sul dissesto in località Pian dei Sisi, Comune di Abetone Cutigliano (PT)

**Tabella 1 – Sintesi dei documenti (rapporti e note tecniche di aggiornamento) consegnati dal DST-UNIFI a seguito della frana a Pian dei Sisi.**

## 4 La frana del 19 febbraio 2018

La frana si è sviluppata nella tarda serata del 19 febbraio 2018 in località Pian dei Sisi, comune di Abetone Cutigliano (PT), su un versante boscato particolarmente acclive in sponda destra del Torrente Lima. L'abitato di Pian dei Sisi comprende una decina di abitazioni e le strutture connesse alla centrale elettrica di Sestaione, tra cui l'invaso (vasca di carico) posto a monte del versante interessato dalla frana. La vasca di carico ha le seguenti dimensioni: lunghezza: 195 m; larghezza al fondo: 8.40 m; larghezza alla sommità: 27.40 m; profondità massima: 8.50 m.

### 4.1 Morfometria e meccanismo

Il versante, nel tratto in cui si è innescata la frana, è orientato verso est e si estende tra quota 850 m s.l.m. e quota 660 m s.l.m. con pendenze molto elevate, mediamente di circa 30-35° e con massimi di circa 40° nella parte sommitale. La frana nel suo complesso, dalla zona di coronamento fino all'arrivo nel Torrente Lima, ha una lunghezza di circa 350 m e una larghezza variabile dai 50 metri della parte medio-alta fino ai 25 metri della parte medio-terminale. La frana si è verificata circa 70/80 metri a valle della SS12 lungo cui è ubicato il piccolo bacino idrico di proprietà ENEL.

La frana può essere definita come uno "scivolamento di terreno – colata di detrito" (*soil slip – debris flow-debris avalanche*) (Varnes, 1978, Hungr et al., 2014). La frana, originatasi come scivolamento di terreno (*soil slip*), è poi evoluta in colamento rapido (*debris flow- debris avalanche*).

La frana ha interessato la copertura superficiale del versante, portando alla luce il tetto del substrato alterato nella zona di alimentazione, per uno spessore di materiale mobilitato di alcuni metri. Il materiale coinvolto è stato quasi interamente fluidificato dalle cospicue venute d'acqua diffuse sul pendio ed è in gran parte confluito nel sottostante Torrente Lima. Dalla visione dei filmati eseguiti con il drone la mattina successiva all'evento, è stata osservata la fuoriuscita di rilevanti volumi di acqua di ruscellamento principalmente da tre punti del versante, di cui uno coincidente con l'alveo di frana. È stato inoltre osservato che il corpo di frana era stato quasi totalmente asportato dalle acque del Torrente Lima, che di conseguenza è stato in parte invaso dal materiale franato.

Le frane di questo tipo raramente avvengono individualmente, come accaduto per la frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018. Più comunemente avvengono a gruppi (*i.e.*, *cluster* di centinaia o migliaia di *debris avalanches* che si innescano in maniera contemporanea) (Hungr et al., 2014) e sono solitamente innescati da eventi meteorologici di forte intensità e breve durata o di moderata intensità e lunga durata (Moser & Hohensinn, 1983; Crosta & Frattini, 2002).

La Figura 1 e la Figura 2 mostrano l'ubicazione e la geometria della frana. Questa presenta tre settori ben distinti, tipici delle frane di "scivolamento di terreno – colata di detrito":

- 1) **zona di alimentazione** (*depletion zone*) che si sviluppa per circa 80/100 m in direzione est, lungo la direzione di massima pendenza del versante;
- 2) **zona di scorrimento** (*track zone*) di circa 250 m orientata dapprima verso est seguendo l'orientazione naturale del versante, poi verso sudest, con un cambio di direzione che avviene poco a monte del rudere "Casa Giardino";
- 3) **zona di accumulo** (*accumulation zone*) propriamente detta, al piede del versante, dove il pendio termina nel sottostante Torrente Lima. La zona di accumulo non è fisicamente mappabile in quanto, come detto in precedenza, il materiale franato è stato asportato dalle acque del Torrente Lima in pochi giorni.

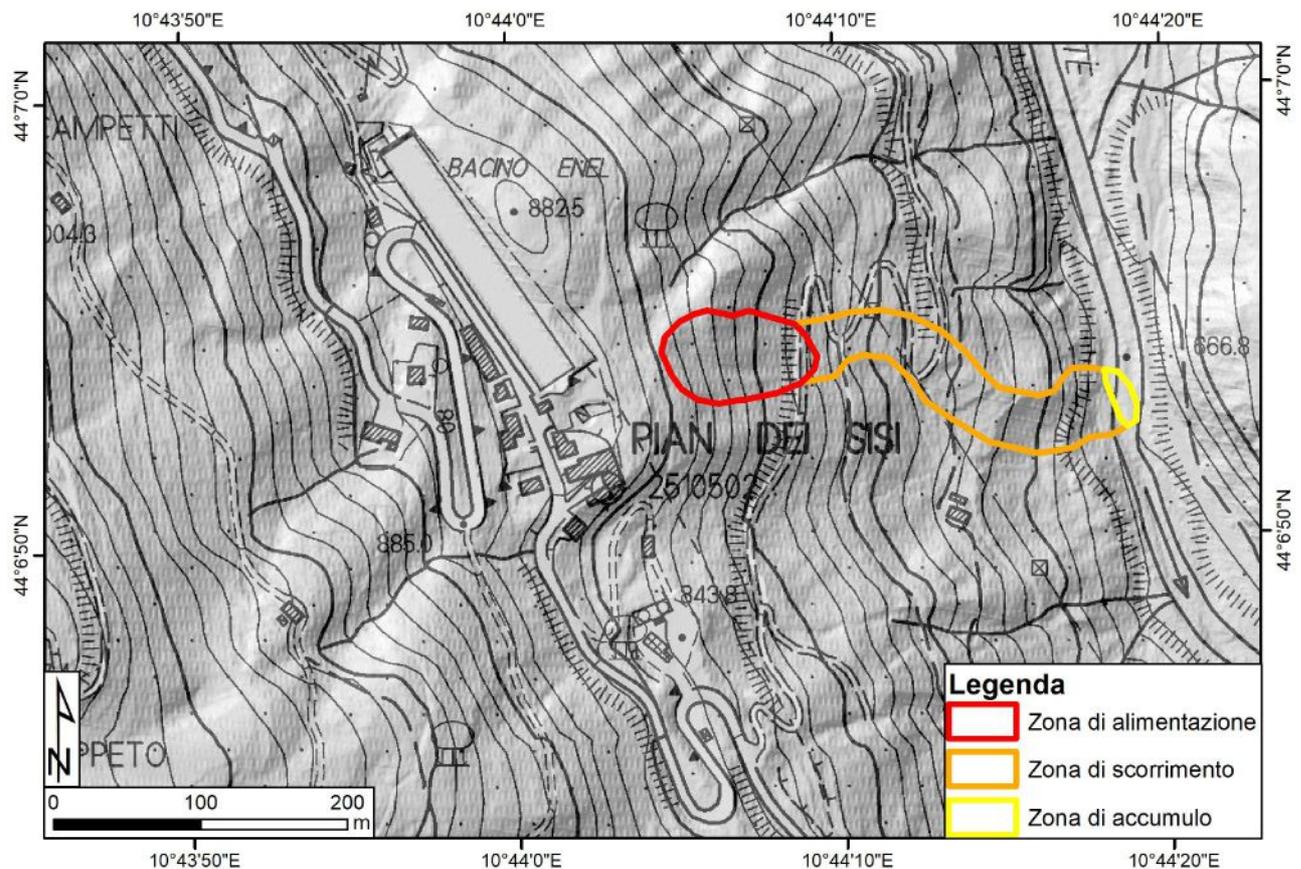
Il meccanismo della frana, tipico dei fenomeni di scivolamento-colata di detrito, è schematizzabile come segue:

- 1) distacco per taglio della coltre di terreno superficiale in corrispondenza della zona di alimentazione e innesco della frana per scivolamento;

- 2) propagazione della frana lungo la zona di scorrimento con parziale liquefazione del terreno ed erosione del canale di frana;
- 3) ulteriore propagazione in forma di colata di detrito e fango molto fluido, per completa liquefazione del materiale, e sua espansione nella zona di accumulo.

La zona di alimentazione della frana ha una lunghezza di circa 100 m, larghezza di circa 50 m e profondità media di circa 6 m. È possibile stimare un volume di circa 30.000 m<sup>3</sup> di materiale distaccato dal versante nella zona di alimentazione.

Durante la propagazione la frana ha preso in carico ulteriore materiale, per erosione della zona di scorrimento. Si può presumere che il volume complessivo della frana, in gran parte recapitato nella zona di accumulo, sia di alcune decine di migliaia di metri cubi. Parte di questo materiale è confluito nel sottostante Torrente Lima, parte di esso (soprattutto la frazione più grossolana, *i.e.*, massi e blocchi) è tuttora presente sul versante all'interno del perimetro di frana (Figura 3).



**Figura 1: Mappatura e zonazione della frana con indicazione della zona di alimentazione, di scorrimento e di accumulo. L'estensione della zona di accumulo è da ritenersi puramente indicativa in quanto il materiale franato è stato asportato dalle acque del Torrente Lima.**

Si precisa che la delimitazione della frana è stata effettuata con l'immagine ottica multispettrale acquisita dalla costellazione Sentinel-2 in data 19 aprile 2018 che ha una risoluzione di 10 m ed un errore di georeferenziazione di alcuni metri. Al contrario, la suddivisione della frana in tre settori è stata effettuata mediante rilievo di campagna e tramite analisi di foto e video acquisiti sul posto.

La stessa suddivisione della frana in zona di alimentazione e zona di scorrimento è riportata in Figura 2 utilizzando una foto panoramica scattata il 28 marzo 2018 dal versante in sinistra idrografica del Torrente Lima, ovvero sul versante opposto a quello in cui è avvenuta la frana.

L'analisi della cartografia esistente e le risultanze dei sopralluoghi effettuati mostrano come il versante in oggetto sia caratterizzato da estese e potenti coperture superficiali che coprono le formazioni appartenenti al Macigno. Sia gli scriventi sia i tecnici GETAS Petrogeo, evidenziano come gli affioramenti di Macigno sono

molto scarsi e concentrati nel settore a sud del bacino ENEL, se si esclude quelli portati a giorno dalla frana del 19 febbraio 2018.



Figura 2 – Panoramica scattata il 28 marzo 2018 della parte medio alta (zona di alimentazione e parte della zona di scorrimento) della frana di Pian dei Sisi. Nella foto si evidenzia anche la località (ora rudere) “Casa Giardino”. Sono indicati i punti di ripresa delle immagini riportate in Figura 3 e Figura 4.

Su tutti gli affioramenti, anche sui meno estesi, è rilevabile la direzione di immersione (verso est-sudest) e la pendenza degli strati (variabile tra 24 ° e 52°). Ciò significa che siamo in presenza di un versante con assetto degli strati a franapoggio, ovvero le superfici di strato hanno immersione nello stesso verso dell'inclinazione del versante. Negli affioramenti maggiori sono evidenti lineazioni di due sistemi trasversali, mediamente orientati N10W e N80W. Nello specifico, tali lineazioni sono rappresentate da sovrascorrimenti che presentano un andamento circa N-S con piani prevalentemente immergenti verso W. Inoltre, questi sovrascorrimenti sono tagliati da faglie subverticali ad andamento NW-SE. I sopralluoghi hanno evidenziato, nella zona di alimentazione della frana, un sistema di fratture legato alla presenza di un piano di faglia, attualmente ben visibile per la rimozione dei terreni di copertura.

Tale sistema di fratture, che rappresenta l'interfaccia tra substrato (più o meno fratturato) e terreni di copertura, costituisce il principale piano di distacco nella zona del coronamento della frana.



**Figura 3 – Zona di alimentazione della frana con affioramento del piano di faglia, dislocato da un secondo sistema di fratture. Si riconosce un assetto a franapoggio degli strati. Si evidenzia la presenza di materiale mobilizzato sul versante all'interno del perimetro di frana. L'immagine è stata scattata il 17 luglio 2019.**

A seguito del distacco per taglio della coltre di terreno superficiale in corrispondenza della zona di alimentazione e innesco della frana per scivolamento, la frana si è propagata lungo la zona di scorrimento, creando ed erodendo il canale di frana (Figura 4).



**Figura 4 – Settore iniziale della zona di scorrimento della frana a monte del cambio di direzione del canale di frana che avviene poco a monte del rudere "Casa Giardino". L'immagine è stata scattata il 17 luglio 2019.**

Proseguendo all'interno del canale di colata, si arriva alla parte terminale della zona di scorrimento (Figura 5). Si evidenzia, anche in questo caso, la presenza di materiale mobilizzato all'interno del canale di colata.



**Figura 5 – Settore terminale della zona di scorrimento a valle della località Casa Giardino. L'immagine è stata scattata il 7 maggio 2019. Si vede, in basso, il Torrente Lima.**

## **4.2 Le riprese drone del 20 febbraio 2018**

I tre filmati eseguiti con il drone la mattina del 20 febbraio 2018 costituiscono un elemento di analisi di fondamentale importanza ai fini dell'approfondimento della conoscenza della frana di Pian dei Sisi, in quanto permettono di analizzare lo stato dei luoghi del versante interessato e della frana stessa poche ore dopo l'insacco.

I tre filmati drone coprono l'intero versante interessato dalla frana, dall'abitato di Pian dei Sisi fino al torrente Lima, includendo l'intero sviluppo longitudinale della frana, dalla zona di alimentazione posta a quota 850 m fino all'arrivo della colata all'interno dell'alveo del Torrente Lima, a quota 660 m.

In Figura 6 sono visibili, dall'alto verso il basso:

- la zona di alimentazione, dove si è originato il movimento della frana a quota 850 m s.l.m. Sono ben riconoscibili le zone dove si è avuto il distacco per taglio della coltre di terreno superficiale con innesco della frana per scivolamento. Nella zona sinistra della superficie di alimentazione è ancora visibile un blocco di materiale che è traslato verso il basso lungo la superficie di scivolamento senza però arrivare alla zona di scorrimento;
- La zona di scorrimento, dove il materiale, parzialmente liquefatto, è transitato. Si evidenzia il notevolissimo scorrimento d'acqua all'interno del canale di colata e, soprattutto, lungo il fianco dritto della frana sia a monte che a valle di Casa Giardino (situata ad una quota di 720 m s.l.m.);
- La zona di deposizione della frana, al suo arrivo nell'alveo del Torrente Lima a quota 660 m s.l.m. Anche in questo si evidenzia, all'interno del canale di colata e lungo il fianco dritto della frana, il notevole scorrimento d'acqua che in questa zona assume le sembianze di un piccolo torrente montano.

L'elemento dei filmati eseguiti con il drone che merita maggiore attenzione è sicuramente l'inaspettata fuoriuscita di rilevanti volumi di acqua, non soltanto all'interno del corpo di frana (un punto di emergenza è coincidente con l'alveo di frana) ma su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di Pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima (Figura 7).



**Figura 6 – Riprese della frana di Pian dei Sisi effettuate da drone la mattina del 20 febbraio 2018. In alto la zona di alimentazione; nel mezzo la zona di scorrimento (si vede il rudere Casa Giardino sulla destra della frana nel riquadro rosso); in basso l'arrivo del materiale nell'alveo del Torrente Lima.**

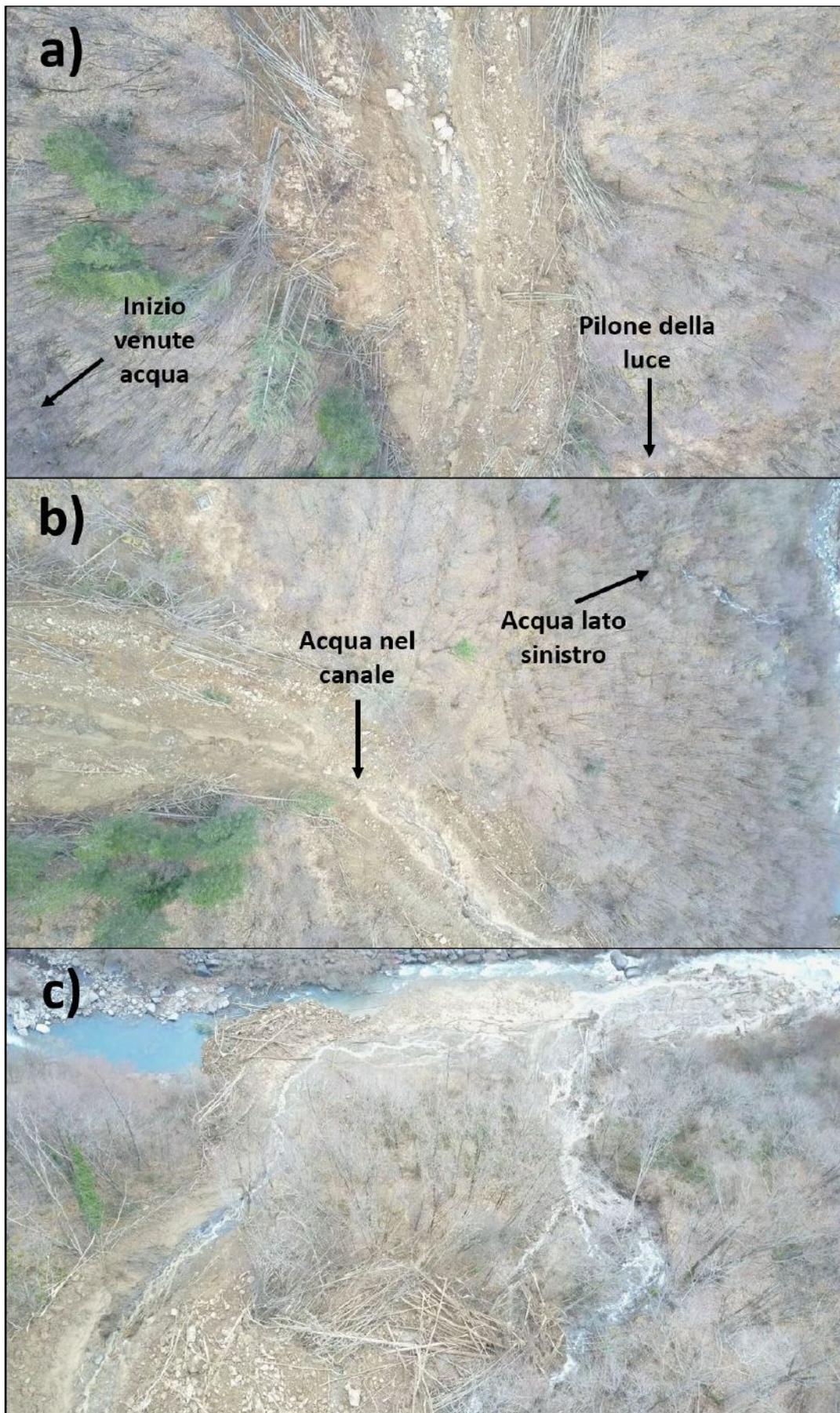


Figura 7 – Riprese della frana di Pian dei Sisi effettuate da drone la mattina del 20 febbraio 2018, che evidenziano la presenza di acqua sull'intero versante interessato dalla frana di Pian dei Sisi.

In Figura 7 sono visibili, dall'alto verso il basso:

- L'emergenza delle prime venute d'acqua sul settore di versante a destra della frana, ad una quota corrispondente alla parte alta della zona di scorrimento. Non è possibile associare una quota precisa a tali venute ma, essendo esse localizzate poco a monte del pilone della luce (indicato in foto) appare ragionevole pensare ad una quota di circa 760m (Figura 7a);
- L'emergenza dell'acqua all'interno del canale di scorrimento della frana, ad una quota di circa 740 m. Si vede anche una cospicua quantità di acqua nell'incisione a nord della frana (*i.e.*, sul settore di versante a sinistra della frana stessa) (Figura 7b);
- L'arrivo del materiale mobilizzato nell'alveo del Torrente Lima, parzialmente ostruito dai detriti e dai tronchi ma non totalmente sbarrato. La quantità d'acqua in arrivo dal versante e dalla frana nel Torrente Lima è decisamente anomala (Figura 7c).

Ulteriori considerazioni sulla presenza di tale acqua lungo il versante e all'interno del perimetro di frana verranno fatte in seguito, in relazione anche alle precipitazioni antecedenti all'innesco della frana e alla rottura della condotta forzata dell'impianto ENEL visibile nel filmato eseguito all'interno della condotta forzata stessa.

Gli scriventi considerano tuttavia importante anticipare quanto contenuto nell'istanza depositata il 5 marzo 2018 dalla Sig. Maila Sisi, dato che rappresenta un'informazione di fondamentale importanza per qualsiasi considerazione sui fattori di innesco della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018: *"... nella mattinata immediatamente successiva all'evento disastroso l'esponente e gli abitanti della zona hanno potuto constatare la fuoriuscita di acqua in tre punti: al centro della frana, a monte ed a valle della stessa. Successivamente alla chiusura degli impianti ENEL, e quindi lo svuotamento dei condotti ENEL, tanto il torrente d'acqua creatosi al centro della frana che quello spostato a monte si sono rapidamente esauriti, il che fa presumere che la provenienza dell'acqua cagionante il cedimento del terreno dai condotti ENEL..."*.

## 5 Cronologia degli eventi

A seguito dell'evento del 19 febbraio 2018, il personale del Settore Genio Civile Toscana Nord (sede di Lucca) si è recato, nei giorni 20, 21 e 26 febbraio 2018, presso l'abitato di Pian dei Sisi per verificarne lo stato dei luoghi. I sopralluoghi si sono svolti il 20 ed il 21 alla presenza dei tecnici comunali, del Sindaco con altri amministratori del Comune, delle forze dell'ordine e dei tecnici ANAS. Al sopralluogo del giorno 20 hanno partecipato anche alcuni proprietari delle abitazioni, ed il giorno 21 erano presenti anche il geologo Ghezzi di Getas Petrogeo, convocato dal Comune.

Ulteriori sopralluoghi sono stati svolti dal personale del Settore Genio Civile Toscana Nord anche nei giorni 28 febbraio, 2, 5, 6 e 9 marzo per verificare lo stato dei luoghi dell'area interessata dalla frana (abitato di Pian dei Sisi e Torrente Lima). In particolare, per una migliore comprensione dei fenomeni in atto e per una valutazione delle possibili conseguenze della frana sull'edificato di Pian dei Sisi, i sopralluoghi si sono focalizzati sull'area compresa tra l'abitato di Pian dei Sisi e la nicchia di distacco della frana, con attenzione ai fabbricati che costituiscono l'abitato.

Il 21 Febbraio il Sindaco del Comune Abetone-Cutigliano ha organizzato un tavolo tecnico con gli esperti di ENEL Green Power e di Getas Petrogeo, quest'ultima in veste di consulente del Comune, col compito di valutare le condizioni di stabilità degli edifici evacuati per poter consentire il rientro degli interessati in assoluta sicurezza. In quella sede è stato concordato un programma di indagini, affidando a ciascun attore compiti precisi; le attività sono iniziate nel giro di pochi giorni. È stato concordato un programma di indagini affidando a ciascun attore compiti precisi e le operazioni sono iniziate nel giro di pochi giorni. ENEL avrebbe coperto le spese.

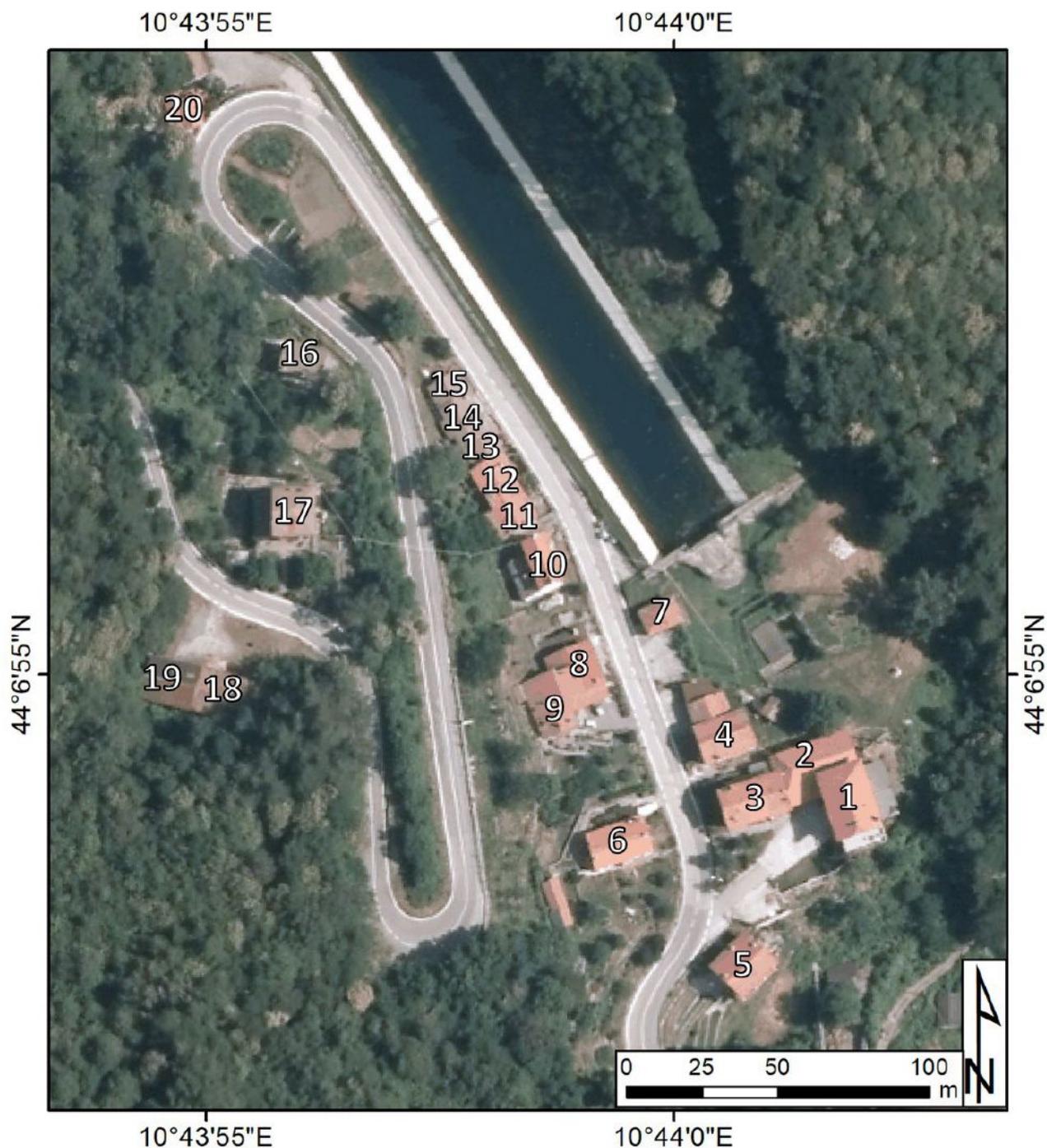
In data 16 marzo è stato redatto un verbale di somma urgenza per l'esecuzione dei lavori per l'allontanamento di tutto il materiale legnoso, costituito per lo più da tronchi di alberi di medio e di alto fusto, a seguito della frana. I lavori si sono conclusi il 30 marzo.

Nel COC (Centro Operativo Comunale) del 30 Marzo ENEL ha comunicato che alcuni suoi tecnici sono stati indagati in seguito ad un esposto/denuncia presentato da alcuni privati in Procura di Pistoia. Da quel momento ENEL ha riferito i risultati delle indagini esclusivamente al CTPM (Consulente Tecnico del Pubblico Ministero) nominato dalla Procura che ha il compito di definire le cause della frana.

Nel COC del 24 maggio tenutosi presso il Comune di Abetone Cutigliano e a cui hanno partecipato anche gli scriventi su richiesta della Regione Toscana, Getas presenta il primo documento *"Stato di avanzamento delle indagini per la sicurezza del sito abitativo"* che fa il punto del quadro conoscitivo sulla base di tutti i dati acquisiti alla data del COC. Il rapporto contiene i risultati delle indagini eseguite da Getas, integrati dai dati ENEL raccolti in marzo nel quadro dell'accordo ENEL – Comune di Abetone Cutigliano (misure dei 44 fessurimetri, 8 logs dei sondaggi eseguiti, 4 letture inclinometriche in S111 e S312, 2 letture inclinometriche in S413, misure inclinometriche ENEL in contraddittorio e misure piezometriche della falda, dati piovosità delle due stazioni pluviometriche più vicine). Fa seguito un secondo documento del 25 giugno. In entrambe le riunioni si dispone di elementi che consentono di decidere il rientro dei residenti in parte delle 20 case evacuate.

Nel COC del 24 maggio i tecnici presenti hanno esaminato per la prima volta i dati sopra riportati e, dopo esauriente discussione, la riunione si conclude approvando, all'unanimità dei presenti quanto segue: *"...sulla base dei dati del predetto monitoraggio satellitare è possibile far rientrare le persone con ragionevole grado di sicurezza negli edifici da 10 a 20 .....mantenendo le attività di monitoraggio..."* e *"... l'eventuale revoca dell'ordinanza di sgombero (delle case da 1 a 9) dovrà essere subordinata ad una chiara evidenza di rallentamento sulla base di tutti i dati di monitoraggio acquisiti finora.....in modo da disporre di un congruo periodo di monitoraggio con strumentazione basata a terra..."*. In Figura 8 viene riportata la numerazione, scelta in accordo con le parti, degli edifici della frazione di Pian dei Sisi.

Il COC si è concluso con la decisione di iniziare un monitoraggio degli edifici mediante stazione totale, come da proposta presentata da Getas al Comune. Il COC si è aggiornato alla fine giugno con i nuovi dati acquisiti, compreso l'aggiornamento del monitoraggio satellitare.



**Figura 8 - Numerazione degli edifici della frazione di Pian dei Sisi. Tale numerazione è stata scelta in accordo tra le parti coinvolte e verrà usata come riferimento nel presente documento.**

Il 25 giugno a Pisa, nella sede di Getas Petrogeo, si è riunito, come da programma, il gruppo di esperti che stavano collaborando in settori diversi. Ad inizio giugno è stata montata la stazione totale di monitoraggio a terra e sono state eseguite le prime tre delle quattro letture previste sia per la stazione che per gli inclinometri. Anche gli scriventi, su richiesta della Regione Toscana, hanno partecipato alla riunione tecnica. Il quadro emergente dai dati ottenuti è riportato nel documento ed è basato su:

- sei letture degli inclinometri 1 e 2; prima lettura degli inclinometri 4 e 5;
- nota Tecnica DST-UNIFI del 21 giugno 2018 sul monitoraggio satellitare;
- prime tre misure effettuate con la stazione totale.

I dati interpretati e discussi hanno evidenziato la possibilità di revoca dell'ordinanza di evacuazione per gli edifici 6-8-9, ubicati a monte della strada, mentre la situazione più critica permaneva sugli edifici a valle della strada. In attesa di un sistema di monitoraggio in automatico, si è quindi proposto di procedere con gli stessi controlli attualmente in esercizio. Viene fissata la data del 19 luglio, ore 15, a Pisa presso Eurotec (società che si occupa del monitoraggio tramite stazione totale), per una successiva riunione dello stesso gruppo di lavoro. Si concorda di eseguire entro quella data almeno:

- due campagne di letture sugli inclinometri;
- due misure con stazione totale;
- l'aggiornamento dei dati satellitari;
- l'acquisizione della relazione e la cartografia tematica del CTPM;
- l'esecuzione di almeno una campagna di letture dei fessurimetri delle case monitorate.

Il 19 luglio a Pisa, nella sede di Eurotec, si è riunito, come da programma, il gruppo di esperti che stanno collaborando in settori diversi. Anche gli scriventi, su richiesta della Regione Toscana, partecipano alla riunione tecnica. Si valutano i nuovi elementi acquisiti. Risulta mancante solo la lettura dei fessurimetri, non disponibile per cause tecniche. Al termine della discussione viene confermata la decisione di revocare l'ordinanza di evacuazione degli edifici 6-8-9 ai quali viene aggiunto anche l'edificio 5.

Restano solo gli edifici 1-2-3-4-7 per i quali si discuterà la possibilità di revoca solo quando i dati di monitoraggio della strumentazione a terra dimostrino chiaramente l'esaurimento degli effetti dell'evento franoso di febbraio.

Nel settembre 2018, sulla base dei dati monitoraggio acquisiti dalla strumentazione a terra e dal sistema satellitare Sentinel-1, viene decisa la revoca dell'ordinanza di evacuazione per gli edifici 1-2-3. I risultati del monitoraggio eseguito nei mesi intercorsi tra la frana e il mese di settembre hanno consentito di concludere che, nel complesso, la stabilità del sito e delle costruzioni non manifestava segni particolari di immediato pericolo. In dettaglio:

- gli edifici 1-2-3, vicini all'inclinometro I4, pur interessati da numerose lesioni, nei sei mesi di controllo strumentale hanno mostrato scostamenti minimi, coerenti con movimenti generalizzati del versante precedenti la frana;
- l'edificio 4, benché il più a rischio, è disabitato;
- l'edificio 7 è un magazzino di proprietà ENEL.

## 6 Analisi dati pluviometrici

Ai fini della valutazione dell'entità dell'evento meteorico registrato precedentemente e in concomitanza della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018 (avvenuta nella tarda serata), sono stati presi in considerazione i dati pluviometrici relativi alla stazione *TOS02004215 - Casotti di Cutigliano* e *TOS02000359 - Melo*, che sono risultate essere le più prossime alla zona in esame e per le quale sono a disposizione dati pluviometrici registrati ogni ora.

L'ubicazione geografica delle suddette stazioni è illustrata in Figura 9.

I dati pluviometrici registrati dalle stazioni possono essere, ragionevolmente, ritenuti significativi e rappresentativi delle precipitazioni che hanno interessato la frazione di Pian dei Sisi prima ed in concomitanza dell'innescò della frana del 19 febbraio 2018.

La stazione di Casotti di Cutigliano si trova a circa 2.3 km di distanza dall'area in esame, all'interno dello stesso bacino idrografico (quello del Torrente Lima), ma ad una quota più bassa (593 m s.l.m. per la stazione pluviometrica e circa 850 m s.l.m. per l'area in frana).

La stazione di Melo si trova a circa 2.0 km di distanza dall'area in esame, all'interno dello stesso bacino idrografico (quello del Torrente Lima), ad una quota leggermente più alta (1000 m s.l.m. per la stazione pluviometrica e circa 850 m s.l.m. per l'area in frana).

Si è proceduto ad analizzare i dati pluviometrici relativi al periodo gennaio 1996 - novembre 2019 (Figura 10 e Figura 11).

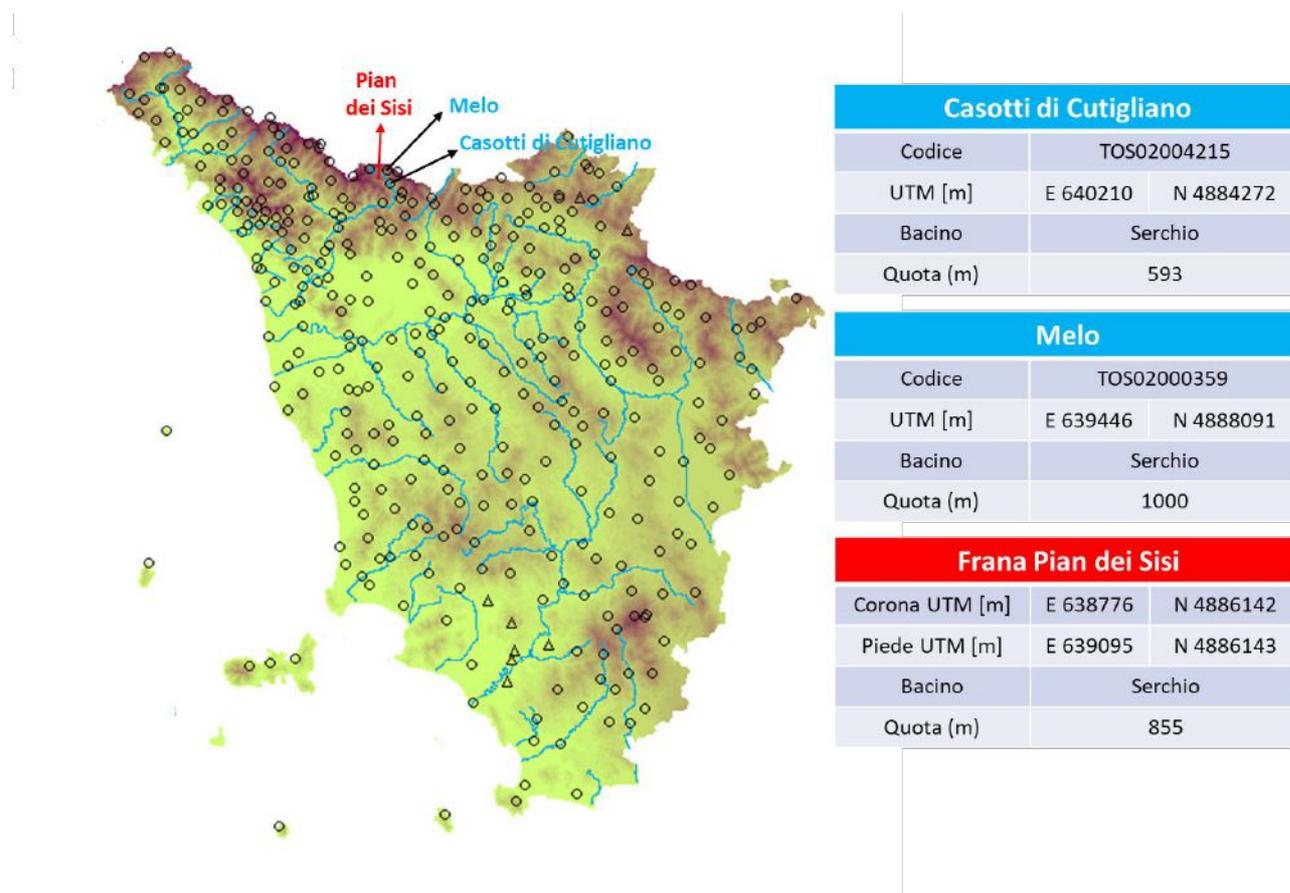


Figura 9 - A sinistra è riportata l'ubicazione delle stazioni pluviometriche di *Casotti di Cutigliano* e *Melo* considerate nell'analisi all'interno della rete dei pluviometri disponibili per la Regione Toscana (Da <http://www.cfr.toscana.it>). A destra sono riportate le informazioni necessarie per la localizzazione delle stazioni pluviometriche rispetto alla frana di Pian dei Sisi.

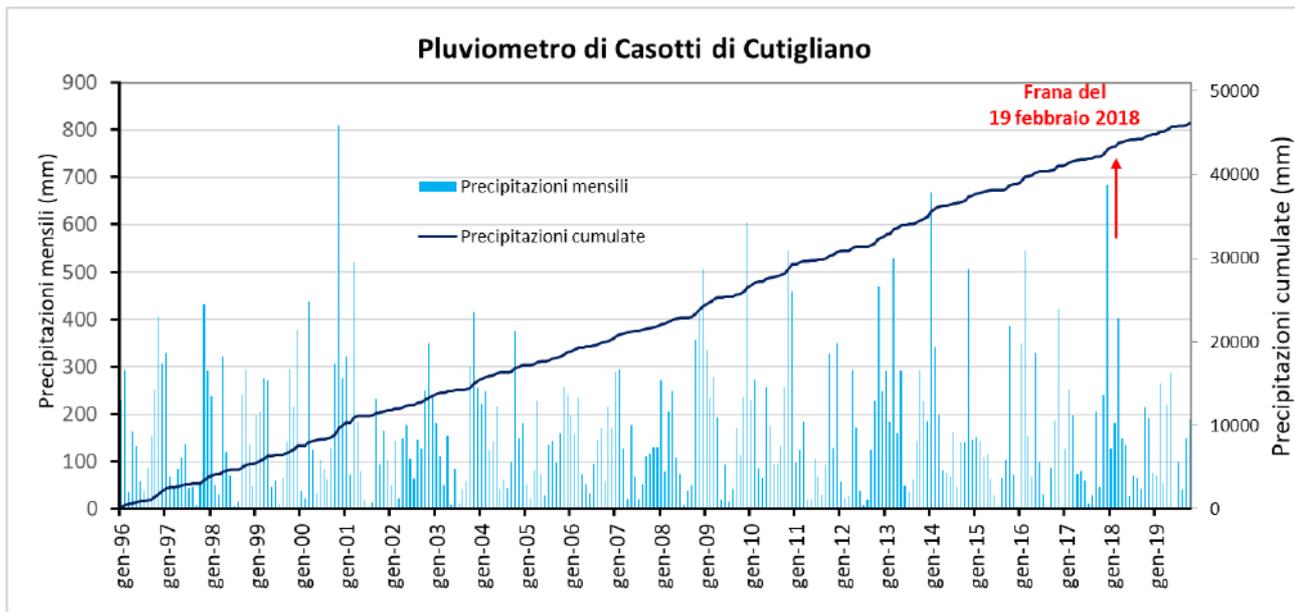


Figura 10 - Dati di pioggia mensili (in mm) tra il gennaio 1996 e il novembre 2019. Stazione TOS02004215 – Casotti di Cutigliano. La freccia rossa indica l’innesco della frana nella tarda serata del 19 febbraio 2018.

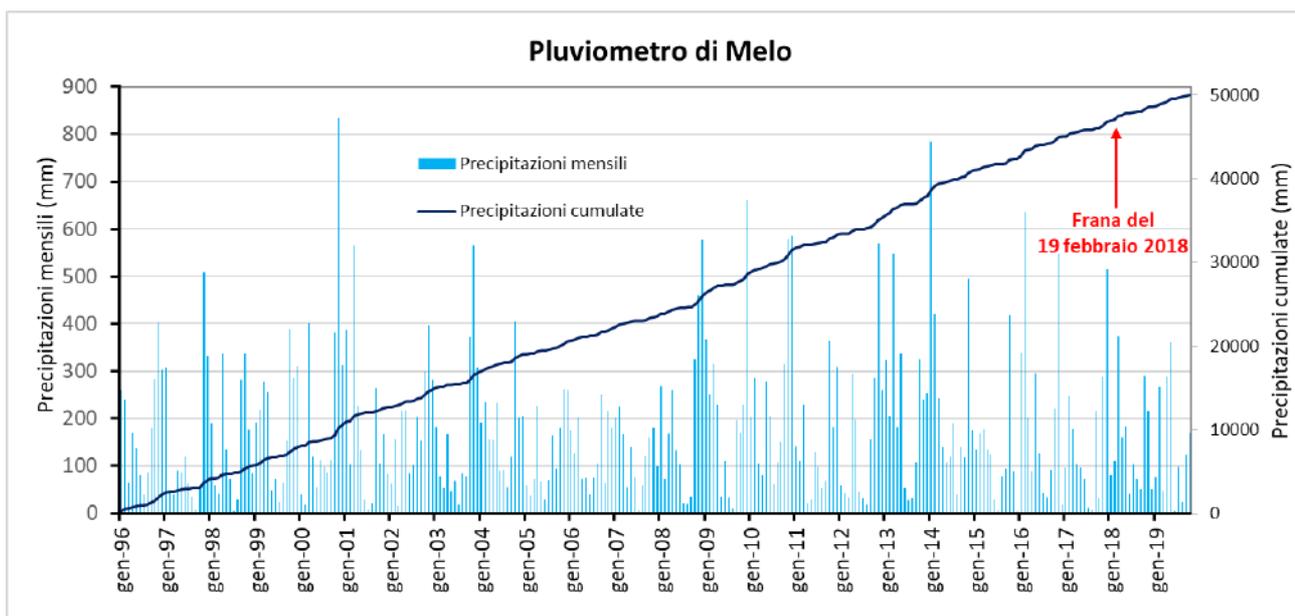


Figura 11 - Dati di pioggia mensili (in mm) tra il gennaio 1996 e il novembre 2019. Stazione TOS02000359 – Melo. La freccia rossa indica l’innesco della frana nella tarda serata del 19 febbraio 2018.

## 6.1 Analisi dati pluviometrici antecedenti la frana del 19 febbraio 2018

L'analisi dei dati pluviometrici ha messo in evidenza come nei 30 giorni antecedenti l'evento (periodo dal 21 gennaio 2018 al 19 febbraio 2018 compresi) siano caduti 177.4 mm e 117.6 mm di pioggia nelle stazioni di Casotti di Cutigliano e Melo, rispettivamente (Tabella 2).

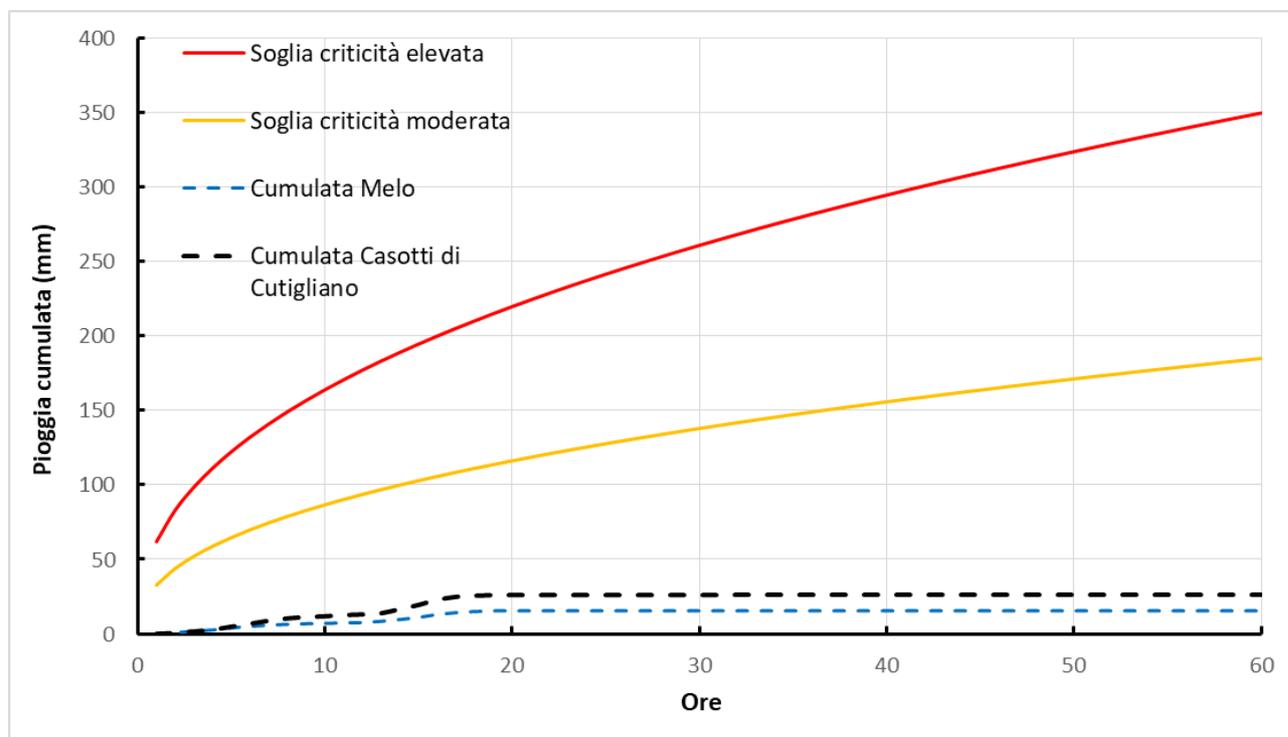
L'analisi ha messo in evidenza anche che nella settimana precedente la frana sono caduti 33.4 mm e 19.6 mm di pioggia nelle stazioni di Casotti di Cutigliano e Melo, rispettivamente.

Precipitazioni antecedenti la frana del 19 febbraio 2018		
	Casotti di Cutigliano	Melo
Cumulata 24 ore	0.2	0
Cumulata a 15 giorni	44.2	22.2
Cumulata a 30 giorni	177.4	117.6
Cumulata a 60 giorni	426.6	283.0
Cumulata a 90 giorni	1056.6	769.2
Cumulata a 120 giorni	1222.4	993.4
Precipitazione media annuale per il periodo 1996-2017	1957.7	2075.6

**Tabella 2 – Precipitazioni antecedenti l’insacco della frana di Pian dei Sisi registrate ai pluviometri di Casotti di Cutigliano e Melo.**

L’analisi ha altresì mostrato anche che nelle 60 ore immediatamente precedenti la frana sono caduti 15.4 mm di pioggia alla stazione di Melo fra le 12.00 del 17 febbraio e le 06.00 del 18 febbraio, con picco massimo orario di 1,4 mm alle 02.00 del 18 febbraio. Per quanto riguarda la stazione di Casotti di Cutigliano, sono stati registrati 26.2 mm di pioggia fra le 13.00 del 17 febbraio e le 06.00 del 18 febbraio, con picco massimo orario di 3.4 mm alle 03.00 del 18 febbraio.

Le piogge cumulate registrate nelle 60 ore precedenti alla frana nelle stazioni di Melo e Casotti di Cutigliano sono state confrontate con le soglie di insacco delle frane superficiali definite da Rosi et al., (2015) per la zona di “allerta A3” (Alto bacino del Serchio). L’analisi mostra che le piogge antecedenti alla frana sono ben al di sotto sia della soglia a criticità elevata sia di quella a criticità moderata (Figura 12).



**Figura 12 - Soglie di insacco per la zona di allerta A3 (Alto bacino del Serchio) confrontate con le piogge cumulate registrate dalle stazioni di Melo e Casotti di Cutigliano.**

Le piogge cumulate registrate nei 30 giorni precedenti alla frana nelle stazioni di Melo e Casotti di Cutigliano sono state confrontate con le curve di probabilità di pioggia definite da Martelloni et al. (2012) e calcolate sulla base dell’archivio di dati di pioggia del periodo 1996-2018. Ognuna delle curve equivale ad un tempo di ritorno della pioggia; ad esempio, la curva relativa ad una deviazione *standard* ( $1\sigma$ , curva rossa in Figura 13 e

Figura 14) corrisponde ad una pioggia con tempo di ritorno di 3 anni. L'analisi mostra che le cumulate di pioggia registrate nei 30 giorni precedenti sono assolutamente ordinarie, non superando nessuna delle curve segnalatrici indicate (Figura 13 e Figura 14).

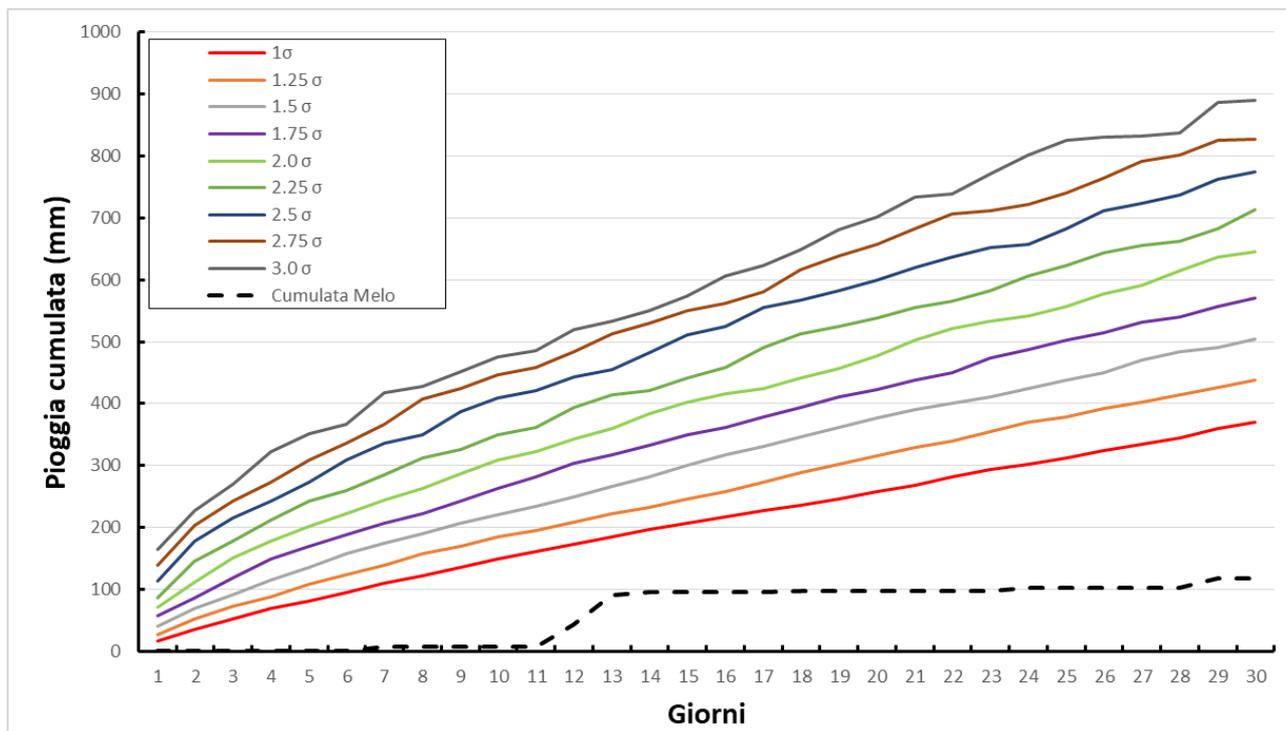


Figura 13 - Curve di probabilità di pioggia con incremento  $0.25 \sigma$  per un periodo cumulo fino a 30 giorni per il pluviometro di Melo, basate sui dati del periodo gennaio 1996 – maggio 2018. In nero sono riportate le piogge cumulate registrate dalla stazione di Melo 30 giorni prima della frana.

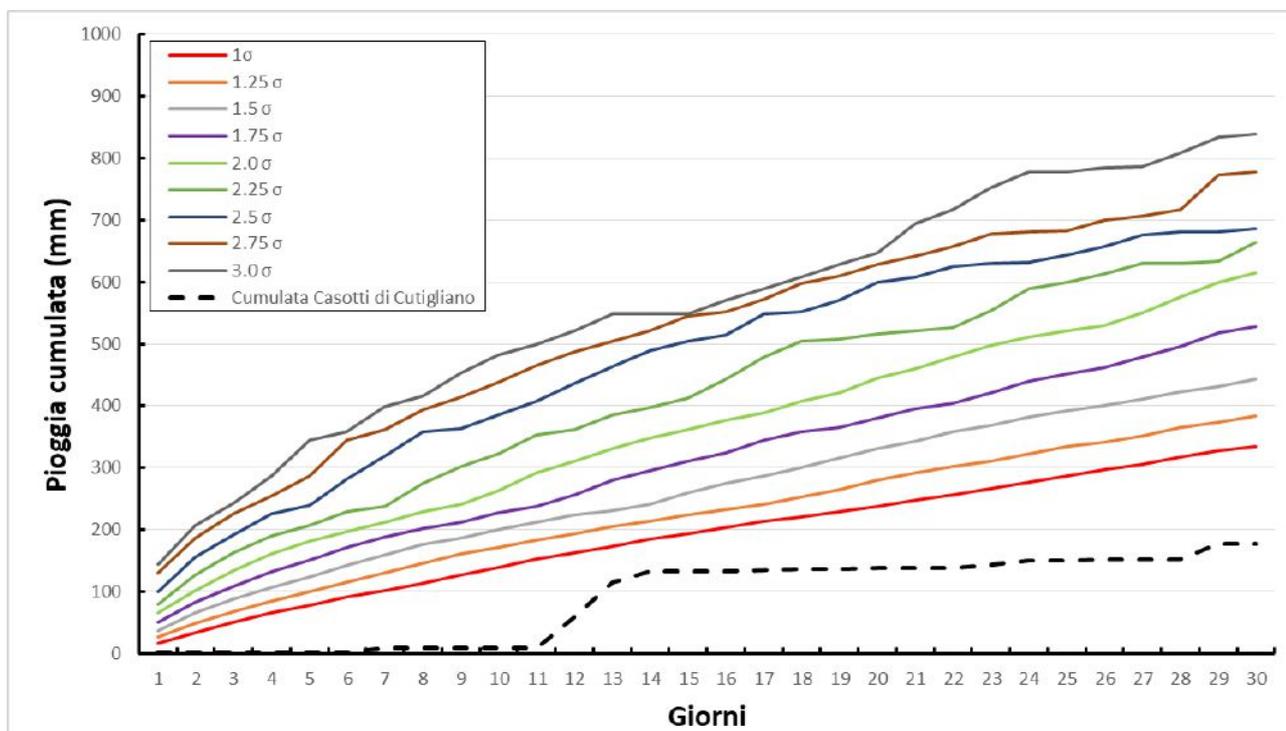


Figura 14 - Curve di probabilità di pioggia con incremento  $0.25 \sigma$  per un periodo cumulo fino a 30 giorni per il pluviometro di Casotti di Cutigliano, basate sui dati del periodo gennaio 1996 – maggio 2018. In nero sono riportate le piogge cumulate registrate dalla stazione Casotti di Cutigliano 30 giorni prima della frana.

Questi risultati mostrano come le piogge cadute prima dell'evento siano da considerarsi assolutamente ordinarie, ben al di sotto delle soglie di innesco dei fenomeni franosi superficiali.

L'analisi delle precipitazioni antecedenti la frana del 19 febbraio 2018 porta a due conclusioni:

- i) la frana di Pian dei Sisi, a valle dell'invaso di proprietà ENEL, non è avvenuta in concomitanza di eventi pluviometrici significativi, dato che le piogge cadute prima dell'evento sono da considerarsi assolutamente ordinarie, ben al di sotto di qualsiasi soglia di innesco dei fenomeni franosi superficiali;
- ii) il massiccio deflusso superficiale evidente dai filmati eseguiti con il drone, non soltanto all'interno del corpo di frana ma su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima, appare assolutamente anomalo e non giustificabile dallo scarso apporto meteorico dei giorni precedenti.

Gli scriventi ritengono opportuno ricordare che le frane di questo tipo (scivolamento di terreno – colata di detrito, *soil slip – debris flow/debris avalanche*) sono frane superficiali che raramente avvengono individualmente, come accaduto per la frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018. Più comunemente avvengono a gruppi (*i.e.*, *cluster* di centinaia o migliaia di *debris avalanches* che si innescano in maniera contemporanea) e sono solitamente innescati da eventi meteorologici di forte intensità e breve durata o di moderata intensità e lunga durata (Moser & Hohensinn, 1983; Crosta & Frattini, 2002).

Si anticipa inoltre (per maggiori dettagli fare riferimento al Paragrafo 11.2.3) che i terreni interessati dalla frana sono terreni granulari (nello specifico sabbie con ghiaie limose) caratterizzati da una discreta permeabilità con buona capacità di drenaggio (vedere a tal riguardo i valori di permeabilità riportati nel Paragrafo 11.2.3).

Un'ultima considerazione necessaria, derivante dall'analisi delle piogge antecedenti la frana, riguarda la presenza di un periodo di piogge prolungate durante i mesi di novembre e dicembre 2017. Nello specifico il pluviometro di Casotti di Cutigliano ha registrato 240.8 mm nel mese di novembre 2017 e 684.4 mm nel mese di dicembre 2017. Il pluviometro di Melo ha registrato 287.4 mm nel mese di novembre 2017 e 514 mm nel mese di dicembre 2017 (Tabella 3).

L'analisi delle piogge per il periodo 1996-2018 mostra come la media delle precipitazioni mensili per il pluviometro di Casotti di Cutigliano sia 310 mm per il mese di novembre e 256.4 per il mese di dicembre. Per il pluviometro di Melo le medie mensili sono 357.9 mm per novembre e 279.9 per quello di dicembre.

Il mese di novembre 2017 risulta solamente il dodicesimo mese più piovoso nel periodo 1996-2018. Il mese di dicembre 2017 risulta il più piovoso e il quarto più piovoso per i pluviometri di Casotti e Melo, rispettivamente.

<b>Precipitazioni per i mesi di novembre e dicembre (mm)</b>				
	Casotti di Cutigliano		Melo	
	Novembre	Dicembre	Novembre	Dicembre
Valore medio mensile (1996 -2018)	310	254.4	357.9	279.9
Valore massimo mensile (1996 -2018)	809.4 (2000)	684.4 (2017)	833.2 (2000)	660.4 (2009)
Valore mensile 2017	240.8 (12°)	684.4 (1°)	287.4 (12°)	514 (4°)

**Tabella 3 – Precipitazioni medie mensili per novembre e dicembre per i pluviometri di Casotti di Cutigliano e Melo. Tra parentesi è riportato l'anno a cui il valore massimo mensile si riferisce o la posizione nella classifica di piovosità mensile per il mese di aprile**

Tutto ciò premesso, agli scriventi pare opportuno evidenziare come il periodo di piogge prolungate sebbene non eccezionali registrato tra novembre e dicembre 2017 sia avvenuto quasi due mesi prima della frana del 19 febbraio 2018 e quindi non è da ritenersi in alcun modo causa predisponente o scatenante della frana del 19 febbraio 2018.

## 6.2 Analisi dati pluviometrici antecedenti il sopralluogo il sopralluogo del 7 maggio 2019

L'analisi dei dati pluviometrici ha messo in evidenza come nei 30 giorni antecedenti il sopralluogo del 7 maggio 2019 siano caduti 207.4 mm e 276.2 mm di pioggia nelle stazioni di Casotti di Cutigliano e Melo, rispettivamente (Tabella 4).

L'analisi ha messo in evidenza anche che nelle due settimane precedenti la frana sono caduti 160.4 mm e 201.3 mm di pioggia nelle stazioni di Casotti di Cutigliano e Melo, rispettivamente.

L'analisi ha altresì mostrato che nelle 24 ore immediatamente precedenti il sopralluogo sono caduti 47.6 mm di pioggia alla stazione di Melo e 39.2 nella stazione di Casotti di Cutigliano.

<b>Precipitazioni antecedenti il sopralluogo del 7 maggio 2019</b>		
	Casotti di Cutigliano	Melo
Cumulata 24 ore	39.2	47.6
Cumulata a 15 giorni	160.4	201.6
Cumulata a 30 giorni	207.4	276.2
Cumulata a 60 giorni	339.2	404.2

**Tabella 4 – Precipitazioni antecedenti l'insacco della frana di Pian dei Sisi registrate ai pluviometri di Casotti di Cutigliano e Melo.**

L'analisi delle piogge antecedenti il sopralluogo del 7 maggio 2019 mostra la presenza di un periodo di piogge prolungate a partire dall'inizio di aprile 2019. Nello specifico, nel mese di aprile 2019 il pluviometro di Casotti di Cutigliano ha registrato 220.8 mm, mentre quello di Melo ha registrato 287 mm (Tabella 5).

L'analisi delle piogge per il periodo 1996-2019 mostra come la media delle precipitazioni mensili per il mese di aprile sia 149.9 mm per il pluviometro di Casotti di Cutigliano e 169.9 mm per il pluviometro di Melo.

Il mese di aprile 2019 risulta il sesto mese di aprile più piovoso nel periodo 1996-2019 per il pluviometro di Casotti di Cutigliano. Il mese di aprile 2019 risulta il terzo mese di aprile più piovoso per il pluviometro di Melo nel periodo 1996-2019.

<b>Precipitazioni per il mese di aprile (mm)</b>		
	Casotti di Cutigliano	Melo
Valore medio mensile (1996 -2018)	149.9	169.6
Valore massimo mensile (1996 -2018)	322.1 (1998)	336.1 (1998)
Valore mensile 2019	220.8 (6°)	287 (3°)

**Tabella 5 – Precipitazioni mensili per aprile per i pluviometri di Casotti di Cutigliano e Melo. Tra parentesi è riportato l'anno a cui il valore massimo mensile si riferisce o la posizione nella classifica di piovosità mensile per il mese di aprile.**

Ciò premesso per sottolineare come il sopralluogo effettuato dagli scriventi il 7 maggio 2019 sia avvenuto a seguito di un periodo di piogge prolungate, seppur non eccezionali, come dimostrato dalle tabelle riportate in precedenza. Si sottolinea come, durante il sopralluogo, non sia stata rilevata la minima traccia di deflusso superficiale, a testimonianza della buona capacità di drenaggio (vedere a tal riguardo le foto scattate durante il sopralluogo del 7 maggio – Capitolo 7) dei materiali interessati dalla frana.

## 7 Sopralluoghi effettuati

Il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze ha eseguito due sopralluoghi a Pian dei Sisi, con il supporto del personale del Genio Civile Toscana nord, in data 7 maggio 2019 e 17 luglio 2019.

Il primo sopralluogo, dedicato all'analisi dello stato dei luoghi dopo un anno dalla frana, ha avuto un duplice scopo:

- l'analisi delle fratture a carico dei fabbricati dell'abitato di Pian dei Sisi;
- il rilievo e la caratterizzazione della frana, con particolare attenzione al deflusso superficiale (*i.e.*, lo scorrimento libero dell'acqua sul suolo) lungo il tratto di versante tra Pian dei Sisi e il Torrente Lima.

Il secondo sopralluogo, dedicato all'esecuzione di prove *in situ*, ha avuto anch'esso un duplice scopo:

- esecuzione di una campagna di misure geofisiche (tomografie elettriche 2D e misure di *noise* sismico);
- caratterizzazione geotecnica *in situ* dei terreni di copertura, tramite la determinazione dei parametri di coesione e permeabilità e il campionamento di materiale per successive prove di laboratorio.

### 7.1 Sopralluogo del 7 maggio 2019

La data del 7 maggio 2019 è stata scelta con lo scopo di verificare se la massiccia presenza di deflusso superficiale ripresa da drone in data 20 febbraio 2019, non soltanto all'interno del corpo di frana ma su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima, fosse situazione normale oppure elemento del tutto anomalo.

Si ricorda che la quantità di deflusso superficiale a seguito di un evento pluviometrico dipende, secondo i modelli di trasformazione afflussi-deflussi, dalla precipitazione avvenuta e dalla decurtazione operata dal sistema suolo-vegetazione che diminuisce la quantità d'acqua precipitata in arrivo alla rete idrografica sotto forma di scorrimento. Tale decurtazione dipende, oltre che dalla topografia della zona, dalla capacità complessiva di tale sistema suolo-vegetazione che varia nel tempo in funzione dei fenomeni di evapotraspirazione e del livello di saturazione del terreno. Per operare un confronto tra i deflussi superficiali della stessa zona in momenti diversi (19 febbraio 2018 e 7 maggio 2019) è quindi necessario prendere in considerazione momenti in cui gli afflussi meteorici siano stati, per un tempo sufficientemente lungo, simili.

Il sopralluogo del 7 maggio 2019 è stato effettuato a seguito di un periodo di piogge prolungate, seppur non eccezionali, come dimostrato dall'analisi dei dati pluviometrici delle stazioni di Casotti di Cutigliano e Melo riportati precedentemente nel Paragrafo 6.2.

L'analisi di tali dati mostra che sono stati registrati:

- 207.4 mm (Casotti di Cutigliano) e 276.2 mm (Melo) nei 30 giorni antecedenti il sopralluogo del 7 maggio 2019;
- 177.4 mm (Casotti di Cutigliano) e 117.6 mm (Melo) nei 30 giorni antecedenti la frana del 19 febbraio 2018.

Il sopralluogo effettuato il 7 maggio 2019 è avvenuto quindi a seguito di un periodo piovoso di 30 giorni ben più ben più intenso di quello che ha preceduto l'innescò della frana del 19 febbraio 2019. Tale fatto appare ancora più evidente se si analizzano i dati delle 24 ore precedenti:

- 39.2 mm (Casotti di Cutigliano) e 47.6 mm (Melo) nelle 24 ore antecedenti il sopralluogo del 7 maggio 2019;
- 0.2 mm (Casotti di Cutigliano) e 0 mm (Melo) nelle 24 ore antecedenti la frana del 19 febbraio 2018.

Alcune immagini della frana di Pian dei Sisi scattate il 7 maggio 2019 sono riportate in Figura 15.



**Figura 15 – Immagini della frana di Pian dei Sisi scattate la mattina del 7 maggio 2019. In alto la zona di alimentazione; nel mezzo la zona di scorrimento riprese da Casa Giardino; in basso l’arrivo del canale di colata nell’alveo del Torrente Lima. Le immagini testimoniano la totale assenza di acqua all’interno della frana.**

In dettaglio, in Figura 15 sono visibili, dall'alto verso il basso:

- la zona di alimentazione, dove si è originato il movimento della frana a quota 850 m s.l.m. Sono ancora ben riconoscibili le zone dove si è avuto il distacco per taglio della coltre di terreno superficiale con innesco della frana per scivolamento;
- la zona di scorrimento fotografata dalla quota corrispondente al rudere Casa Giardino. Si vede, nel riquadro rosso, il pilone della luce sul fianco sinistro del canale di scorrimento. Si evidenzia la totale assenza di deflusso superficiale all'interno del canale di colata e si ricorda la notevole presenza d'acqua in data 19 febbraio 2018 subito a valle del pilone (vedi Figura 7);
- la zona di deposizione della frana, al suo arrivo nell'alveo del Torrente Lima a quota 665 m s.l.m. Anche in questo si evidenzia la totale assenza di deflusso superficiale all'interno del canale di colata e si ricorda il notevole arrivo d'acqua in data 19 febbraio 2018 all'interno del Torrente Lima (vedi Figura 7).

In sintesi, il sopralluogo effettuato il 7 maggio 2019 ha evidenziato come i terreni interessati dalla frana siano terreni caratterizzati da una discreta permeabilità e da ottima capacità di drenaggio (vedere a tal riguardo i valori di permeabilità riportati nel Paragrafo 11.2.3 ), tali da limitare la quantità di deflusso superficiale a seguito di un evento pluviometrico.

Appare evidente quindi, come la massiccia presenza di acqua, non soltanto all'interno del corpo di frana ma su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di Pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima visibile dai filmati eseguiti con il drone, sia non soltanto inaspettata ma largamente anomala in relazione alle scarse precipitazioni dei giorni precedenti alla frana stessa.

Per una migliore comprensione dei fenomeni in atto e per una valutazione delle possibili conseguenze della frana sull'edificato di Pian dei Sisi, il sopralluogo del 7 maggio 2019 è stato poi esteso ai fabbricati che costituiscono l'abitato di Pian dei Sisi, la cui numerazione è riportata in Figura 8.

Durante il sopralluogo sono state inoltre acquisite informazioni sullo stato precedente dei fabbricati maggiormente danneggiati, fornite spontaneamente dai proprietari degli stessi quando presenti.

I sopralluoghi hanno permesso di rilevare la presenza di lesioni diffuse a carico degli edifici l'abitato di Pian dei Sisi, significative su alcuni di essi. Il manto stradale della SS12 al momento dei sopralluoghi non presentava lesioni riconducibili a dissesti di interesse geologico.

Per quanto riguarda l'edificio 3, che risulta essere l'edificio maggiormente lesionato, la proprietaria ha riferito la presenza sia all'esterno che all'interno di lesioni preesistenti già monitorate da due anni per mezzo di fessurimetri. Dopo il distacco della frana è comparsa una lesione sul marciapiede esterno lato Sud e se ne è ampliata una sul pavimento all'interno. Sempre secondo quanto riferito dalla proprietaria, è comparsa una lesione in corrispondenza di una soglia posta nella parete Est del medesimo edificio (Figura 16).

Anche gli edifici 4, 5, 6, 8, 9 e 11 mostrano la presenza di lesioni, alcune delle quali preesistenti all'evento.



**Figura 16 - Lesioni riscontrate dall'edificio 3 durante i sopralluoghi effettuati.**

Il sopralluogo effettuato il 7 maggio 2019 ha permesso infine anche di valutare le portate delle sorgenti connesse al sistema sorgentifero di località Casa Giardino (Figura 17). Si tratta di un sistema di sorgenti posto sul fianco destro della frana, da cui dista circa 50-60 metri e situato ad una quota di circa 730 m s.l.m., ovvero pochi metri a monte del rudere visibile in Figura 6.



**Figura 17 - Immagine scattata la mattina del 7 maggio 2019 relativa al sistema sorgentifero Case Giardino, localizzato nel bosco sul fianco destro della frana.**

Si tratta di un sistema sorgentizio costituito da diverse emergenze d'acqua distribuite in un intorno di alcune decine metri quadrati. Alcune di esse sono temporanee, altre perenni.

Il sopralluogo effettuato il 7 maggio 2019, ovvero nel momento di massima ricarica della falda, ha permesso di stimare, in maniera speditiva, in circa 0.6-0.8 m<sup>3</sup>/minuto la portata complessiva di questo sistema sorgentizio. Si tratta naturalmente di una stima caratterizzata da un certo grado di incertezza, visto che risulta complicato misurare delle venute d'acqua distribuite sul terreno, ma che ci permette di avere una misura rappresentativa della portata di questo sistema. La difficoltà della misura sta anche nel fatto che il punto di raccolta di tali emergenze, situato alcuni metri più a valle, è caratterizzato da un deflusso superficiale sensibilmente minore delle sorgenti che lo alimentano, a testimonianza che la permeabilità di tali coperture è buona e che l'acqua delle sorgenti si infiltra rapidamente nel suolo.

Altro elemento da sottolineare è che la direzione di tale deflusso superficiale non è immediatamente diretta verso la frana, ma è orientata parallelamente ad essa, naturalmente lungo la massima pendenza del versante, almeno fino alla quota del Rudere Casa Giardino.

## **7.2 Sopralluogo del 17 luglio 2019**

Durante il secondo sopralluogo, effettuato in data 17 luglio, sono state effettuate prove *in situ* per la caratterizzazione geofisica e geotecnica dei materiali di copertura interessati dalla frana del 19 febbraio 2018.

La campagna di misure geofisiche (tomografie elettriche 2D e misure di *noise* sismico) è stata effettuata a valle della vasca di carico ENEL con lo scopo di caratterizzare gli orizzonti superficiali e di individuare eventuali discontinuità ascrivibili alla presenza del *bedrock* e a variazioni nelle caratteristiche degli strati più superficiali.

Sono stati eseguiti 2 stendimenti, uno trasversale al pendio (L1) ed uno longitudinale (T1) come mostrato in Figura 18 e Figura 19. Per entrambi sono stati impiegati 48 elettrodi posti con interdistanza pari ad 1 m in funzione della disponibilità di spazio, e le misure sono state acquisite mediante strumentazione *Syscal-Pro Switch48* con configurazione polo-dipolo, dipolo-dipolo.



**Figura 18 - Immagine relativa allo stendimento L1. A sinistra si scorge la vasca di carico ENEL.**



**Figura 19 - Immagine relativa allo stendimento T1.**

Sono state inoltre eseguite 8 misure di *noise* sismico ambientale (Figura 20) al fine di caratterizzare gli spessori degli strati. Le tracce sono state acquisite con Tromino per 20 minuti con una frequenza di campionamento di 256 Hz e sono state successivamente elaborate con il *software* Grilla.



Figura 20 – Acquisizione delle misure di *noise* sismico ambientale.

Allo scopo di definire le caratteristiche idrogeologiche e geotecniche dei materiali coinvolti dal movimento franoso indagato, sono state condotte prove di permeabilità saturo *in situ* (tramite un dispositivo portatile per misurazioni della permeabilità a carico costante, *i.e.*, *Amoozmeter* o CCHP, *Compact Constant Head Permeameter*) e sono stati prelevati dei campioni per successive prove di laboratorio. Le prove *in situ* ed il prelievo di campioni sono stati realizzati in due punti posti alla destra dei volumi di terreno franati, all'altezza del settore superiore della zona di alimentazione della frana (Figura 21).



Figura 21 – Prove di permeabilità saturo *in situ* tramite *Amoozmeter*

## 8 Inquadramento geomorfologico e geologico

Per quanto riguarda il quadro conoscitivo geologico e geomorfologico dell'area interessata dalla frana, il versante su cui si è sviluppato il fenomeno ricade nel Foglio CARG 251 ed è caratterizzato dalla presenza di formazioni appartenenti alla parte alta della successione della Falda Toscana (Macigno) e alla successione del Monte Modino-Monte Cervarola deformate. I rapporti tra le unità sono di tipo tettonico, rappresentati da sovrascorrimenti che presentano un andamento circa N-S con piani prevalentemente immergenti verso W. Inoltre, questi sovrascorrimenti sono tagliati da faglie subverticali ad andamento NW-SE (Figura 22). In particolare, stratigraficamente dal basso verso l'alto sono presenti:

### Successione della Falda Toscana:

- Macigno (Chattiano-Aquitaniaco): arenarie torbiditiche quarzoso-feldspatiche in banchi da spessi a molto spessi a base arenacea a grana grossolana intervallati a intervalli pelitici di spessore estremamente ridotto. Lungo il versante la successione si presenta rovesciata con strati immergenti verso SE con inclinazioni variabili da 30 a 40° identificando questo settore come il fianco rovescio di un'anticlinale il cui asse si può posizionare verso i settori più occidentali.

### Successione del Monte Modino-Monte Cervarola:

- Argille di Fiumalbo (Rupeliano): argilliti e argilliti marnose a cui si intercalano sottili strati siltitico-pelitici e arenitici fini.
- Marne di Marmoreto (Rupeliano p.p. - Chattiano p.p.): marne poco stratificate con rapporti variabili tra la frazione argilloso-siltosa e quella calcarea. Da un punto di vista della successione stratigrafica, le Marne di Marmoreto sono state attribuite alla successione del Monte Modino come suggerito da Plesi et al. (2002);
- Arenarie di Monte Modino (Chattiano - Aquitaniaco): arenarie torbiditiche silicoclastiche in strati da medi a spessi con base arenitica a grana medio-grossolana e tetto pelitico-marnoso con rapporto arenaria-pelite >1, a cui si alternano intervalli plurimetrici di torbiditi sottili siltitico-pelitiche e siltitico-marnose con rapporto arenaria pelite <1. Lungo il versante questa formazione immerge verso SE con polarità degli strati variabile risalendo il versante. Nella parte inferiore gli strati sono a polarità rovescia mentre nella parte superiore gli strati si presentano a polarità normale, questo assetto identifica una piega rovesciata il cui asse presenta un andamento NW-SE;
- Arenarie del Monte Cervarola (Aquitaniaco - Burdigaliano): arenarie torbiditiche silicoclastiche in strati arenacei da grossolani a fini, gradati, dello spessore variabile da pochi centimetri ad alcuni metri, intervallati da livelli pelitici-marnosi e con frequenti intercalazioni di torbiditi calcareo-marnose spesse da pochi decimetri fino a qualche metro.

In Figura 22 è mostrato uno stralcio della carta geologica alla scala 1:10.000. Le formazioni appartenenti alle successioni del Macigno e del Modino-Cervarola sono coperte da estese coperture superficiali, di cui sono riportati i depositi eluvio-colluviali e di versante.

Le risultanze dei sopralluoghi effettuati dagli scriventi in data 7 maggio 2019 e in data 17 luglio 2019 confermano il quadro geologico sopra descritto.

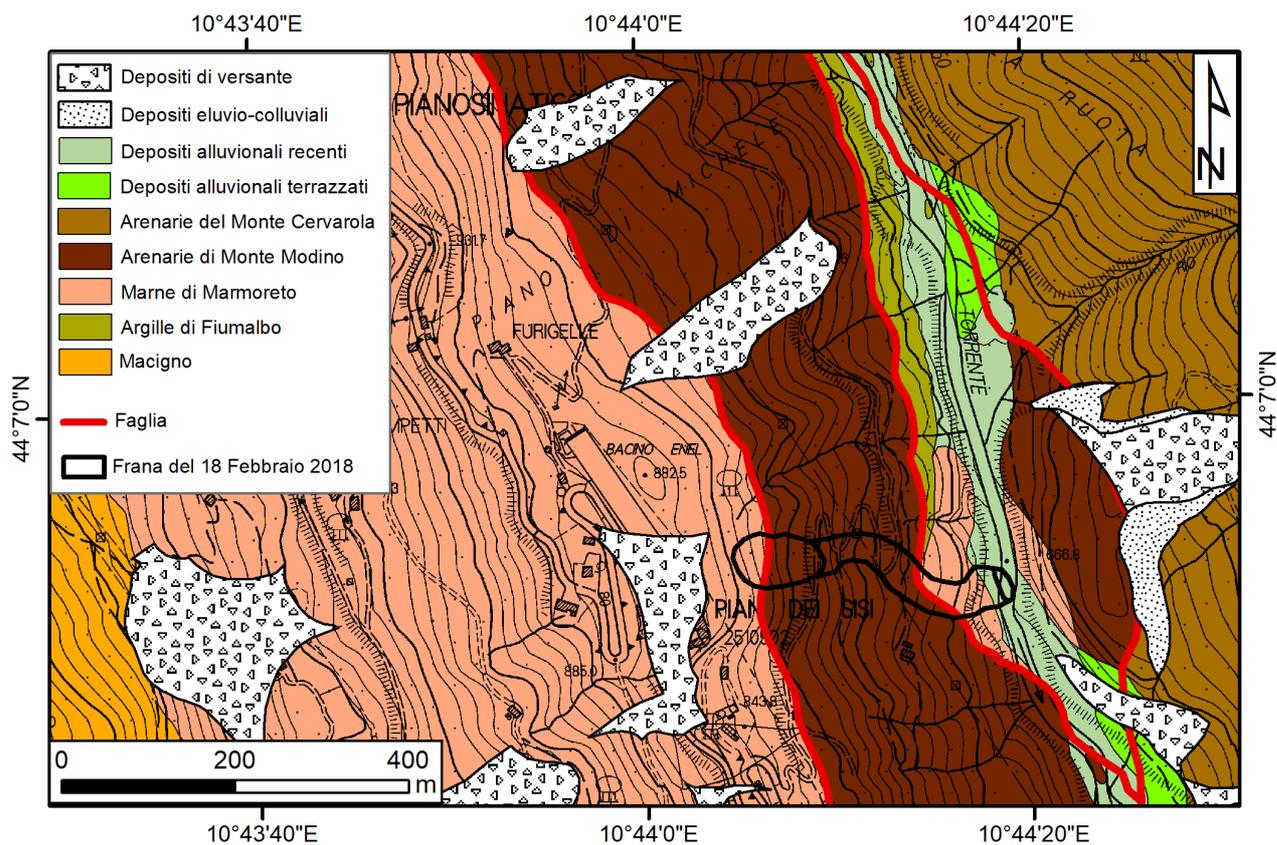


Figura 22 - Carta geologica in scala 1:10.000 e coperture detritiche cartografate dallo studio Getas Petrogeo.

A riguardo del quadro geomorfologico, per quanto a conoscenza degli scriventi non esiste documentazione tecnica interna relativamente alla stabilità pregressa dell'area in questione e dei manufatti che vi insistono. Non avendo a disposizione documentazione di dettaglio specifica per l'area di interesse, si fa riferimento alla documentazione ufficiale disponibile, ovvero la cartografia del PAI (Piano Assetto Idrogeologico) e il catalogo dei fenomeni franosi della Regione Toscana.

La tavola 251050 (Figura 23), elaborata dall'Autorità di Bacino del Fiume Serchio, aggiornata al luglio 2012, segnala la presenza di diversi movimenti franosi in stato di quiescenza nei dintorni dell'abitato sia a monte che a valle. Non si evidenziano particolari criticità in corrispondenza dell'abitato di Pian dei Sisi. La mappa d'inventario del PAI mostra inoltre la presenza di estesi depositi detritici in corrispondenza delle frazioni di Pian dei Sisi, Pianosiatico e Cioppeto.

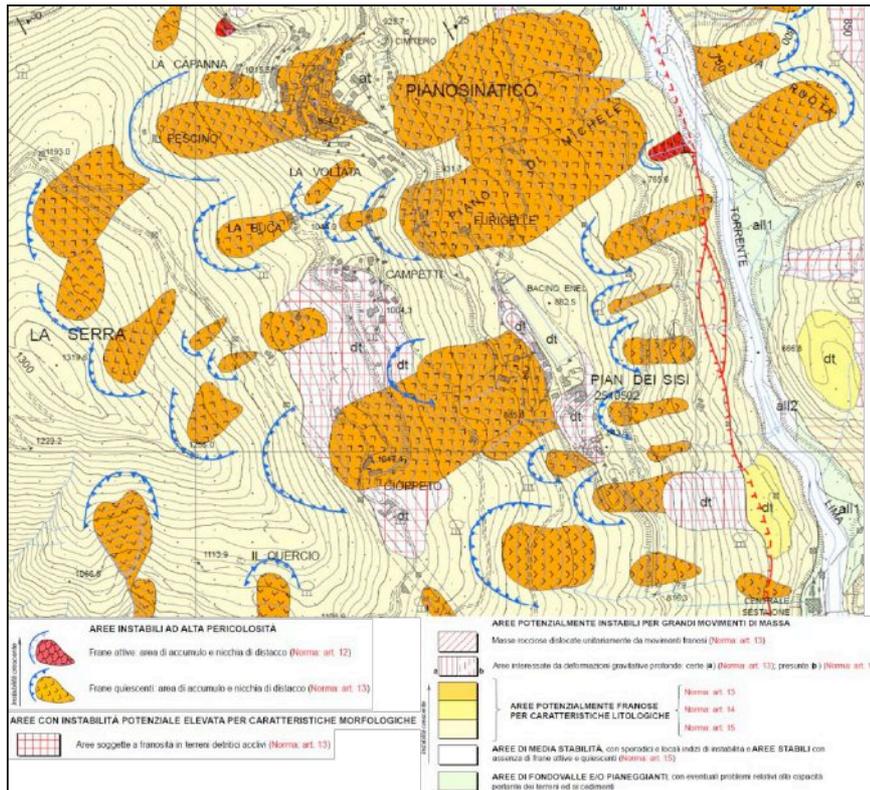


Figura 23 - Inventario dei fenomeni franosi cartografati del PAI elaborato dall’Autorità di Bacino del Fiume Serchio.

All’interno del catalogo dei fenomeni franosi della Regione Toscana (aggiornato al 2012) (Figura 24) sono presenti frane quiescenti con tipo di movimento indeterminato, corrispondenti alle stesse frane già cartografate come quiescenti dal PAI sui versanti a monte e a valle dell’abitato di Pian dei Sisi.

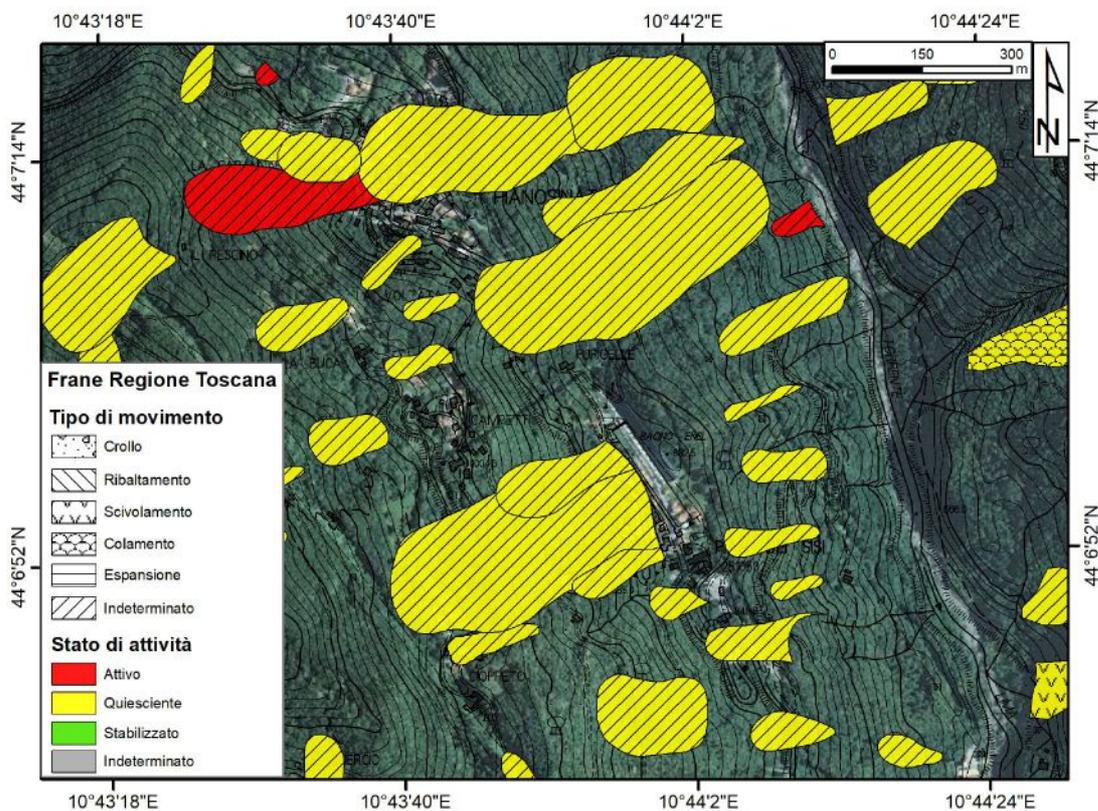


Figura 24 - Inventario dei fenomeni franosi della Regione Toscana per l’area in esame.

## 9 Analisi dei dati di monitoraggio dei movimenti

Sono stati analizzati ed interpretati i dati derivanti dal sistema di monitoraggio basato a terra, che include otto sondaggi (tre equipaggiati con piezometri e cinque con inclinometri), fessurimetri a griglia installati nelle abitazioni evacuate, una stazione totale per il controllo della stabilità degli edifici nel tempo. Inoltre, a supporto ed integrazione del sistema di monitoraggio basato a terra e per determinare lo scenario deformativo recente dell'area coinvolta, sono stati analizzati i dati *radar* interferometrici satellitari acquisiti dal satellite Sentinel-1 e aggiornati all'ultima acquisizione disponibile.

### 9.1 Inclinometri

Nell'abitato di Pian dei Sisi sono stati installati da ENEL cinque inclinometri, la cui lettura periodica è stata affidata, fra gli altri, allo studio Getas Petrogeo di Pisa, nella persona del Dott. Giuseppe Ghezzi. La localizzazione dei cinque sondaggi attrezzati con inclinometro è riportata in Figura 25.

In Figura 25 è riportata anche la numerazione degli edifici dell'abitato, già mostrata in Figura 8: le case sono numerate da 1 a 20 e le più esposte al rischio di richiamo della frana sono contraddistinte dai numeri da 1 a 9 e, tra queste, le più critiche sono le sei ubicate sotto la strada statale SS12 dell'Abetone e del Brennero.

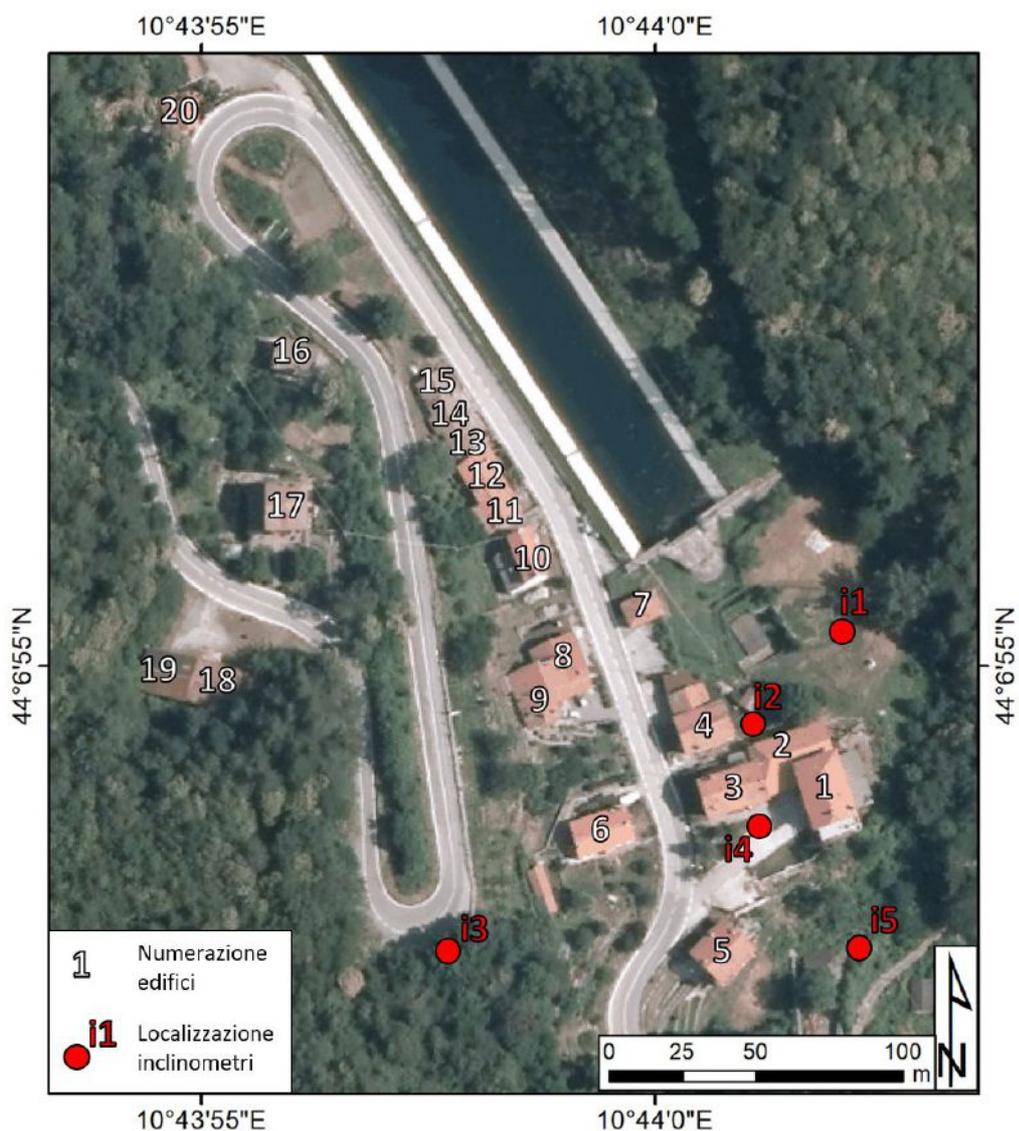


Figura 25 - Numerazione degli edifici dell'abitato di Pian dei Sisi e localizzazione dei 5 inclinometri.

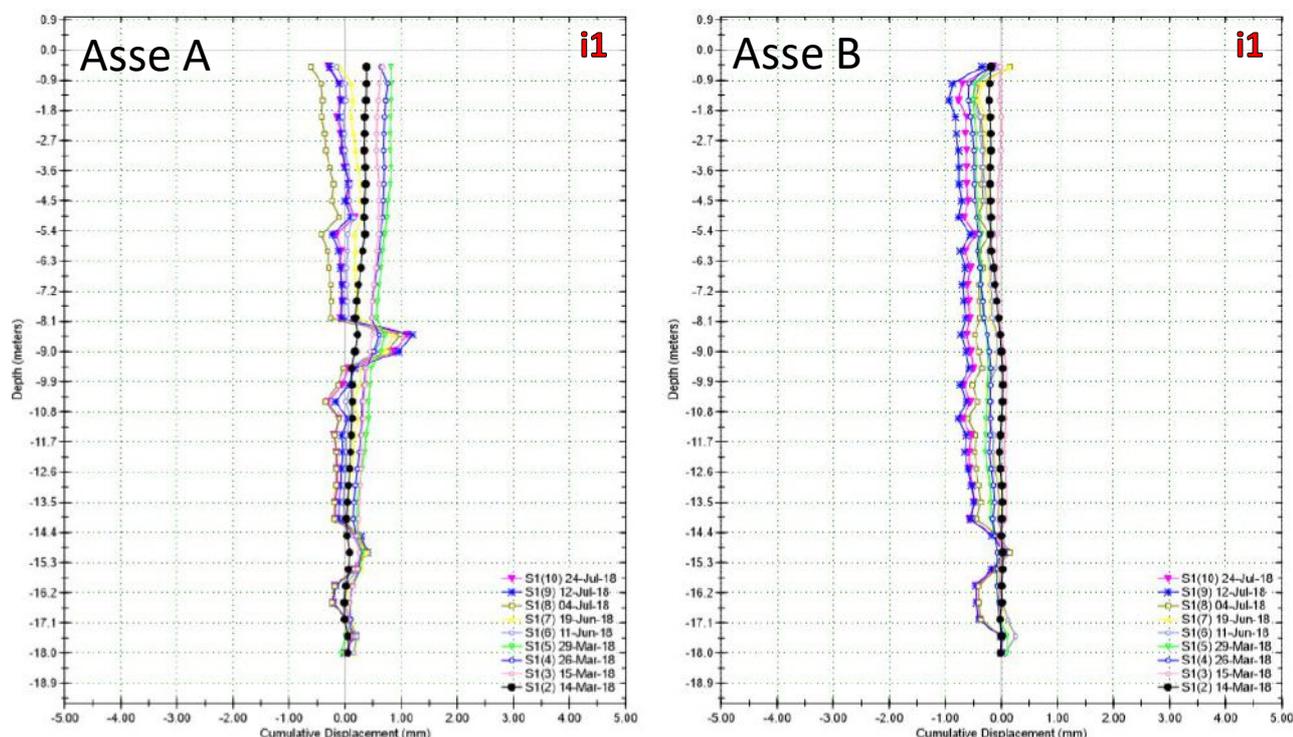
Le misure inclinometriche hanno permesso di ampliare il quadro conoscitivo sui possibili movimenti residui sull'abitato di Pian dei Sisi, ottenendo misure dirette in foro. I dati inclinometrici forniscono quindi una stima quantitativa dello stato deformativo del versante in profondità, a complemento dei dati *radar* satellitari che forniscono solo stime delle deformazioni superficiali.

Dopo la lettura zero (13/3/2018) sono disponibili nove letture eseguite negli inclinometri i1, i2 e i3, due letture eseguite nell'inclinometro i3 e quattro letture eseguite negli inclinometri i4 e i5. Si riportano di seguito i risultati delle letture inclinometriche aggiornate all'ultima misura effettuata (24/07/18).

L'inclinometro i1 è localizzato nel sondaggio S1 direttamente a monte della corona della frana del 19 febbraio ed ha registrato spostamenti massimi di circa 1.2 mm nei quattro mesi di monitoraggio.

Le letture sull'asse A mostrano alla profondità tra 8 e 9 metri uno scostamento verso valle con flessione massima di 1.2 mm e, al di sotto di 14 m, un tratto debolmente anomalo con scostamento verso valle di qualche decimillimetro e accenno ad inversione verso monte intono a 15 m di profondità (Figura 26).

L'asse B ha un andamento più regolare: non avverte alcun movimento intorno ai 9 m di profondità, ma segnala gli stessi scostamenti dell'asse A al di sotto dei 14 m. Tra 8-9 m dal piano di campagna il sondaggio S1 ha attraversato un livello argilloso con spessore circa 1 metro, che potrebbe giustificare la suddetta flessione (Figura 26).



**Figura 26 - Inclinometro i1 nel sondaggio S1: letture aggiornate al 24 luglio 2018 per l'asse A e l'asse B. Si ricorda che l'asse A è orientato lungo l'asse della frana, l'asse B è perpendicolare al primo.**

L'inclinometro i2, inserito nel sondaggio S3, è localizzato in corrispondenza dell'edificio 4 di Figura 25. Le misure inclinometriche presentano diagrammi molto regolari fino a 11 m di profondità, dove si registra una flessione su entrambi gli assi, in verso contrario (verso monte) rispetto a quella rilevata in i1, con scostamento massimo di 3.4 nelle ultime letture di Luglio 2018 (Figura 27). Questa anomalia potrebbe corrispondere ad un intervallo molto fratturato attraversato in perforazione, probabilmente legato al sistema di faglie che caratterizzano questo sito, evidenziate anche nei profili SISMO 1 e SISMO 4 di ENEL.

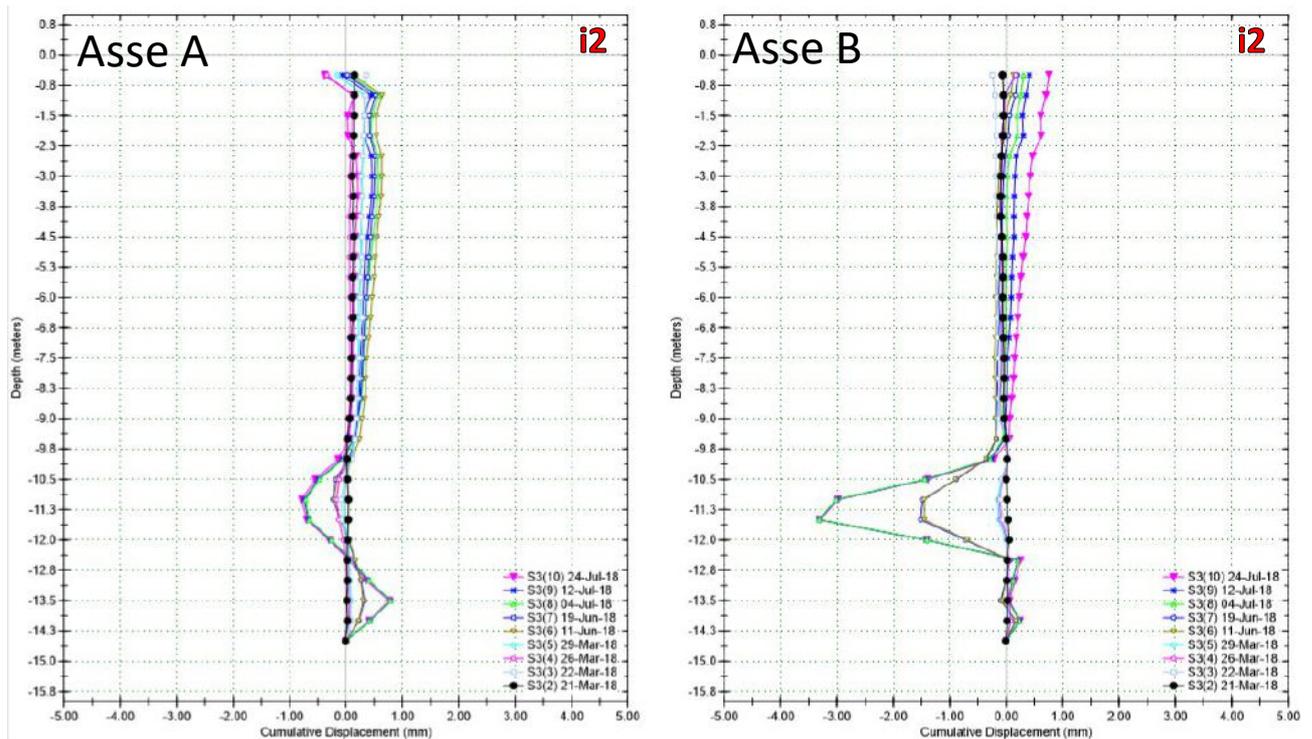


Figura 27 - Inclinometro i2 nel sondaggio S3: letture aggiornate al 24 luglio 2018 per l'asse A e l'asse B. Si ricorda che l'asse A è orientato lungo l'asse della frana, l'asse e B è perpendicolare al primo.

L'inclinometro i3, inserito nel sondaggio S4, è localizzato a S della strada statale SS12 dell'Abetone e del Brennero. Per questo inclinometro, dopo la lettura zero del 13/03/2018, risultano disponibili solo due letture, effettuate a Marzo 2018. Tuttavia, le misure su questo inclinometro risultano essere le meno rappresentative dei possibili movimenti residui legati alla frana del 19 Febbraio 2018 in quanto lo strumento è localizzato a più di 150 metri di distanza a monte dal coronamento della frana. Le due letture inclinometriche disponibili mostrano diagrammi molto regolari su entrambi gli assi. Sull'asse B si osserva un debolissimo scostamento verso valle nei primi metri superficiali (Figura 28).

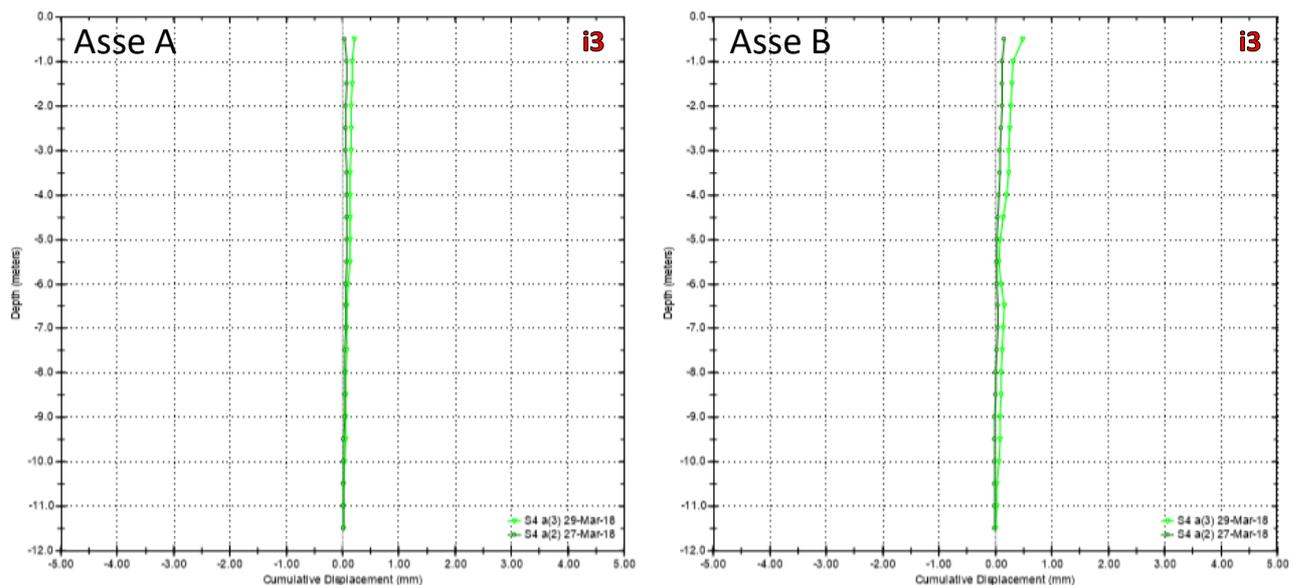
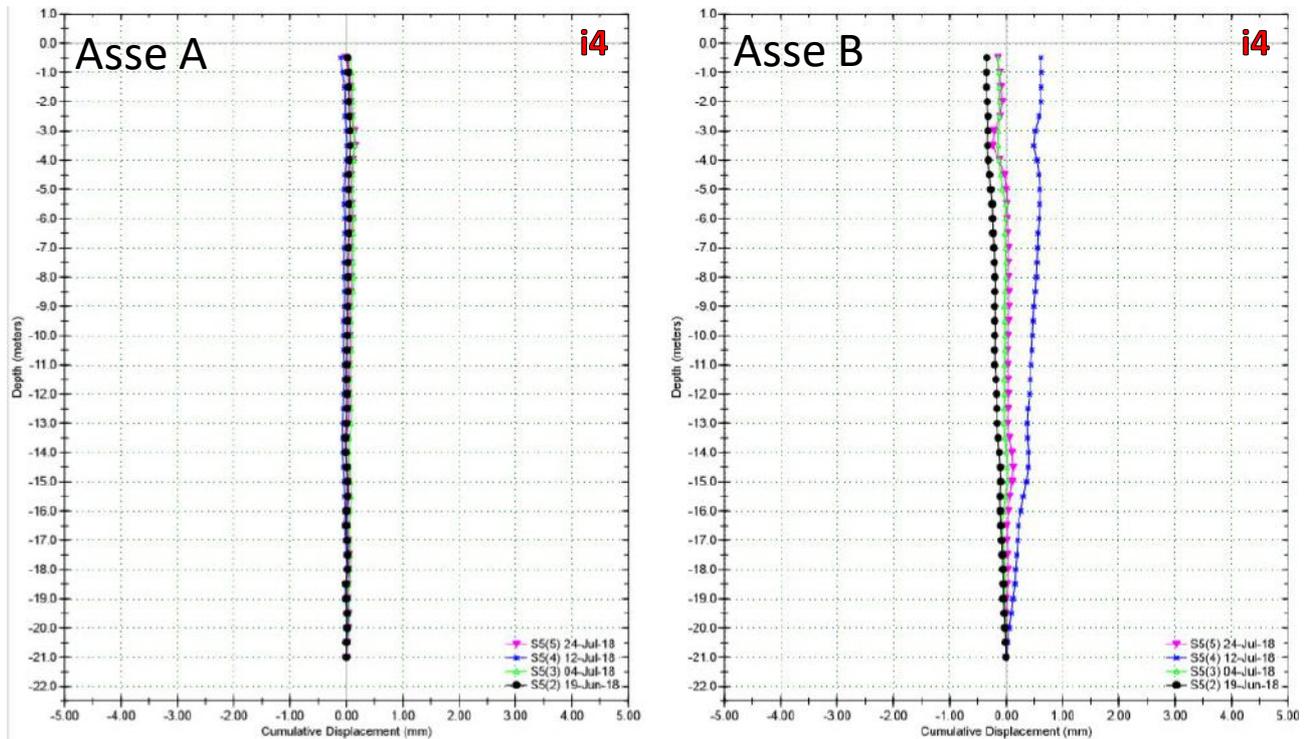


Figura 28 - Inclinometro i3 nel sondaggio S4: letture disponibili per l'asse A e l'asse B. Si ricorda che l'asse A è orientato lungo l'asse della frana, l'asse e B è perpendicolare al primo.

L'inclinometro i4, inserito nel sondaggio S5, è situato in corrispondenza dell'edificio 3 di Figura 25. Le misure inclinometriche non mostrano nessuno scostamento sull'asse A e registrano uno scostamento massimo sull'asse B di circa 0.6 mm misurato in superficie (Figura 29).



**Figura 29 - Inclinometro i4 nel sondaggio S5: letture aggiornate al 24 luglio 2018 per l'asse A e l'asse B. Si ricorda che l'asse A è orientato lungo l'asse della frana, l'asse B è perpendicolare al primo.**

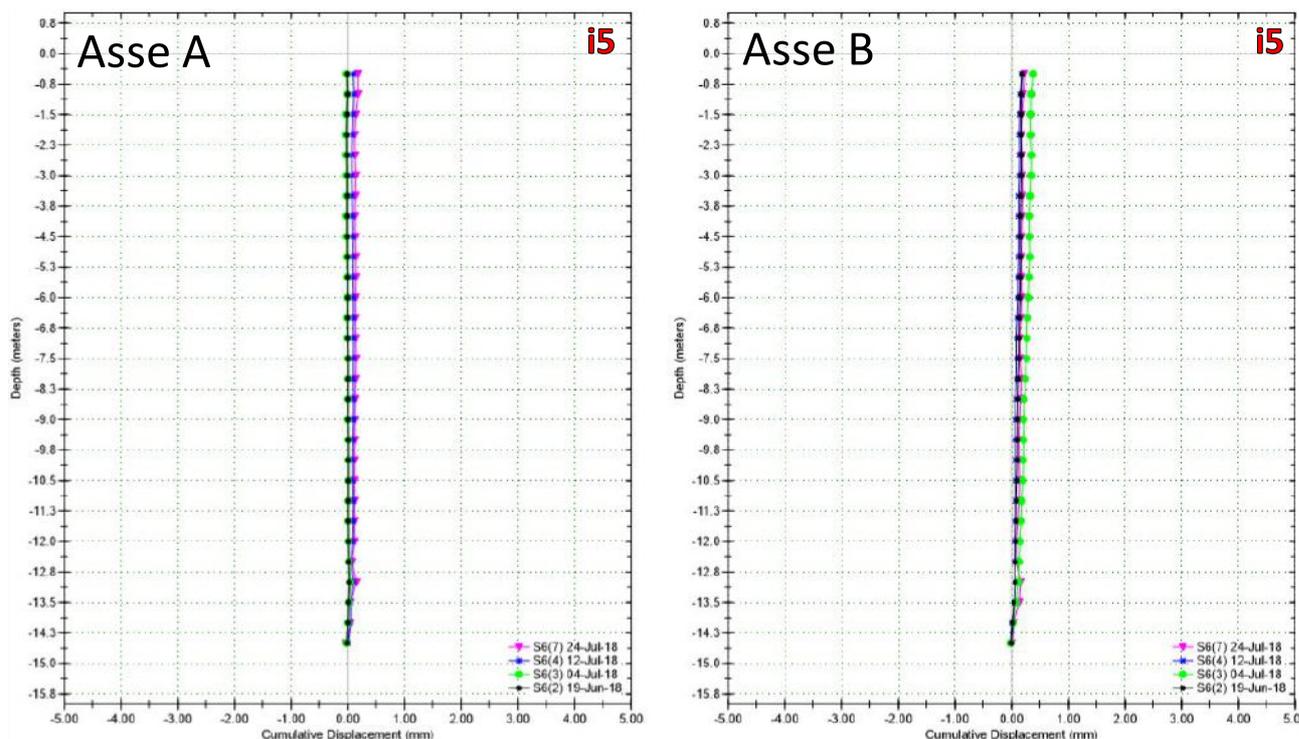
L'inclinometro i5, inserito nel foro di sondaggio S6, è localizzato lungo un sentiero poco più a valle dell'edificio 5. Le misure inclinometriche non mostrano nessuno scostamento significativo su entrambi gli assi. Lo scostamento massimo è di circa 0.4 mm misurato in superficie sull'asse B (Figura 30).

In sintesi, i dati inclinometrici degli strumenti mostrano che negli inclinometri i1 ed i2, i più vicini alla frana del 19 febbraio, nelle ultime misure di giugno/luglio sono evidenziate due flessioni di scostamento, intorno agli 8-9 m e al di sotto dei 14 m di profondità.

La flessione con scostamento verso valle tra 8 e 9 m nell'inclinometro i1 potrebbe essere legata all'orizzonte argilloso di circa 1 metro di spessore attraversato nel sondaggio a tale profondità; la flessione di scostamento verso monte localizzata intorno a 12 metri nell'inclinometro i2, in assenza di falda, potrebbe essere legata alla forte fratturazione delle arenarie riscontrata nel sondaggio, legata alla presenza di faglie che sono evidenziate anche dai profili SISMO 1 e SISMO 4 di ENEL.

Le misure dell'inclinometro i4 ubicato vicino alle case 1-2-3, interessate da numerose lesioni, nei sei mesi di controllo strumentale hanno mostrato scostamenti minimi, coerenti con gli assestamenti precedenti.

Le lievi oscillazioni registrate in superficie evidenziate in tutti gli inclinometri e i vettori di scostamento registrati dagli inclinometri i4 ed i5 rientrano nell'errore strumentale ( $\pm 0,5$  mm).



**Figura 30 - Inclinometro i5 nel sondaggio S6: letture aggiornate al 24 luglio 2018 per l'asse A e l'asse B. Si ricorda che l'asse A è orientato lungo l'asse della frana, l'asse B è perpendicolare al primo.**

## 9.2 Piezometri

Per quanto riguarda le misure piezometriche alla data del 16 aprile 2018 (*i.e.*, profondità della falda acquifera dal piano campagna), si osserva che nel piezometro 1 (sondaggio S2, profondità 17 m, a pochi metri dal sondaggio S1) non vi è presenza di acqua. Come riportato nella relazione preliminare di progresso del 16 giugno 2018 a firma del Dott. Geol. Paride Antolini, con 17 m di profondità si arriva quasi alla quota della corona di frana.

Nel piezometro 2 (sondaggio S7, profondità 15 m, a pochi metri dal sondaggio S6, inclinometro i5) viene intercettata la falda a fondo foro. Il sondaggio S7 è posizionato ad una quota di circa 13 metri inferiore rispetto al sondaggio S2.

Infine, nel piezometro 3 (sondaggio S8, profondità 15 m, a pochi metri dall'edificio 20) la falda freatica è intercettata alla profondità di 6.9 m.

Le letture piezometriche confermano che nella zona a sud del bacino la falda freatica è localizzata ad una profondità superiore ai 17 m e pertanto i depositi di versante che coprono il substrato roccioso sono prive di falda acquifera.

## 9.3 Fessurimetri

Su alcuni dei 20 edifici di Pian dei Sisi che erano stati evacuati a seguito della frana del 19 febbraio, ubicati in parte a monte del bacino ENEL lungo la strada statale SS12 e in parte a sud del bacino stesso, sono stati installati esternamente 47 fessurimetri su altrettante lesioni.

Si tratta di 45 lesioni già esistenti e di 2 nuove lesioni, che si sarebbero formate dopo l'evento franoso del 19 febbraio 2018, come viene riportato dagli abitanti.

Tutti gli edifici sono fondati esclusivamente su terreni di copertura con l'unica eccezione dell'edificio 1 il cui spigolo di SE poggia direttamente sull'arenaria affiorante sul pendio sottostante in strati con 52° di immersione verso SE, a franapoggio con inclinazione maggiore del pendio.

I fessurimetri, installati a partire dal 23 febbraio 2018, sono 39 piani ed 8 angolari. Le prime letture, eseguite da un tecnico del Comune, sono iniziate il 24 febbraio 2018. Non si ha alcuna documentazione a riguardo delle aperture delle lesioni preesistenti la frana del 19 febbraio, prima dell'installazione dei fessurimetri.

L'ubicazione dei fessurimetri, che monitorano 9 case e la condotta forzata in uscita dalla galleria proveniente dal bacino ENEL, è mostrata in Figura 31. In Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8 sono elencate tutte le misure disponibili, che riportano le dimensioni delle aperture, eseguite nel periodo 23 Febbraio - 4 Settembre 2018.



**Figura 31 - Numerazione degli edifici dell'abitato di Pian dei Sisi e localizzazione dei fessurimetri e della condotta forzata (c.f.) in uscita dalla galleria proveniente dal bacino ENEL.**

La lesione più vicina alla parte sommitale della frana del 19 febbraio è la "lesione 1.2" sulla casa 1 che dista circa 60 metri dalla corona di frana. Questa lesione era già esistente prima della frana del 19 febbraio 2018. Il 26 febbraio 2018, data della messa in posto del fessurimetro, l'apertura risultava essere di 2.1 mm (Figura 32).

Il 2 marzo 2018 è misurato uno scostamento di 0.5 mm che rimane costante fino al 5 aprile 2018 quando si annulla. Seguono un nuovo scostamento ed un recupero, sempre di 0.5 mm, nelle due letture del 7 aprile 2018 e del 9 aprile 2018, con ritorno sulla lettura iniziale. Nelle letture successive non viene registrato nessun movimento.



**Figura 32 – Foto della “lesione 1.2” in data 26 febbraio 2018 (data di messa in posto del fessurimetro). La misura dell’apertura è di 2.1 mm.**

Durante il periodo di controllo sono state eseguite circa un migliaio di letture. In Tabella 9 è riportata una sintesi dell’analisi di tutte le misure effettuate. Delle 45 lesioni già esistenti prima della frana del 19 febbraio, 11 hanno una larghezza che varia tra 1 e 3 mm e le rimanenti sono inferiori al mm. Tutti gli scostamenti si compensano in tempi diversi, perciò il comportamento delle lesioni si può considerare “stazionario”. È necessario notare comunque che il periodo del controllo cade essenzialmente nella stagione estiva.

Le due nuove lesioni formatesi dopo la frana del 19 febbraio 2018 sono indicate come “lesione 3.9” sull’edificio 3 e “lesione 6.9” sull’edificio 6 (Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8).

La “lesione 3.9” monitorata con fessurimetro angolare, mostra un’apertura di 0.5 mm al momento dell’installazione dello strumento in data 27 febbraio 2018 (Figura 33). Il 28 febbraio 2018 è misurato uno scostamento di 0.5 mm. Seguono il 2 marzo 2018 uno scostamento di 1 mm in direzione contraria e il 8 marzo 2018 uno scostamento di 0,5 mm annulla il precedente. Tra il 9 e il 13 marzo viene registrato uno spostamento di 0.6 mm recuperato in parte (0.4 mm) il 21 maggio 2018 con spostamento contrario di 0.8 mm nella lettura del 4 settembre 2018.

La “lesione 6.9” monitorata con fessurimetro piano, mostra un’apertura di 0.3 mm al momento dell’installazione dello strumento in data 28 febbraio 2018 (Figura 33). Seguono le letture del 1 marzo 2018 (0.5 mm), 9 marzo 2018 (0.1 mm) e 10 marzo 2018 (0.2 mm), annullati il 13 marzo 2018 con uno scostamento di 0.3 mm in direzione contraria. Nella lettura del 5 aprile 2018 vengono recuperate le condizioni iniziali. Nella lettura del 21 maggio 2018, data dell’ultima lettura disponibile, viene registrato uno spostamento di 0.5 mm verso il basso.



**Figura 33 – Foto delle due nuove lesioni che si sarebbero formate dopo l’evento franoso del 19 febbraio 2018: “lesione 3.9” (a sinistra) con apertura di 0.5 mm e “lesione 6.9” con apertura di 0.3 mm al momento dell’installazione del fessurimetro.**

Il comportamento tra le lesioni esistenti già prima della frana del 19 febbraio 2018 e le due nuove formatesi dopo l'evento risulta essere praticamente analogo.

Abit. Nr.	Fessurimetro Nr.	Apertura delle fessure pre-installazione fessurimetro (mm)	29/02/2018	25/02/2018	26/02/2018	27/02/2018	29/02/2018	01/03/2018	02/03/2018	03/03/2018	04/03/2018	05/03/2018	06/03/2018	07/03/2018	08/03/2018
			Movimento (mm)												
1	1.1	0.8	=	=	*	=	=	=	=	=	n.r.	=	n.r.	=	n.r.
	1.2	2.1	=	=	*	=	=	=	0.5→	=	n.r.	=	n.r.	=	n.r.
	1.3	1.1	=	=	*	=	=	=	=	0.5→	n.r.	=	n.r.	=	n.r.
	1.4	0.3	=	=	*	=	=	=	=	=	n.r.	=	n.r.	=	n.r.
3	3.1	0.2	=	0.3↓	=	0.5↓	0.5↑	0.3↑	0.3↓	0.3↑	=	=	=	=	=
	3.2	0.8	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	3.3	0.2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	3.4	3.5	=	=	=	←0.5	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	3.5	1.0	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	3.6	0.4	=	1.5→	←1.5	=	0.5↑	=	0.5↓	=	=	=	=	=	=
	3.7	0.4	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	3.8	2.6	=	←0.6	←0.7	=	=	=	=	=	=	=	=	0.5→	=
4	4.1	3.0	=	3.0	0.5→	=	=	=	←0.5	=	=	=	=	=	=
	4.2	0.1	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.3	0.3	=	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.4	0.2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.5	0.4	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.6	1.3	=	=	=	=	0.5↑	=	1.0↓	=	=	=	=	=	0.6→
	4.7	0.8	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.8	0.2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	0.5→
	4.9	0.5	=	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.10	0.3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	4.11	1.6	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	n.r.
	5	5.1	0.60	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
5.2		0.60	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	n.r.
5.3		1.75	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	n.r.
5.4		0.5	=	=	=	0.3→	=	=	=	=	=	=	=	=	0.3→
5.5		0.3	=	←0.5	=	←0.3	=	=	=	=	0.5→	←0.2	=	=	0.4→
5.6		0.2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
5.7		0.4	=	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=
5.8		0.4	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
5.9		0.3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
5.10		0.30	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	n.r.
6	6.1	0.2	=	=	←0.5	=	=	=	=	=	=	=	=	=	n.r.
	6.2	0.3	=	0.8→	=	0.2→	0.3→	=	=	=	0.5→	←0.2	=	=	0.3→
	6.3	0.2	=	=	←0.5	=	←0.3	=	=	=	=	=	=	=	0.4→
	6.4	0.8	=	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	6.5	0.4	=	=	=	0.5→	=	0.5↑	0.5↑	0.5↑	0.5↑	0.5↑	0.5↑	0.5↑	0.5↑
	6.6	0.4	=	=	*	0.2↓	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑	0.2↑
	6.7	0.2	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	6.8	0.3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	6.9	0.3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	6.10	0.1	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
8	8.1	0.3	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	8.2	0.6	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
10	10.1	0.7	=	=	*	=	=	←0.3	←0.2	←0.2	←0.3	←0.3	←0.3	←0.3	←0.3
	10.2	0.7	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
11	11.1	3.4	=	=	*	=	=	=	0.5→	0.5→	0.5→	0.5→	0.5→	0.5→	0.5→
	11.2	3.2	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
13	13.1	3.2	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	13.2	0.9	=	=	*	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
c.t.	completata forz														0.2→

=: Nessuno spostamento rispetto alla misura precedente  
 n.r.: Misura non rilevata  
 \* : Data di installazione del fessurimetro  
 ↓ : Fessure post-evento  
 → : Direzione di spostamento orizzontale  
 ↑ : Fessurimetro angolare  
 ↘ : Direzione di spostamento verticale  
 ↙ : Direzione di spostamento verticale

Il fessurimetro 5.13 è installato su un muretto in c.a. all'esterno dell'edificio 5, in direzione sud.

Tabella 6 - Misure rilevate ai fessurimetri – Periodo 24 febbraio 2018 – 8 marzo 2018.

Abit. Nr.	Fessurimetro Nr.	Apertura delle fessure pre-installazione fessurimetro (mm)	09/03/2018	10/03/2018	11/03/2018	12/03/2018	13/03/2018	15/03/2018	17/03/2018	19/03/2018	20/03/2018	22/03/2018	26/03/2018
			Movimento (mm)										
1	1.1	0.8	n.r.										
	1.2	2.1	n.r.										
	1.3	1.1	n.r.										
	1.4	0.3	n.r.										
	2.1	0.2	n.r.										
	2.2	0.8	n.r.										
	3.2	0.8	n.r.										
	3.3	0.2	n.r.										
	3.4	1.5	n.r.	n.r.	n.r.	0.9→	n.r.						
	3.5	1.0	n.r.										
	3.6	0.4	n.r.										
	3.7	0.4	n.r.										
	3.8	2.6	n.r.	n.r.	n.r.	0.6→	n.r.						
	3.9	0.5	<-0.1	<-0.3	n.r.	<-0.1	<-0.1	n.r.	n.r.	<-0.6	n.r.	n.r.	n.r.
3.10	2.8	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	
4	4.1	3.0	n.r.										
	4.2	0.1	n.r.										
	5.1	0.1	n.r.										
	5.2	0.3	n.r.										
	5.3	0.3	n.r.										
	5.4	0.4	0.8→	n.r.									
	5.5	1.3	n.r.										
	5.6	0.8	n.r.										
	5.7	0.2	0.2→	n.r.									
	5.8	0.5	n.r.										
	5.9	0.3	n.r.										
	5.10	0.30	n.r.										
	5.11	1.6	n.r.										
	5.12	0.60	n.r.										
5	5.13	17.5	<-0.3	0.5↑	n.r.								
	6.1	0.5	<-0.2	<-0.2	n.r.	<-0.6	n.r.						
	6.2	0.3	n.r.										
	6.3	0.2	n.r.										
	6.4	0.3	n.r.										
	6.5	0.4	n.r.										
	6.6	0.4	n.r.										
	6.7	0.2	0.1→	0.1→	<-0.1	n.r.							
	6.8	0.3	n.r.										
	6.9	0.3	0.1→	0.2→	<-0.2	n.r.							
	6.10	0.1	n.r.										
	6.11	0.3	n.r.										
	6.12	0.3	n.r.										
	6.13	0.6	n.r.										
6	8.1	0.6	n.r.										
	8.2	0.6	<-0.2	<-0.1	n.r.								
	10.1	0.7	<-0.2	n.r.									
	11.1	1.4	0.1→	0.1→	n.r.	<-0.3	n.r.						
	11.2	3.2	n.r.										
	11.3	3.2	n.r.										
	13.1	0.6	<-0.2	<-0.2	n.r.	0.1→	n.r.						
	c.f. condotta forz.		0.6→	<-0.2	n.r.								

n.r.: Nessuno spostamento rispetto alla misura precedente  
 n.r.: Misura non rilevata  
 n.r.: Data di installazione del fessurimetro  
 n.r.: Fessura post-evento  
 n.r.: Direzione di spostamento orizzontale  
 n.r.: Fessurimetro angolare  
 n.r.: Direzione di spostamento verticale  
 n.r.: 6A

Il fessurimetro 5.13 è installato su un muretto in cls all'esterno dell'edificio 5, in direzione sud.

Tabella 7 - Misure rilevate ai fessurimetri – Periodo 9 marzo 2018 – 26 marzo 2018.

Abil. Nr.	Fessurimetro Nr.	Apertura delle fessure pre-installazione fessurimetro (mm)	30/03/2018		05/04/2018		07/04/2018		09/04/2018		11/04/2018		16/04/2018		21/05/2018		20/07/2018		04/09/2018	
			Movimento (mm)																	
1	1.1	0.8																		
	1.2	2.1																		
	1.3	1.1																		
	1.4	0.3																		
	3.1	0.2																		
	3.2	0.8																		
	3.3	0.2																		
	3.4	1.5																		
	3.5	1.0																		
	3.6	0.4																		
	3.7	0.4																		
	3.8	2.6																		
	3.9	0.5																		
	4	3.10	2.8																	
5	4.1	3.0																		
	5.1	0.1																		
	5.2	0.3																		
	5.3	0.3																		
	5.4	0.4																		
	5.5	1.3																		
	5.6	0.8																		
	5.7	0.2																		
	5.8	0.5																		
	5.9	0.3																		
	5.10	0.30																		
	5.11	1.6																		
	5.12	0.60																		
	6	5.13	17.5																	
6.1		0.5																		
6.2		0.3																		
6.3		0.2																		
6.4		0.3																		
6.5		0.4																		
6.6		0.4																		
6.7		0.2																		
6.8		0.3																		
6.9		0.3																		
6A		0.1																		
6B		0.3																		
8.1		0.6																		
8.2		0.6																		
10	10.1	0.7																		
	11.1	1.4																		
	11.2	3.2																		
11	11.3	3.2																		
	13.1	0.6																		
c.f.	condotta forz.																			

m: Nessuno spostamento rispetto alla misura precedente  
 n.r.: Misura non rilevata  
 #: Data di installazione del fessurimetro  
 ○: Fessura post-evento  
 →: Direzione di spostamento orizzontale  
 ↘: Direzione di spostamento verticale  
 6A

Il fessurimetro 5.13 è installato su un muretto in c/c all'esterno dell'edificio 5, in direzione sud.

Tabella 8 - Misure rilevate ai fessurimetri – Periodo 30 marzo 2018 – 4 settembre 2018.

Abit. Nr.	Fessurimetro Nr.	Monitoraggio 2018			
		Totale misure eseguite	Movimenti < 1 mm	Movimenti 1 - 2 mm	Movimenti > 2 mm
1	1.1	64	64	0	0
	1.2				
	1.3				
	1.4				
3	3.1	282	279	3	0
	3.2				
	3.3				
	3.4				
	3.5				
	3.6				
	3.7				
	3.8				
	3.9				
	3.10				
4	4.1	32	31	1	0
5	5.1	260	253	7	0
	5.2				
	5.3				
	5.4				
	5.5				
	5.6				
	5.7				
	5.8				
	5.9				
	5.10				
	5.11				
	5.12				
	5.13				
6	6.1	246	246	0	0
	6.2				
	6.3				
	6.4				
	6.5				
	6.6				
	6.7				
	6.8				
	6.9				
	6A				
6B					
8	8.1	45	45	0	0
	8.2				
10	10.1	26	26	0	0
11	11.1	71	68	0	0
	11.2				
	11.3				
13	13.1	26	26	0	0
c.f.	condotta forz.	18	18	0	0

○ : Fessura post-evento  
6A: Fessurimetro angolare

Tabella 9 - Sintesi delle misure effettuate sulle lesioni durante il periodo di monitoraggio nel periodo 23 febbraio 2018 – 4 settembre 2018. Le letture sono state suddivise 3 classi di spostamento.

## 9.4 Stazione totale

Alcuni edifici dell'abitato di Pian dei Sisi sono monitorati tramite stazione totale di alta precisione, e registrazione automatica dei dati, utilizzando i prismi (caposaldi) per il puntamento automatico.

Il rilievo è stato eseguito con la procedura della celerimensura elettronica automatica, procedura normalmente seguita per questa tipologia di monitoraggio, utilizzando un numero di misure sovrabbondanti e memorizzando le letture coniugate per poter compensare eventuali residui errori di rettifica.

Le caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato (*Stazione totale Leica TS60\**), riportano un errore teorico di pochi decimi di millimetro a 100 m (precisione angolare del TS60:  $\pm 0.15$  mgon,  $\pm 0.2$  mm a 100 m e precisione lineare del TS60\*:  $\pm 0.6$  mm+1ppm,  $\pm 0.7$  mm a 100 m).

I calcoli relativi alla celerimensura di precisione, sono stati eseguiti compensando le letture coniugate.

È stato preso come origine il punto 1 posizionato sul fabbricato 17, lontano dai punti da monitorare e come orientamento il punto 2 posizionato sulla sommità di un muro (Figura 34).

Al punto 1 (origine) sono stati assegnati i valori:  $X = 0$ ;  $Y = 0$ ;  $Q = 100$ .

La congiungente i punti 1-2 è sull'asse X. L'asse delle Y corrisponde indicativamente alla direzione EST (Figura 34).

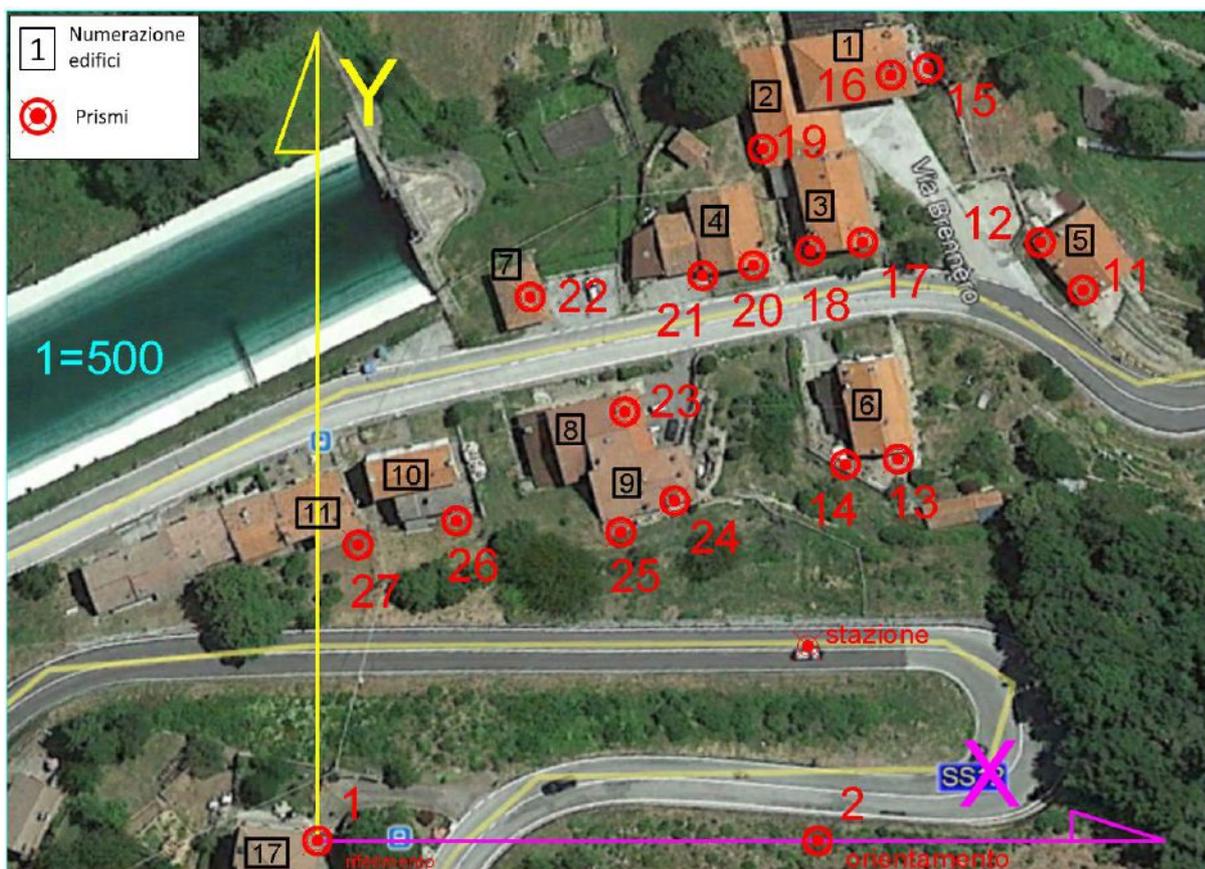


Figura 34 - Posizione dei prismi per il monitoraggio topografico con stazione totale, installati sulle abitazioni dell'abitato di Pian dei Sisi.

Gli edifici monitorati sono 11 ed i prismi installati (mire) sono 19, di cui 17 (numerati da 11 a 27) su edifici e 2 sui punti fissi (Figura 34).

Sono state eseguite sei misure, effettuate con strumentazione certificata, nelle date seguenti:

- 6 giugno 2018;
- 15 giugno 2018;
- 21 giugno 2018;
- 4 luglio 2018;
- 12 luglio 2018;
- 10 agosto 2018.

Nelle Tabella 10 e Tabella 11 si riportano tutte le letture delle sei misure effettuate ed il dato di ogni movimento in mm misurato sugli assi X e Y per ogni prisma.

Numero	Abitazione	Prima misura (riserimento) 6 giugno 2018			Seconda misura 15 giugno 2018						Terza misura 21 giugno 2018					
		ID	X	Y	Q	X	Y	Q	diff. X (mm)	diff. Y (mm)	diff. Q (mm)	X	Y	Q	diff. X (mm)	diff. Y (mm)
17	1 rif	0.0000	0.0000	100.0000	0.0000	0.0000	100.0000	0.0	0.0	0.0	0.0000	0.0000	100.0000	0.0	0.0	0.0
muro	2 ori	74.3532	0.0000	91.7413	74.3529	0.0000	91.7412	-0.3	0.0	-0.1	74.3533	0.0000	91.7413	0.1	0.0	0.0
5	11	113.8047	82.5458	68.8808	113.8059	82.5452	68.8802	1.2	-0.6	-0.6	113.8061	82.5445	68.8805	1.4	-1.3	-0.3
	12	107.4575	89.6997	68.5992	107.4586	89.6996	68.5990	1.1	-0.1	-0.2	107.4592	89.6995	68.5994	1.7	-1.2	0.2
6	13	86.2912	57.2171	74.1959	86.2916	57.2167	74.1960	0.4	-0.4	0.1	86.2920	57.2185	74.1958	0.8	-0.6	-0.1
	14	78.4539	56.3782	73.7085	78.4544	56.3781	73.7088	0.5	-0.1	0.3	78.4547	56.3779	73.7083	0.8	-0.3	-0.2
1	15	90.7893	115.8117	71.7588	90.7893	115.8120	71.7588	0.0	0.3	0.0	90.7916	115.8113	71.7594	2.3	-0.4	0.6
	16	85.2484	114.7835	71.3751	85.2504	114.7838	71.3747	1.0	0.3	-0.4	85.2514	114.7831	71.3752	2.0	-0.4	0.1
3	17	81.0248	89.7034	71.2632	81.0257	89.7033	71.2631	1.1	-0.1	-0.1	81.0258	89.7031	71.2630	1.2	-0.3	-0.2
	18	73.2722	88.4626	71.3006	73.2720	88.4625	71.3004	-0.2	-0.1	-0.2	73.2732	88.4625	71.3000	1.0	-0.1	-0.6
2	19	66.1676	103.7198	70.5568	66.1668	103.7199	70.5568	-0.8	0.1	0.0	66.1688	103.7199	70.5568	1.2	0.1	0.0
4	20	64.7818	86.2423	71.7827	64.7818	86.2424	71.7829	0.0	0.1	0.2	64.7826	86.2424	71.7825	0.8	0.1	-0.2
	21	57.2711	84.7104	71.7671	57.2715	84.7106	71.7669	0.4	0.2	-0.2	57.2718	84.7105	71.7669	0.7	0.1	-0.2
7	22	31.6315	81.4937	72.5727	31.6310	81.4927	72.5722	-0.5	-1.0	-0.5	31.6326	81.4940	72.5721	1.1	0.3	-0.6
8	23	45.6812	64.3367	71.3609	45.6810	64.3361	71.3612	-0.2	-0.6	0.3	45.6816	64.3370	71.3608	0.4	0.3	-0.1
9	24	53.0938	50.9658	75.6543	53.0938	50.9657	75.6545	0.0	-0.1	0.2	53.0943	50.9660	75.6541	0.5	0.2	-0.2
	25	45.0964	46.2262	76.5889	45.0966	46.2260	76.5891	0.2	-0.2	0.2	45.0967	46.2265	76.5889	0.3	0.3	0.0
10	26	20.6857	47.9327	73.5557	20.6856	47.9310	73.5545	-0.1	-1.7	-1.2	20.6857	47.9318	73.5549	0.0	-0.9	-0.8
11	27	6.0463	44.3497	74.6396	6.0460	44.3478	74.6385	-0.3	-1.9	-1.1	6.0463	44.3494	74.6384	0.0	-0.3	-1.2

Tabella 10 - Letture strumentali con Stazione Totale Laser TS60: misure 1-2-3.

Numero	Abitazione	Quarta misura 4 luglio 2018						Quinta misura 12 luglio 2018						Sesta misura 10 agosto 2018						
		ID	X	Y	Q	diff. X (mm)	diff. Y (mm)	diff. Q (mm)	X	Y	Q	diff. X (mm)	diff. Y (mm)	diff. Q (mm)	X	Y	Q	diff. X (mm)	diff. Y (mm)	diff. Q (mm)
17	1 rif.		0.0000	0.0000	100.0000	0.0	0.0	0.0	0.0000	0.0000	100.0000	0.0	0.0	0.0	0.0000	0.0000	100.0000	0.0	0.0	0.0
	muro	2 ori.	74.3536	0.0000	91.7414	0.4	0.0	0.1	74.3537	0.0000	91.7415	0.5	0.0	0.2	74.3534	0.0000	91.7420	0.2	0.0	0.7
5		11	113.8055	82.5457	68.8806	0.8	-0.1	-0.2	113.8057	82.5452	68.8811	1.0	-0.6	0.3	113.8057	82.5457	68.8809	1.0	-0.1	0.1
		12	107.4581	89.7001	68.5999	0.6	0.4	0.7	107.4584	89.6994	68.5997	0.9	-0.3	0.5	107.4581	89.7002	68.5997	0.6	0.5	0.5
6		13	86.2917	57.2170	74.1962	0.5	-0.1	0.3	86.2915	57.2167	74.1966	0.3	-0.4	0.7	86.2917	57.2171	74.1966	0.5	0.0	0.7
		14	78.4543	56.3783	73.7087	0.4	0.1	0.2	78.4545	56.3780	73.7086	0.6	-0.2	1.1	78.4541	56.3782	73.7091	0.2	0.0	0.6
1		15	90.7897	115.8119	71.7589	0.4	0.2	0.1	90.7900	115.8114	71.7592	0.7	-0.3	0.4	90.7901	115.8117	71.7587	0.8	0.0	-0.1
		16	85.2493	114.7838	71.3750	-0.1	0.3	-0.1	85.2501	114.7830	71.3752	0.7	-0.5	0.1	85.2494	114.7832	71.3755	0.0	-0.3	0.4
3		17	81.0244	89.7036	71.2633	-0.2	0.2	0.1	81.0249	89.7031	71.2637	0.3	-0.3	0.5	81.0248	89.7035	71.2635	0.2	0.1	0.3
		18	73.2718	88.4629	71.3004	-0.4	0.3	-0.2	73.2723	88.4621	71.3009	0.1	-0.5	0.3	73.2721	88.4628	71.3005	-0.1	0.2	-0.1
2		19	66.1664	103.7201	70.5570	-1.2	0.3	0.2	66.1673	103.7195	70.5570	-0.3	-0.3	0.2	66.1669	103.7198	70.5570	-0.7	0.0	0.2
4		20	64.7810	86.2425	71.7829	-0.8	0.2	0.2	64.7812	86.2420	71.7833	-0.6	-0.3	0.6	64.7812	86.2424	71.7837	-0.6	0.1	1.0
		21	57.2696	84.7101	71.7671	-1.3	-0.3	0.0	57.2706	84.7099	71.7675	-0.5	-0.6	0.4	57.2707	84.7103	71.7675	-0.4	-0.1	0.4
7		22	31.6309	81.4927	72.5724	-0.6	-1.0	-0.3	31.6314	81.4923	72.5729	-0.1	-1.4	0.2	31.6310	81.4925	72.5728	-0.5	-1.2	-0.1
8		23	45.6808	64.3363	71.3611	-0.4	-0.4	0.2	45.6809	64.3359	71.3619	-0.3	-0.8	1.0	45.6806	64.3364	71.3615	-0.6	-0.3	0.6
9		24	53.0940	50.9658	75.6544	0.2	0.0	0.1	53.0941	50.9654	75.6553	0.3	-0.4	1.0	53.0937	50.9657	75.6550	-0.1	-0.1	0.7
		25	45.0965	46.2263	76.5892	0.1	0.1	0.3	45.0966	46.2259	76.5902	0.2	-0.4	1.3	45.0963	46.2260	76.5899	-0.1	-0.2	1.0
10		26	20.6856	47.9318	73.5553	-0.1	-0.9	-0.4	20.6858	47.9310	73.5550	0.1	-1.7	-0.7	20.6855	47.9313	73.5551	-0.2	-1.4	-0.6
11		27	6.0462	44.3489	74.6396	-0.1	-0.8	-1.0	6.0463	44.3490	74.6399	0.0	-1.7	-0.7	6.0461	44.3495	74.6395	-0.2	-1.2	-1.1

**Tabella 11 - Letture strumentali con Stazione Totale Laser TS60: misure 4-5-6.**

Per quanto riguarda l'insieme dei movimenti vettoriali delle sei misure di ogni prisma, si osserva che, nel caso di due prismi installati nella stessa casa, le misure confermano lo stesso orientamento. Si osserva anche che in ogni casa l'insieme dei movimenti avviene entro una ristretta area.

Nonostante le varie misurazioni siano state disturbate dal movimento continuo degli strati d'aria e talora da disturbi locali occasionali, dall'analisi delle misure effettuate i punti rilevati risultano stabili: i movimenti riscontrati nella misura 6 (10 agosto 2018) rientrano nei valori della precisione teorica della strumentazione previsti dalla casa costruttrice.

Nelle Figura 35 e Figura 36 sono state graficizzate in scala le misure sugli assi X e Y ed il vettore risultante delle ultime due misure di ogni prisma su ogni misura (misura 5 del 12 luglio 2018 e misura 6 del 10 agosto 2018). Le due figure concordano nell'indicare una suddivisione delle case in due gruppi caratterizzati da movimenti diversi sia in direzione che in valore (pur rientrando nei valori della precisione strumentale). A distanza di un mese circa tra le due letture, nelle stesse condizioni stagionali, il quadro sembra indicare una buona stabilità.

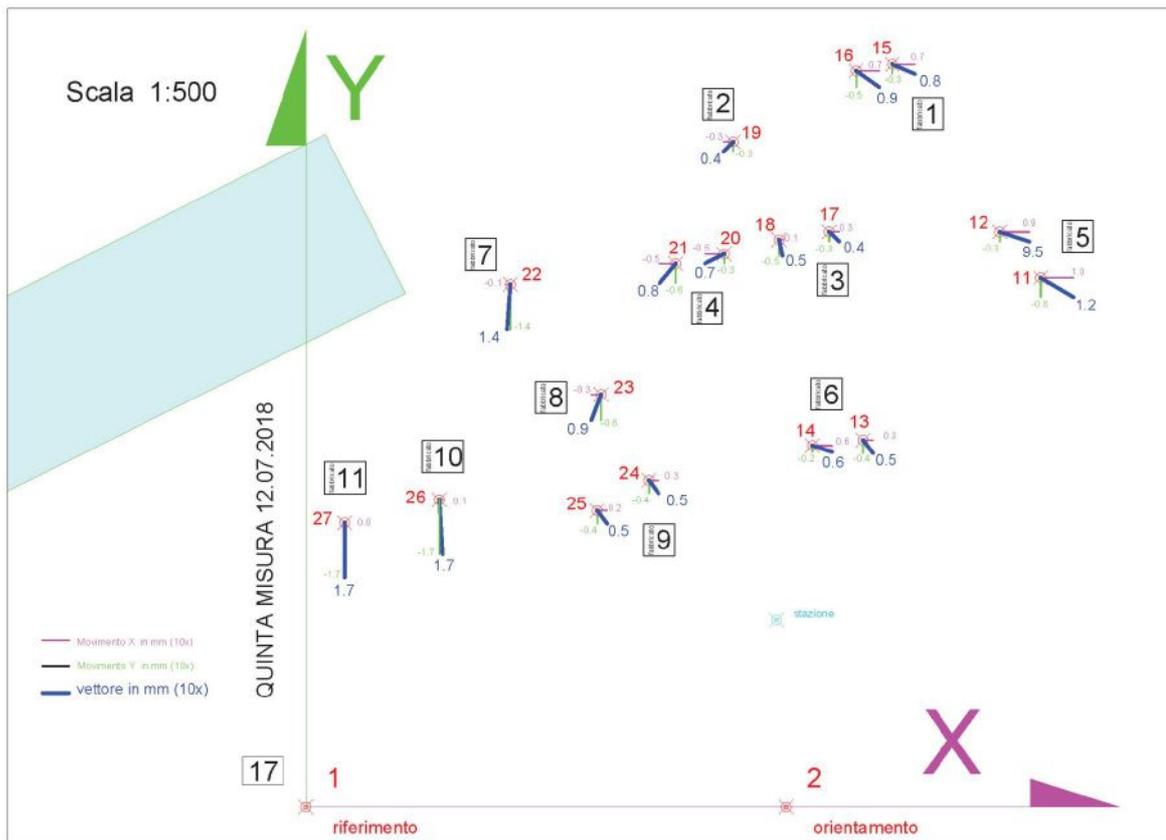


Figura 35 - Pianta degli spostamenti rilevati su ciascuna abitazione (misura 5 del 12 luglio 2018).

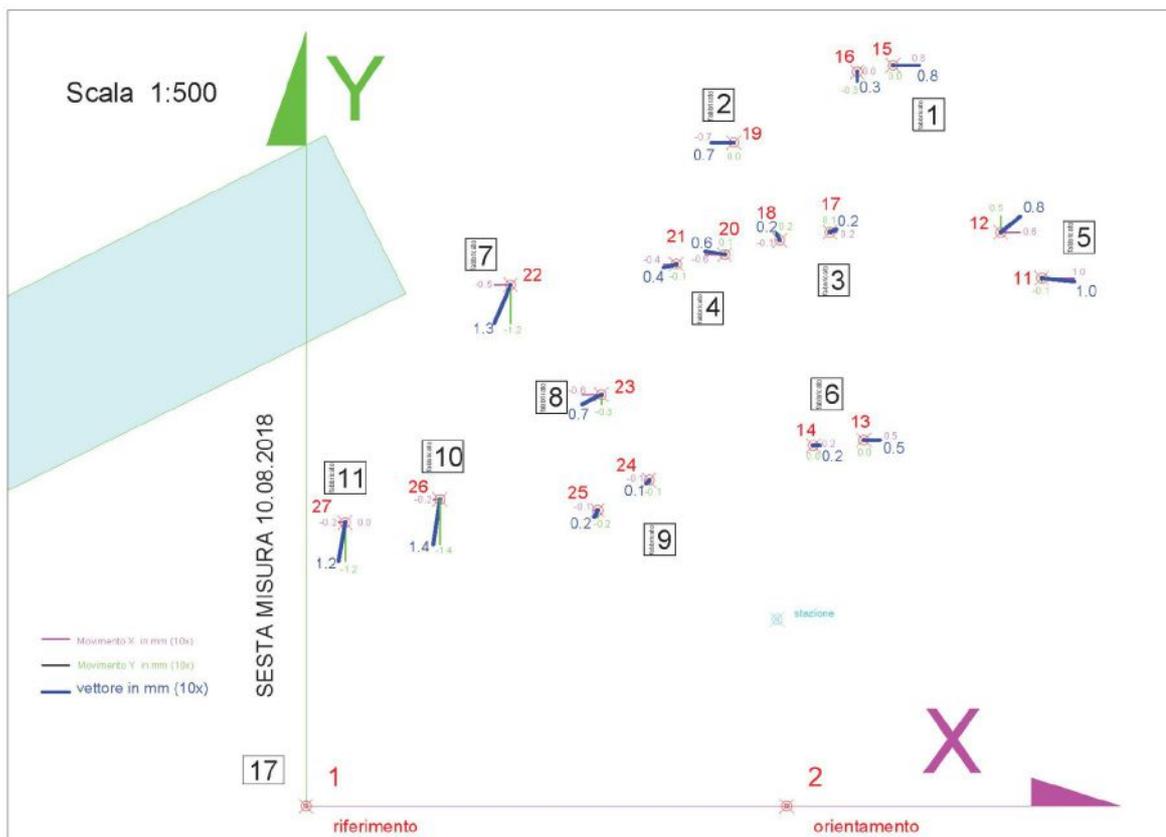


Figura 36 - Pianta degli spostamenti rilevati su ciascuna abitazione (misura 6 del 10 agosto 2018).

## 9.5 Dati radar satellitari interferometrici

Al fine di verificare lo stato attuale del versante a riguardo dello scenario deformativo recente, è stata svolta un'analisi delle misure di spostamento superficiale ottenute mediante elaborazione delle immagini *radar* satellitari recenti. In particolare, sono stati analizzati ed interpretati dati *radar* satellitari interferometrici della costellazione Sentinel-1, aggiornati alla data dell'ultima acquisizione disponibile alla data di stesura del rapporto.

Gli *stack* interferometrici, elaborati con tecnica SqueeSAR (Ferretti et al., 2011, per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 7), sono composti da 219 immagini in orbita ascendente che coprono l'intervallo temporale dal 12 dicembre 2014 al 23 ottobre 2019 e da 215 immagini in orbita discendente che coprono l'intervallo temporale dal 22 marzo 2015 al 27 ottobre 2019. Le specifiche tecniche dei dati acquisiti ed analizzati sono riportate in Tabella 12.

Tabella 12 - Specifiche dei *dataset* utilizzati.

<i>Dataset</i>	Satellite	Geometria	Numero di immagini	Periodo monitorato	Angolo di vista (°)
1	Sentinel-1	Ascendente	219	12/12/2014 - 23/10/2019	36,3°
2	Sentinel-1	Discendente	215	22/03/2015 - 27/10/2019	37,2°

Le velocità medie dei dati PS, calcolate sull'intero intervallo di acquisizione, sull'abitato di Pian dei Sisi in orbita ascendente oscillano intorno a valori di circa -3.4 mm/anno (0.3 mm/mese). Tale considerazione è valida anche per i punti nell'intorno dell'invaso ENEL (Figura 37). Si tratta di un movimento a componente orizzontale predominante lungo un versante con esposizione verso i quadranti orientale, compatibile con la presenza di una frana a cinematica lenta che, come riportato dalle cartografie ufficiali del PAI (Figura 23) e della Regione Toscana (Figura 24), interessa l'area compresa tra Cioppeto e Pian dei Sisi.

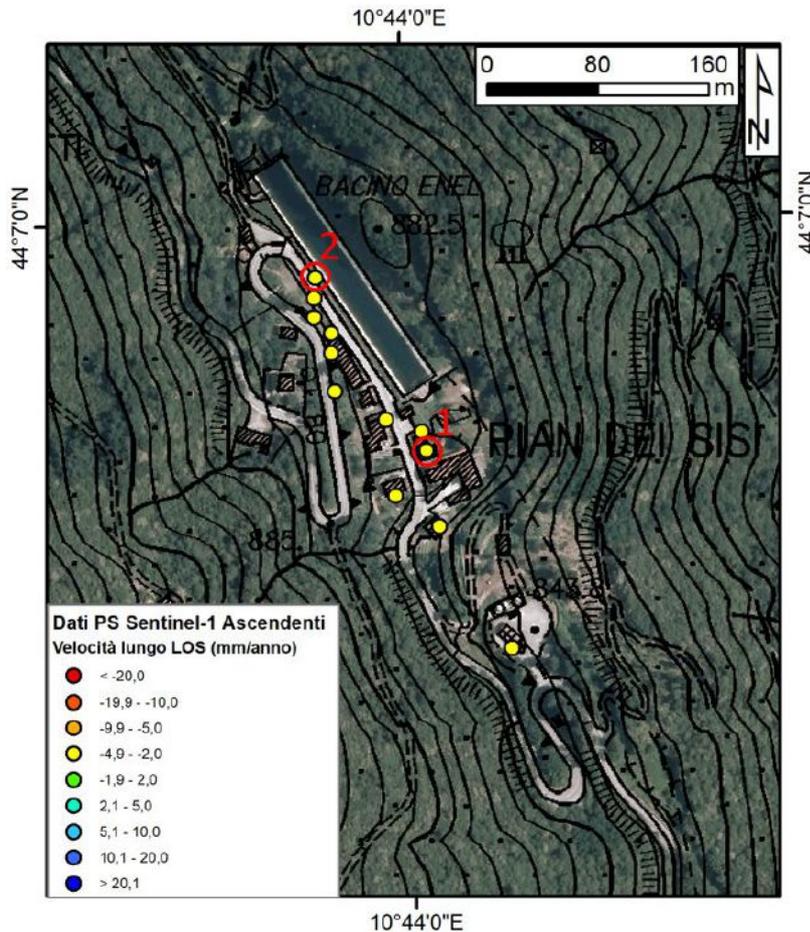
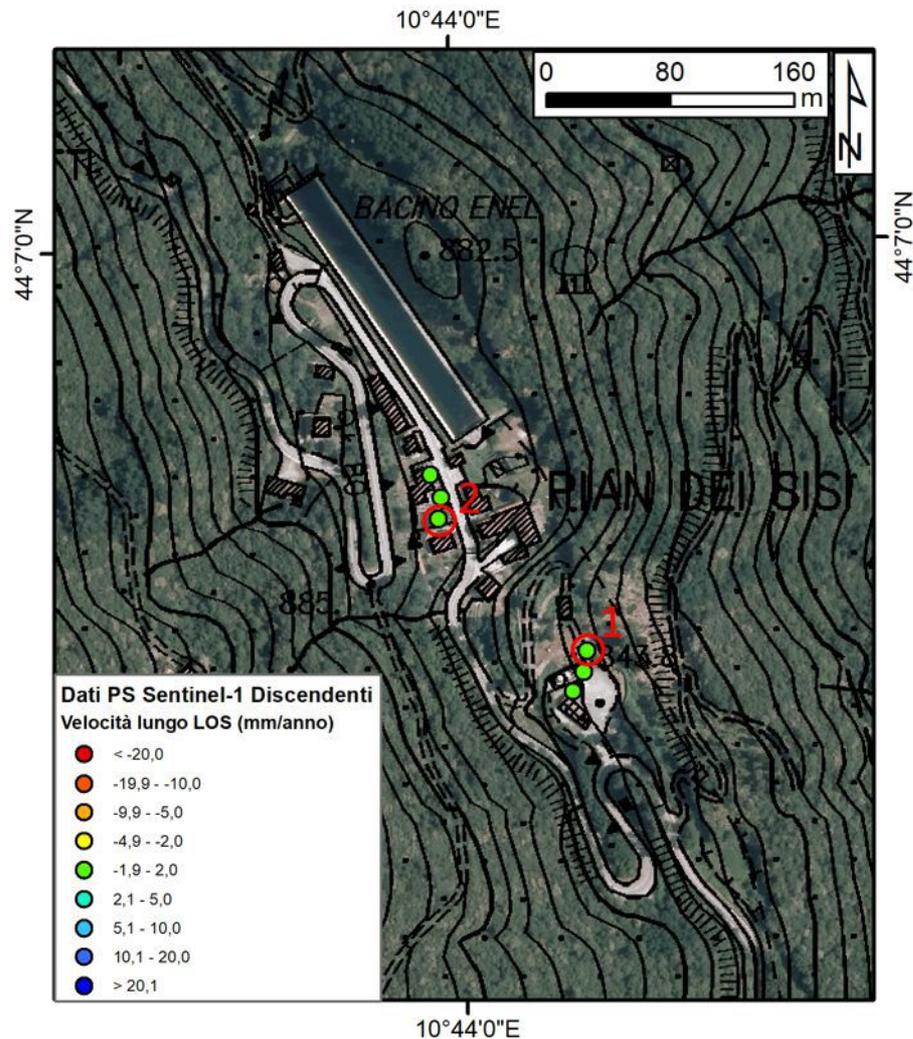


Figura 37 - Dati Sentinel-1 ascendenti, aggiornati al 23 ottobre 2019 sull'abitato di Pian dei Sisi. Cerchiati in rosso i dati PS utilizzati per illustrare le serie temporali di Figura 39 e Figura 40..

Le velocità medie dei dati PS, calcolate sull'intero intervallo di acquisizione, sull'abitato di Pian dei Sisi in orbita discendente oscillano intorno a valori di 1.6 mm/anno (0.1 mm/mese) in orbita discendente (Figura 38).



**Figura 38 - Dati Sentinel-1 discendenti, aggiornati al 27 ottobre 2019 sull'abitato di Pian dei Sisi. Cerchiati in rosso i dati PS utilizzato per illustrare le serie temporali di Figura 41 e Figura 42.**

Sono state analizzate le serie temporali di deformazione dei punti di misura nell'area di interesse per ricostruire l'andamento nel tempo degli spostamenti pregressi fino alla data dell'ultima acquisizione satellitare.

In particolare, le serie temporali sono aggiornate all'ultima acquisizione disponibile del satellite Sentinel-1, ossia al 23 ottobre 2019 in orbita ascendente ed al 27 ottobre 2019 in orbita discendente.

Le serie temporali dei dati PS ascendenti sono state estratte nei due settori di maggior interesse nell'area in esame:

- punto 1, in corrispondenza degli edifici prospicienti la frana e che hanno registrato lesioni riscontrate durante i sopralluoghi;
- punto 2, in corrispondenza della Strada Statale 12 che costeggia il muro perimetrale dell'invaso di proprietà ENEL

La serie temporale relativa al punto 1 (Figura 39) mostra un andamento lineare, caratterizzato da spostamenti in allontanamento dal satellite e non ha mostrato variazioni significative nei giorni precedenti all'innescò della frana rispetto all'andamento pregresso che si è mantenuto costante su valori di 3.5 mm/anno (0.3 mm/mese). Ciò è stato verificato anche per quelli edifici (3 e 4) che hanno riscontrato lesioni

post-evento. Le analisi effettuate hanno pertanto escluso la presenza di significativi segnali precursori dell'innescò della frana.

La serie temporale relativa al punto 1 mostra una lieve accelerazione a partire dalla fine di febbraio 2018, con velocità che si sono attestate intorno a 1.7 mm/mese, rispetto agli 0.3 mm/mese nel periodo precedente.

A partire da maggio 2018 si registra una decelerazione del movimento con velocità che si attestano su valori medi di circa 0.5 mm/mese, di poco superiori rispetto alla velocità media prima dell'evento del 19 febbraio. Le velocità post-evento registrate dal sistema satellitare sono in accordo con quanto evidenziato dalle letture inclinometriche eseguite in corrispondenza degli edifici 3 e 4.

In generale, altre leggere oscillazioni all'interno della serie temporale sono riferibili alla normale variabilità del dato *radar*, il quale presenta un certo grado di incertezza intrinseca sulle singole misure di deformazione (circa  $\pm 2-3$  mm).

La serie temporale estratta in prossimità dell'invaso, relativa al punto 2 (Figura 40), mostra un andamento analogo a quella del punto 1, caratterizzato da un andamento lineare nel tempo con una lieve accelerazione a partire da fine febbraio 2018 e, negli ultimi mesi di acquisizioni, velocità costanti con variazioni entro la sensibilità della tecnica di analisi interferometrica.

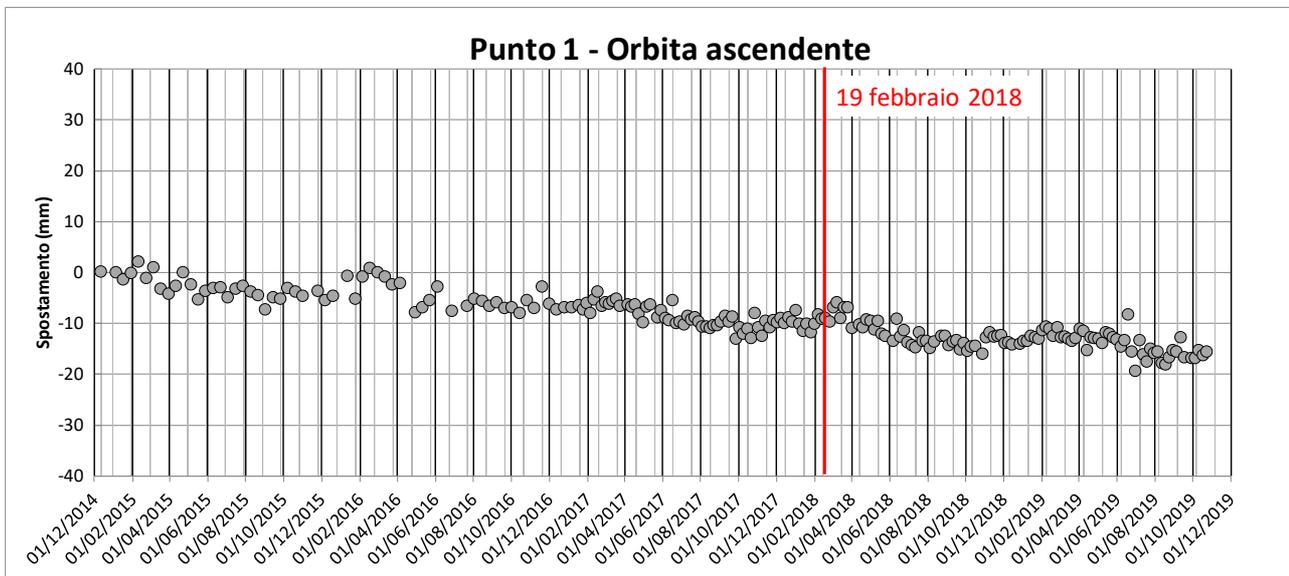


Figura 39 - Serie temporale in orbita ascendente riferita al punto 1 di Figura 37.

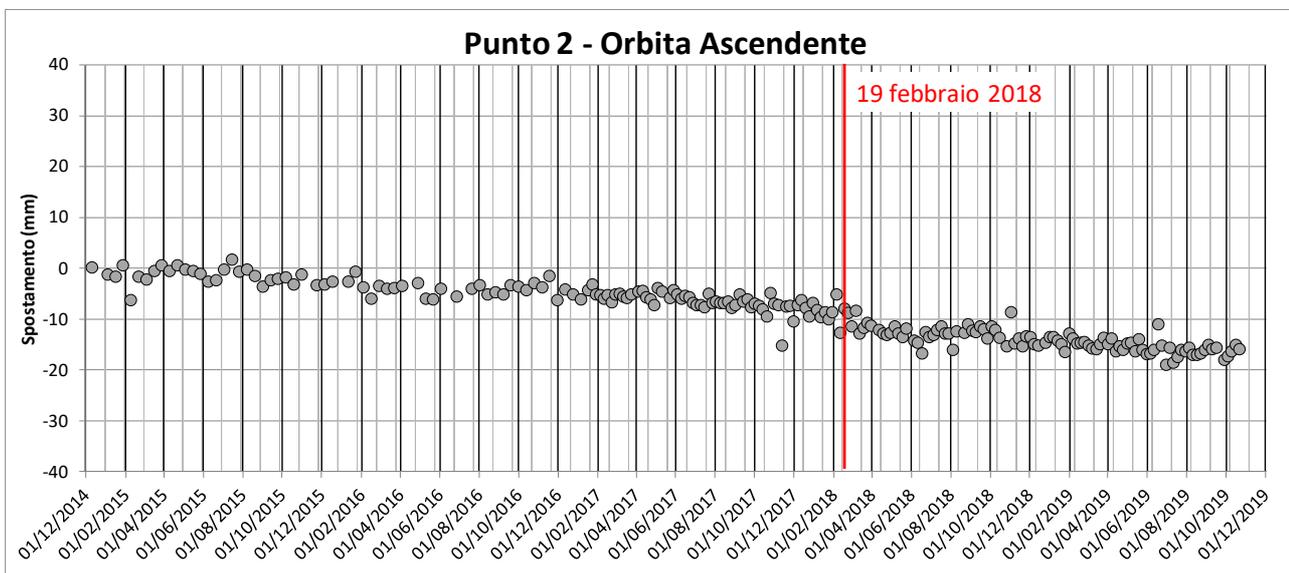


Figura 40 - Serie temporale in orbita ascendente riferita al punto 2 di Figura 37.

Per i dati PS discendenti sono state estratte due serie temporali:

- punto 1, in corrispondenza del piazzale a S della condotta forzata ENEL;
- punto 2, in corrispondenza degli edifici lungo la Strada Statale 12 a S dell'invaso di proprietà ENEL.

La serie temporale relativa al punto 1 (Figura 41) presenta un andamento lineare e costante e non mostra alcuna accelerazione significativa in tutto il periodo di osservazione.

La serie temporale relativa al punto 2 (Figura 42) è caratterizzata da una sostanziale stabilità, con spostamenti che oscillano intorno al valore zero in tutto il periodo di osservazione. Queste misure rientrano in un intervallo di velocità molto ristretto, pari a qualche millimetro superiore alla stabilità, corrispondente alla sensibilità della tecnica di analisi interferometrica.

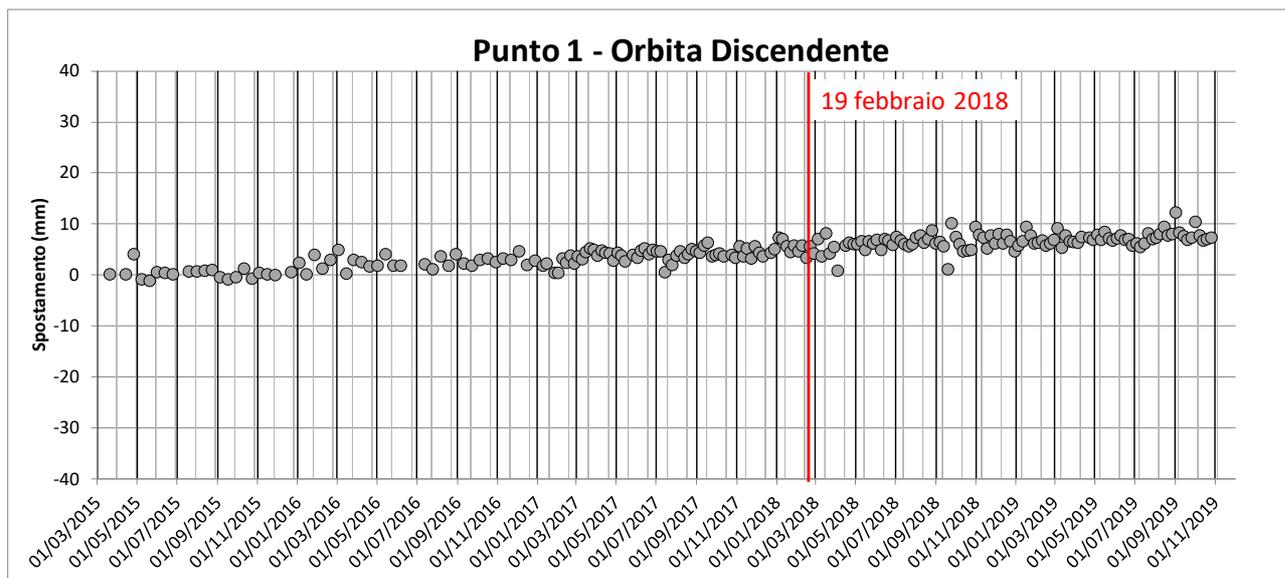


Figura 41 - Serie temporale in orbita discendente riferita al punto 1 di Figura 38.

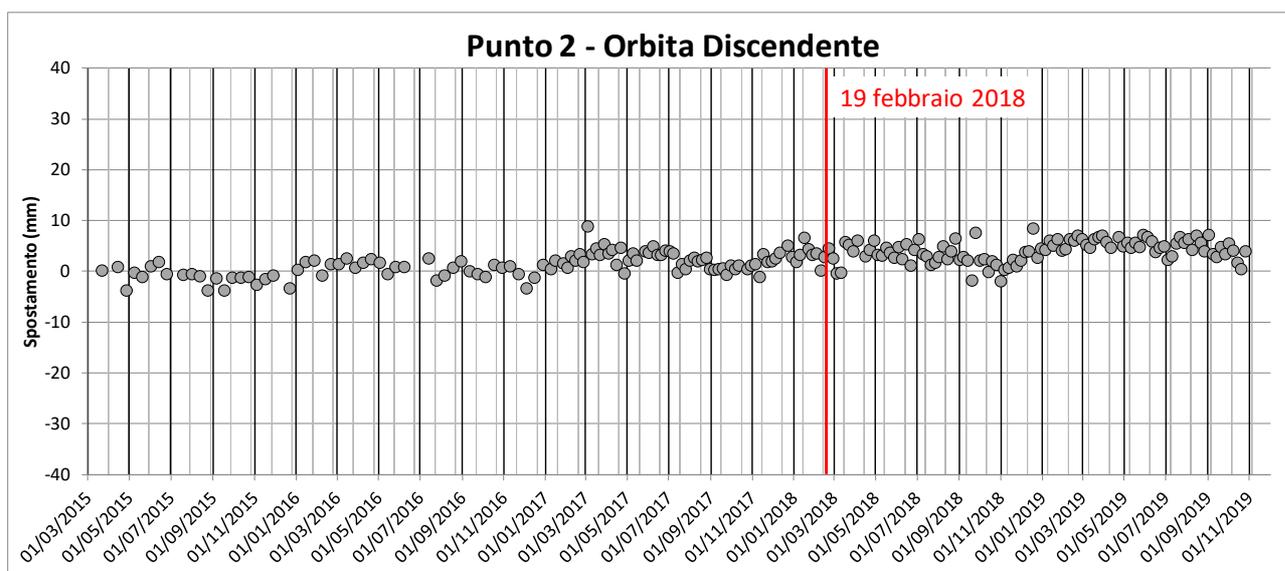


Figura 42 - Serie temporale in orbita discendente riferita al punto 2 di Figura 38.

In sintesi, l'analisi delle serie temporali di deformazione per i punti di interesse sull'abitato di Pian dei Sisi in geometria ascendente e discendente non ha mostrato variazioni significative per tutto il periodo analizzato e mostra attualmente una situazione di generale stabilità. Le analisi effettuate hanno pertanto escluso la presenza di significativi segnali precursori dell'innesco della frana.

## 10 Indagini geofisiche

La campagna di misure geofisiche (tomografie elettriche 2D e misure di *noise* sismico) è stata condotta in data 17 luglio 2019 dal personale del DST-UNIFI, affiancato dal personale del Genio Civile Toscana Nord. La campagna di misure geofisiche è stata effettuata a valle della vasca di carico ENEL con lo scopo di caratterizzare gli orizzonti superficiali e di individuare eventuali discontinuità ascrivibili alla presenza del *bedrock* e a variazioni nelle caratteristiche degli strati più superficiali. Maggiori dettagli sulla teoria dei metodi geoelettrici e sismici impiegati per caratterizzare il sottosuolo nell'area di pian dei Sisi a valle della vasca di carico ENEL sono riportati nell'Allegato 8.

### 10.1 Tomografie elettriche 2D

Sono stati eseguiti 2 stendimenti, uno trasversale al pendio (L1) ed uno longitudinale (T1) come indicato in Figura 43. Per entrambi sono stati impiegati 48 elettrodi posti con interdistanza pari ad 1 m in funzione della disponibilità di spazio, e le misure sono state acquisite mediante strumentazione *Syscal-Pro Switch48* con configurazione polo-dipolo, dipolo-dipolo.

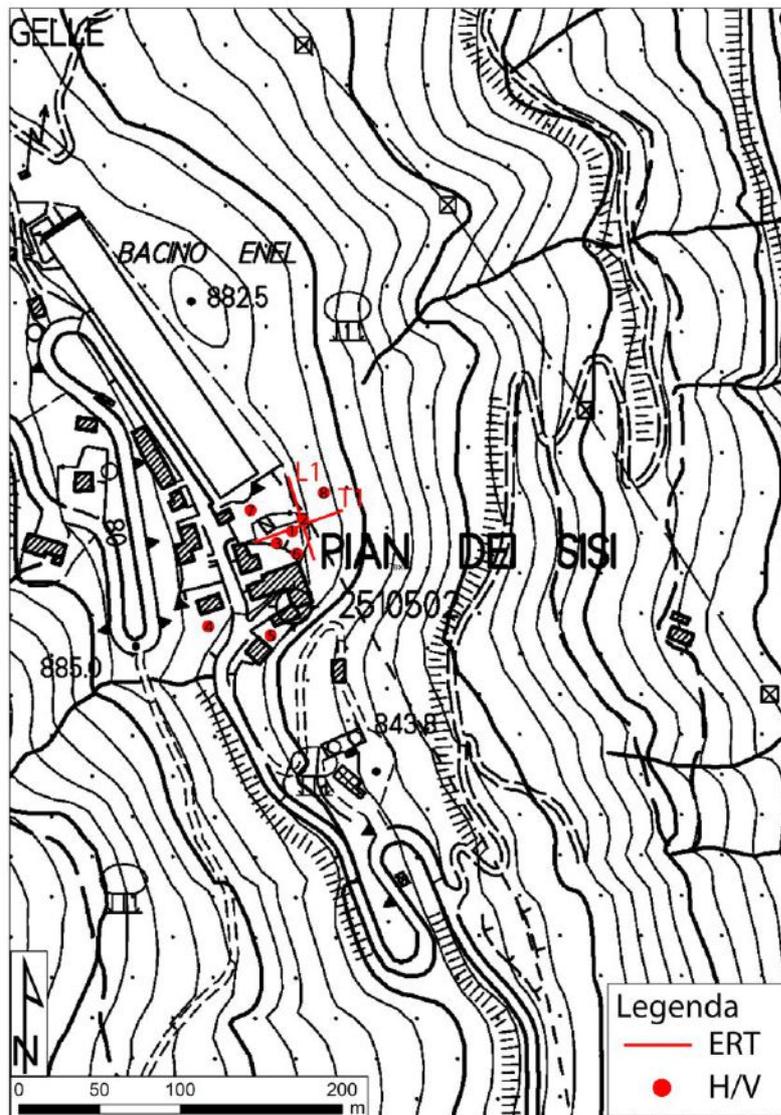
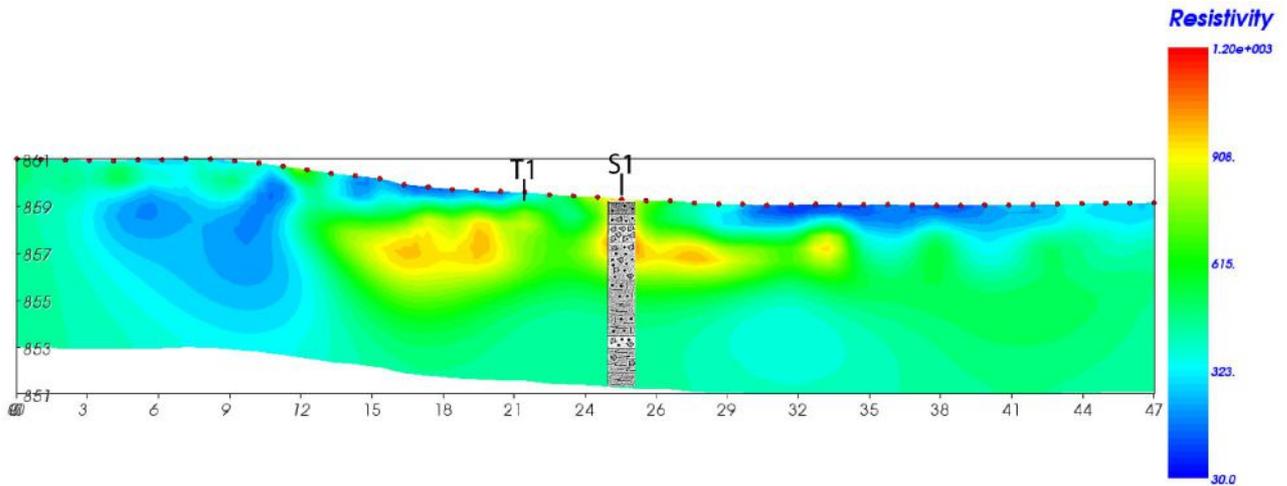
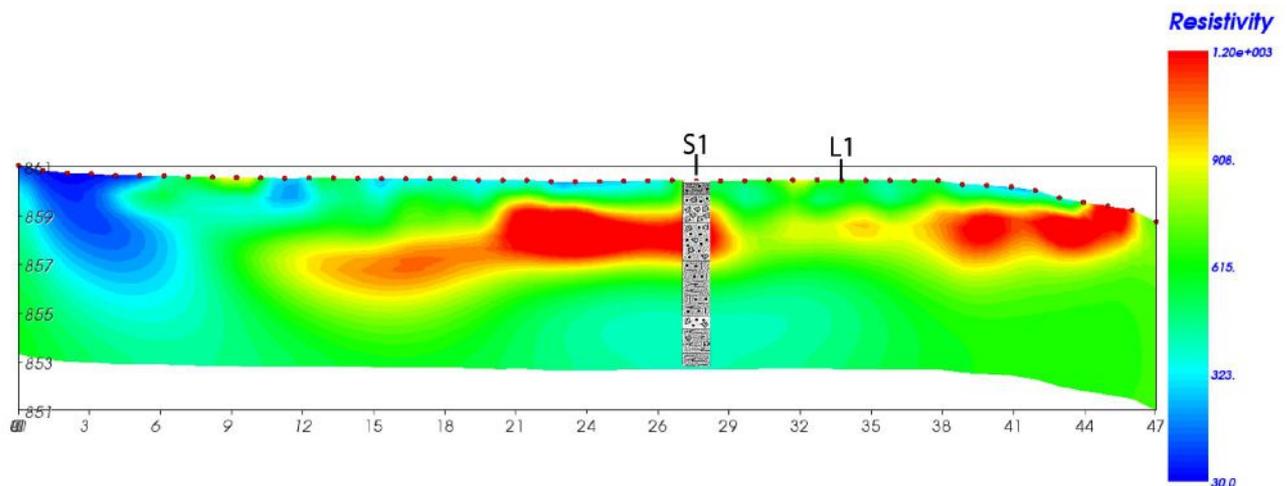


Figura 43 – Localizzazione in pianta su CTR delle tomografie geoelettriche (ERT) e delle misure di *noise* sismico (H/V) realizzate nell'area di Pian dei Sisi.

I dati acquisiti in campagna sono stati elaborati con il *software ERTLab*, distribuito dalla *GeostudiAstier*. Tale software permette di eseguire l'inversione dei dati di resistività apparente a partire da un modello di sottosuolo a resistività omogenea, producendo un modello 2D di resistività reale del sottosuolo (Figura 44 e Figura 45). Solitamente il modello di partenza ha un valore di resistività pari al valore medio delle resistività apparenti misurate, ma può anche essere imposto dall'utente.



**Figura 44 – Modello di resistività reale del sottosuolo per la sezione L1 (l'asse x è in m mentre la profondità è la quota reale del terreno espressa in m s.l.m.). Per il sondaggio di faccia riferito al Paragrafo 10.3.**



**Figura 45 – Modello di resistività reale del sottosuolo per la sezione T1 (l'asse x è in m mentre la profondità è la quota reale del terreno espressa in m s.l.m.). Per il sondaggio di faccia riferito al Paragrafo 10.3.**

## 10.2 Misure di microtremore sismico

Sono state eseguite 8 misure di *noise* sismico ambientale localizzate come in Figura 43 al fine di caratterizzare gli spessori degli strati. Tali misure sono state impiegate anche per vincolare meglio le informazioni derivanti dalle prospezioni geoelettriche seppur presenti due sondaggi nell'area di interesse. Le tracce sono state acquisite con Tromino (uno strumento prodotto dalla MoHo srl, dal volume 1 dm<sup>3</sup> e peso < 1kg, a nove canali – di cui tre velocimetri saturazione  $\pm 1.2$  mm/s in banda, tre velocimetri con saturazione  $\pm 50$  mm/s in banda e tre accelerometri – che può lavorare in una banda di frequenza di 0.1 – 200 Hz) per 20 minuti con una frequenza di campionamento di 256 Hz e sono state elaborate con il *software* Grilla.

Di seguito riportiamo solo i risultati della misura eseguita vicino al sondaggio S1:

- la curva media H/V (linea rossa) e la curva sperimentale (linea blu) derivante dal modello del sottosuolo ottenuto vincolando la velocità del primo strato con dati di letteratura;

- gli spettri delle tre componenti;
- il grafico della stabilità temporale della curva H/V durante l'intero periodo di misura;
- il grafico della direzionalità del segnale sismico registrato.

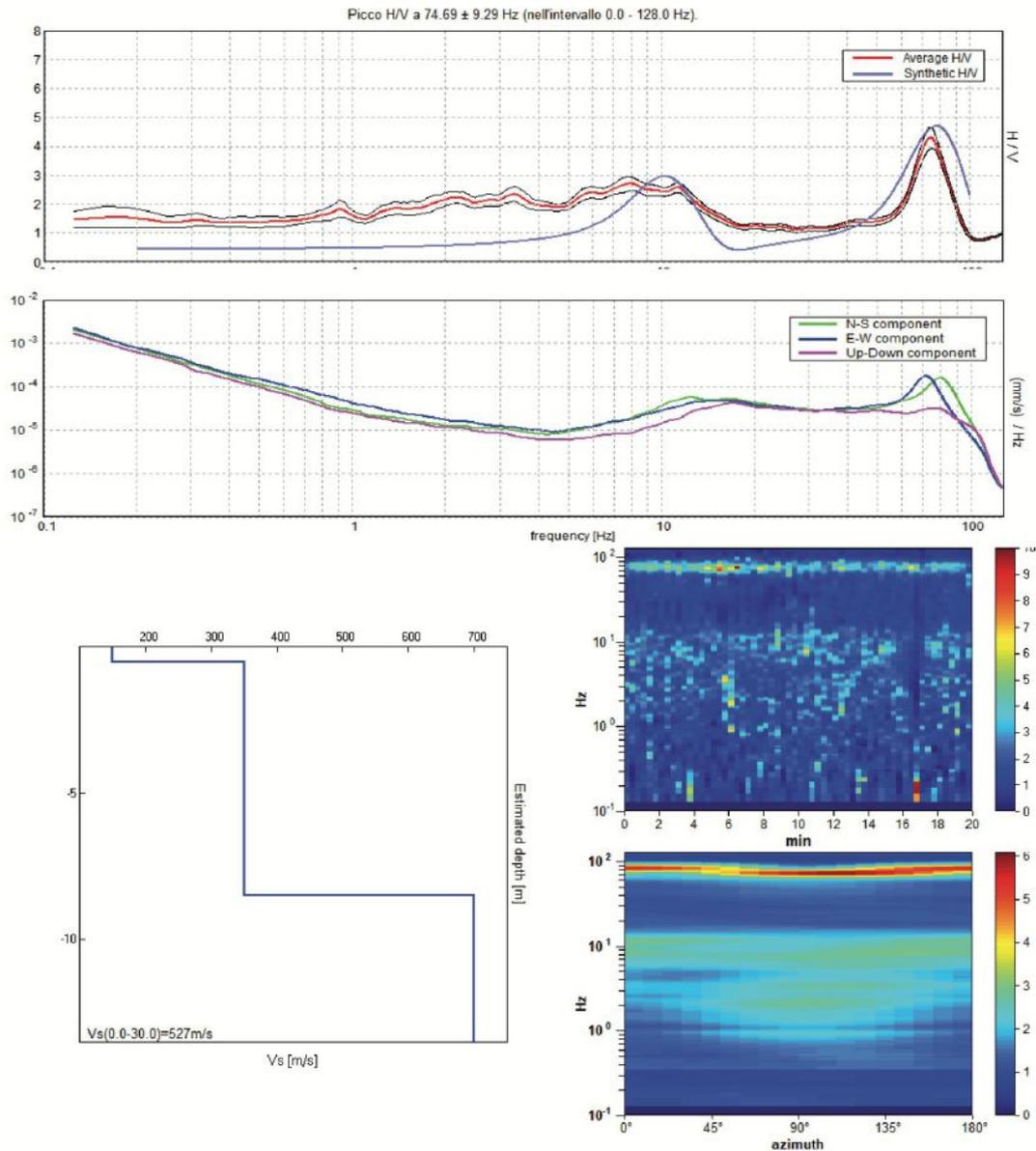


Figura 46 – Sezioni di impedenza acustica ottenuta interpolando le misure a stazione singola del *noise* ambientale per il sito MUL. L'asse verticale indica la profondità rispetto al piano campagna.

### 10.3 Interpretazione dei risultati

I modelli di resistività reale 2D (Figura 44 e Figura 45) sono stati interpretati e tarati sulla base dei dati di sottosuolo disponibili (Figura 47), congiuntamente ai risultati della misura di *noise* sismico (Figura 46).

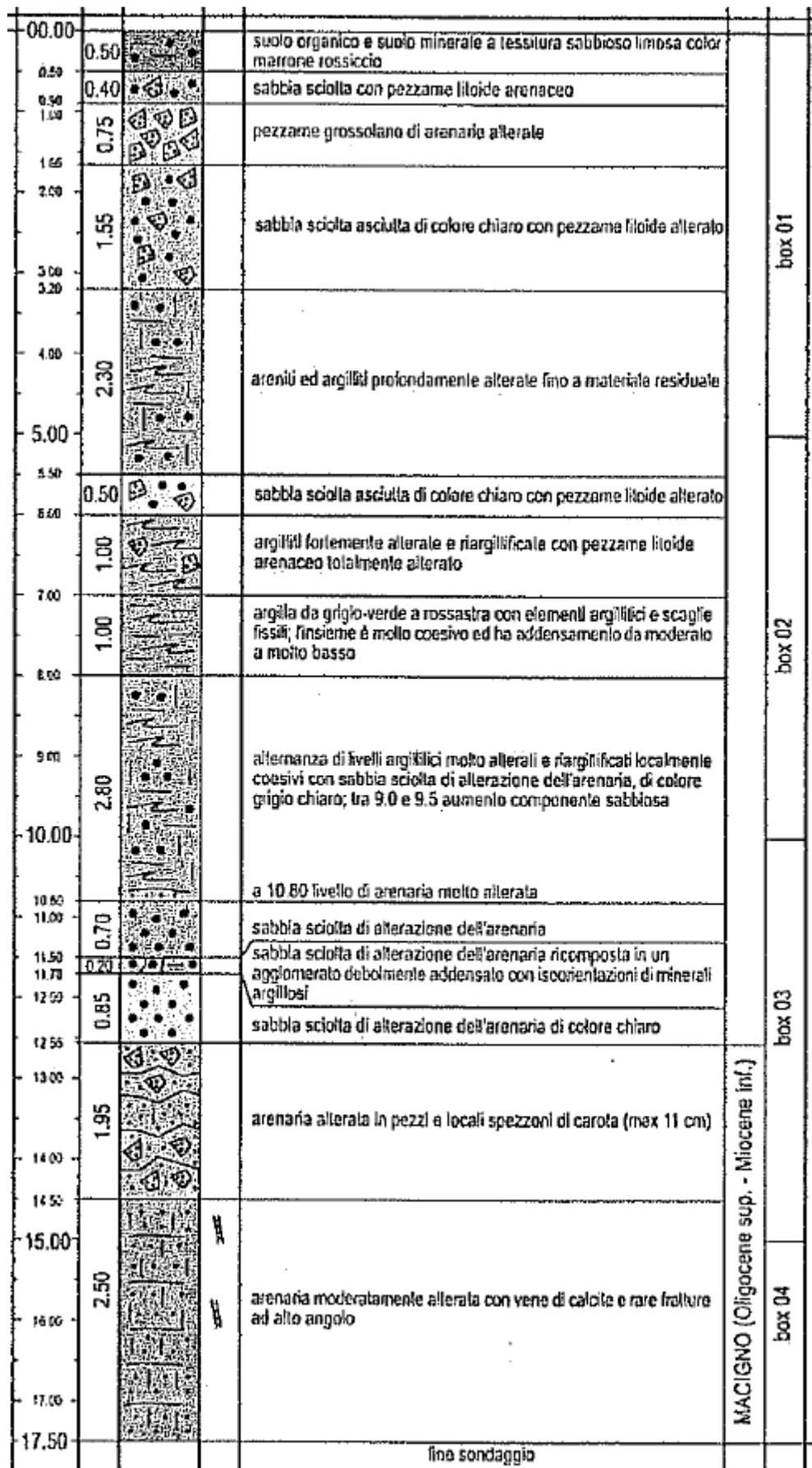


Figura 47 – Estratto dal sondaggio S1 effettuato a Pian dei Sisi a valle della vasca di carico. Fonte: Perizia CTPM Antolini.

I modelli di resistività reale del sottosuolo lungo la sezione L1 e T1 sono riportati in Figura 44 e Figura 45, rispettivamente. Osservando che valori di resistività che non sono mai superiori ai 1200  $\Omega\text{m}$ , si può affermare che entrambe le indagini, avendo raggiunto una profondità massima di 8.0 m non hanno intercettato il *bedrock* alterato che secondo il sondaggio si trova infatti a partire dai 12.0 -12.55 m di profondità. Il *bedrock*, che in questa zona è costituito da arenaria (Formazione del Macigno), ha valori di resistività che possono superare anche i 2000  $\Omega\text{m}$ .

I depositi caratterizzati da ghiaie o ghiaie in matrice sabbiosa, se saturi hanno una resistività che può variare tra 150  $\Omega\text{m}$  e 300  $\Omega\text{m}$ , altrimenti possono raggiungere valori superiori ai 1000  $\Omega\text{m}$  come le sabbie asciutte. I depositi costituiti da limi argillosi hanno una resistività che varia da 30  $\Omega\text{m}$  a 200  $\Omega\text{m}$ , così come le sabbie più o meno limose.

Il materiale rappresentato dai modelli di resistività lungo le sezioni L1 e T1 è ascrivibile alle terreni di copertura derivanti dalla disgregazione e dall'alterazione del Macigno. Si tratta di materiale incoerente, formato da frammenti litoidi arenacei in una matrice sabbiosa con una frazione fine rappresentata da limo. I modelli di resistività restituiscono un terreno più o meno uniforme (area in verde) i cui valori di resistività sono coincidenti con quelli di una copertura che granulometricamente è una sabbia secca/asciutta. All'interno di questo stato più o meno uniforme sono presenti due aree una a più bassa ed una a più alta resistività: la prima può essere dovuta alla presenza di materiale più umido, l'altra alla presenza di "*pezzame grossolano di arenaria*" come individuato dal sondaggio S1 tra 1 e 3 metri di profondità.

L'eventuale presenza, in questa zona, di terreno di riporto (solitamente uno strato areato e ben drenato), derivante dallo scavo della vasca di carico ENEL agli inizi del Novecento, avrebbe restituito valori di resistività piuttosto elevati, solitamente nel range 200  $\Omega\text{m}$  a 1700  $\Omega\text{m}$ . È altresì vero che tali valori possono diminuire molto (anche di due ordini di grandezza fino a 30  $\Omega\text{m}$  -100  $\Omega\text{m}$ ) in funzione delle condizioni di umidità contenuta al loro interno: se ci sono state forti precipitazioni nei giorni precedenti alle misure, infatti, il contenuto d'acqua dello strato superficiale può diminuire la resistività, in funzione della capacità drenante del terreno. Appare opportuno evidenziare come un terreno di riporto degli inizi del Novecento, sia esso derivante dalla movimentazione di materiale di copertura sia dallo scavo di roccia più o meno fratturata, può avere caratteristiche geoelettriche simili al detrito di versante.

Nemmeno l'indagine H/V ha individuato il *bedrock*, che avrebbe creato un forte contrasto di impedenza acustica tra il materiale molto fratturato che costituisce il *bedrock* ed il terreno di riporto sovrastante.

Per quanto riguarda la velocità delle onde sismiche, i terreni presenti nell'area di studio presentano un aumento della velocità di propagazione delle onde con la profondità piuttosto lento e costante (ampiezza media della curva H/V intorno a 3 con assenza di picchi), probabilmente dovuto a passaggi stratigrafici graduali fra i vari litotipi, che non presentano contrasti di impedenza acustica particolarmente importanti e che finiscono con l'inficiare la qualità del dato finale.

## 11 Modello geologico ed idrogeologico del versante

### 11.1 Sezione geologico-tecnica

Al fine di caratterizzare il settore di versante interessato dalla frana del 19 febbraio 2018, ne è stato ricostruito il modello geologico e idrogeologico attraverso:

- 1) le evidenze emerse durante i vari sopralluoghi effettuati lungo tutta la frana, dalla zona di alimentazione fino al Torrente Lima;
- 2) l'interpretazione e l'analisi delle indagini geofisiche effettuate dagli scriventi e dei sondaggi riportati nella relazione preliminare di progresso del 16 giugno 2018 a firma del Dott. Geol. Paride Antolini;
- 3) la caratterizzazione geotecnica ed idrogeologica dei terreni affioranti effettuata mediante prove *in situ* e in laboratorio.

È stata quindi ricostruita la sezione geologico-tecnica AB, la cui traccia è riportata nella planimetria di Figura 48: Essa copre la porzione di versante interessata dalla frana in esame lungo la direzione di innesco della frana, ovvero lungo la direzione di massima pendenza del versante.

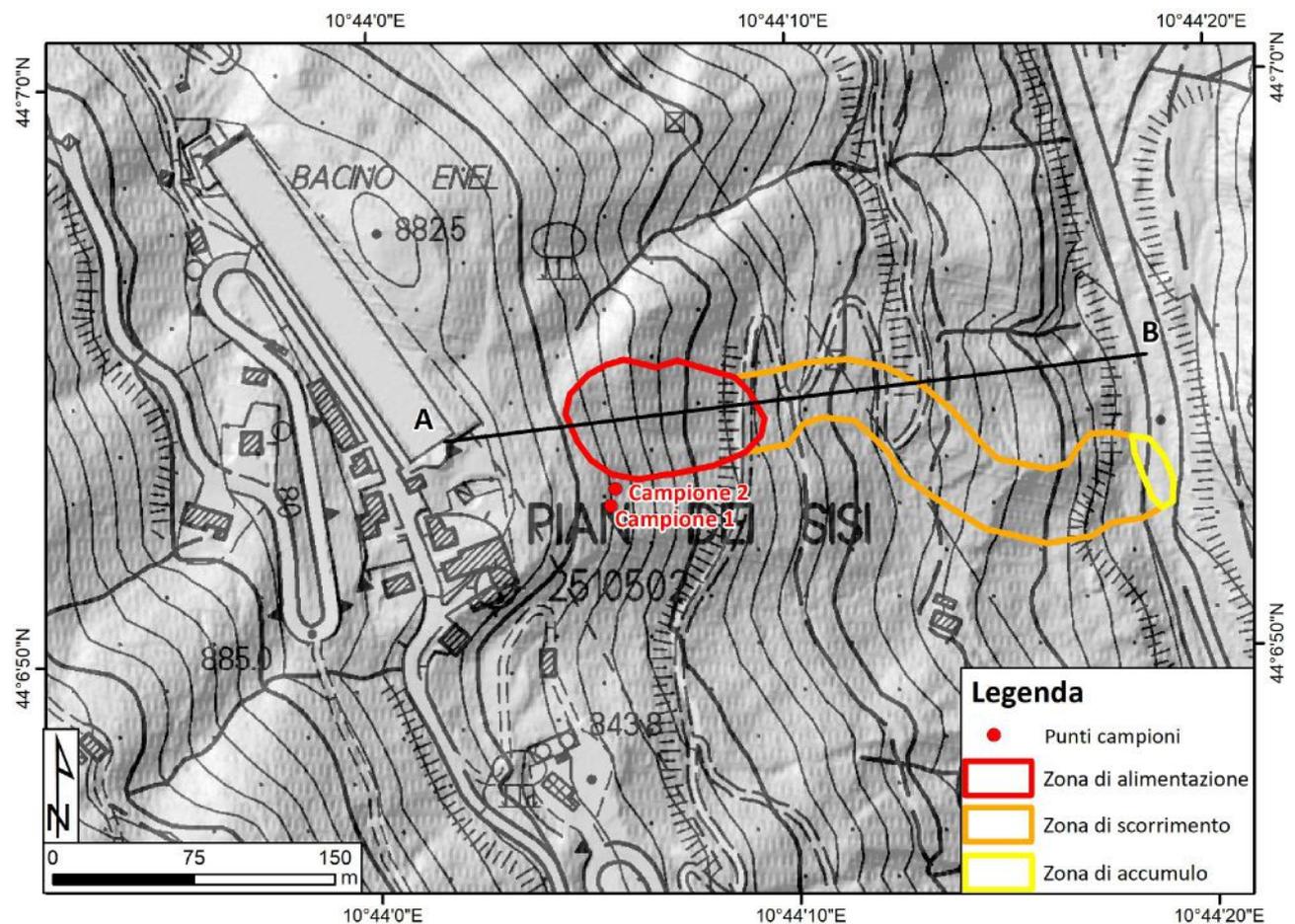


Figura 48: Ubicazione della traccia di sezione AB per la quale è stato ricostruito il modello geologico tecnico e dei punti di indagine e di campionamento.

Sulla base dei dati analizzati ed in particolare delle sezioni sismiche, il modello geologico e stratigrafico del versante di Pian dei Sisi può essere esemplificato, procedendo dal piano campagna in profondità, con i seguenti 2 livelli di materiale (Figura 49):

- 1) **Livello 1:** detrito superficiale di alterazione dei sottostanti livelli, costituito principalmente da sabbia e limo, con spessore variabile fra 3 m nella parte a monte della frana e i 12.5 m in prossimità dei sondaggi S1 e S2 a valle della vasca di carico ENEL;
- 2) **Livello 2:** substrato roccioso (arenarie torbiditiche) alterato e non alterato con una profondità massima di circa 12.5 m dal piano di campagna; rocce appartenenti a questo livello sono messe a nudo solo nella zona di alimentazione in seguito alla frana che ha rimosso le sovrastanti coperture (Figura 49).

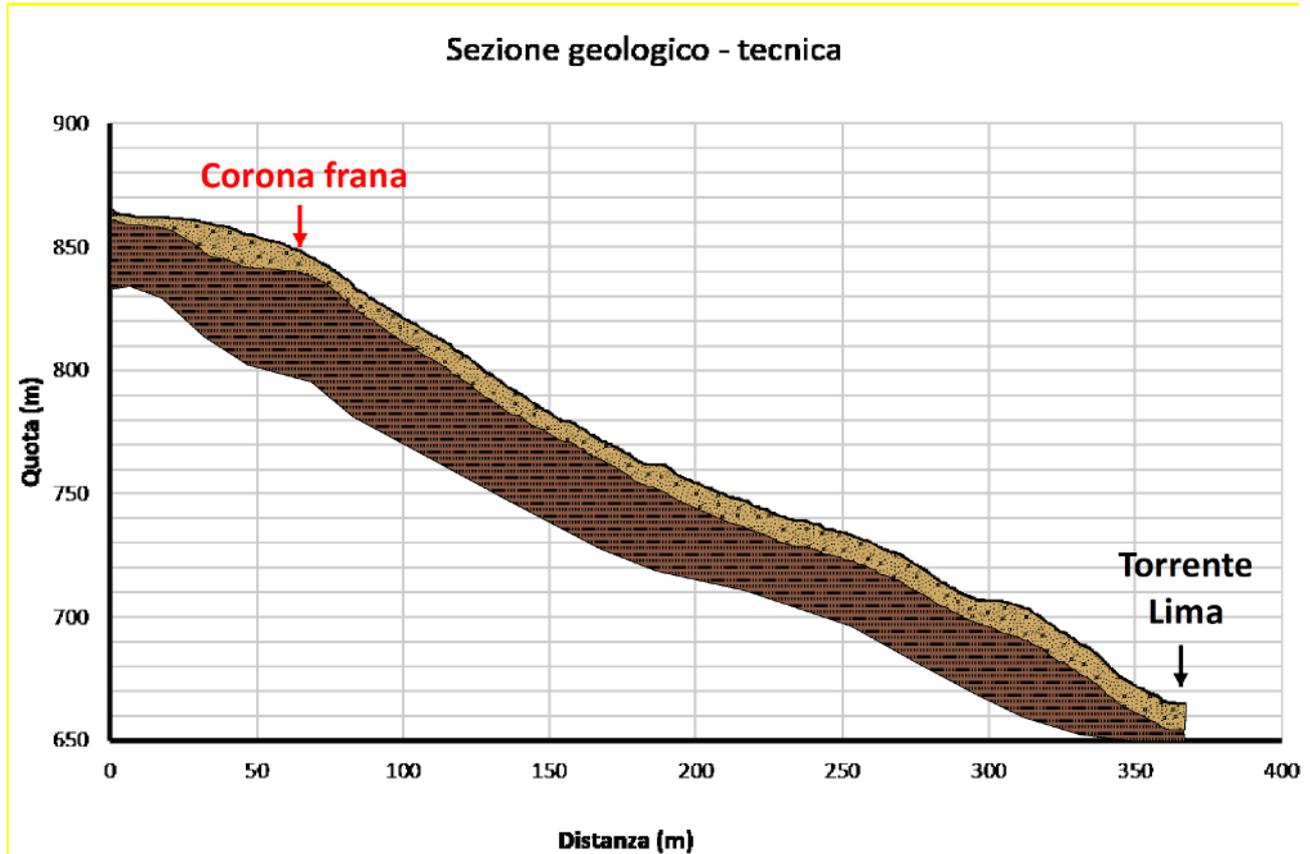


Figura 49 - Modello geologico del versante lungo la sezione AB (si veda la Figura 48 per l'ubicazione). Il profilo topografico è stato ricostruito dai dati Lidar con passo 1x1 metro messi a disposizione dalla Regione Toscana.

## 11.2 Caratterizzazione geotecnica dei materiali coinvolti nel fenomeno

Allo scopo di definire le caratteristiche idrogeologiche e geotecniche dei materiali coinvolti dal movimento franoso indagato, sono state condotte prove *in situ* ed analisi di laboratorio su campioni prelevati contestualmente alle prove di campagna in occasione del sopralluogo del 17 luglio 2019.

Nello specifico sono state effettuate le seguenti prove ed analisi:

- determinazione della permeabilità satura ( $k_s$ );
- analisi granulometrica e determinazione delle principali proprietà indice;
- determinazioni dei limiti di Atterberg;
- determinazione dei parametri di resistenza al taglio ( $\phi'$  e  $c'$ ).

Le misurazioni *in situ* ed il prelievo di campioni sono stati realizzati in due punti diversi posti alla destra dei volumi di terreno franati, all'altezza del settore superiore della zona di alimentazione della frana (Figura 48). Nel corso dei sopralluoghi effettuati è stata rilevata un'elevata omogeneità ed uniformità della copertura detritica dell'area indagata. Inoltre, i punti di misura e prelievo campioni si trovano ad una distanza massima di circa 15 metri dal limite destro dell'area interessata della frana. Si ritiene pertanto che i punti selezionati possano garantire una caratterizzazione geotecnica sufficientemente rappresentativa dei materiali franati.

### 11.2.1 Analisi granulometrica e proprietà indici

L'analisi granulometrica dei due campioni è stata eseguita tramite setacciatura umida in conformità agli *standard* internazionali ASTM D 2217, pertanto passando 200 grammi di campione essiccato in forno attraverso una serie di setacci a maglie con lumi decrescenti (di dimensioni *standard*) tramite l'ausilio di acqua corrente e pesando il materiale trattenuto da ogni setaccio dopo opportuna essiccazione.

Per determinare la distribuzione granulometrica delle frazioni fini è stato applicato il metodo della densimetria (sedimentazione di 40 grammi di campione passante il setaccio n°200, caratterizzato da lumi della dimensione di 0,075 mm).

Le prove di setacciatura e di sedimentazione nell'insieme restituiscono le curve granulometriche rappresentate in Allegato 9. I campioni 1 e 2 sono classificabili come "sabbia con ghiaia debolmente limosa" e "sabbia con ghiaia limosa", rispettivamente, secondo la nomenclatura AGI (1977), (Tabella 13).

Ulteriori analisi di laboratorio hanno permesso di valutare le proprietà indici fondamentali dei materiali campionati.

Nello specifico sono stati determinati:

- peso di volume totale ( $\gamma$ );
- peso di volume secco ( $\gamma_d$ );
- peso di volume saturo ( $\gamma_{sat}$ );
- contenuto d'acqua ( $w$ );
- indice dei vuoti ( $e$ );
- porosità ( $n$ ).

I campioni indagati sono caratterizzati dai valori delle proprietà indici riportati in Tabella 13. Maggiori dettagli sulle proprietà indici dei campioni analizzati sono riportati nell'Allegato 10.

### 11.2.2 Determinazione dei parametri di resistenza al taglio ( $\phi'$ e $c'$ )

I parametri di resistenza al taglio (angolo di attrito efficace  $\phi'$  e coesione efficace  $c'$ ) dei campioni sono stati determinati mediante prove di taglio diretto utilizzando l'apparecchio di taglio di Casagrande, applicando le procedure standardizzate dalle norme ASTM D3080-90.

La prima fase delle prove di taglio consiste nella consolidazione dei materiali della durata di circa 24 ore, durante la quale sono applicati tre carichi normali di diversa entità ad altrettanti provini realizzati con materiale prelevato dallo stesso campione.

Tramite la fase di consolidazione si ottiene la curva del cedimento in funzione del tempo necessaria a determinare la velocità di deformazione da applicare durante la successiva fase di taglio.

Tramite la fase di taglio, durante la quale si applicano tre differenti carichi normali, si ottiene la curva sforzo-deformazione; il valore massimo raggiunto dallo sforzo rappresenta la resistenza al taglio del materiale indagato. I valori di resistenza massima sono diagrammati in un grafico  $\tau$ - $\sigma'$  in modo da ricavare il criterio di rottura del materiale e, quindi, i parametri di resistenza al taglio  $c'$  e  $\phi'$ .

Le fasi di taglio sui campioni indagati sono state realizzate utilizzando valori di carico normale di 50, 80, 100 kPa.

Le prove di taglio hanno restituito valori di angolo di attrito ( $\phi'$ ) e coesione ( $c'$ ) di 35.5° e 7.4 kPa rispettivamente nel caso del campione 1; nel caso del campione 2 sono stati invece riscontrati valori di 34.3 per l'angolo di attrito ( $\phi'$ ) e 13.3 di coesione ( $c'$ ) (Tabella 13). Maggiori dettagli sulle prove di laboratorio effettuate sui campioni raccolti a Pian dei Sisi sono riportati nell'Allegato 9.

		<b>Campione 1</b> <b>Sabbia con ghiaia</b> <b>debolmente limosa</b>	<b>Campione 2</b> <b>Sabbia con ghiaia</b> <b>limosa</b>
<b>Analisi granulometrica</b>	Ghiaia (%)	38.7	41.7
	Sabbia (%)	47.3	40.1
	Limo (%)	13.0	16.7
	Argilla (%)	1.1	1.5
	Classificazione USCS	SM	SM
<b>Proprietà indici</b>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.5	16.7
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.6	11.3
	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.3	16.9
	w (%)	24.8	24.7
	e (-)	0.91	1.30
	n (%)	47.6	56.5
<b>Resistenza al taglio</b>	$\phi'$ (°)	35.5	34.3
	$c'$ (kPa)	7.4	13.3
<b>Permeabilità satura</b>	$k_s$ (m/s)	$4.70 \times 10^{-6}$	$7.01 \times 10^{-6}$

**Tabella 13 - Caratterizzazione geotecnica dei campioni di terreno raccolti a Pian dei Sisi.**

### 11.2.3 Determinazione della permeabilità satura ( $K_s$ ) attraverso prove *in situ*

La valutazione della permeabilità satura è stata eseguita *in situ* nei due punti di campionamento (Figura 48) tramite un dispositivo portatile per misurazioni della permeabilità a carico costante (*Amoozmeter* o CCHP, *Compact Constant Head Permeameter*, Amoozegar, 1992).

Il CCHP è uno strumento che consente di misurare *in situ* la conducibilità idraulica satura ( $K_{sat}$ ) ad una determinata profondità dal piano di campagna mediante la predisposizione di un foro di piccolo diametro, realizzabile con trivelle a mano. Le misure che si ottengono sono una combinazione delle conducibilità verticali e orizzontali della superficie bagnata del foro.

Durante le prove di permeabilità realizzate con il dispositivo CCHP il carico in foro è mantenuto costante grazie ad un sistema di serbatoi comunicanti. Dopo una fase iniziale di rapida diminuzione della velocità del flusso, il regime d'infiltrazione dell'acqua nel terreno diviene stazionario. Il tempo che intercorre tra l'inizio della prova e la transazione al regime stazionario è funzione delle caratteristiche di permeabilità del terreno stesso. Dal momento in cui la velocità di infiltrazione risulta costante, la permeabilità satura del terreno può essere ricavata tramite la soluzione di *Glover*.

In condizioni ideali (materiale omogeneo ed isotropo, con caratteristiche costanti nel tempo), a partire dalla velocità di flusso stazionario si può ricavare la permeabilità  $K_{sat}$  tramite l'equazione di *Glover*:

$$k_s = A \times Q$$

$$\text{dove } A = \{\sinh^{-1}(H/r) - [(H/r)^2 + 1]^{1/2} + r/H\} / (2\pi H^2)$$

H = altezza dell'acqua in foro; r = raggio del foro; Q = portata di flusso stazionario.

La prova nel punto di campionamento 1 è stata realizzata ad una profondità di circa 45 cm dal piano di campagna ed ha restituito un valore di permeabilità satura ( $k_s$ ) pari a  $4,70 \times 10^{-6}$  m/s (Tabella 13).

La misura della permeabilità nel punto di campionamento 2 è stata invece realizzata ad una profondità di circa 37 cm dal piano di campagna ed ha restituito un valore di permeabilità satura ( $k_s$ ) pari a  $7,01 \times 10^{-6}$  m/s (Tabella 13). Maggiori dettagli sulle prove *Amoozometer* effettuate a Pian dei Sisi sono riportati nell'Allegato 11.

Permeabilità dell'ordine di grandezza di  $10^{-6}$  sono generalmente tipiche di materiali costituiti da sabbie fini. Secondo le analisi granulometriche effettuate, i materiali campionati sono classificabili come sabbie con ghiaie e ghiaie con sabbie, materiali caratterizzati generalmente da permeabilità maggiori (tra  $10^{-5}$  e  $10^{-2}$ ). Vale la pena rammentare in questa sede che la permeabilità dipenda da molti fattori e non soltanto dalla sola composizione granulometrica, tra i quali la distanza del fondo foro dalla roccia intatta, la tessitura del materiale indagato (organizzazione dei granuli nello spazio) e la presenza di eventuali ostacoli che possano rallentare il flusso dell'acqua.

La permeabilità riscontrata (inferiore a quella prevedibile dalla sola distribuzione granulometrica) è verosimilmente da imputare a materiali grossolani (come da caratterizzazione granulometrica) posti poco lontano dalla roccia intatta. La vicinanza del *bedrock* è difatti una condizione che determina un rallentamento dell'infiltrazione dell'acqua ed i suoli dell'area indagata sono caratterizzati da bassi spessori.

## 12 Analisi delle condizioni di innesco della frana

Al fine di caratterizzare le condizioni di innesco della frana avvenuta il 19 febbraio 2018 in località Pian dei Sisi è stata condotta una modellazione numerica idrologica-geotecnica.

In particolare, l'obiettivo è stato quello di verificare se le piogge antecedenti l'evento franoso siano state in grado di innescare la frana stessa. Per fare questo è stata utilizzata una analisi combinata filtrazione-stabilità. L'analisi di filtrazione è stata effettuata con il codice SEEP della GeoStudio basato sul metodo degli elementi finiti, mentre l'analisi di stabilità è stata condotta con il codice SLOPE appartenente sempre al pacchetto GeoStudio.

L'analisi di filtrazione è stata condotta in condizioni transitorie ovvero valutando il regime delle pressioni interstiziali durante i trenta giorni precedenti all'evento sulla base delle precipitazioni registrate. I risultati della modellazione di filtrazione sono stati importati nell'analisi di stabilità in modo da determinare il fattore di sicurezza del versante. Tale modellazione ha permesso di valutare se la pioggia abbia influito sulla stabilità del versante di Pian dei Sisi.

### 12.1 Analisi di filtrazione

Per effettuare la modellazione del comportamento del versante in risposta all'evento di pioggia il primo passo consiste nella cosiddetta analisi di filtrazione, ovvero nella analisi dei processi di infiltrazione delle acque nel suolo e di flusso idrico nella fascia sub-superficiale del terreno (cosiddetto deflusso ipodermico), laddove il terreno si trova in condizioni di saturazione variabile nel tempo e nello spazio.

Il flusso saturo e insaturo lungo il versante in condizioni transitorie è stato modellato utilizzando il codice agli elementi finiti SEEP (GeoStudio, 2020). Si tratta di un codice di calcolo molto diffuso ed ampiamente utilizzato in campo geotecnico per effettuare modellazioni avanzate.

La legge fondamentale, cui fanno riferimento tutte le teorie sulla filtrazione, è la legge di *Darcy*, enunciata nel 1856 dall'omonimo ingegnere francese. La più comune formulazione della legge è la seguente:

$$v = k i$$

dove  $v$  rappresenta la velocità del flusso,  $k$  è dimensionalmente una velocità e rappresenta il coefficiente di permeabilità,  $i$  è il gradiente idraulico e rappresenta la perdita di carico idraulico per unità di percorso compiuto.

Le ipotesi alla base della legge di *Darcy* sono:

- Mezzo poroso omogeneo e isotropo: l'omogeneità e l'isotropia, raramente riscontrabili in terreni naturali, possono essere assunte considerando volumi di terreno sufficientemente grandi che presentino granulometrie uniformemente distribuite;
- Moto laminare: la legge ha validità se il moto di filtrazione è caratterizzato da filetti fluidi che scorrono paralleli. È dimostrato sperimentalmente che all'interno di mezzi porosi si ha con buona approssimazione un moto di tipo laminare per velocità di filtrazione sufficientemente lente;
- Mezzo poroso saturo.

Riguardo a quest'ultima ipotesi, prove sperimentali hanno dimostrato che la legge di *Darcy* può essere estesa anche alla porzione di terreno non saturo, introducendo la variabilità del coefficiente di permeabilità come funzione del contenuto d'acqua del terreno e quindi della pressione dell'acqua nei pori. La relazione fra il coefficiente di permeabilità e la pressione interstiziale è definita dalla cosiddetta "curva-k" del materiale.

Il modello di filtrazione adottato si basa sull'equazione del moto e l'equazione di conservazione della massa (o di continuità), nella forma estesa a condizioni non sature (Richards, 1931; Fredlund & Rahardjo, 1993):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dove, H= carico totale;  $k_x$ = conducibilità idraulica in direzione x;  $k_y$  = conducibilità idraulica in direzione y; Q =flusso esterno applicato;  $\theta$ = contenuto d'acqua volumetrico, t= tempo.

L'applicazione del modello SEEP/W alle frane analizzate prevede il seguente schema operativo:

- Definizione della geometria della sezione e del modello geologico-tecnico;
- Assegnazione delle caratteristiche dei materiali;
- Definizione delle condizioni iniziali;
- Assegnazione delle condizioni al contorno.

### 12.1.1 Definizione della geometria della sezione e del modello geologico-tecnico

La geometria della sezione e il modello geologico-tecnico del versante sono stati definiti nella sezione 11.1. In particolare, si ricorda qui che il modello geologico-tecnico è costituito da due livelli di materiale:

- **Livello 1:** detrito di alterazione del substrato sottostante, costituito prevalentemente da ghiaia e sabbia, con spessore in prossimità della zona di innesco di circa 8 m
- **Livello 2:** substrato roccioso alterato e non alterato con una profondità massima di circa 12.5 m dal piano campagna; rocce appartenenti a questo livello sono messe a nudo nella zona di distacco della frana. Si può quindi ragionevolmente assumere che nella zona di distacco la frana abbia raggiunto il substrato con una profondità di circa 8 m.

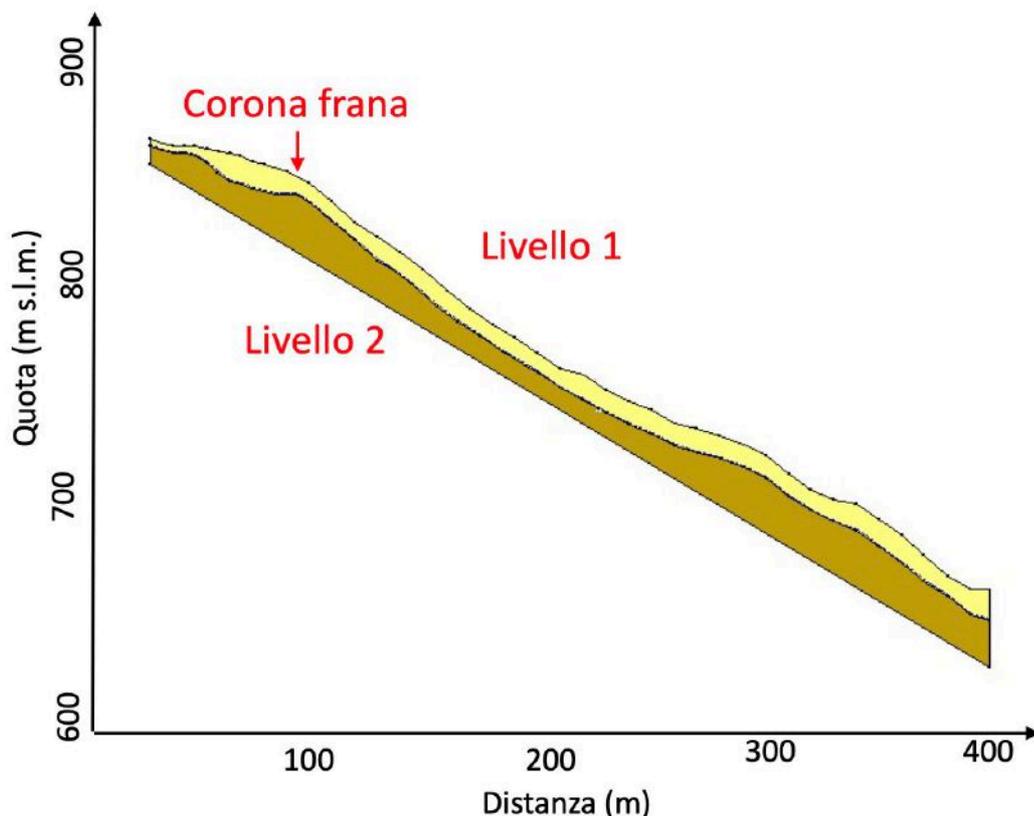


Figura 50: Modello geologico-tecnico del versante e livelli di materiale.

Relativamente alle condizioni idrogeologiche iniziali, le misure piezometriche effettuate nel piezometro 1 (sondaggio S2, realizzato a valle della vasca e a monte della zona di corona della frana) non hanno evidenziato

una falda all'interno del livello 1, ovvero il detrito superficiale di alterazione del substrato. Per tale motivo, il livello iniziale della tavola d'acqua è stato posto al contatto fra il detrito e il sottostante substrato alterato.

La creazione della *mesh* caratteristica è stata effettuata tenendo conto della geometria del pendio e della stratigrafia del sottosuolo.

### 12.1.2 Assegnazione delle caratteristiche dei materiali

Questa fase prevede l'assegnazione ai materiali costituenti la sezione, ovvero il detrito superficiale e il sottostante substrato alterato, delle rispettive curve caratteristiche e curve *k*.

La curva caratteristica, o funzione del contenuto d'acqua volumetrico, è l'espressione grafica del contenuto d'acqua in funzione della suzione (Fredlund & Rahardjo, 1993). Tale curva è detta caratteristica perché dipende dalle proprietà intrinseche del terreno: granulometria, indice dei pori, disposizione strutturale delle particelle e composizione mineralogica dei granuli.

In Figura 51 è riportata la forma generale della curva caratteristica con la pressione dell'acqua in ascissa e in ordinata il contenuto d'acqua volumetrico, che rappresenta il rapporto fra il volume occupato dall'acqua ( $V_w$ ) e il volume totale del mezzo poroso ( $V$ ).

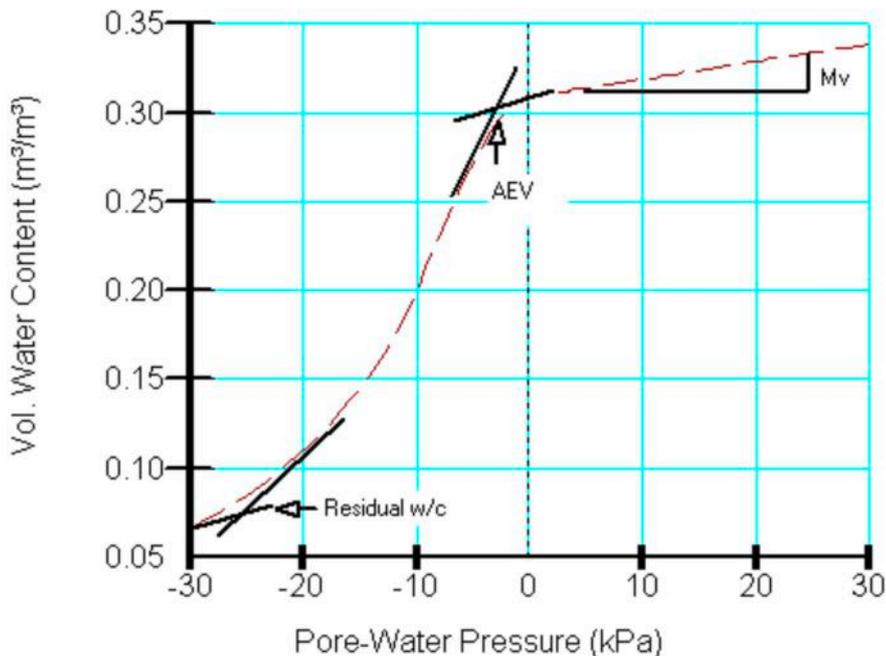
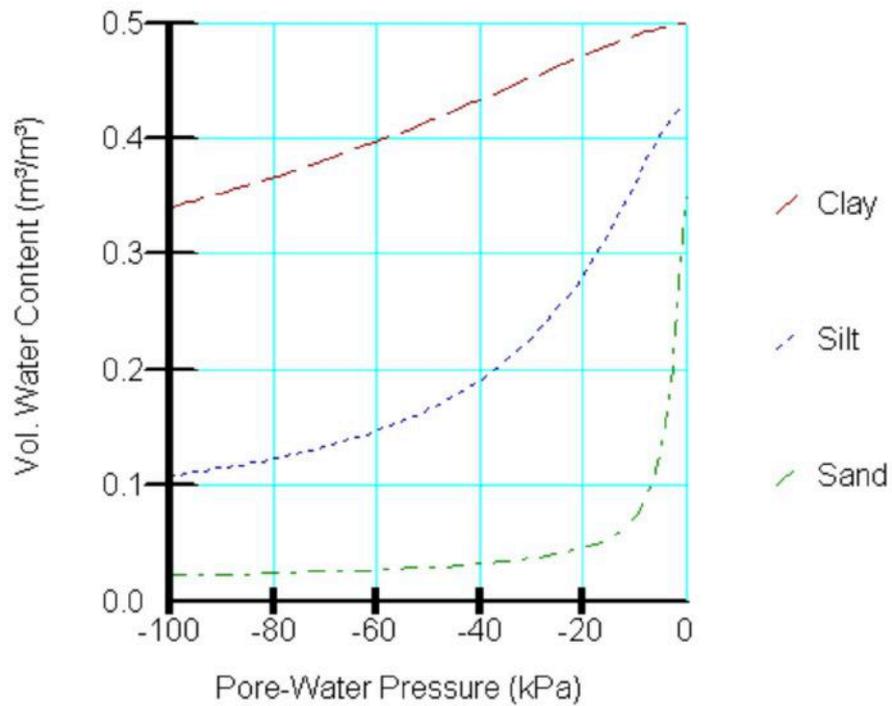


Figura 51: Forma generale della curva caratteristica. Residual w/c: contenuto d'acqua residuale, AEV: valore di entrata dell'aria,  $m_v$ : coefficiente di compressibilità di volume (da GEOSLOPE, 2015).

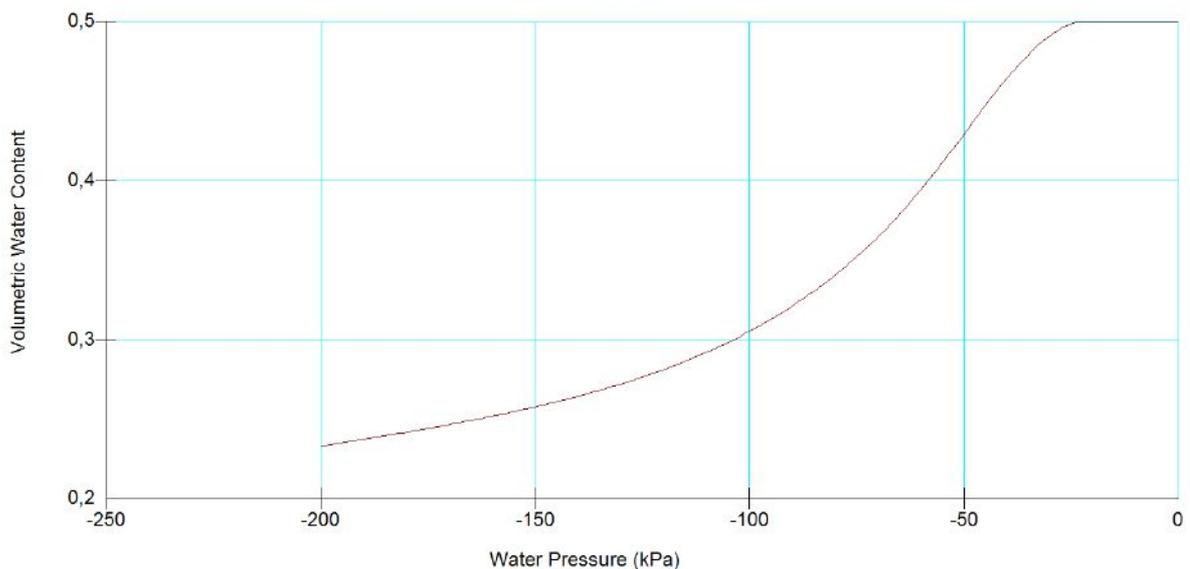
Quando il grado di saturazione è pari al 100%, il contenuto d'acqua volumetrico è equivalente alla porosità del terreno che è definita come il rapporto fra il volume dei vuoti ( $V_v$ ) e il volume totale ( $V$ ).

La Figura 52 mostra un esempio di curve caratteristiche riferite a tre diversi tipi di materiali; sabbie, limi e argille. In particolare, si può osservare come nel caso dell'argilla la curva caratteristica presenti una pendenza molto bassa, indice di una graduale diminuzione del contenuto d'acqua in funzione della pressione interstiziale. Questo avviene per l'elevata quantità di acqua di ritenzione rispetto al totale. Le sabbie al contrario hanno un processo di desaturazione molto più brusco con pendenze della curva caratteristica via via crescenti. Tale comportamento può essere associato alla prevalenza di acqua di gravità.

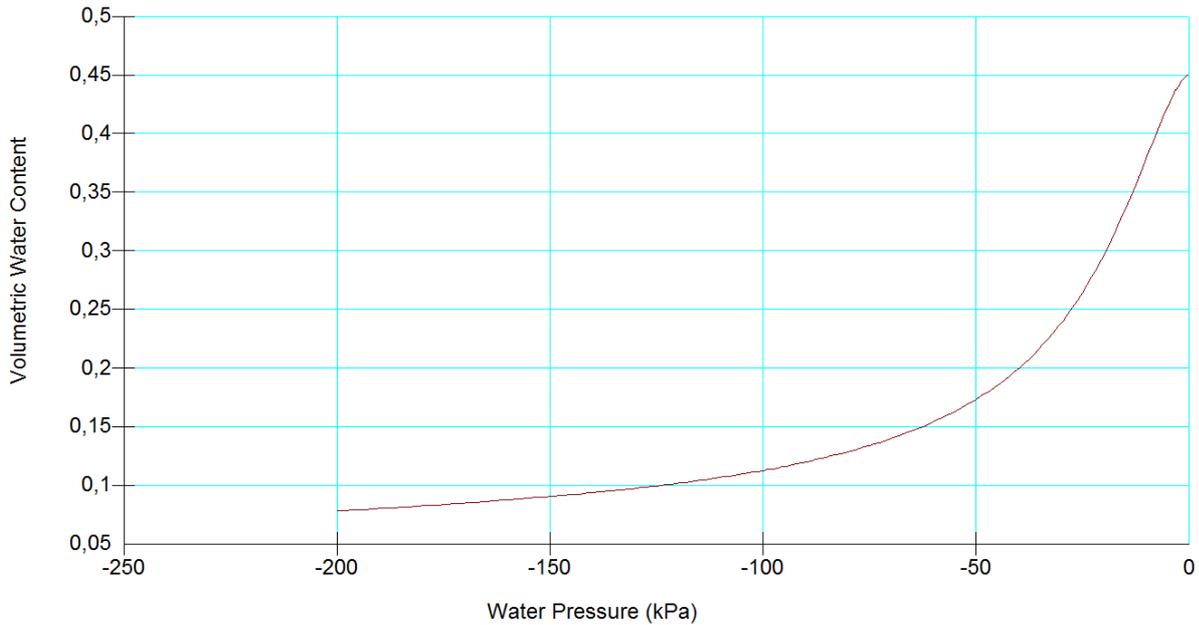


**Figura 52: Funzioni del contenuto d'acqua per sabbie fini, limo e argilla (da GEOSLOPE, 2015)**

Le curve caratteristiche dei due livelli materiali sono state ricavate utilizzando la libreria di curve disponibile all'interno dell'applicativo SEEP. In particolare, per il Livello 1 è stato possibile stimare la curva caratteristica sulla base della distribuzione granulometrica determinata attraverso prove di laboratorio e integrando tale curva con il valore della porosità misurato (Paragrafo 11.2). Per Livello 2, la curva caratteristica è stata definita utilizzando una curva disponibile in libreria corrispondente a un terreno tipo limo. Le curve dei due materiali sono riportate in Figura 53 e Figura 54 per il livello 1 e per il livello 2, rispettivamente.



**Figura 53: Curva caratteristica del Livello 1 (detrito di alterazione).**

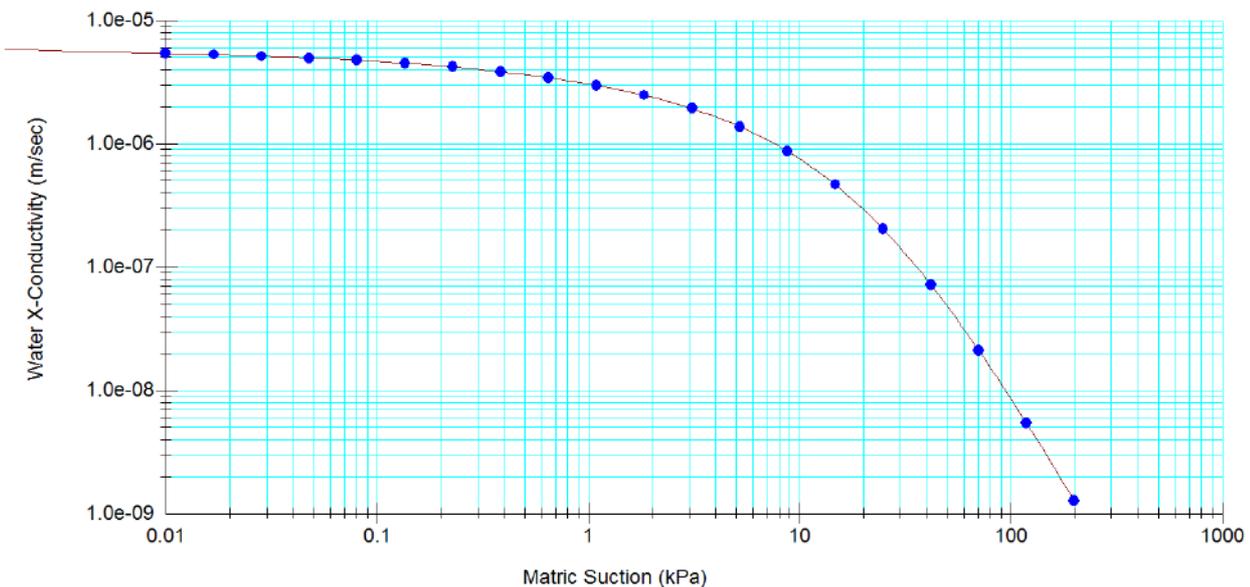


**Figura 54: Curva caratteristica del Livello 2 (substrato roccioso alterato e non alterato).**

La curva  $k$  rappresenta la variazione della permeabilità in funzione della suzione. Contrariamente a quanto si verifica per la curva caratteristica, la curva  $k$  non è di facile ricostruzione sperimentale. Sono stati sviluppati in letteratura diversi algoritmi per la stima della curva  $k$  del materiale sulla base della sua curva caratteristica: in particolare l'applicativo SEEP ha al suo interno tre metodi per la definizione della curva  $k$  partendo dalla curva caratteristica e dal valore di permeabilità satura ( $k_s$ ): Fredlund et al. (1996), Green & Corey (1971) e Van Genuchten (1980).

Nel presente lavoro è stato utilizzato l'algoritmo di Van Genuchten (1980), in quanto è risultato il metodo più appropriato ed affidabile relativamente al caso di studio: l'algoritmo è stato applicato utilizzando come dato di *input* le curve caratteristiche associate ai vari livelli e descritte nella sezione precedente.

Nella determinazione della curva  $k$  del livello di detrito si è tenuto conto anche del valore sperimentale disponibile relativo alla permeabilità satura del materiale (Paragrafo 11.2.3). Le curve  $k$  dei due livelli di materiale sono riportate in Figura 55 e Figura 56.



**Figura 55: Curva  $k$  relativa al Livello 1 (detrito di alterazione).**

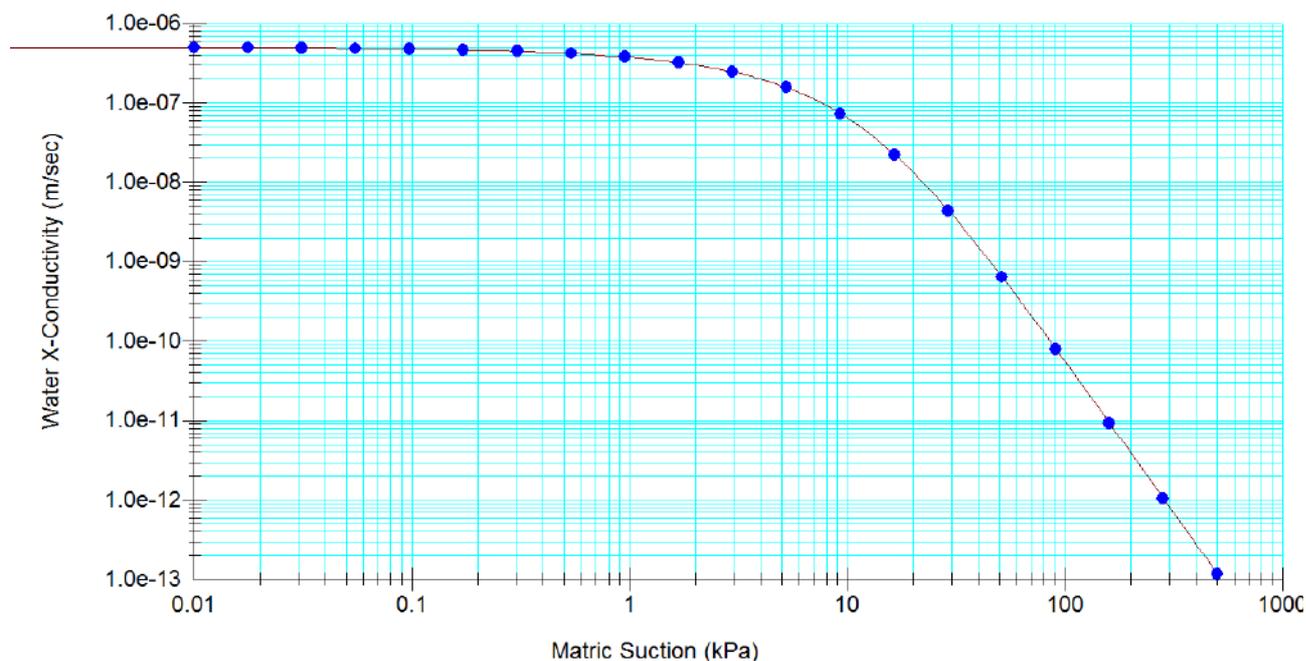


Figura 56: Curva k relativa al Livello 2 (substrato roccioso alterato e non alterato).

### 12.1.3 Definizione delle condizioni iniziali;

Le condizioni iniziali possono essere specificate definendo un livello di falda di partenza ed un valore di pressione interstiziale per ogni nodo della *mesh*.

Le misure piezometriche effettuate a valle della vasca non hanno evidenziato una falda all'interno del livello 1, ovvero il detrito superficiale di alterazione del substrato. Per tale motivo, il livello iniziale della tavola d'acqua è stato posto al contatto fra il detrito e il sottostante substrato alterato.

Sulla base della posizione della falda, il codice assegna ad ogni nodo un carico piezometrico iniziale in proporzione alla distanza dalla tavola d'acqua. L'effetto che si ha, quindi, definendo la superficie libera iniziale è una distribuzione idrostatica delle pressioni.

Tale condizione può però portare a suzioni molto alte nella porzione superiore sottosatura del detrito. È necessario quindi stabilire un limite massimo alla suzione raggiungibile in modo da ottenere una più realistica distribuzione di pressione interstiziale all'inizio dell'evento meteorico. Questo è stato possibile attribuendo a tutto lo spessore di detrito un valore di suzione iniziale indicativo delle condizioni del suolo all'inizio dell'evento. Tale valore ha tenuto in considerazione il fatto che la simulazione si riferisce alla stagione invernale e che quindi il terreno si trovava verosimilmente in condizioni di parziale saturazione. Sulla base delle suddette considerazioni e di dati di letteratura il valore di suzione matriciale assunto come valore iniziale è pari a 100 kPa.

### 12.1.4 Assegnazione delle condizioni al contorno

L'assegnazione delle condizioni al contorno prevede che a tutti i nodi lungo la superficie della sezione analizzata sia attribuito in condizioni transitorie un valore di precipitazione.

In particolare, è stato deciso di valutare le condizioni di filtrazione e infiltrazione nel mese precedente all'innescio della frana (19 gennaio 2018 – 19 febbraio 2018), che rappresenta un Intervallo di tempo ragionevole per ricostruire l'andamento delle pressioni interstiziali, tenuto conto della tipologia di frana (Paragrafo 4).

L'evento di riferimento è stato suddiviso in *step* temporali di durata giornaliera ai quali corrisponde il valore di intensità di precipitazione giornaliera misurata alla stazione di Casotti di Cutigliano (Figura 52). È stato

scelto di utilizzare le precipitazioni misurate alla stazione di Casotti di Cutigliano anziché quelle della stazione di Melo, in quanto le prime sono maggiori (200.4 mm a Casotti, 128.4 mm a Melo). L'analisi condotta rappresenta quindi la situazione più cautelativa, ovvero considerando il caso peggiore in termini di quantità di acqua in entrata. Il numero totale di *step* temporali utilizzati durante l'analisi è quindi pari a 32.

Dal 19 gennaio 2018 al 19 febbraio 2018 compresi, la pioggia cumulata è pari a 200.4 mm, con un picco di precipitazione pari a 56.4 mm il 2 febbraio 2018. Il giorno della frana (19 febbraio 2018), la pioggia è pari a 0.2 mm.

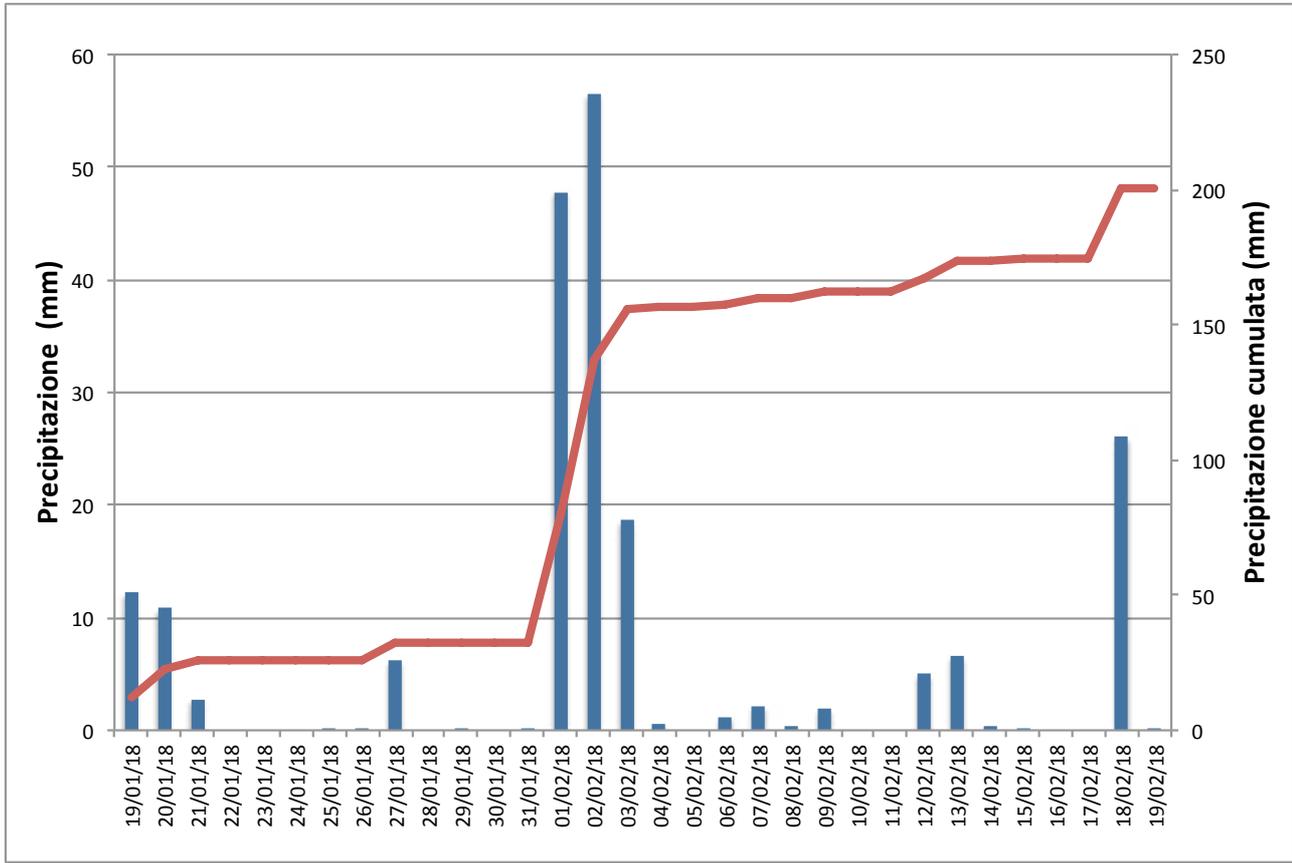


Figura 57: Precipitazione giornaliera misurata alla stazione di Casotti di Cutigliano dal 19 gennaio 2018 al 19 febbraio 2018 utilizzata come condizione al contorno nel modello SEEP.

### 12.2 Analisi di stabilità

L'analisi di stabilità è stata realizzata con l'applicativo SLOPE/W (GeoStudio, 2020). Le distribuzioni delle pressioni interstiziali negative e positive calcolate con il modello SEEP/W durante l'evento sono state incorporate all'interno dell'analisi di stabilità. Il codice implementa il metodo dell'equilibrio limite ed in particolare il fattore di sicurezza del pendio è calcolato utilizzando il metodo di Morgenstern & Price (1965), avvalendosi del criterio di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci, in caso di pressioni interstiziali positive, e l'equazione di Vanapalli et al. (1996) in caso di pressioni interstiziali negative. In particolare, l'equazione di Vanapalli et al. (1996) permette di quantificare la resistenza del materiale in condizioni sottosature attraverso la curva caratteristica del materiale e i parametri efficaci di resistenza al taglio.

I parametri di resistenza al taglio utilizzati per l'analisi sono quelli ricavati dalle prove condotte in laboratorio ed *in situ*. I parametri geotecnici relativi al Livello 1 utilizzati nell'analisi sono riportati in Tabella 14, mentre la curva caratteristica dello stesso livello è riportata in sezione 12.1.2.

**Tabella 14: Parametri utilizzati nell'analisi di stabilità.**

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)
16,5	35	10

Il modello SLOPE/W è interfacciato con SEEP/W ed è quindi possibile importare la stessa geometria del problema e considerare la distribuzione di pressioni interstiziali derivata dall'analisi agli elementi finiti del processo di filtrazione in condizioni transitorie.

Sulla base delle informazioni raccolte attraverso i sopralluoghi effettuati, la superficie di scivolamento è stata completamente definita (Paragrafo 4.1). La profondità nella zona di innesco è di circa 6-7 m, la lunghezza circa 100m.

A tal proposito è importante sottolineare che la frana definita nel modello corrisponde alla zona di alimentazione o innesco (sezione 4.1) in quanto l'applicativo SLOPE/W modella soltanto le condizioni di innesco delle frane e non la loro propagazione. La frana di Pian dei Sisi, infatti, si innesca come scivolamento roto-traslato, interessando la coltre detritica superficiale e poi evolve in colata detritica.

### 12.3 Risultati

L'analisi di filtrazione ha permesso di ricostruire nel versante interessato dalla frana l'andamento delle pressioni interstiziali del terreno in funzione del regime delle precipitazioni per i trenta giorni precedenti l'evento.

La distribuzione delle pressioni interstiziale durante alcuni giorni selezionati è riportata in Figura 58 mentre in Figura 59 sono riportati i profili di pressioni dell'acqua all'interno del Livello 1 lungo due verticali (riportate in nero in Figura 58), collocate rispettivamente nella zona di innesco e nella parte mediana della frana.

Dalla Figura 58 e dalla Figura 59 si può osservare che il Livello 1 si trova in generale in condizioni di sottosaturazione, ovvero con pressioni interstiziali negative, durante tutto il periodo della simulazione. Nella zona di corona, dove lo spessore del livello di detrito è maggiore (Figura 59), i profili di pressione mostrano una minima oscillazione della falda freatica, che si trova ad una profondità variabile da 6 m a 7 m durante tutta la simulazione.

Il giorno 3 febbraio 2018 a seguito di una precipitazione di circa 100 mm nei tre giorni precedenti, le pressioni aumentano fino a raggiungere valori positivi. In particolare, si osserva un incremento di pressione interstiziale nel profilo corrispondente alla parte mediana della (Figura 59) a causa del limitato spessore del livello detritico e della filtrazione di acqua proveniente dalla parte alta del versante. Nella zona di innesco, dove lo spessore del livello 1 è maggiore, le pressioni rimangono generalmente negative.

Il 19 febbraio 2018, giorno in cui è avvenuta la frana, le pressioni dell'acqua sono di nuove negative sia nella zona di innesco che nella zona mediana. Nella zona di innesco la falda si trova da una profondità di circa 7 m, mentre nella parte mediana della frana il terreno risulta essere completamente sottosaturo e la falda freatica al contatto con il sottostante livello costituito da roccia alterata.

La distribuzione delle pressioni interstiziale nei trenta giorni precedenti all'evento è coerente con la tipologia di terreno, ovvero un terreno granulare con una discreta permeabilità, e con il regime delle precipitazioni registrate. Si deve osservare infatti che la cumulata di pioggia relativa ai trenta giorni precedenti è pari 200.4 mm. Tale precipitazione è, come ampiamente discusso nel Paragrafo 6.1 è assolutamente ordinaria, ben al di sotto delle soglie di innesco di fenomeni franosi superficiali.

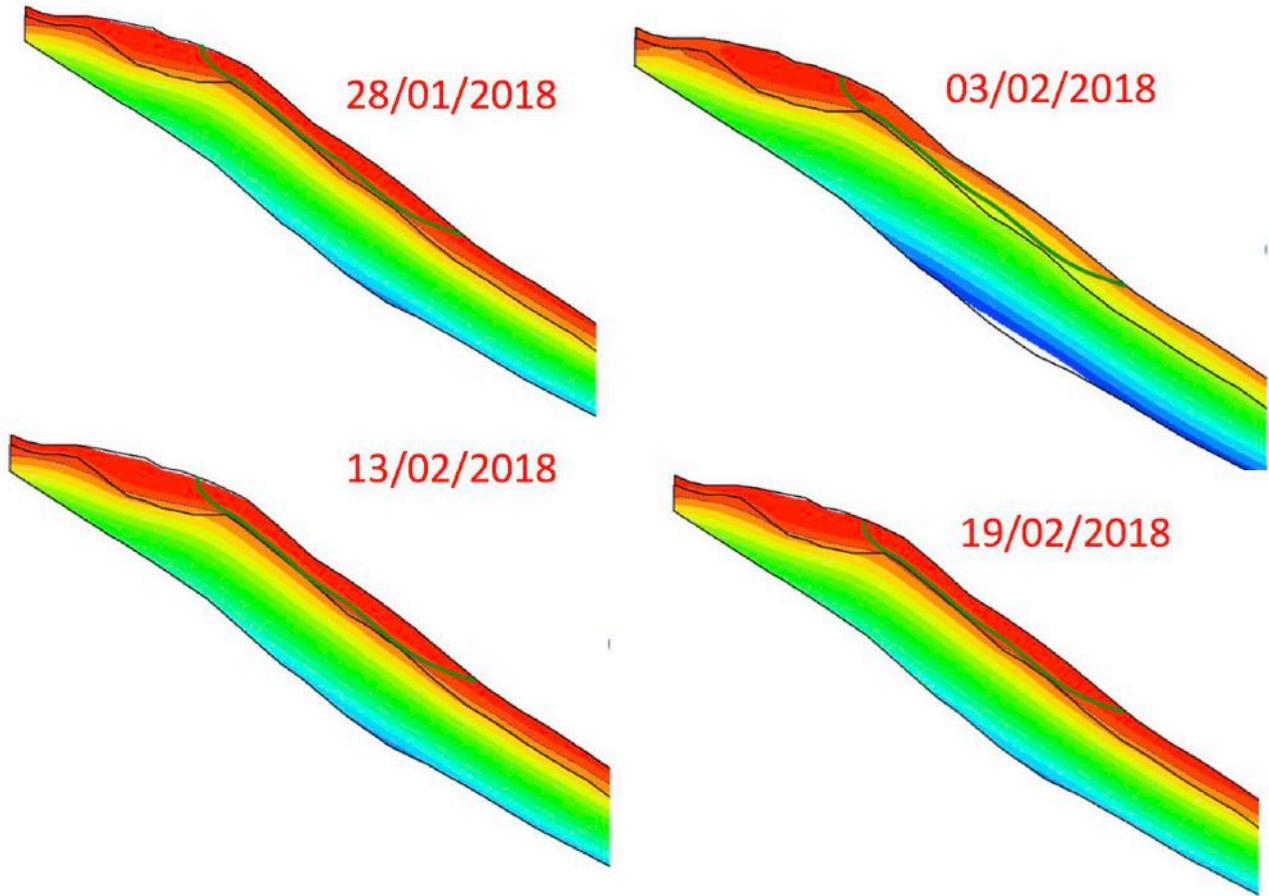
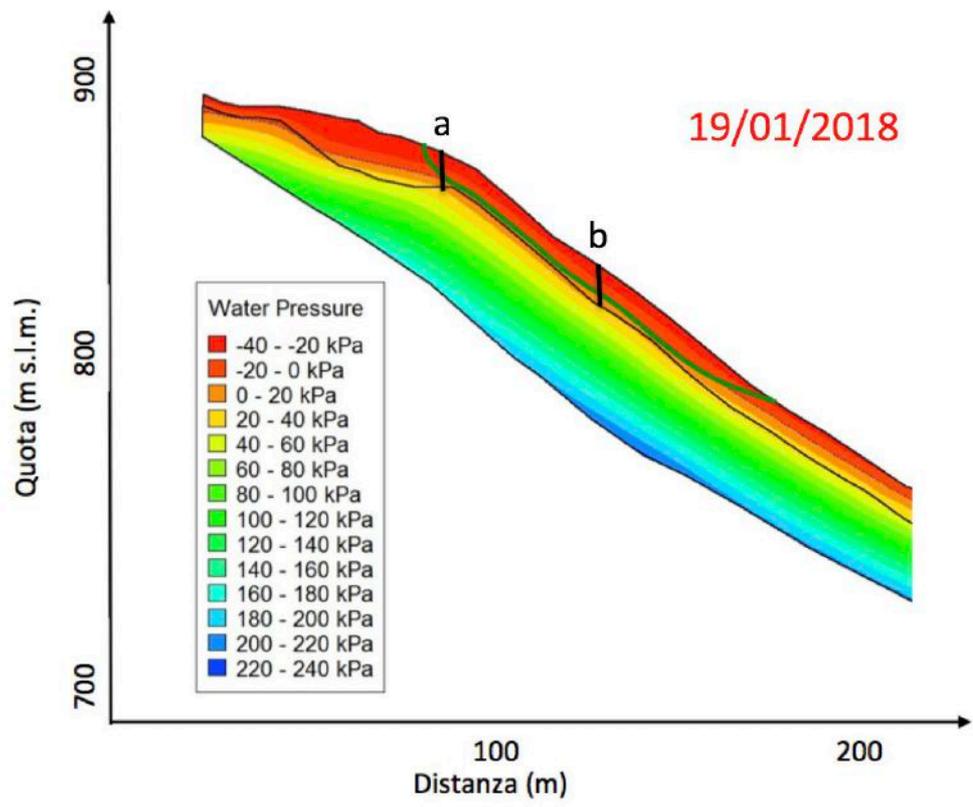
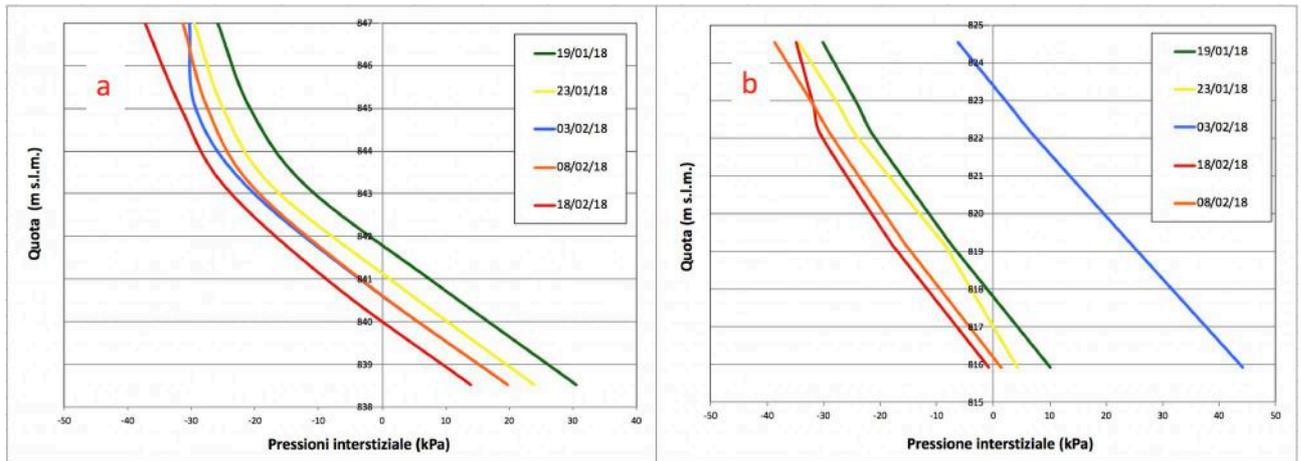


Figura 58: Distribuzione delle pressioni interstiziali nella parte alta del versante interessata dalla zona di innesco della frana durante alcuni step temporali selezionati. La linea verde rappresenta la superficie di scivolamento mentre le due linee verticali nere (a e b), l'ubicazione dei profili di pressione dell'acqua riportati in Figura 59.



**Figura 59: Profili di pressione relativi al Livello 1 nella zona di innesco della frana (a) e al livello 2 (b).**

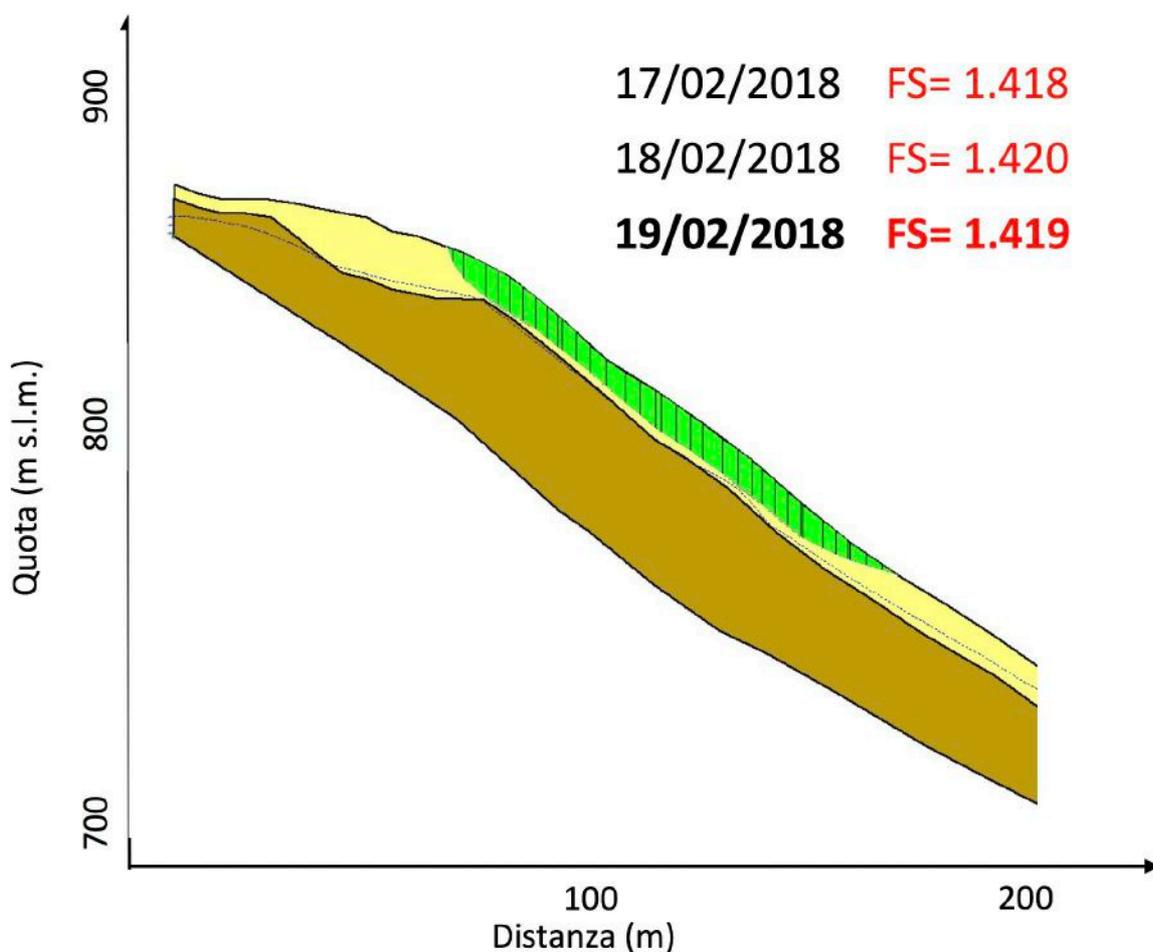
L'analisi di filtrazione condotta ha permesso di ottenere una ricostruzione dettagliata delle pressioni interstiziali durante i giorni antecedenti e il giorno stesso della frana.

L'analisi di stabilità condotta per i giorni 17, 18 e 19 febbraio 2018 ha evidenziato una sostanziale stabilità del versante. Il Fattore di Sicurezza (FS) risulta essere ampiamente superiore ad il valore 1, che rappresenta condizioni di equilibrio limite. In particolare, come riportato in Figura 60, FS è uguale a 1.418, 1.420 e 1.419 i giorni 17 febbraio, 18 febbraio e 19 febbraio, rispettivamente.

È necessario sottolineare che l'analisi di filtrazione è stata condotta assumendo che tutta la precipitazione si sia infiltrata nel terreno senza considerare il contributo della vegetazione, in termini di intercettazione della precipitazione stessa ed in termini di aumento della coesione dovuto agli apparati radicali.

Nella realtà, infatti, una parte della precipitazione è intercettata dalla vegetazione, in questo caso latifoglie, e restituita al terreno con tempi più lunghi rispetto al normale processo di infiltrazione. Inoltre, il valore della coesione potrebbe persino raddoppiare in presenza di boschi di latifoglie (Bischetti et al., 2009; Hales et al., 2018).

L'analisi di stabilità condotta rappresenta quindi la situazione più cautelativa, ovvero considerando il caso peggiore in termini di quantità di acqua infiltrata.



**Figura 60: Superficie di scivolamento e fattore di sicurezza.**

In sintesi, l'analisi combinata filtrazione-stabilità ha evidenziato che:

- durante i trenta giorni precedenti alla frana il livello di detrito superficiale coinvolto nella frana si trova in condizione di sottosaturazione. Il livello della falda freatica nella zona di innesco si aggira intorno a 6/7 m di profondità, mentre nella zona mediana della frana è collocato al contatto con substrato sottostante;
- tale situazione è coerente con il tipo di materiale, ovvero detrito di alterazione del substrato, corrispondente da un punto di vista granulometrico a una sabbia con ghiaia e dotato di discreta permeabilità e con le precipitazioni registrate che sono da considerarsi ordinarie, ben al di sotto di qualunque soglia di innesco di fenomeni franosi superficiali;
- l'analisi di stabilità condotta utilizzando i dati dell'analisi di filtrazione con una simulazione di 30 giorni evidenzia che il Fattore di Sicurezza dei due giorni precedenti la frana e del giorno stesso è circa 1.4, molto sopra il valore dell'equilibrio limite;
- i risultati dell'analisi di filtrazione e stabilità indicano che le precipitazioni registrate i trenta giorni precedenti l'evento non sono in alcun modo sufficienti ad innescare la frana avvenuta nella tarda serata del 19 febbraio 2018.

Ad ulteriore dimostrazione del fatto che le precipitazioni avvenute nel mese antecedente alla frana non siano state sufficienti ad innescare la frana stessa e che fosse necessario un quantitativo di pioggia molto superiore, sono state condotte ulteriori due analisi combinate filtrazione-stabilità modificando lo ietogramma di precipitazione di Figura 57 ed in particolare la pioggia delle 24 ore precedenti all'innesco. In particolare, è stato modificato il valore di pioggia del 19 febbraio 2018 considerando i due seguenti scenari:

- Scenario 1: 50 mm di pioggia il 19 febbraio 2018;
- Scenario 2: 100 mm di pioggia il 19 febbraio 2018.

È importante sottolineare che la frana è avvenuta il giorno 19 febbraio 2018 alle ore 23:00 circa e che la precipitazione registrata il giorno 19 febbraio 2018 è uguale 0.2 mm, mentre quella registrata il giorno precedente è uguale a 26 mm. Le piogge ipotizzate nei due scenari sono quindi molto superiori alle precipitazioni reali degli ultimi 2 giorni.

I risultati dell'analisi combinata hanno mostrato i seguenti valori del fattore di sicurezza (FS) per il giorno 19 febbraio 2018:

- Scenario 1: FS: 1.268
- Scenario 2: FS: 0.823

I risultati mostrano che per innescare la frana sarebbero stati necessari circa 100 mm di pioggia nelle 24 ore precedenti la frana, un valore nettamente superiore a quello realmente misurato (0.2 mm).

### 13 Considerazioni sull'innescò della frana

I risultati dell'analisi di filtrazione e stabilità hanno chiaramente indicato che le precipitazioni registrate i trenta giorni precedenti l'evento non sono in alcun modo sufficienti ad innescare la frana avvenuta nella tarda serata del giorno 19 febbraio 2018 a Pian di Sisi.

Considerato che le precipitazioni registrate sono da considerarsi ben al di sotto di qualunque soglia di innescò di fenomeni franosi superficiali per l'area in esame e che l'analisi di filtrazione e di stabilità ha evidenziato la necessità di ulteriori 100 mm di pioggia nelle 24 ore precedenti all'istante di innescò della frana, appare importante stabilire quale (o quali) causa abbia determinato la frana di Pian dei Sisi. In altre parole, appare necessario identificare l'origine di tale quantità di acqua, la cui presenza è stata poi ben documentata tramite riprese da drone la mattina del 20 febbraio 2018 (Paragrafo 4.2 per maggiori dettagli).

A seguito della frana sono state avanzate alcune ipotesi su cosa possa aver alimentato la circolazione idrica superficiale e sub-superficiale, oltre che i fenomeni di ruscellamento diffusi e incontrollati sul versante, in modo così consistente da aver determinato l'innescò della frana:

- la mancata o deficitaria regimazione delle acque meteoriche di corrivazione superficiale (acqua di ruscellamento di impluvi naturali), il cui deflusso naturale è interrotto dalla presenza degli edifici dell'abitato e della viabilità. A questo va aggiunto il contributo della Strada Statale del Brennero che dal suo tracciato convoglia le acque nel versante;
- la dispersione di acque miste, stante la presenza, a servizio di proprietà private, di vasche *Imhoff*, fosse settiche bicamerali o tricamerali, che non essendo collegate al tracciato di fognatura mista, confluiscono dall'impianto di trattamento primario in pozzi a disperdere direttamente nel terreno;
- la dispersione verso valle della fognatura mista comunale, esistente parallelamente alla Strada Statale del Brennero e che raccoglie gli scarichi degli edifici posti a monte della strada stessa.

Gli scriventi concordano sul fatto che la circolazione superficiale degli afflussi meteorici, nell'area in esame, sia condizionata dalla morfologia del versante che li indirizza dal crinale verso il fondovalle del Torrente Lima, passando attraverso l'abitato di Pian dei Sisi, dove tali deflussi subiscono un rallentamento operato dalla diminuzione dell'acclività e subiscono un rallentamento dovuto alla presenza del tessuto edilizio stesso che favorisce l'infiltrazione delle acque nel versante. La presenza della Strada Statale, in particolare, maschera il reticolo idrografico in almeno due punti e rappresenta indubbio ostacolo al naturale deflusso delle acque superficiali, che d'altro canto, è favorito dall'accentuata acclività generale del versante.

Appare opportuno ricordare come la presenza di deflusso superficiale (acque di ruscellamento in impluvi naturali e convogliate lungo la Strada Statale) è condizionata al verificarsi di precipitazioni intense e/o persistenti, condizione che non si è verificata per quanto esposto e discusso al Capitolo 4). Nelle due settimane precedenti la frana si sono registrati 44.2 mm di pioggia, quantità del tutto insufficiente per generare quei fenomeni di ruscellamento diffusi e incontrollati sul versante documentati tramite riprese da drone la mattina del 20 febbraio 2018.

Anche assumendo, all'estremo opposto, che il deflusso superficiale generato da tali precipitazioni si sia infiltrato completamente nel terreno (assunzione poco credibile considerata la pendenza del versante), l'analisi congiunta filtrazione-stabilità ha ampiamente dimostrato che le precipitazioni registrate sono da considerarsi ben al di sotto della quantità necessaria all'innescò di fenomeni franosi superficiali. Per questo motivo gli scriventi escludono categoricamente che la deficitaria regimazione delle acque superficiali sia causa (o concausa) dell'innescò della frana del 19 febbraio 2018.

Infine, appare quanto meno poco plausibile che la dispersione verso valle della fognatura mista comunale e delle fognature a perdere (a servizio dei 33 abitanti della frazione di Pian dei Sisi) abbia contribuito, nella notte del 19 febbraio 2018, all'innescò della frana.

A quanto appena esposto è stata aggiunta anche una quarta concausa, ovvero l'azione erosiva del Torrente Lima che scorre ai piedi del versante. Gli scriventi escludono categoricamente anche questa ipotesi: per quanto l'opera di modellamento operata da parte Torrente Lima sia da considerarsi indubbia, l'azione erosiva

e di approfondimento dell'alveo esercitata da parte del Torrente Lima stesso, non può in alcun modo essere considerata concausa di innesco della frana di Pian dei Sisi. In primo luogo, la zona di corona, ovvero la zona da cui la frana di Pian di Sisi si è originata, è posta ad una quota di 200 m più in alto rispetto all'alveo del torrente Lima, che ha rappresentato il punto di arrivo (e non certo di origine) del materiale mobilizzato. In secondo luogo, appare quantomeno inverosimile che l'azione erosiva del torrente abbia operato uno scalzamento al piede del versante, inducendo una serie di fenomeni retrogressivi successivi tali da determinare l'attuale perimetro di frana.

In base a quanto esposto, appare quindi evidente che l'innesco della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018 debba essere ricercato altrove e debba essere ricondotto in maniera esclusiva alla fuoriuscita di acqua dall'apertura generatasi nella condotta forzata a valle della vasca di carico ENEL (Figura 61).



Figura 61: *screenshots* dal video ispezione eseguito all'interno della condotta forzata a valle della vasca di carico ENEL: tale video mostra all'interno della condotta forzata un'evidente rottura (Allegato 6).

La rottura della condotta forzata ha determinato l'infiltrazione nel terreno di un'anomala quantità d'acqua che è stata poi documentata poi nelle riprese effettuate da drone la mattina del 20 febbraio 2018, sottoforma di emergenze all'interno e ai lati del perimetro di frana.

Tale acqua ha determinato un rapido aumento delle pressioni interstiziali (acqua contenuta nei pori) e rappresenta l'unica causa di innesco della frana di Pian dei Sisi.

La tubazione della condotta forzata a valle della vasca di carico ENEL è costituita da un tubo in lamiera di acciaio chiodato, dal diametro di 1.2 m nel punto in cui si è verificata la rottura. Il video ispezione effettuato all'interno della condotta mostra una frattura, persistente su tutta la circonferenza del tubo, di larghezza variabile tra 1 e 3 cm posta su una giunzione chiodata della tubatura. La frattura è posta circa a 25 m a valle della valvola di chiusura della vasca di carico e quindi è localizzabile al di sotto dell'edificio 4 di Figura 8.

Tale apertura generata dalla rottura della lamiera è riportata anche nell'istanza depositata il 5 marzo 2018 dalla Sig. Maila Sisi nella quale si legge: *"...è stata effettuata una prima video ispezione attraverso un Robot che ha consentito di individuare all'interno del condotto ENEL un importante distaccamento di 3 cm..."*.

A supporto dell'ipotesi che l'origine dell'anomala quantità d'acqua, causa dell'innesco della frana e ben visibile dalle riprese drone, sia da ricercare esclusivamente nella rottura della condotta forzata ENEL, si riporta quanto contenuto nella suddetta istanza della Sig.ra Maila Sisi: *"... nella mattinata immediatamente successiva all'evento disastroso l'esponente e gli abitanti della zona hanno potuto constatare la fuoriuscita di acqua in tre punti: al centro della frana, a monte ed a valle della stessa. Successivamente alla chiusura degli impianti ENEL, e quindi lo svuotamento dei condotti ENEL, tanto il torrente d'acqua creatosi al centro della frana che quello spostato a monte si sono rapidamente esauriti, il che fa presumere che la provenienza dell'acqua cagionante il cedimento del terreno dai condotti ENEL. L'unico che seppur diminuito nella sua portata continua a gettare acqua è quello spostato a valle della frana..."*.

In estrema sintesi, stando a quanto dichiarato nell'istanza, a seguito della chiusura degli impianti e allo svuotamento della condotta forzata, la presenza di acqua lungo il versante è diminuita rapidamente. Ciò appare ragionevole per quanto finora detto circa l'alta pendenza del versante, che regola la rapidità di trasformazione degli afflussi in deflussi, e la discreta permeabilità dei materiali che costituiscono la coltre superficiale che determina un rapido drenaggio delle acque.

Anche il perdurare, se pur in forma minore, dell'emergenza di acqua nella parte a valle della frana appare naturale, dato che essa corrisponde, se gli scriventi interpretano correttamente le parole dell'istanza, con il sorgenti di Casa Giardino, che come detto rappresenta un importante complesso sorgentizio nell'area.

## 14 Suggerimenti per gli interventi di mitigazione del rischio

Al fine di controllare la stabilità degli edifici nell'area si raccomanda la continuazione delle attività di monitoraggio dell'abitato di Pian dei Sisi, sia mediante interferometria *radar* satellitare sia con misure inclinometriche e topografiche *in situ*.

In particolare, il Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze sta portando avanti il monitoraggio in continuo delle deformazioni del terreno del territorio regionale toscano tramite interferometria radar satellitare nell'ambito dell'accordo stipulato il 06 marzo 2019, ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 4 del Decreto Legge 02 gennaio 2018, n. 1 con la Regione Toscana "Attività di monitoraggio del rischio idrogeologico nel territorio della Regione Toscana". Questa attività, di durata triennale, permette misurazioni non invasive e ad alta precisione degli spostamenti superficiali del terreno per l'individuazione e la mappatura delle aree interessate dai più alti tassi di deformazione e per la segnalazione tempestiva di punti di misura che mostrano anomalie di movimento (*i.e.*, cambi di *trend*, variazioni repentine della velocità nelle serie temporali di deformazione). Questo servizio rappresenta un importante strumento operativo di monitoraggio in continuo, con frequenza di aggiornamento dei dati inferiore al mese (*i.e.*, 12 giorni), utile per l'identificazione di eventuali accelerazioni di movimento del terreno.

Si consiglia di mantenere attivo il monitoraggio strumentale degli edifici: tramite gli inclinometri, eseguendo le letture nei cinque fori di sondaggio già equipaggiati, in particolare per verificare le due flessioni di scostamento profonde rilevate durante le ultime misure; tramite i fessurimetri a parete, continuando le letture sulle lesioni degli edifici già monitorati per controllare l'evoluzione temporale del quadro fessurativo; tramite la stazione totale topografica per il monitoraggio delle deformazioni in superficie con elevata precisione millimetrica. La cadenza consigliata delle misurazioni *in situ* è mensile fino all'inizio delle piogge, e più frequente (*i.e.*, quindicinale) nella stagione piovosa.

Si suggerisce inoltre un eventuale attività di monitoraggio con sistema GPS su postazioni fisse di lettura tramite campagne di misura periodiche che, grazie ai sistemi di posizionamento globale satellitare, consentono misurazioni delle coordinate di punti noti con precisione sub-centimetrica, permettendo di effettuare valutazioni accurate degli spostamenti plano-altimetrici in intervalli temporali prestabiliti.

## 15 Conclusioni

Nell'ambito del servizio relativo allo "Studio geologico-tecnico della frana di Pian dei Sisi nel Comune di Abetone Cutigliano (PT) per la valutazione degli interventi di mitigazione del rischio", il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI) ha effettuato analisi e studi dell'area interessata dalla frana avvenuta il 19 febbraio 2018, con lo scopo di approfondire le conoscenze della frana stessa anche al fine di supportare le necessarie misure di mitigazione del rischio.

In primo luogo, con lo scopo di individuare tutte le informazioni utili per l'approfondimento delle conoscenze della frana, è stata raccolta ed esaminata la documentazione esistente, ovvero i rapporti prodotti da Getas Petrogeo, ENEL e del Consulente Tecnico del Pubblico Ministero del Tribunale di Pistoia e i filmati disponibili.

È stata effettuata la caratterizzazione morfometrica della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018. La frana si è verificata su un versante boscato particolarmente acclive in sponda destra del Torrente Lima, circa 70/80 metri a valle del piano della SS12 lungo cui è ubicato il piccolo bacino idrico di proprietà ENEL. La frana può essere definita come uno "scivolamento di terreno – colata di detrito" (*soil slip – debris flow- debris avalanche*) (Varnes, 1978, Hungr et al., 2014). La frana, originatasi come scivolamento di terreno (*soil slip*), è poi evoluta in colamento rapido (*debris flow- debris avalanche*). La frana ha interessato la copertura superficiale del versante, portando alla luce il tetto del substrato alterato nella zona di alimentazione, per uno spessore di materiale mobilitato di alcuni metri. Il materiale coinvolto è stato quasi interamente fluidificato dalle cospicue venute d'acqua diffuse sul pendio ed è in gran parte confluito nel sottostante Torrente Lima.

Il versante su cui si è sviluppata la frana è caratterizzato dalla presenza di litologie torbiditico-arenacee (Arenarie di Monte Modino-Cervarola) con assetto a franapoggio, passanti a formazioni più prettamente argillose e marnose in corrispondenza del Torrente Lima (Argille di Fiumalbo e Marne di Marmoreto). Sono presenti estese e potenti coperture detritiche superficiali.

Tramite rilievo di campagna e analisi di foto e video acquisiti sul posto, è stata effettuata una suddivisione della frana in tre settori: una zona di alimentazione (dove si è avuto l'innesco della frana per scivolamento), una zona di scorrimento e una zona di accumulo al piede del versante, dove il pendio termina nel sottostante Torrente Lima.

I tre filmati eseguiti con il drone la mattina del 20 febbraio 2018 mostrano la fuoriuscita di rilevanti volumi di acqua, non soltanto all'interno del corpo di frana (un punto di emergenza è coincidente con l'alveo di frana), ma su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di Pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima.

Ai fini della valutazione dell'entità dell'evento meteorico registrato precedentemente e in concomitanza della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018, sono stati presi in considerazione i dati pluviometrici relativi alle stazioni più prossime alla zona in esame (Casotti di Cutigliano e Melo). L'analisi dei valori di pioggia, riferiti a durate comprese fra 60 ore e 30 giorni prima dell'evento, mostrano come le precipitazioni cadute prima dell'evento siano da considerarsi assolutamente ordinarie, ben al di sotto delle soglie di innesco di fenomeni franosi superficiali. Il periodo di piogge prolungate registrato a tra novembre e dicembre 2017 è avvenuto quasi due mesi prima della frana del 19 febbraio 2018 e quindi non è da ritenersi in alcun modo causa predisponente o scatenante della frana (*debris flow/debris avalanche*) del 19 febbraio 2018, che rientra nella tipologia di frane innescate da piogge immediatamente precedenti, talvolta concomitanti, all'evento stesso.

Il massiccio deflusso superficiale evidente dai filmati eseguiti con il drone, presente sia all'interno del corpo di frana sia su tutto il tratto di versante compreso tra l'abitato di Pian dei Sisi e l'alveo del Torrente Lima, appare quindi assolutamente anomalo e non giustificabile dallo scarso apporto meteorico dei giorni precedenti.

Sono stati eseguiti due sopralluoghi a Pian dei Sisi, il primo in data 7 maggio 2019 per verificare lo stato dei luoghi dopo un anno dalla frana del 19 febbraio 2018, e il secondo in data 17 luglio 2019, dedicato all'esecuzione di prove *in situ*.

Il primo sopralluogo del 7 maggio 2019 ha permesso di verificare la totale assenza di deflusso superficiale all'interno della frana, a testimonianza della discreta permeabilità e ottima capacità di drenaggio dei terreni, pur a ridosso di un periodo di piogge prolungato, come confermato dall'analisi dei dati pluviometrici antecedenti il sopralluogo. Il sopralluogo del 7 maggio 2019 ha permesso anche di rilevare la presenza di lesioni diffuse a carico degli edifici l'abitato di Pian dei Sisi, significative su alcuni di essi.

Durante il secondo sopralluogo, effettuato in data 17 luglio 2019, sono state effettuate prove *in situ* per la caratterizzazione geofisica e geotecnica dei materiali di copertura interessati dalla frana del 19 febbraio 2018.

I risultati della campagna di misure geofisiche (tomografie elettriche 2D e misure di *noise* sismico) effettuate in data 17 luglio 2019 fino ad una profondità massima di 8 m mostrano che il *bedrock* non è stato raggiunto e che il materiale presente è ascrivibile a terreni di copertura derivanti dalla disgregazione e dall'alterazione del Macigno. I modelli di resistività sono coincidenti con quelli di una copertura che granulometricamente è una sabbia secca/asciutta.

È stata effettuata la caratterizzazione geotecnica dei materiali coinvolti nella frana tramite prove *in situ* ed analisi di laboratorio. L'analisi granulometrica dei due campioni prelevati indica che essi sono classificabili come "sabbia con ghiaia debolmente limosa" e "sabbia con ghiaia limosa", rispettivamente, secondo la nomenclatura AGI (1977). Le prove di taglio hanno restituito valori di angolo di attrito ( $\phi'$ ) e coesione ( $c'$ ) di 35,5° e 7,4 kPa per il campione 1 e valori di 34,3 per l'angolo di attrito ( $\phi'$ ) e 13,3 di coesione ( $c'$ ) per il campione 2. La misura della permeabilità ha restituito valori dell'ordine di grandezza di  $10^{-6}$ , che sono tipici di materiali costituiti da sabbie fini.

I dati degli inclinometri installati a seguito della frana mostrano lievi oscillazioni registrate in superficie che rientrano nell'errore strumentale ( $\pm 0,5$  mm). Negli inclinometri i1 ed i2, i più vicini alla frana del 19 febbraio, sono visibili due flessioni di scostamento; una intorno agli 8-9 m, che potrebbe essere legata all'orizzonte argilloso di circa 1 metro di spessore a tale profondità, e una al di sotto dei 14 m di profondità, che potrebbe essere legata alla forte fratturazione delle arenarie a tale profondità.

I fessurimetri a griglia installati su 47 lesioni su nove case dell'abitato di Pian dei Sisi a partire dal 23 febbraio 2018 mostrano un comportamento delle lesioni che si può considerare "stazionario". È necessario notare comunque che il periodo del controllo cade essenzialmente nella stagione estiva.

L'analisi dei dati della stazione totale di alta precisione relativi a 6 misure tra giugno e agosto 2018 mostra che i punti rilevati risultano stabili e i movimenti riscontrati rientrano nei valori della precisione teorica della strumentazione previsti dalla casa costruttrice.

L'analisi dei dati *radar* satellitari interferometrici della costellazione Sentinel-1, aggiornati alla data dell'ultima acquisizione disponibile (dal 12 dicembre 2014 al 23 ottobre 2019 in orbita ascendente e dal 22 marzo 2015 al 27 ottobre 2019 in orbita discendente), non mostrano variazioni significative nei giorni precedenti all'innescò della frana rispetto all'andamento pregresso e pertanto hanno escluso la presenza di significativi segnali precursori dell'innescò della frana. Inoltre, le serie temporali di spostamento sono caratterizzate da un andamento lineare e velocità costanti, con variazioni che rientrano entro la sensibilità della tecnica di analisi interferometrica.

Al fine di caratterizzare le condizioni di innescò della frana avvenuta il 19 febbraio 2018 in località Pian dei Sisi è stata condotta una modellazione numerica idrologica-geotecnica. L'obiettivo è stato quello di verificare se le piogge antecedenti l'evento franoso siano state in grado di innescare la frana stessa. Per fare questo è stata utilizzata una analisi combinata filtrazione-stabilità.

L'analisi di filtrazione è stata condotta assumendo che tutta la precipitazione si sia infiltrata nel terreno senza considerare il contributo della vegetazione, in termini di intercettazione della precipitazione stessa ed in termini di aumento della coesione dovuto agli apparati radicali. L'analisi condotta rappresenta quindi la situazione più cautelativa, ovvero considerando il caso peggiore in termini di quantità di acqua infiltrata.

L'analisi di stabilità, condotta utilizzando i dati dell'analisi di filtrazione con una simulazione di trenta giorni, evidenzia che il Fattore di Sicurezza dei due giorni precedenti la frana e del giorno stesso è circa 1.4, molto sopra il valore dell'equilibrio limite.

I risultati dell'analisi di filtrazione e stabilità hanno chiaramente indicato che le precipitazioni registrate i trenta giorni precedenti l'evento non sono in alcun modo sufficienti ad innescare la frana avvenuta nella tarda serata del giorno 19 febbraio 2018 a Pian di Sisi.

I risultati mostrano anche che per innescare la frana sarebbero stati necessari circa 100 mm di pioggia nelle 24 precedenti la frana, un valore nettamente superiore a quello realmente misurato (0.2 mm).

L'innescò della frana di Pian dei Sisi del 19 febbraio 2018 deve essere ricondotto in maniera esclusiva alla fuoriuscita di acqua dall'apertura generatasi nella condotta forzata a valle della vasca di carico ENEL. La rottura della lamiera della condotta forzata è documentata dal video ispezione eseguito successivamente all'evento del 19 febbraio 2018.

L'anomala quantità di acqua, proveniente dalla condotta forzata e infiltratasi nel versante, documentata poi nelle riprese effettuate da drone la mattina del 20 febbraio 2018, sottoforma di emergenze all'interno e ai lati del perimetro di frana, rappresenta l'unica causa di innescò della frana di Pian dei Sisi.

Al fine di controllare la stabilità degli edifici nell'area si raccomanda la continuazione delle attività di monitoraggio dell'abitato di Pian dei Sisi, sia mediante interferometria *radar* satellitare sia con misure inclinometriche e topografiche in situ ed eventuale monitoraggio con sistema GPS su postazioni fisse di lettura tramite campagne di misura periodiche.

## 16 Bibliografia

- Crosta G. & Frattini P. (2002). Rainfall thresholds for triggering soil slip and debris flow. Proc. 2nd Plinius Int. Conf. on Mediterranean Storms, 16–18 October 2000, Siena, Italy.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Epis, T., & Morlotti, E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324(1-2), 71-89.
- Hales, T. C. (2018). Modelling biome-scale root reinforcement and slope stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2157-2166.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(9), 3460-3470.
- Fredlund, D.G., Xing, A. Fredlund M.D., and Barbour, S.L., (1996) The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength to the Soil-water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 440-448.
- Fredlund D. G. & Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons Inc.
- Green R.E. & Corey G. J. SI. (1971). Calculation of Hydraulic conductivity: further evaluation of some predictive methods. *Soil Science Society of America Proceeding*, 35, pp. 3-8.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., & Catani, F. (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, 9(4), 485-495.
- Morgenstern R, Price VE (1965) The analysis of stability of general slip surfaces. *Géotechnique* 15:181–189
- Moser M. & Hoensinn F. (1983) – Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Eng Geol* 19: 185–211.
- Plesi, G. (2002). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000, Foglio 235 "Pievepelago". SELCA, Firenze.
- Rosi, A., Lagomarsino, D., Rossi, G., Segoni, S., Battistini, A., & Casagli, N. (2015). Updating EWS rainfall thresholds for the triggering of landslides. *Natural Hazards*, 78(1), 297-308.
- Vanapalli, S.K., Fredlund D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W., 1996. Model for the Prediction of Shear Strength with respect to Soil Suction. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 379-392.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:892-898.
- Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33.

## 17 Allegati

- 1) Relazione preliminare di progresso del 16 giugno 2018 a firma del Dott. Geol. Paride Antolini, Consulente Tecnico della Procura della Repubblica di Pistoia nel procedimento n.1331/18 RGNR;
- 2) Relazione dal titolo "*Evento franoso del 20.02.2019 in Loc. Pian dei Sisi - Stato di avanzamento delle indagini per la sicurezza del sito abitativo rapporto aggiornato al 7 settembre 2018*" redatta dal Dott. Giuseppe GHEZZI di Getas Petrogeo;
- 3) Video 1 drone del 20 febbraio 2018;
- 4) Video 2 drone del 20 febbraio 2018;
- 5) Video 3 drone del 20 febbraio 2018;
- 6) Video ispezione condotta;
- 7) Specifiche della tecnica SqueeSAR;
- 8) Specifiche delle indagini geofisiche;
- 9) Certificati delle prove di laboratorio effettuate sui campioni raccolti a Pian dei Sisi;
- 10) Certificati delle proprietà indici dei campioni raccolti a Pian dei Sisi;
- 11) Certificati delle prove di permeabilità *in situ* Amoozometer effettuate a Pian dei Sisi.