

IL CONSIGLIO SNPA

- VISTO** l'art. 13 della legge 28 giugno 2016 n. 132 che, al fine di promuovere e indirizzare lo sviluppo coordinato delle attività del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente ha istituito il Consiglio del Sistema nazionale (di seguito Consiglio SNPA), presieduto dal presidente dell'ISPRA e composto dai legali rappresentanti delle agenzie e dal direttore generale dell'ISPRA;
- VISTO** il Regolamento di funzionamento del Consiglio SNPA approvato con delibera n. 75/2020 del 30 aprile 2020;
- VISTO** il Programma Triennale SNPA 2018-2020 approvato nella seduta del Consiglio SNPA del 4 aprile 2018;
- VISTO** il Programma Triennale SNPA 2021-2023 approvato nella seduta del Consiglio SNPA dell'8 aprile 2021 con delibera n. 100/2021;
- CONSIDERATO** che all'interno del SNPA è emersa la necessità di adottare regole condivise per conseguire obiettivi di razionalizzazione, armonizzazione ed efficacia delle attività e delle informazioni derivanti dalle funzioni assegnate al Sistema dall'art. 3 della l. n. 132/2016;
- VISTO** l'art. 3, comma 1, della l. n. 132/2016 che assegna al SNPA, tra le sue funzioni, il monitoraggio dello stato dell'ambiente, avvalendosi di reti di osservazione, nonché il controllo delle fonti di pressioni sull'ambiente, derivanti da processi territoriali e da fenomeni di origine antropica o naturale, anche di carattere emergenziale;
- CONSIDERATO** che ad esito di un confronto avviato in occasione di RemTech Expo con soggetti esterni al SNPA, l'ISPRA ha sviluppato in collaborazione con alcune agenzie (Lombardia, Liguria, Piemonte, Veneto, Sardegna) il documento "Linee guida per il monitoraggio delle frane" e sottoposto ai coordinatori del TIC II "Controlli e Monitoraggi";
- VISTO** che il predetto documento è stato approvato in via preliminare con delibera n. 102/2021 del Consiglio SNPA, ai fini della consultazione pubblica;
- VISTA** la nota di sintesi al Consiglio che descrive gli esiti della consultazione pubblica;

- VISTO** il testo delle “Linee Guida SNPA per il monitoraggio delle frane” come rivisto ad esito della consultazione pubblica;
- VISTA** la proposta dei coordinatori del TIC II;
- RITENUTO** di adottare in via definitiva il documento;
- VISTO** l’art. 12 del Regolamento del Consiglio SNPA che definisce la rilevanza anche esterna delle deliberazioni del Consiglio e la loro immediata esecutività, fatta salva la possibilità di prevedere nel medesimo provvedimento una diversa efficacia temporale;

DELIBERA

1. di approvare in via definitiva il documento “Linee guida SNPA per il monitoraggio delle frane”, che è parte integrante della presente delibera;
2. di ritenere il presente atto, ai sensi dell’art. 12 del predetto Regolamento di funzionamento, immediatamente esecutivo; per il territorio delle Province Autonome di Trento e Bolzano l’atto stesso è applicato nel rispetto delle disposizioni dello statuto di autonomia speciale, delle relative norme di attuazione e della sentenza n. 212/2017 della Corte Costituzionale;
3. di dare mandato ad ISPRA di pubblicare il presente atto sul sito www.sn Timer ambiente.it;
4. di dare, altresì, mandato ad ISPRA di dare notizia dell’avvenuta approvazione del presente atto al Ministero della Transizione Ecologica nonché al Presidente della Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome.

Roma, 12 luglio 2021

Il Presidente
F.TO
Stefano Laporta

LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO DELLE FRANE

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 12.07.21. Doc. n.132/21



LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO DELLE FRANE

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 12.07.21. Doc. n.132/21

Il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) è operativo dal 14 gennaio 2017, data di entrata in vigore della Legge 28 giugno 2016, n.132 "Istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale". Esso costituisce un vero e proprio Sistema a rete che fonde in una nuova identità quelle che erano le singole componenti del preesistente Sistema delle Agenzie Ambientali, che coinvolgeva le 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA), oltre a ISPRA.

La legge attribuisce al nuovo soggetto compiti fondamentali quali attività ispettive nell'ambito delle funzioni di controllo ambientale, monitoraggio dello stato dell'ambiente, controllo delle fonti e dei fattori di inquinamento, attività di ricerca finalizzata a sostegno delle proprie funzioni, supporto tecnico-scientifico alle attività degli enti statali, regionali e locali che hanno compiti di amministrazione attiva in campo ambientale, raccolta, organizzazione e diffusione dei dati ambientali che, unitamente alle informazioni statistiche derivanti dalle predette attività, costituiranno riferimento tecnico ufficiale da utilizzare ai fini delle attività di competenza della pubblica amministrazione.

Attraverso il Consiglio del SNPA, il Sistema esprime il proprio parere vincolante sui provvedimenti del Governo di natura tecnica in materia ambientale e segnala al MiTE e alla Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le regioni e le province autonome di Trento e Bolzano l'opportunità di interventi, anche legislativi, ai fini del perseguimento degli obiettivi istituzionali. Tale attività si esplica anche attraverso la produzione di documenti, prevalentemente Linee Guida o Report, pubblicati sul sito del Sistema SNPA e le persone che agiscono per suo conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in queste pubblicazioni.

ISBN 978-88-448-1071-9

© Linee Guida SNPA 32/2021

Riproduzione autorizzata citando la fonte.

Coordinamento della pubblicazione online:
Daria Mazzella – ISPRA

Copertina: Alessia Marinelli, Ufficio Grafica ISPRA

Foto di copertina: Frana Ruinon (ARPA Lombardia)

Luglio 2021

Coordinamento editoriale delle Linee guida per il monitoraggio delle frane
Luca Dei Cas², Alessandro Trigila¹, Carla Iadanza¹

Comitato di redazione

ISPRA, ARPA Lombardia, ARPA Piemonte, ARPA Liguria, ARPA Veneto

Autori (in ordine alfabetico)

Luigi Aceto¹⁰ (Par. C.11), Paolo Allasia¹⁰ (Par. C.8), Luca Amico⁹ (Par. C.7), Marco Baldo¹⁰ (Par. 4.1.7, 4.1.11, A.2.3, A.2.7), Gianluca Beccaris⁴ (Par. 4.2.1, 4.2.6, 5.7, 5.7.1, 5.7.3, A.4.1, A.4.2, A.4.3, A.4.8, A.4.9, A.4.10), Davide Bertolo⁷ (Par. 2.2.1, A.5.1, A.5.2, A.5.3, C.1, C.2), Silvia Bianchini¹² (Par. 4.1.9, A.2.5, C.2), Dennis Bonetti² (Par. 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5, A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4, A.2.1, A.4.5, A.4.6, A.4.7, intro Allegato), Luigi Borrelli¹⁰ (Par. C.11), Francesca Bozzano¹⁸ (Par. C.12), Stefano Calcaterra¹ (Par. 4.1.6, 5.7, 5.7.2, 5.7.3, A.2.2, A.6.2.2, C.9), Domenico Caracciolo⁶ (Par. 4.3.1), Giulio Carcani¹ (Par. A.6.2.2), Tommaso Carlà¹² (Par. 4.1.10, A.2.6, C.2), Nicola Casagli¹² (Par. C.2, C.8), Matteo Cesca⁵ (Par. 4.1.13, C.5), Federica Cotecchia¹⁷ (Par. C.10), Velio Coviello^{10,15} (Par. 4.1.13, A.3, A.3.1, A.3.2, A.3.3, A.3.4, C.4), Stefano Crema¹⁰ (Par. 4.1.13, A.3, A.3.1, A.3.2, A.3.3, A.3.4), Giovanni Battista Crosta¹³ (Par. 2.2.4), Luca Dei Cas² (intro Cap. 1, Par. 1.1, 2.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, intro Cap. 3, Par. 3.1, 3.2, 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.8, 4.2.2, 4.2.3, A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4, A.2, A.2.1, A.2.4, A.4.4, A.4.5, A.5, A.5.1, A.5.2, A.5.3, intro Allegato), Alessandro Delitalà⁶ (par. 4.3.2, A.5.4), Jacopo De Rosa¹⁶ (Par. C.9), Fiorina Di Gioia⁹ (Par. C.7), Caterina Di Maio¹⁶ (Par. C.9), Silvio Di Nocera¹⁴ (Par. C.9), Federica Ferrigno¹ (Par. C.8), Piera Gambino¹ (Par. 4.1.6, 5.7, 5.7.2, 5.7.3, A.2.2, A.6.2.2, C.9), Giovanni Gigli¹² (Par. 4.1.8, A.2.4, C.8), Daniele Giordan¹⁰ (Par. 4.1.7, 4.1.11, 8.1, 8.2, A.2.3, A.2.7, C.8), Giovanni Gullà¹⁰ (Par. C.11), Carla Iadanza¹ (intro Cap. 1, Par. 1.1, 1.2, intro Appendice C), Emanuele Intrieri¹² (Par. C.8), Luca Lanteri³ (intro Cap. 6, Par. 6.1, 8.1, 8.2), Pierluigi Lanza³ (intro Cap. 7, Par. 7.1, 7.2, 7.3), Giorgio Lollino¹⁰ (Par. C.8), Piernicola Lollino¹⁰ (Par. C.8), Pierpaolo Macconi⁸ (Par. C.4), Volkmar Mair⁸ (Par. C.3), Serena Majetta²¹ (Par. C.12), Lorenzo Marchi¹⁰ (Par. 4.1.13, A.3, A.3.1, A.3.2, A.3.3, A.3.4, C.4), Claudio Margottini¹ (Par. 4.1.14), Paolo Mazzanti^{18,19} (Par. 4.1.12, C.12), Giuseppina Moletta³ (Par. 2.1, intro Cap. 4), Aldo Orrù⁶ (Par. 4.3.1), Benedetto Porfidia¹ (Par. C.9), Federico Raspini¹² (Par. 4.1.9, A.2.5, C.2), Giacomo Re Fiorentin³ (intro Cap. 7, Par. 7.1, 7.2, 7.3), Saverio Romeo¹⁸ (Par. C.12), Francesca Santaloia¹⁰ (Par. C.10), Filippo M. Soccodato²⁰ (Par. C.6), Monica Solimano⁴ (Par. 4.2.1, 4.2.6, 5.7, 5.7.1, 5.7.3, A.4.1, A.4.2, A.4.3, A.4.8, A.4.9, A.4.10), Carmelo Sorce²¹ (Par. C.12), Daniele Spizzichino¹ (Par. 2.1.1, 4.1.14, intro Cap. 5), Claudia Strada⁸ (Par. C.3), Vito Tagarelli¹⁷ (Par. C.10), Mauro Tarabro³ (Par. 2.1), Patrick Thuegaz⁷ (Par. 4.2.2, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, A.4.4, A.5.1, A.5.2, A.5.3, A.6.1, A.6.2, A.6.3, A.6.4, C.2), Paolo Tommasi¹¹ (Par. C.6), Alessandro Trigila¹ (intro Cap. 1, Par. 1.1, 1.2, intro Appendice C), Gianfranco Urciuoli¹⁴ (Par. 4.2.7, A.4.11), Mario Valiante¹⁸ (Par. C.12), Roberto Vassallo¹⁶ (Par. C.9).

¹ISPRA, ²ARPA Lombardia, ³ARPA Piemonte, ⁴ARPA Liguria, ⁵ARPA Veneto, ⁶ARPA Sardegna, ⁷Regione Autonoma Valle d'Aosta, ⁸Provincia Autonoma di Bolzano, ⁹Comune di Ancona, ¹⁰CNR IRPI, ¹¹CNR IGAG, ¹²Università degli Studi di Firenze, ¹³Università degli Studi di Milano-Bicocca, ¹⁴Università degli Studi di Napoli Federico II, ¹⁵Libera Università di Bolzano, ¹⁶Università degli Studi della Basilicata, ¹⁷Politecnico di Bari, ¹⁸Sapienza Università di Roma, ¹⁹Centro di Ricerca CERi - Sapienza Università di Roma, ²⁰Alta Scuola, ²¹Anas SpA

Le Linee Guida sono state sottoposte a *peer review* interna a cura degli autori e a consultazione pubblica.

Citare le Linee guida come segue:

Dei Cas L., Trigila A., Iadanza C. (eds) Linee Guida per il monitoraggio delle frane. Linee Guida SNPA 32/2021

ABSTRACT

Il monitoraggio *in situ* è fondamentale per approfondire la conoscenza dei fenomeni franosi e valutare i trend deformativi in atto, supportare la progettazione delle opere di stabilizzazione e verificarne l'efficacia nel tempo, pianificare correttamente il territorio e attivare procedure di allertamento della popolazione per la salvaguardia delle vite umane.

Le presenti Linee Guida hanno l'obiettivo di armonizzare le procedure e fornire riferimenti e criteri per la progettazione, l'installazione, la gestione e la manutenzione delle reti di monitoraggio delle frane, nonché per la diffusione dei dati. Affrontano le seguenti tematiche: valenza e limiti delle differenti tipologie di reti di monitoraggio, caratteristiche tecniche della strumentazione, modalità di installazione, acquisizione, trasmissione e archiviazione del dato, significatività e limiti delle soglie/scenari per la previsione dei fenomeni franosi.

Le LLGG intendono rappresentare uno strumento di riferimento per i soggetti che operano sul territorio nel monitoraggio e controllo dei fenomeni franosi, quali Pubbliche Amministrazioni, gestori di reti infrastrutturali, liberi professionisti.

Parole chiave: reti di monitoraggio, frane, misure di superficie, misure in foro, misure automatiche, misure manuali, sistemi di acquisizione, trasmissione dati

In situ monitoring is essential to get a better understanding of landslides and evaluate deformation trends, support the design of stabilization works and verify their effectiveness over time, contribute to a proper urban planning and activate procedures of early warning to protect human lives.

These Guidelines aim to harmonize procedures and provide references and criteria for the design, installation, management and maintenance of landslide monitoring networks, as well as for the dissemination of data.

They address the following issues: value and limits of the different types of monitoring networks, technical details of the instrumentation, installation, data acquisition, transmission and archiving systems, significance and limits of thresholds/scenarios for landslide prediction.

The guidelines are intended to be a reference tool for those who operate in the field of landslide monitoring and control, such as Public Administrations, infrastructure network managers, professionals.

Keywords: monitoring networks, landslides, surface measurements, in-depth measurements, automatic measurements, manual measurements, acquisition systems, data transmission

PRESENTAZIONE

Sono lieto di presentare le *Linee Guida per il monitoraggio delle frane* a cura del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente. L'importanza di questo documento è duplice: da una parte l'Italia, con oltre 620.000 frane censite nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia - IFFI, è il paese con più frane in Europa, dall'altra l'attività di monitoraggio *in situ* scontava una carenza di linee guida a valenza nazionale che armonizzassero le procedure e fornissero riferimenti e criteri per dare uniformità alle reti di monitoraggio e controllo delle frane.

Uno dei compiti fondamentali del Sistema è infatti assicurare regole condivise per conseguire obiettivi di razionalizzazione, armonizzazione ed efficacia delle attività e dei dati derivanti dalle funzioni assegnate dalla L. 132/2016, al fine di tutelare l'ambiente in modo uniforme sul territorio nazionale. Le Linee guida hanno un'impostazione pratica e operativa, valorizzando il patrimonio delle esperienze maturate e delle conoscenze acquisite. L'SNPA, nello spirito di massima collaborazione, ha coinvolto altri enti pubblici di ricerca e università nella stesura del documento.

In attuazione dei principi dell'*open government* che mirano a rendere procedimenti e decisioni più trasparenti e aperti alla partecipazione, abbiamo deciso di sottoporre le presenti Linee guida a consultazione pubblica per aprire un confronto con il mondo della ricerca e con gli altri soggetti pubblici e privati che si occupano del monitoraggio delle frane.

Mi auguro che le Linee guida possano diventare un utile strumento di lavoro per tutti coloro che operano sul territorio con finalità di previsione, prevenzione, monitoraggio, controllo dei fenomeni franosi e allertamento anche nell'ambito di Servizi Nazionali e Regionali di protezione civile. Auspico altresì che diano una forte spinta al potenziamento delle reti regionali esistenti di monitoraggio delle frane e alla realizzazione delle stesse nelle regioni che ancora non ne dispongono.

Stefano Laporta

*Presidente dell'Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e del Sistema
Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA)*

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Finalità delle linee guida	2
1.2	Riferimenti normativi e raccomandazioni	2
1.2.1	Riferimenti normativi nazionali	2
1.2.2	Riferimenti normativi regionali	4
1.2.3	Altri riferimenti normativi e raccomandazioni	4
2	LE RETI DI MONITORAGGIO FRANE: FINALITÀ E LIMITI	9
2.1	Rete con finalità conoscitiva	9
2.1.1	Utilizzo del monitoraggio conoscitivo per la scelta, dimensionamento e verifica dell'efficacia delle opere di mitigazione	11
2.2	Rete con finalità di allertamento	13
2.2.1	Il criterio di ridondanza	15
2.2.2	Reperibilità	16
2.2.3	Soglie e scenari	17
2.2.4	Modellazione dei dissesti e individuazione di soglie	18
3	ATTIVITÀ E FASI DELLA PROGETTAZIONE	23
3.1	Progetto di fattibilità	24
3.1.1	Documentazione progetto di fattibilità	25
3.2	Progetto definitivo ed esecutivo	25
3.2.1	Documentazione progetto definitivo	25
3.2.2	Documentazione progetto esecutivo	26
4	MISURE	27
4.1	Misure di superficie	27
4.1.1	Misure distometriche	27
4.1.2	Misure estensimetriche	28
4.1.3	Misure fessurimetriche	29
4.1.4	Misure inclinometriche a parete	30
4.1.5	Misure topografiche tradizionali	30
4.1.6	Misure GPS/GNSS	32
4.1.7	Misure Lidar	35
4.1.8	Misure interferometriche da terra	39
4.1.9	Misure interferometriche da satellite	41
4.1.10	Misure con radar doppler	45
4.1.11	Misure per mezzo di droni – UAV	47
4.1.12	Misure per mezzo di fotomonitoraggio	50
4.1.13	Misure per colate rapide	52
4.1.14	Misure con sensori a fibra ottica	54

4.2	Misure in foro.....	56
4.2.1	Misure inclinometriche	56
4.2.2	Misure multiparametriche	61
4.2.3	Misure TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>)	64
4.2.4	Misure estensimetriche multibase	65
4.2.5	Misure assestimetriche	66
4.2.6	Misure piezometriche.....	68
4.2.7	Misure di suzione.....	70
4.3	Misure meteo-pluviometriche.....	72
4.3.1	Misure pluviometriche.....	72
4.3.2	Misure anemometriche	74
5	INSTALLAZIONE E SISTEMI DI ACQUISIZIONE	77
5.1	Strumentazione di misura.....	78
5.2	Cablaggi e accessori per l'installazione.....	78
5.3	Sistemi di alimentazione.....	79
5.4	Strumentazione per l'acquisizione dei dati.....	80
5.5	Sistemi di trasmissione dei dati.....	81
5.6	Server di acquisizione.....	83
5.7	Monografie	83
5.7.1	Monografie e schede di campagna di stazioni inclinometriche e piezometriche	83
5.7.2	Monografie e schede di campagna di stazioni GPS	87
5.7.3	Format monografia SNPA.....	88
6	ARCHIVIAZIONE, GESTIONE E FORMATO DATI.....	91
6.1	File dati e formato di scambio.....	91
6.1.1	Specifiche tecniche per la trasmissione e il trattamento dei dati grezzi.....	92
6.1.2	Banca dati	94
6.1.3	Anagrafiche dei sensori	94
7	ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE	97
7.1	Manutenzione preventiva.....	97
7.1.1	Punti di misura	97
7.1.2	Strumenti manuali (SLM)	98
7.1.3	Strumenti automatizzati (SLC-SLR).....	98
7.1.4	Frequenza.....	99
7.2	Manutenzione correttiva	100
7.2.1	Punti di misura	100
7.2.2	Strumenti manuali.....	100
7.2.3	Strumenti automatizzati	100
7.2.4	Frequenza.....	101
7.3	Aspetti gestionali.....	101
7.3.1	Rapporti e documentazione	101
7.3.2	Mezzi di trasporto e attrezzature	101

8	COMUNICAZIONE DELLE INFORMAZIONI.....	103
8.1	Diffusione dei dati	103
8.2	Comunicazione delle informazioni elaborate	103
	APPENDICE	107
A.	STRUMENTAZIONE: SPECIFICHE TECNICHE E INSTALLAZIONE.....	109
A.1	Strumentazione superficiale.....	109
A.1.1	Distometri a nastro.....	109
A.1.2	Estensimetri	109
A.1.3	Fessurimetri	110
A.1.4	Inclinometri da parete	112
A.2	Strumentazione topografica e radar	114
A.2.1	Stazione totale e mire ottiche	114
A.2.2	Strumentazione GNSS	117
A.2.3	Lidar.....	119
A.2.4	Radar interferometrico da terra.....	121
A.2.5	Sensori radar satellitari	123
A.2.6	Radar doppler	128
A.2.7	Droni - UAV.....	130
A.3	Strumentazione colate rapide	131
A.3.1	Sensori di livello.....	131
A.3.2	Geofoni	132
A.3.3	Cavi a strappo.....	134
A.3.4	Telecamera/fotocamera	135
A.4	Strumentazione in foro	137
A.4.1	Tubi inclinometrici	137
A.4.2	Sistema inclinometrico manuale	141
A.4.3	Sonde inclinometriche fisse	142
A.4.4	Colonne multiparametriche	143
A.4.5	Cavo TDR ed ecometro in foro	145
A.4.6	Estensimetri multibase.....	147
A.4.7	Assestimetri	148
A.4.8	Tubi piezometrici.....	150
A.4.9	Freatimetro	152
A.4.10	Sensori freatimetrici fissi nei piezometri	153
A.4.11	Tensiometri	154
A.5	Strumentazione meteo-pluviometrica	156
A.5.1	Pluviometri.....	156
A.5.2	Termometri	158
A.5.3	Nivometri.....	159
A.5.4	Anemometri	160
A.6	Strumentazione per l'acquisizione e trasmissione dati.....	161
A.6.1	Data Logger	161

A.6.2	Sistemi di trasmissione e telecontrollo.....	163
A.6.3	Sistemi di alimentazione elettrica	165
A.6.4	Cablaggi, supporti e accessori di installazione	170
B.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	173
C.	CASI DI STUDIO	179
C.1	Frana di La Saxe (AO, Valle d'Aosta).....	183
C.1.1	Inquadramento del sito	183
C.1.2	Sistema di monitoraggio	183
C.1.3	Risultati e discussione	183
C.1.4	Riferimenti bibliografici.....	184
C.2	Frana di Bosmatto (AO, Valle d'Aosta).....	187
C.2.1	Inquadramento del sito	187
C.2.2	Sistema di monitoraggio	187
C.2.3	Risultati e discussione	189
C.2.4	Riferimenti bibliografici.....	190
C.3	Frana di Corvara (Provincia Autonoma di Bolzano)	191
C.3.1	Inquadramento del sito	191
C.3.2	Sistema di monitoraggio	191
C.3.3	Risultati e discussione	192
C.3.4	Riferimenti bibliografici.....	192
C.4	Colata detritica del Rio Gader (Provincia Autonoma di Bolzano).....	195
C.4.1	Inquadramento del sito	195
C.4.2	Sistema di monitoraggio	196
C.4.3	Risultati e discussione	197
C.4.4	Riferimenti bibliografici.....	199
C.5	Colata detritica di Cancia (BL, Veneto)	201
C.5.1	Inquadramento del sito	201
C.5.2	Sistema di monitoraggio	201
C.5.3	Risultati e discussione	202
C.5.4	Riferimenti bibliografici.....	203
C.6	Le frane di Orvieto (TR, Umbria)	207
C.6.1	Inquadramento del sito	207
C.6.2	Sistema di monitoraggio	207
C.6.3	Risultati e discussione	209
C.6.4	Riferimenti bibliografici.....	210
C.7	Frana di Ancona (AN, Marche)	213
C.7.1	Inquadramento del sito	213
C.7.2	Sistema di monitoraggio	214
C.7.3	Risultati e discussione	215
C.7.4	Riferimenti bibliografici.....	217
C.8	Frana di Montaguto (AV, Campania).....	219
C.8.1	Inquadramento del sito	219

C.8.2	Sistema di monitoraggio	219
C.8.3	Risultati e discussione	223
C.8.4	Riferimenti bibliografici	224
C.9	Frana di Costa della Gaveta (PZ, Basilicata)	225
C.9.1	Inquadramento del sito	225
C.9.2	Monitoraggio con sistemi inclinometrici e GPS	225
C.9.3	Risultati e discussione	226
C.9.4	Riferimenti bibliografici	227
C.10	Frana di Pisciole (PZ, Basilicata)	231
C.10.1	Inquadramento del sito	231
C.10.2	Sistema di monitoraggio	232
C.10.3	Risultati e discussione	233
C.10.4	Riferimenti bibliografici	236
C.11	Frana di Serra di Buda (CS, Calabria)	237
C.11.1	Inquadramento del sito	237
C.11.2	Sistema di monitoraggio	237
C.11.3	Risultati e discussione	238
C.11.4	Riferimenti bibliografici	239
C.12	Frana di Scillato (PA, Sicilia)	243
C.12.1	Inquadramento del sito	243
C.12.2	Sistema di monitoraggio	243
C.12.3	Risultati e discussione	244
C.12.4	Riferimenti bibliografici	245

ALLEGATO	246
COSTI DI RIFERIMENTO PER LA PROGETTAZIONE E LA GESTIONE DELLE RETI DI MONITORAGGIO DELLE FRANE	247

1 INTRODUZIONE

Le frane sono fenomeni estremamente diffusi sul territorio nazionale e causano ogni anno impatti significativi sulla popolazione, sui centri abitati, sulle infrastrutture lineari di comunicazione e sul tessuto economico e produttivo. L'Italia, con oltre 620.000 frane censite nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), è il paese con più frane in Europa (Trigila *et alii*, 2018).

Il monitoraggio *in situ* è uno strumento fondamentale per approfondire la conoscenza dei fenomeni franosi e valutare i trend deformativi in atto, supportare la progettazione delle opere di stabilizzazione e verificarne l'efficacia nel tempo, pianificare correttamente il territorio e attivare procedure di allertamento della popolazione per la salvaguardia delle vite umane. Il monitoraggio *in situ* può quindi rappresentare una misura "non strutturale" di mitigazione del rischio.

Mentre il monitoraggio meteo-idrologico ha una significativa copertura spaziale e temporale, nel caso dei dissesti di versante le esperienze sono di gran lunga più recenti, ma stanno diventando numericamente importanti con oltre 500 siti sul territorio italiano monitorati dalle ARPA o dalle strutture tecniche delle Regioni/Province Autonome.

L'attività di monitoraggio *in situ* delle frane sconta una carenza di norme tecniche o linee guida a valenza nazionale che permettano di disporre di riferimenti comuni per tutte le Regioni/Province Autonome. Per tali ragioni il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), del quale fanno parte l'ISPRA e le Agenzie regionali e delle province autonome per la protezione dell'ambiente, ha promosso la redazione delle presenti Linee Guida.

L'SNPA ha tra i propri obiettivi l'adozione di regole condivise per l'armonizzazione della attività e dei dati derivanti dalle funzioni assegnate al Sistema dall'art. 3 della L.132/16; fornisce inoltre un importante contributo al monitoraggio e controllo delle frane attraverso il

Centro Monitoraggio Geologico di ARPA Lombardia, la Rete Regionale di Controllo Movimenti Franosi (ReRCoMF) gestita da ARPA Piemonte e la rete Remover di monitoraggio dei versanti di ARPA Liguria.

Le presenti Linee Guida, oltre ad ISPRA, ARPA Lombardia, Piemonte, Liguria, Veneto e Sardegna, hanno visto il coinvolgimento di strutture tecniche regionali, provinciali e comunali (Regione Autonoma Valle d'Aosta, Provincia Autonoma di Bolzano, Comune di Ancona), del CNR IRPI (sedi di Torino, Padova, Bari e Cosenza), del CNR IGAG, di alcuni gruppi di ricerca in ambito accademico afferenti al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, al Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra dell'Università di Milano-Bicocca, al Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale dell'Università Federico II di Napoli, alla Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi della Basilicata, al Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica del Politecnico di Bari, alla Libera Università di Bolzano, al Dipartimento di Scienze della Terra della Sapienza Università di Roma, e della Scuola di Alta Specializzazione e Centro Studi per la Manutenzione e Conservazione dei Centri Storici in Territori Instabili (Alta Scuola).

Le Linee Guida sono state condivise con le strutture tecniche delle Regioni e Province Autonome nell'ambito del Tavolo tematico IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), istituito dal Consiglio Direttivo del Comitato di Coordinamento Stato-Regioni per la cartografia geologica e geotematica, e hanno tenuto conto delle osservazioni fornite, durante la consultazione pubblica (*notice and comment*) del maggio-giugno 2021, da soggetti che si occupano del monitoraggio delle frane.

1.1 FINALITÀ DELLE LINEE GUIDA

Le presenti Linee Guida hanno l'obiettivo di armonizzare le procedure e fornire riferimenti e criteri per la progettazione, l'installazione, la gestione e la manutenzione delle reti di monitoraggio delle frane, nonché per la diffusione dei dati. Intendono quindi rappresentare uno strumento di lavoro per i soggetti che operano sul territorio con finalità di previsione, prevenzione, monitoraggio e controllo dei fenomeni franosi, quali Pubbliche Amministrazioni, gestori di reti infrastrutturali, liberi professionisti. Costituiscono inoltre un documento chiave in uno scenario di auspicabile potenziamento delle reti regionali esistenti di monitoraggio delle frane e di realizzazione delle stesse nelle regioni che ancora non ne dispongono. Specialmente in questi contesti e in assenza di reti di monitoraggio strumentale, il metodo osservazionale, eseguito da tecnici qualificati esperti, può costituire uno strumento transitorio per la valutazione di fenomeni e segni precursori delle frane.

Le Linee Guida hanno un'impostazione pratica e operativa con l'obiettivo di valorizzare il patrimonio di esperienze maturate e conoscenze acquisite, fornendo ai destinatari gli elementi per un corretto ed efficace approccio metodologico, per effettuare scelte mirate e consapevoli, per dare uniformità a livello nazionale ai nuovi progetti di reti di monitoraggio. Il monitoraggio dei fenomeni franosi, infatti, è un processo complesso e dinamico, che richiede continui adeguamenti tecnologici e gestionali al fine di ottenere informazioni sempre più dettagliate sui fenomeni e sulla loro evoluzione. La progettazione di una rete di monitoraggio efficace si basa su valutazioni tecniche, logistiche ed economiche.

Si è ritenuto funzionale suddividere le Linee Guida in due parti.

La parte generale illustra la valenza, le potenzialità e i limiti delle differenti tipologie di reti di monitoraggio, gli indirizzi e le raccomandazioni per una corretta progettazione, installazione, gestione, manutenzione della rete e diffusione dei dati. Fornisce alcune indicazioni sui contenuti delle monografie, sullo schema delle anagrafiche, sul formato del dato e

sull'organizzazione dei metadati, al fine di standardizzare e rendere più agevole lo scambio di dati tra differenti reti.

L'Appendice contiene le caratteristiche tecniche e le specifiche di installazione della strumentazione geotecnica superficiale e in foro, topografica e radar, termopluviometrica, della strumentazione di monitoraggio delle colate detritiche; i sistemi di acquisizione, trasmissione e archiviazione dei dati.

L'Appendice propone inoltre dodici casi di studio di siti monitorati distribuiti sul territorio italiano, caratterizzati da differenti tipologie di movimento, velocità, volumi, litologie coinvolte, evidenziando i principali punti di forza, elementi innovativi o eventuali criticità della rete di monitoraggio e/o della strumentazione applicata.

In Allegato sono riportati i costi di riferimento per le strumentazioni/lavorazioni, a supporto della redazione di capitolati.

1.2 RIFERIMENTI NORMATIVI E RACCOMANDAZIONI

Il paragrafo elenca i riferimenti normativi nazionali e regionali e le principali raccomandazioni di interesse per la progettazione e gestione dei sistemi di monitoraggio dei fenomeni franosi.

1.2.1 Riferimenti normativi nazionali

Le **Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)**, approvate con **D.M. del 17 gennaio 2018**, al capitolo 6 Progettazione Geotecnica indicano che la *“programmazione delle attività di controllo e monitoraggio”* costituisce uno degli aspetti essenziali in cui si articola il progetto delle opere e degli interventi, oltre alla *“caratterizzazione e modellazione geologica del sito”*, alla *“scelta del tipo di opera o d'intervento e programmazione delle indagini geotecniche”*, alla *“caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce presenti nel volume significativo e definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo”*, alla *“definizione delle fasi e delle modalità costruttive”*, e alle *“verifiche della sicurezza e delle prestazioni”* (cfr. art. 6.2. Articolazione del progetto). Il monitoraggio costituisce lo strumento

essenziale per ricorrere all'impiego del metodo osservazionale nella progettazione (cfr. art. 6.2.5. Impiego del metodo osservazionale).

Con riferimento allo studio delle condizioni di “stabilità dei pendii naturali”, viene indicato che *“il monitoraggio di un pendio o di una frana interessa le diverse fasi che vanno dallo studio al progetto, alla realizzazione e gestione delle opere di stabilizzazione e al controllo della loro funzionalità e durabilità. Esso è riferito principalmente agli spostamenti di punti significativi del pendio, in superficie e/o in profondità, al controllo di eventuali manufatti presenti e alla misura delle pressioni interstiziali, da effettuare con periodicità e durata tali da consentire di definirne le variazioni periodiche e stagionali. Il controllo dell'efficacia degli interventi di stabilizzazione deve comprendere la definizione delle soglie di attenzione e di allarme e dei provvedimenti da assumere in caso del relativo superamento”* (cfr. art. 6.3.6. Controlli e monitoraggio). Il monitoraggio costituisce un aspetto essenziale per la modellazione geotecnica del pendio e per la scelta e il dimensionamento delle opere di stabilizzazione.

Per quanto riguarda la progettazione del sistema di monitoraggio, il **Codice dei contratti pubblici D.Lgs. 50/2016** definisce all'art. 23 i tre *“livelli della progettazione per gli appalti e per le concessioni di lavori nonché per i servizi”*: progetto di fattibilità tecnica ed economica, progetto definitivo e progetto esecutivo. *Il progetto definitivo individua compiutamente i lavori da realizzare [...] e contiene, tutti gli elementi necessari ai fini del rilascio delle prescritte autorizzazioni e approvazioni, nonché la quantificazione definitiva del limite di spesa per la realizzazione e del relativo cronoprogramma, attraverso l'utilizzo, ove esistenti, dei prezzi predisposti dalle regioni e dalle province autonome territorialmente competenti, di concerto con le articolazioni territoriali del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, secondo quanto previsto al comma 16 (cfr. art. 23 comma 7). Il progetto esecutivo, redatto in conformità al progetto definitivo, determina in ogni dettaglio i lavori da realizzare, il relativo costo previsto, il cronoprogramma coerente con quello del progetto definitivo, e deve essere sviluppato ad un*

livello di definizione tale che ogni elemento sia identificato in forma, tipologia, qualità, dimensione e prezzo (cfr. art. 23 comma 8).

Per quanto riguarda l'installazione e la gestione della strumentazione di monitoraggio si dovrà tenere conto degli aspetti connessi alla sicurezza nelle aree di lavoro definiti nel **Testo unico per la sicurezza sul lavoro D.Lgs. 81/2008 e s.m.i.** con particolare riguardo agli artt. 88 e seguenti sulle misure per la salute e sicurezza nei cantieri temporanei o mobili. Il committente o il responsabile dei lavori, nelle fasi di progettazione dell'opera, deve attenersi ai principi e alle misure generali di tutela di cui all'art. 15 tra cui: la valutazione di tutti i rischi per la salute e sicurezza; l'eliminazione dei rischi e, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico; la limitazione al minimo del numero dei lavoratori che sono, o che possono essere, esposti al rischio; l'informazione e formazione adeguate per i lavoratori e per i rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza; le istruzioni adeguate ai lavoratori; le misure di emergenza da attuare in caso di primo soccorso, di lotta antincendio, di evacuazione dei lavoratori e di pericolo grave e immediato; la regolare manutenzione di ambienti, attrezzature, impianti, con particolare riguardo ai dispositivi di sicurezza in conformità all'indicazione dei fabbricanti. Con particolare riguardo ai lavori in quota, i riferimenti sono l'art. 116 del suddetto D.Lgs. che contiene gli *“Obblighi dei datori di lavoro concernenti l'impiego di sistemi di accesso e di posizionamento mediante funi”* e la *Linea guida per l'esecuzione di lavori temporanei in quota con l'impiego di sistemi di accesso e posizionamento mediante funi*, prodotta nel 2003 dal Ministero del lavoro e delle politiche sociali e dal Ministero della salute - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (ISPESL).

Nel caso di realizzazione di perforazioni con profondità superiore a 30 m per l'installazione di strumenti di monitoraggio, dovrà essere compilata, a norma della **L. 464/1984**, una dettagliata relazione, corredata dalla relativa documentazione, sui dati geologici e geofisici acquisiti.

1.2.2 Riferimenti normativi regionali

Con **Deliberazione della Giunta Regionale del Piemonte 18-3690 del 16/04/2012** è stato approvato il *Disciplinare per lo sviluppo, la gestione e la diffusione dati di sistemi di monitoraggio su fenomeni franosi del territorio regionale con finalità di prevenzione territoriale e di protezione civile* che standardizza le procedure amministrative e tecniche per il finanziamento, la realizzazione ed il mantenimento dei sistemi di monitoraggio frane e la diffusione dei dati, con l'obiettivo di coordinare le attività di Regione Piemonte, ARPA Piemonte e Comuni. ARPA Piemonte, ai sensi della L.R. 28/2002, gestisce in ambito piemontese la Rete Regionale di Controllo dei Movimenti Franosi (ReRCoMF) e le attività del Centro Funzionale per la previsione ed il monitoraggio ambientale.

Con **Delibera di Giunta regionale n. XI/3733 del 26 ottobre 2020** *Approvazione degli indirizzi operativi per l'individuazione dei sistemi di monitoraggio dei fenomeni franosi di interesse regionale* **Regione Lombardia** individua i fenomeni franosi sui quali ritiene prioritario installare o dismettere (se già presente) un sistema di monitoraggio geologico di interesse regionale. ARPA Lombardia, secondo quanto previsto dalla sua legge istitutiva (L.R. 16/1999) e per il tramite del proprio Centro di Monitoraggio Geologico (CMG), svolge per Regione Lombardia un ruolo di supporto tecnico-scientifico e di gestione dei sistemi di monitoraggio, ove necessario anche ai fini di protezione civile. Per quanto riguarda l'omogeneizzazione dei sistemi di monitoraggio geologico e la loro progettazione Regione Lombardia, con **Delibera di Giunta regionale n. X/2684 del 14 dicembre 2011**, si era già dotata del documento *Approvazione di linee guida per la progettazione, esecuzione, gestione e manutenzione dei sistemi di monitoraggio, nell'ambito della prevenzione del rischio idrogeologico in Lombardia*. Quest'ultimo documento si intende aggiornato e sostituito dalle presenti Linee Guida SNPA.

Con **L.R. della Liguria 20/2006** è stata istituita la rete di monitoraggio dei versanti (REMOVER), per il monitoraggio dei fenomeni di instabilità di versante ai

fini della programmazione e del controllo degli interventi di difesa del suolo. Con l'Intesa del 20 luglio 2007 *Definizione delle modalità di gestione della rete regionale di monitoraggio dei versanti instabili REMOVER*, la Regione Liguria ha affidato ad ARPAL la gestione operativa della rete, comprensiva dell'effettuazione delle misure e dell'elaborazione dei dati.

In Regione Autonoma Valle d'Aosta il sistema di monitoraggio dei fenomeni franosi è gestito, sia a livello impiantistico che d'interpretazione, dalla struttura Attività Geologiche, secondo quanto riportato nell'allegato 2 alla **DGR 3655/2009**. Per quanto concerne la reportistica inerente il sistema di monitoraggio delle frane si rimanda anche all'All. 2.b. del documento *Disposizioni e procedure operative per l'attivazione della direttiva del presidente del consiglio dei ministri del 27 febbraio 2004 e ss.mm.ii. - Protocollo di intesa tra strutture regionali che concorrono al sistema di allertamento per rischio meteorologico, idrogeologico, idraulico e pericolo valanghe - Aggiornamento procedure approvate con DGR 3655/2009 (dicembre 2013)*.

1.2.3 Altri riferimenti normativi e raccomandazioni

Sono attualmente quattro le **norme UNI** (Ente Italiano di Normazione) relative a **Indagini e prove geotecniche - Monitoraggio geotecnico con strumentazione di campo**, prodotte dal *Technical Committee ISO/TC 182 Geotechnics*:

- **UNI EN ISO 18674-1:2015 Parte 1: Regole generali** (Data entrata in vigore: 09 luglio 2015) che si applica al monitoraggio del terreno, alle strutture che interagiscono con il terreno e ai lavori geotecnici, in particolare alla strumentazione di campo e alle misurazioni eseguite congiuntamente alle indagini del suolo e delle rocce in conformità alla EN 1997-2 e alle procedure di progettazione in conformità alla EN 1997-1;
- **UNI EN ISO 18674-2:2016 Parte 2: Misurazione degli spostamenti lungo la linea: Estensimetri**

(Data entrata in vigore: 20 dicembre 2016);

- UNI EN ISO 18674-3:2020 *Parte 3: Misurazione degli spostamenti lungo la linea: Inclinatori* (Data entrata in vigore: 09 aprile 2020);
- UNI EN ISO 18674-5:2019 *Parte 5: Misure di variazione di tensione tramite celle di pressione totale* (Data entrata in vigore: 05 dicembre 2019) che fornisce le indicazioni utili alla misura della variazione dello stato tensionale del terreno che si produce ad esempio alla base dei riempimenti in terra, al contatto fra opere di sostegno e terreno e al disotto delle fondazioni.

L'organismo di normazione statunitense, **American Society for Testing and Materials – ASTM** ha prodotto le seguenti norme tecniche relative agli inclinometri:

- ASTM D6230-13 *Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers* (Last Updated January 15, 2013) che fornisce indicazioni su tipologia di strumenti, procedure di installazione, acquisizione dei dati e requisiti di manutenzione;
- ASTM D7299-12 *Standard Practice for Verifying Performance of a Vertical Inclinometer Probe* (Last Updated July 1, 2012).

Le raccomandazioni sul monitoraggio geotecnico, prodotte dall'**International Society for Rock Mechanics - ISRM** e tradotte in italiano sulla Rivista Italiana di Geotecnica, sono:

- *Suggested Methods for Monitoring Rock Movements Using Borehole Extensometers* (1978);
- *Suggested Methods for Monitoring Rock Movements Using Inclinometers and Tiltmeters* (1977):
 - *Part 1 SM for Monitoring Rock Movements Using a Probe Inclinometer*;
 - *Part 2 SM for Monitoring Rock Movements Using Fixed-in-Place Inclinometers*;
 - *Part 3 SM for Monitoring Rock Movements Using Tiltmeters*;

- *Suggested Methods for Pressure Monitoring Using Hydraulic Cells* (1980);
- *Suggested Methods for Surface Monitoring of Movements Across Discontinuities* (1984).

Le raccomandazioni sono state raccolte nel 2007 nel volume *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006* (Editors: R. Ulusay & J.A. Hudson).

Nel 2014 è stata integrata la raccomandazione *Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS)* contenuta nel volume *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (Editor: R. Ulusay).

Le specifiche tecniche *Modalità tecnologiche per l'esecuzione di indagini geognostiche e l'installazione e la gestione di impianti di monitoraggio*, prodotte dall'**Associazione Nazionale Imprese Specializzate in indagini geognostiche – ANISIG**, illustrano le caratteristiche descrittive, la posa in opera e la lettura della strumentazione, forniscono delle prescrizioni qualitative per la sensoristica ed i componenti in modo da ottenere la massima affidabilità e garanzia di funzionamento.

Per quanto riguarda la strumentazione meteorologico-pluviometrica, la *Commission for Instruments and Methods of Observation – CIMO* del **World Meteorological Organization – WMO** ha prodotto:

- *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 8, CIMO Guide; 2014 edition, Updated in 2017, Preliminary 2018 Edition available for consideration by Members) che fornisce raccomandazioni e buone pratiche per l'installazione della strumentazione e la misura delle variabili meteorologiche (temperatura, pressione, umidità, vento, precipitazione);
- *Guide to Hydrological Practices Volume I Hydrology – From Measurement to Hydrological Information* (WMO-No. 168, Sixth edition 2008) al fine di promuovere la standardizzazione delle osservazioni meteorologiche e idrologiche e

l'elaborazione dei dati.

Sui dati idrometeorologici sono state pubblicate tre **Linee Guida nazionali**: Metodologie di misura e specifiche tecniche per la raccolta e l'elaborazione dei dati idrometeorologici - ISPRA Manuali e linee guida 60/2010; Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici - ISPRA Manuali e linee guida 84/2013; Linee guida per il controllo di validità dei dati idro-meteorologici - Linee guida SNPA 02/2017.

Le **norme UNI** in materia comprendono la UNI EN 13798:2010 Idrometria - Specifiche di un pozzetto pluviometrico di riferimento (Data entrata in vigore: 07 ottobre 2010) che costituisce la versione ufficiale della norma europea EN 13798 (edizione giugno 2010), la UNI EN 17277:2020 Idrometria - Requisiti di misurazione e classificazione degli strumenti pluviometrici per la misura dell'intensità di precipitazione (Data entrata in vigore: 16 gennaio 2020; sostituisce la precedente UNI 11452:2012 Idrometria - Intensità di precipitazione liquida al suolo - Requisiti metrologici e metodi di prova per pluviometri captatori) e la UNI CEI CEN/TR 16469:2014 Idrometria - Misurazione dell'intensità di precipitazione (precipitazione liquida): requisiti, metodi di taratura e misurazioni in campo (Data entrata in vigore: 04 dicembre 2014) che è la versione ufficiale del rapporto tecnico europeo CEN/TR 16469 (edizione gennaio 2013).

Di interesse per la fase di modellazione del fenomeno franoso e per la progettazione del sistema di monitoraggio sono le raccomandazioni relative alle indagini *in situ* e alle prove di laboratorio per la definizione dei parametri fisici e meccanici di un terreno, tra cui:

- le **Raccomandazioni AGI sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche** (Giugno 1977) che contengono i criteri di progetto ed esecuzione delle indagini per caratterizzare dal punto di vista geotecnico il sottosuolo (scavi e perforazioni di sondaggio, prelievo di campioni, profili stratigrafici, misura delle pressioni neutre, determinazione del coefficiente di permeabilità,

prove penetrometriche e scissometriche) e le **Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio** (Gennaio 1994) relative alle analisi granulometriche, prove edometriche, di taglio diretto e di compressione triassiale;

- l'**Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo** UNI EN 1997-2:2007 (Data entrata in vigore: 10 maggio 2007), che fornisce regole aggiuntive alla UNI EN 1997-1 sui criteri di progettazione geotecnica, con particolare riferimento alla pianificazione delle indagini nel sottosuolo, ai requisiti generali per le prove di laboratorio e in sito comunemente utilizzate, all'interpretazione e alla valutazione dei risultati di prova, nonché alla derivazione dei valori dei parametri geotecnici;
- le **norme UNI** relative a **Indagini e prove geotecniche**, e in particolare a **Prove di laboratorio sui terreni** (UNI EN ISO 17892-1:2015 - *Parte 1 Determinazione del contenuto in acqua*, UNI EN ISO 17892-2:2015 *Parte 2: Determinazione della massa volumica*, UNI EN ISO 17892-3:2016 *Parte 3: Determinazione della massa volumica dei granuli solidi*, UNI EN ISO 17892-4:2017 *Parte 4: Determinazione della distribuzione granulometrica*, UNI EN ISO 17892-5:2017 *Parte 5: Prova edometrica ad incrementi di carico*, UNI EN ISO 17892-6:2017 *Parte 6: Prova con la punta conica*, UNI EN ISO 17892-7:2018 *Parte 7: Prova di compressione non confinata*, UNI EN ISO 17892-8:2018 *Parte 8: Prova triassiale non consolidata non drenata*, UNI EN ISO 17892-9:2018 *Parte 9: Prove di compressione triassiale consolidate su terreni saturi*, UNI EN ISO 17892-10:2019 *Parte 10: Prove di taglio diretto*, UNI EN ISO 17892-11:2019 *Parte 11: Prove di permeabilità*, UNI EN ISO 17892-12:2018 *Parte 12: Determinazione dei limiti liquidi e plastici*) e a **Prove in sito** (EC 1-2013 UNI EN ISO 22476-1:2012 *Parte 1: Prova penetrometrica con cono elettrico e piezocono*, UNI EN ISO 22476-2:2012 *Parte 2: Prova di penetrazione dinamica*, UNI EN ISO 22476-3:2012 *Parte 3: Prova penetrometrica*

dinamica tipo SPT Standard Penetration Test, UNI EN ISO 22476-4:2013 Parte 4: Prova con pressiometro Menard, UNI EN ISO 22476-5:2013 Parte 5: Prova con dilatometro flessibile, UNI EN ISO 22476-6:2018 Parte 6: Prova con pressiometro autoperforante, UNI EN ISO 22476-7:2013 Parte 7: Prova con martinetto in foro, UNI EN ISO 22476-8:2018 Parte 8: Prova con pressometro a costipamento laterale, UNI EN ISO 22476-10:2017 Parte 10: Prova di penetrazione sotto peso, UNI EN ISO 22476-11:2017 Parte 11: Prova con dilatometro piatto, UNI EN ISO 22476-12:2009 Parte 12: Prova meccanica di penetrazione del cono (CPTM), UNI EN ISO 22476-14:2020 Parte 14: Prova penetrometrica dinamica continua, UNI EN ISO 22476-15:2016 Parte 15: Misurazione durante la perforazione);

- le **Raccomandazioni ISRM** relative a **Laboratory Testing** e **Field Testing** raccolte nei due volumi già citati *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006* e *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*.

2 LE RETI DI MONITORAGGIO FRANE: FINALITÀ E LIMITI

2.1 RETE CON FINALITÀ CONOSCITIVA

Il monitoraggio con finalità conoscitiva (d'ora in poi definito monitoraggio conoscitivo) viene generalmente avviato su fenomeni che possono essere definiti permanenti e che interferiscono, spesso, con insediamenti, infrastrutture ed attività antropiche.

Con il termine permanente si identificano tutte quelle frane la cui attività si sviluppa nel tempo e nello spazio in modo continuo, vale a dire si esplica alternativamente con cicli di attività e di inattività, dislocando tutta la massa o parte di questa con spostamenti a cinematica lenta. Queste frane sono sempre caratterizzate da una significativa instabilità residua connessa a possibili riattivazioni dell'intera frana o, più frequentemente, di parti di questa. In genere permangono diversi fattori di innesco e la loro completa stabilizzazione con opere strutturali può risultare tecnicamente onerosa e/o complessa e difficilmente sostenibile in termini economici. In queste situazioni può risultare di estrema utilità l'installazione delle reti di monitoraggio a supporto di interventi di mitigazione.

Nel caso di deformazioni lente e prolungate nel tempo il controllo può proseguire per molti anni.

Il monitoraggio conoscitivo fornisce un valido supporto alla comprensione delle caratteristiche del fenomeno franoso, tra cui la geometria e i volumi coinvolti, i meccanismi di movimento, la pericolosità e la tendenza evolutiva.

Le principali finalità possono essere riepilogate come segue:

- valutazione di tutti i parametri dimensionali ed evolutivi che concorrono a definire i modelli concettuali di un determinato tipo di fenomeno franoso;
- valutazione dell'evoluzione e dello stato di attività del fenomeno franoso, delle cause predisponenti e

di innesco al fine di una corretta gestione del rischio;

- supporto alla scelta e dimensionamento di opere di stabilizzazione dei pendii naturali per la riduzione del rischio da frana, verifica delle scelte progettuali e controllo dell'efficacia degli interventi realizzati;
- supporto alla pianificazione territoriale (strumenti urbanistici) e alla predisposizione di piani di protezione civile;
- supporto alla progettazione di reti di monitoraggio con finalità di allertamento;
- integrazione e aggiornamento degli inventari dei fenomeni franosi delle pubbliche amministrazioni (costituzione di una serie storica di dati);
- studio e ricerca.

Il monitoraggio conoscitivo si attua con l'impiego di strumentazioni appropriate e opportune modalità di misura da definire e precisare sulla base delle caratteristiche note dei movimenti franosi di interesse.

Ogni sistema di misura ha prerogative e limiti propri; appare evidente che l'impiego di più tipologie strumentali sullo stesso sito possa garantire un controllo più efficace.

In via generale, si evidenziano alcuni elementi caratterizzanti il monitoraggio conoscitivo:

- la rete di monitoraggio deve avere un soggetto gestore, responsabile dell'esecuzione delle misure, dell'analisi dei dati e della manutenzione della rete stessa;
- le tempistiche di esecuzione delle misure, validazione e comunicazione del dato nonché del ripristino a seguito di malfunzionamenti sono estremamente variabili (legate alla modalità e frequenza di acquisizione e alle finalità del monitoraggio) e non necessariamente immediate;

- viene fatto ricorso a strumentazione, sia di profondità che di superficie, a lettura manuale (SLM), in continuo (SLC) e/o con trasmissione da remoto (SLR) (vedi Paragrafo 7.1);
- la strumentazione installata non è necessariamente rappresentativa dell'intero dissesto; ciò significa che può essere posta sotto controllo solo una porzione del fenomeno, compatibilmente con le conoscenze progressivamente acquisite, le finalità e il valore esposto considerati;
- la durata e la frequenza delle misure dipendono principalmente dalle caratteristiche cinematiche della frana e devono essere tali da consentire l'acquisizione di serie storiche rappresentative delle diverse misure condotte.

Per le caratteristiche sopra menzionate, le frane che meglio si prestano ad essere monitorate sono quelle ad evoluzione lenta. Nello specifico, le classi di velocità prese in considerazione sono quelle da Lenta a Estremamente Lenta, sulla base della classificazione della IUGS/WGL (1995) (*Scala delle velocità e dei danni prodotti dalle frane* – Tabella 1).

Per le frane che sulla base degli elementi conoscitivi disponibili si ritiene siano caratterizzate da inneschi improvvisi, spesso assenza di segnali premonitori, alte velocità (anche superiori a 1 m/s) le reti di monitoraggio conoscitivo possono essere opportunamente configurate per acquisire misure (informazioni) relative ai fattori predisponenti l'innesco.

Il controllo dell'evoluzione del movimento può essere

attivato per finalità di ricerca.

Nel monitoraggio conoscitivo, a seconda delle finalità per cui viene progettato, possono essere presi in considerazione molteplici parametri che concorrono a definire il grado conoscitivo richiesto. I parametri misurabili sono associati alle seguenti categorie:

- cinematica del corpo di frana: entità dello spostamento (in superficie, in profondità e nelle diverse componenti) e direzione di movimento, controllo delle discontinuità in roccia e/o di singole porzioni rocciose (monitoraggio geotecnico e topografico);
- idrologia e idrogeologia del versante e regime delle pressioni interstiziali: dinamica e tipologia delle acque in superficie e in profondità, evoluzione temporale della falda con misura delle pressioni interstiziali (positive e negative) e dei livelli piezometrici, portate, conducibilità, temperatura e chimismo di sorgenti o acque sotterranee;
- meteorologia: precipitazioni, temperatura, ecc.;
- geotecnica: controllo strutturale elementi antropici (monitoraggio statico di manufatti e infrastrutture, monitoraggio dinamico per definire stato di degrado, carichi e vibrazioni);
- altri parametri (umidità del suolo, temperatura di roccia e sottosuolo per controllo stato permafrost, stati tensionali nei volumi in frana e/o alle interfacce con opere presenti o realizzate per la stabilizzazione, ecc.).

Tabella 1 – Scala delle velocità e dei danni prodotti dalle frane (IUGS/WGL 1995)

CLASSE	VELOCITÀ	DANNO ATTESO
Estremamente Lenta	< 16 mm/anno	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni
Molto Lenta	16 mm – 1,6 m/anno	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento
Lenta	1,6 m/anno – 13 m/mese	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di riabilitazione se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione

Le misure condotte sulle reti di monitoraggio conoscitivo, singolarmente o congiuntamente, potranno essere analizzate con progressivi approfondimenti procedendo a:

- confrontare i valori misurati in ciascuna campagna con quelli misurati nella campagna precedente;
- individuare eventuali correlazioni tra misure relative a grandezze diverse;
- definire indicatori del processo di evoluzione del fenomeno di franoso;
- utilizzare tali indicatori in modelli di calcolo di supporto alle diverse finalità della rete di monitoraggio conoscitivo.

2.1.1 Utilizzo del monitoraggio conoscitivo per la scelta, dimensionamento e verifica dell'efficacia delle opere di mitigazione

La progettazione, l'installazione e la gestione di un sistema di monitoraggio possono assolvere nel tempo a diverse funzioni quali ad esempio il supporto nella scelta, dimensionamento e verifica dell'efficacia delle opere di mitigazione del fenomeno franoso.

Come illustrato nel diagramma di flusso in Figura 1, risulta fondamentale l'utilizzo dei dati e dei parametri ottenuti dal monitoraggio nella fase conoscitiva (studio ed indagini), sia per una corretta classificazione del fenomeno (es. geometria, magnitudo, reologia, profondità) e del suo cinematismo (es. lento, veloce, pattern deformativi), che per la scelta ed il corretto dimensionamento dell'intervento di mitigazione. Inoltre, è bene ricordare che qualora permangano (anche dopo estese e approfondite indagini) documentate ragioni di incertezza nella definizione del modello geotecnico della frana risolvibili solo in fase di realizzazione delle opere, è possibile, oltre che consigliabile, ricorrere al metodo osservazionale seguendo il procedimento riportato nella specifica normativa vigente (cfr. 6.2.5 delle NTC 2018).

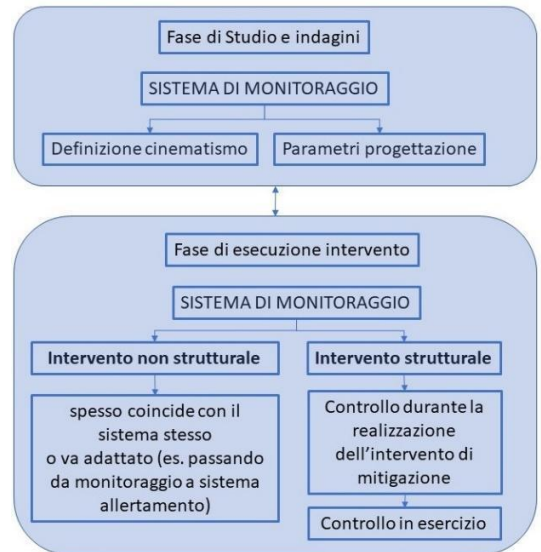


Figura 1 – Utilizzo del monitoraggio per la fase di studio e indagini e per la fase di esecuzione dell'intervento

Una volta scelto il tipo di intervento in funzione delle caratteristiche del tipo di fenomeno, il monitoraggio diventa quindi fondamentale nelle seguenti fasi:

- dimensionamento e verifica delle opere con opportuni modelli di calcolo che considerano i dati ottenuti dalla rete di monitoraggio conoscitivo;
- in fase di realizzazione delle opere di mitigazione validazione ed eventuale calibrazione dei parametri di progetto e supporto al controllo della sicurezza del cantiere;
- fase di esercizio per il controllo nel tempo dell'efficacia delle opere ed eventuali verifiche dei parametri di progetto.

In particolare, quest'ultimo aspetto (la cui applicazione è molto spesso disattesa), è finalizzato alla verifica della funzionalità e durabilità (efficacia) degli interventi nel corso della loro vita utile e concorre in maniera essenziale alla corretta attuazione del piano di manutenzione (ordinaria e straordinaria) redatto in fase di progettazione esecutiva (LL.GG. AGI - ISPRA 2021)

contribuendo a rendere maggiormente sostenibili gli interventi strutturali.

Il monitoraggio degli interventi, che inizia già nella fase di realizzazione delle opere e interessa il complesso opera – terreno, richiede quindi, in generale, una integrazione della rete di monitoraggio conoscitivo con l'installazione di ulteriore ed appropriata strumentazione per la misura di grandezze fisiche significative - quali spostamenti, tensioni, forze e pressioni interstiziali - prima, durante e/o dopo la realizzazione dell'intervento. Il monitoraggio ha lo scopo di verificare la corrispondenza tra le ipotesi progettuali e i comportamenti osservati e quantificati delle opere e di controllare in tal modo la funzionalità e la durabilità nel tempo. Nelle situazioni in cui si procede alla progettazione degli interventi con il richiamato metodo osservazionale, il monitoraggio ha lo scopo di confermare la validità della soluzione progettuale adottata o, in caso contrario, di individuare la più idonea tra le altre soluzioni previste in progetto. Il programma di monitoraggio previsto deve essere definito e illustrato nella relazione geotecnica (cfr. 6.2.6 delle NTC 2018; Paragrafo 1.2).

Il progetto e la realizzazione delle reti di monitoraggio degli interventi possono essere più efficacemente sviluppati considerando la strategia adottata per la riduzione-mitigazione del rischio da frana. Tale strategia può essere in linea generale riferita alle categorie di interventi di seguito illustrate (LL.GG. AGI - ISPRA 2021).

A) Interventi di **prevenzione**, volti a ridurre la probabilità di innesco dei movimenti franosi che, ai fini del controllo in esercizio, si distinguono in:

A1) interventi che operano sui fattori la cui variazione è responsabile della attivazione di frane (di neoformazione) o della riattivazione di frane quiescenti;

A2) interventi che contrastano il movimento della massa instabile.

In entrambi i casi il controllo in esercizio passa attraverso l'accettabilità degli spostamenti *post operam* che, in dipendenza dell'intervento

eseguito, riguardano il solo pendio o anche le opere che sono parte integrante dell'intervento (di queste ultime si potrà monitorare localmente anche lo stato deformativo).

L'accettabilità dipende principalmente dalla natura degli elementi esposti al rischio e, per le strutture/infrastrutture, dovrà associarsi a valori limite degli spostamenti cumulati, stabiliti in fase di dimensionamento se si è adottato un approccio agli spostamenti. La manutenzione dipende naturalmente dalla tipologia di intervento eseguito sul pendio.

- B) Interventi di **protezione** volti ad intercettare il movimento franoso lungo il suo percorso. La rete di monitoraggio di controllo deve riguardare, in particolare, la risposta all'evento di frana da parte dell'opera di protezione, con riferimento alla sua tipologia. In particolare, i dati di monitoraggio devono consentire di verificare in fase post evento: la corretta modellazione della propagazione della frana (in termini di volumi coinvolti, percorsi compiuti, distribuzione nel tempo e nello spazio dell'energia cinetica); la capacità delle opere di assolvere alla funzione per la quale sono state progettate.
- C) Interventi di **riduzione** della **vulnerabilità**, mediante l'incremento (ad esempio, con tecniche di consolidamento o rinforzo) o la riduzione (ad es., con l'inserimento di giunti) della rigidità globale dell'elemento esposto. Il controllo in esercizio richiede che si accerti la reale capacità dell'intervento di limitare il livello di severità del danno a valori compatibili con la funzionalità della struttura/infrastruttura per una assegnata intensità del movimento franoso (che può essere rappresentata da spostamenti cumulati, assoluti o differenziali, o energia cinetica all'impatto). Il sistema di controllo e la manutenzione riguarderà gli elementi strutturali dell'elemento esposto.
- D) Interventi di **riduzione** dell'**esposizione**, basati su sistemi di allerta e piani di emergenza. Il controllo in esercizio mira a constatare che nel progetto siano stati selezionati correttamente i precursori di

evento ed i corrispondenti valori soglia. Deve, quindi, essere verificato il funzionamento dell'intero sistema di allertamento, in termini di sensoristica, sistemi di comunicazione, validazione e gestione dati, soglie, generazione e trasmissione dell'allerta, adeguatezza della tempistica per la salvaguardia delle persone esposte (ad es., possibilità di evacuazione). Il controllo deve essere operato sia per fenomeni diffusi su area vasta e sia nel caso di un singolo pendio sede di instabilità.

Considerando che il monitoraggio prende l'avvio con la caratterizzazione e l'analisi dei movimenti franosi, si arricchisce nelle fasi di progettazione e realizzazione delle opere e si configura definitivamente nella fase del controllo in esercizio, è buona norma utilizzare e integrare progressivamente i sensori, le apparecchiature e la strumentazione di volta in volta installate senza trascurare, laddove possibile, le nuove proposte tecnologiche. Queste raccomandazioni valgono sia per tutti gli interventi di prevenzione, protezione e riduzione della vulnerabilità (lettere A-B-C) sia per le reti di monitoraggio realizzate per concorrere ad un sistema di allertamento (lettera D) come meglio dettagliato al paragrafo seguente.

Per gran parte delle strategie proposte, fondamentale è il monitoraggio degli spostamenti, superficiali e profondi (*pre e post operam*), in quanto l'evoluzione del sistema 'pendio' dipende da numerosi fattori che, interagendo tra loro, incidono sulle modalità di propagazione della/e frana/e. Il monitoraggio degli spostamenti va, inoltre, svolto nella prospettiva della non stazionarietà dei movimenti franosi in quanto le condizioni di equilibrio di un pendio sono in continua evoluzione a causa della variazione nel tempo di alcune condizioni al contorno (LL.GG. AGI - ISPRA 2021).

Va ricordato poi che gli elementi acquisiti nella fase di controllo in esercizio, una volta validato il modello geotecnico della frana, devono essere implementati nei modelli di calcolo per verificare il raggiungimento del livello di mitigazione del rischio stabilito in progetto ed assumere, laddove necessario, tutti gli adempimenti necessari per renderlo tale.

Nell'ipotesi di intervento di tipo A1, il controllo in esercizio è finalizzato quindi principalmente a verificare che i fattori di pendio assunti a riferimento abbiano raggiunto e mantengano nel tempo i valori di progetto.

Per gli interventi di tipo A2 si dovranno monitorare anche gli spostamenti e/o le deformazioni delle opere (ad es. diaframmi) e le sollecitazioni alle quali sono sottoposte (ad es. sforzi nei tiranti). Laddove il dimensionamento dell'intervento sia stato condotto con metodi di analisi avanzati (es. analisi e modelli tensio deformativi), il monitoraggio degli spostamenti dovrà infine verificare che questi stiano entro i limiti di accettabilità previsti nella progettazione e definiti sulla base delle opere realizzate.

2.2 RETE CON FINALITÀ DI ALLERTAMENTO

Le reti di monitoraggio con finalità di *early warning* o allertamento sono tese ad identificare in tempo reale la variazione e la dinamica delle frane e richiedono, pertanto, una progettazione, realizzazione e, in particolare, una gestione più onerosa e complessa rispetto alle reti con finalità conoscitive. Queste peculiarità fanno sì che, ad oggi, in Italia le reti di monitoraggio con finalità di allertamento siano meno diffuse.

In un certo senso si potrebbe dire che la finalità di allertamento rappresenta l'età adulta dei monitoraggi che, necessariamente, devono disporre di un più o meno lungo periodo di gestione conoscitiva sia per valutare i tassi di spostamento del fenomeno franoso che per confermare/modificare l'ubicazione della strumentazione stessa, in modo tale che i dati raccolti siano significativi in relazione al movimento monitorato.

Il passaggio da una fase con finalità conoscitiva ad una con finalità di allertamento è determinato dalla presenza di tre caratteristiche che devono **contemporaneamente e necessariamente** essere possedute dalla rete per far sì che la stessa possa avere finalità di *early warning*:

- 1) l'acquisizione dei dati deve avvenire in continuo e la trasmissione degli stessi deve essere almeno in *near real time*;
- 2) i dati devono essere analizzati e valutati alla luce di

appositi studi sito-specifici (vedi Paragrafo 2.2.4) che abbiano determinato una o più soglie di allertamento caratteristiche per ogni sensore/strumento;

- 3) la rete di monitoraggio deve avere un soggetto gestore, responsabile dell'analisi in continuo dei dati e della manutenzione preventiva e correttiva. Detto soggetto gestore si attiva per porre rimedio tempestivamente (vedi successivo Paragrafo 2.2.2 Reperibilità) ad eventuali malfunzionamenti strumentali o di trasmissione e, se lo ritiene, opera nella valutazione delle segnalazioni automatiche di fuori soglia, al fine di evitare l'emissione di segnalazioni di allertamento non rappresentative delle condizioni di stabilità del dissesto monitorato.

La mancanza anche solo di una delle predette caratteristiche impedisce ad una rete di monitoraggio delle frane di poter essere considerata quale avente finalità di allertamento.

È importante ricordare che la presenza di una rete di monitoraggio, con finalità di *early warning*, non garantisce di per sé l'attivazione di procedure tipiche della gestione del rischio (es. chiusura della viabilità, evacuazione di abitati, modifica di regimi idraulici ecc.). Dette azioni sono regolate e gestite all'interno di piani o procedure di emergenza di protezione civile che per la gran parte delle volte coinvolgono soggetti differenti dal gestore della rete di monitoraggio, la cui descrizione esula dagli scopi delle presenti linee guida.

È però vero che laddove, per motivazioni tecniche o socio-economiche, non sia possibile una significativa riduzione della pericolosità di un fenomeno franoso (si pensi a movimenti di milioni di metri cubi o a movimenti di versante su cui sono ubicati interi centri abitati), l'installazione di una rete di monitoraggio con valenza di allertamento è condizione necessaria, ancorché come detto non sufficiente, per avviare azioni di riduzione del livello di rischio.

Per quanto riguarda la diminuzione del rischio è possibile affermare che il compito, attribuibile ad un sistema di monitoraggio con finalità di allertamento, dipende direttamente dalla possibilità di ridurre

l'esposizione al pericolo di persone e cose che possono essere tempestivamente evacuate dall'area.

In termini più quantitativi il rischio R di un determinato oggetto i sottoposto ad uno scenario di franamento j è rappresentato da:

$$R_{ij} = p_j \cdot p_{ej} \cdot v_{ij} \cdot A_i$$

dove:

p_j è la probabilità che avvenga quanto delineato nello scenario di franamento;

p_{ej} è la probabilità di coinvolgimento dell'oggetto i nello scenario j ;

v_{ij} è la vulnerabilità dell'oggetto i sottoposta allo scenario j ;

A_i è il valore dell'oggetto i .

Per quanto sopra esplicitato, una rete di allertamento influisce, relativamente alla diminuzione del rischio, sulla riduzione della probabilità che persone o strutture mobili i presenti nell'area di frana possano essere coinvolte dall'evento di cui allo scenario j (Sättele *et alii*, 2015).

Ovviamente, affinché una rete di monitoraggio possa contribuire alla mitigazione del rischio, è importante che la stessa possa dirsi efficace. In letteratura l'efficacia E di un sistema di monitoraggio, (che in estrema sintesi è determinata dal rapporto fra R inteso come rischio complessivo senza il sistema di allertamento e R_{ews} ossia rischio con il sistema di allertamento installato e funzionante), è espressa come strettamente legata sia alla capacità del sistema di monitoraggio di individuare tutti gli eventi sia a quella di minimizzare i falsi positivi.

Per il riconoscimento degli eventi è fondamentale che le reti di monitoraggio con valenza di *early warning* siano progettate (vedi Capitolo 3) avendo cura di identificare quei sensori, o meglio quelle combinazioni di differenti strumenti, che permettano di individuare tutte le situazioni naturali che contribuiscono a determinare la pericolosità dell'area. Solo in questo caso l'aspettativa rivolta verso la mitigazione del rischio, determinata dalla presenza di una rete di *early warning*, può dirsi soddisfatta. Parimenti, e come detto, è importante tener conto che, per l'efficacia E di una rete di monitoraggio,

assume una notevole importanza anche la minimizzazione dei falsi allarmi. Ciò può avvenire solo dalla combinazione di più aspetti che vedono coinvolti la progettazione della rete, l'individuazione delle soglie di allertamento e la gestione del sistema di monitoraggio.

Queste tre attività non si possono considerare "cristallizzate" ma, di pari passo con l'evoluzione del fenomeno naturale e con la migliore conoscenza dello stesso, vanno iterativamente sottoposte ad un processo di revisione ed aggiornamento al fine di migliorare l'efficacia della rete di *early warning*.

In conclusione, del paragrafo si ritiene importante evidenziare che, per quanto esuli dai compiti di progettisti e gestori di una rete di *early warning*, l'efficacia E di un sistema di monitoraggio viene percepita solo se il soggetto deputato alle attività di Protezione Civile sarà in grado di agire efficacemente e tempestivamente nella sottrazione di persone o strutture mobili i dall'area potenzialmente interessata dallo scenario j .

2.2.1 Il criterio di ridondanza

L'applicazione del criterio della ridondanza¹ è di assoluta importanza per la realizzazione e gestione di una buona rete di monitoraggio ed è fondamentale se alla rete si intendono attribuire funzioni di allertamento.

Gli scopi, che ci si deve prefiggere di raggiungere con l'applicazione del criterio di ridondanza quando si progetta una rete di monitoraggio, possono sinteticamente essere riassunti in:

- 1) garantire la funzionalità anche in caso di guasti occorsi ad uno dei componenti "primari" costituenti la rete (vantaggioso per una rete conoscitiva ma particolarmente utile per una con finalità di allertamento);
- 2) permettere di identificare eventuali errori di misura che potrebbero compromettere il buon funzionamento della rete.

Per quanto riguarda la prima finalità si deve progettare tenendo conto di una applicazione estensiva del criterio di ridondanza applicandolo a tutti i componenti della rete, e quindi:

- evitare, nel limite del possibile, di progettare reti che non prevedano la ridondanza dei sensori di misura sia per numero (es. evitare di controllare il movimento superficiale di una frana con un solo estensimetro) che per tipologia (es. evitare di controllare i movimenti superficiali di una frana solo con una tipologia di sensore);
- ridondare il sistema di alimentazione (es. prevedere l'alimentazione da rete fissa assistita da un generatore di corrente attivabile in caso di guasto alla rete elettrica);
- ridondare il sistema di trasmissione dei dati (es. prevedere sistema di trasmissione via GPRS/GSM/UMTS assistito da un sistema ausiliario di trasmissione via UHF (vedi Paragrafo A.6.2);
- dotarsi di un sistema di analisi ed archiviazione dei dati (es. prevedere server di acquisizione ridondati e soggetti a politiche di *disaster recovery* e *business continuity*).

Per quanto riguarda la seconda finalità, ossia l'identificazione degli errori di misura, il criterio della ridondanza si applica sia nell'esecuzione della stessa misura (es. ripetendo più volte la stessa misura distometrica o in caso di corrispondenza fra misura estensimetrica e linea distometrica confrontando i singoli incrementi nella stessa unità di tempo) sia nella progettazione della rete, dove è raccomandato l'utilizzo di più sensori nel controllo del medesimo dissesto.

La ridondanza circa l'utilizzo di più sensori di misura (Figura 2) come già detto garantisce sia la prima finalità (funzionamento in caso di guasto) sia la seconda relativa alla qualità delle misure.

¹ Con il termine ridondanza si intende la caratteristica di una rete di monitoraggio in cui sono presenti due o più elementi capaci di svolgere la stessa funzione, così da aumentarne l'affidabilità.



Figura 2 – Esempio di ridondanza dei sistemi di misura del movimento del dissesto di Idro (BS). Sensore GNSS con acquisizione in tempo reale, mira ottica afferente al sistema di misurazione topografica manuale e tubo inclinometrico con cavo TDR (*time domain reflectrometry*). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

2.2.2 Reperibilità

Con il termine reperibilità si intende l'obbligo del lavoratore di porsi in condizione di essere **prontamente rintracciato, fuori dal proprio orario di lavoro**, in vista di un'eventuale prestazione lavorativa e di raggiungere, **in breve tempo**, il luogo di lavoro per **eseguire la prestazione richiesta**.

Parlando di monitoraggio dei fenomeni franosi è immediatamente comprensibile come tale "pronta attivazione" dei tecnici responsabili della gestione/manutenzione della rete non sia strettamente necessaria in caso di rete avente finalità conoscitiva mentre sia indispensabile per una buona gestione di *early warning* della maggior parte dei fenomeni di frana con questa finalità.

In estrema sintesi la reperibilità, necessaria per una tempestiva presa in carico del problema, è finalizzata alle attività relative a:

- 1) garantire il buon funzionamento di tutti i componenti (sensoristica, acquisitori, alimentazione, trasmissione, server di processamento ed archiviazione, visualizzatori dati) costituenti la rete di monitoraggio;
- 2) l'analisi/verifica delle segnalazioni di allerta.

Per quanto descritto al punto 1 i soggetti deputati alle analisi/manutenzioni dei vari componenti devono potersi

attivare prontamente per la risoluzione del guasto che compromette la buona qualità nell'acquisizione o nell'analisi di dati. Questa attivazione dovrà essere tanto più pronta quanto maggiore risulti l'effetto del guasto sull'analisi dei dati ai fini di un eventuale allertamento. Ad esempio, se in una rete, avente 15 estensimetri, uno di questi subisce un guasto tale da comprometterne il buon funzionamento, la manutenzione potrà prendere in carico e risolvere la problematica anche nell'arco di qualche giorno poiché l'analisi dei dati potrà infatti proseguire su oltre il 90% della strumentazione che concorre alla rete di monitoraggio.

Viceversa, se da una rete di monitoraggio cessa improvvisamente il flusso dei dati trasmessi è evidente che la risoluzione del guasto dovrà avvenire il più prontamente possibile e comunque nell'arco di poche ore. In ragione di ciò, ossia di ridurre al minimo le tempistiche di risoluzione dei guasti, è importante che tutti i soggetti deputati alle attività manutentive, sia della strumentazione a campo sia dei sistemi di trasmissione e processamento dei dati, siano attivabili in termini di pronta disponibilità o reperibilità.

Per quanto riguarda il punto 2, ossia l'analisi delle segnalazioni di allerta da parte dell'operatore, è importante ricordare che questa attività non risulta indispensabile, nel senso letterale del termine, per tutte le tipologie di frana trattate nelle presenti linee guida (si pensi ad esempio alle colate che necessitano di una immediata segnalazione d'allarme senza passaggi di verifica che, per il dispendio di tempo, vanificherebbero l'utilità del monitoraggio) e lo è tanto meno quanto più si tenda ad un sistema perfetto o che generi segnalazioni solo qualora numerosi e differenti strumenti superino la rispettiva soglia.

Nella stragrande maggioranza dei casi l'attività di verifica delle segnalazioni di allerta è però necessaria per massimizzare l'efficacia E di una rete con finalità di *early warning* come trattato al Paragrafo 2.2.

I cosiddetti "fuorisoglia", che generano messaggi di allertamento, sono nella realtà spesso attribuibili a situazioni contingenti quali sbalzi nell'alimentazione, situazioni meteorologiche, interferenze di varia natura

(antropiche, di animali) con la strumentazione, guasti nelle componenti dei sensori di misura, ecc.

I sistemi, con finalità di allerta, associano, infatti, alla strumentazione installata degli algoritmi di calcolo, aventi lo scopo di quantificare numericamente la situazione presente sull'area di frana. Qualora il risultato, ottenuto inserendo in detti algoritmi i valori degli ultimi dati acquisiti a campo, superi una predeterminata soglia (vedi Paragrafo 2.2.3) il sistema di monitoraggio genera un messaggio di allerta.

Con il termine verifica delle segnalazioni di allerta intendiamo quell'insieme di attività (es. analisi di corretto funzionamento della strumentazione, sopralluogo in situ, misure manuali di controllo, raffronto fra misure ecc.) che sono volte a confermare la correttezza e la significatività del messaggio di allerta ricevuto.

Per quanto riguarda le reti di *early warning* è evidente che tali verifiche debbano svolgersi entro pochissime ore dalla generazione della segnalazione dell'allerta e pertanto, anche in questo caso, è utile che tutti i soggetti deputati a ciò siano attivabili in termini di pronta disponibilità.

2.2.3 Soglie e scenari

Indispensabile, affinché una rete di monitoraggio possa considerarsi avente finalità di allertamento, è come detto al Paragrafo 2.2 che sulla stessa vengano definite soglie d'allertamento e scenari di evento sito-specifici.

La definizione di dette soglie e degli scenari di evento avviene avvalendosi di studi di modellazione geologica e/o geotecnica di cui si tratterà diffusamente nel Paragrafo 2.2.4.

Qui si vogliono solo definire alcuni concetti generali cui fare riferimento per la definizione di soglie e scenari per le reti di monitoraggio delle frane.

Anzitutto è bene definire cosa si intenda per soglia di allerta in relazione alla strumentazione di cui all'Appendice A.

In generale le soglie sono valori numerici, determinati da una o più variabili, che evidenziano una variazione di

comportamento del sistema frana monitorato, tale da causare un aumento di pericolosità.

Nel caso di **soglia pluviometrica** intendiamo la quantità di precipitazione registrata (in un dato intervallo di tempo) da uno o più pluviometri installati in un'area in frana (o nei suoi pressi), che indica per uno o più livelli di criticità la possibile riattivazione di un dissesto.

Nel caso di **soglie per strumentazione superficiale, in fori di sondaggio, topografica e radar** intendiamo quei valori, di spostamento (lineare od angolare), di velocità, o di accelerazione, registrati o calcolati sulla base dei dati acquisiti da uno strumento installato in un'area di frana, che indicano a vari livelli di criticità il probabile e teorico avvicinarsi al collasso di una frana.

Il lasso di tempo ΔT , che intercorre fra il raggiungimento, da parte di uno o più strumenti, del valore di soglia di criticità ed il possibile evento di collasso, deve essere connesso alle attività previste nella pianificazione di emergenza (es. se al raggiungimento della soglia è prevista l'evacuazione di un paese da effettuarsi in 48 ore non è possibile considerare una soglia che abbia un $\Delta T \leq 48h$) ed al margine precauzionale che il decisore (autorità comunale, provinciale o regionale di Protezione Civile), valutando e soppesando i rischi, vorrà assumersi.

Le soglie possono venir individuate per ogni singolo strumento o, più comunemente, per gruppi di strumenti omogenei e posizionati su aree omogenee della singola frana.

Per quanto riguarda gli **scenari di evento** intendiamo quegli scenari utilizzati per rappresentare una o più situazioni di possibile evoluzione del dissesto.

Tali scenari sono predisposti, sulla base del modello geologico e/o geotecnico e delle conoscenze disponibili in quel momento, mediante l'utilizzo di specifici software di calcolo che consentono la simulazione della fase di espansione dei fenomeni franosi di interesse (crolli, scivolamenti espandimenti, ecc.).

Per facilitare le attività successive (es. redazione piani di emergenza) è necessario che lo scenario di evento venga rappresentato sia in termini descrittivi che su base cartografica a scala adeguata così da poter

rendere immediatamente comprensibile l'areale interessato dall'evento frana o dal concatenamento di eventi (esempio sbarramento di un torrente/fiume e successivo *dam break* con effetti di colata a valle) determinato dal dissesto.

2.2.4 Modellazione dei dissesti e individuazione di soglie

Nel caso di fenomeni con caratteristiche molto specifiche e/o di singoli fenomeni di instabilità, il funzionamento di un sistema di allertamento richiede la definizione di valori soglia che siano rappresentativi di tali specificità. Come evidenziato al Paragrafo 2.2 e 2.2.3 delle presenti Linee Guida, i valori soglia possono riguardare variabili differenti considerate sia singolarmente che in modo complementare. I valori soglia possono riguardare fattori innescanti (per esempio, precipitazioni e loro intensità, valore cumulato e durata; accelerazione sismica), variabili interne legate alla risposta del sistema versante o instabilità (per esempio, oscillazione del livello piezometrico o delle pressioni dell'acqua entro il versante, variazioni delle portate alle sorgenti), o variabili rappresentative degli effetti registrati dal corpo di frana/versante in termini di manifestazioni di instabilità (per esempio spostamenti e variabili derivate da questi; emissione di rumori di diversa tipologia e frequenza).

Il monitoraggio dei fattori innescanti, delle risposte del sistema e del fenomeno, condotto per tempi adeguati, con distribuzione spaziale e temporale ben definite e adatte al fenomeno, è indispensabile se si vogliono cogliere quelli che sono gli aspetti rilevanti di un fenomeno dal punto di vista dell'allertamento e della gestione delle emergenze.

Nel caso non si disponga, entro il periodo di monitoraggio, di una casistica di eventi (per esempio, eventi di riattivazione, accelerazione di un fenomeno di instabilità), tale da consentire una robusta analisi statistica a supporto dell'individuazione di valori soglia, è possibile eseguire studi che consentano di riprodurre, attraverso opportuni strumenti di modellazione, il comportamento atteso del fenomeno analizzato e di conseguenza valori di variabili in corrispondenza dei

quali i valori limite e le variazioni rapide nell'evoluzione del fenomeno possano essere riconosciuti. Questa fase implica la definizione di un modello concettuale del fenomeno tale da consentire una robusta identificazione della tipologia di materiali coinvolti, dei loro comportamenti e delle modalità per il loro inserimento nel modello insieme con le variabili che controllano o favoriscono l'innescio del fenomeno in esame. L'approccio di modellazione di un fenomeno di instabilità è quindi fortemente condizionato dalla tipologia di fenomeno, dal livello di informazione disponibile sulle caratteristiche fisico meccaniche, sulla storia evolutiva dello stesso, nonché sulla tipologia e le caratteristiche degli agenti e degli eventi innescanti, dei dati di monitoraggio disponibili (per esempio, dati di spostamento misurati in superficie o in profondità, precipitazioni, livelli piezometrici o pressioni neutre) nonché delle modalità di acquisizione (per esempio, strumentazione e componenti monitorate, frequenza spaziale e temporale delle misure).

Ne consegue che la modellazione del fenomeno potrà fornire risultati (per esempio, riguardo l'evoluzione del fenomeno e/o gli eventuali valori soglia per cui siano osservate forti variazioni di comportamento) molto diversi e di diversa significatività, in funzione della fase di studio e del livello conoscitivo disponibile al momento della progettazione (per esempio, preliminare, conoscitiva, di approfondimento). Di conseguenza, la modellazione potrà/dovrà essere ripetuta o implementata per garantire l'adattamento della tecnica, delle condizioni al contorno adottate, delle proprietà dei materiali alla fase evolutiva e allo stato delle conoscenze.

Lo scopo di una fase di modellazione consiste nella creazione di un modello che supporti l'individuazione dei valori soglia di un sistema di allertamento, rispetti le osservazioni fatte, tenga conto quanto possibile dei fattori di controllo, e possa fornire una previsione del comportamento del fenomeno di instabilità (per esempio, allargamento dell'area, deformazione attesa in diversi settori), in funzione della fase evolutiva (per esempio, iniziale, di accelerazione, di rallentamento, di stabilizzazione), della variazione delle proprietà

meccaniche dei materiali, delle condizioni geomorfologiche al contorno, nonché dei fattori innescanti. Qualora siano disponibili le necessarie conoscenze, in funzione del tipo di fenomeno, si potranno impiegare gli strumenti di modellazione per verificarne l'evoluzione, ossia per esempio l'accumulo di deformazioni tali da causare danni a strutture e infrastrutture, la rapidità con cui queste possono avvenire, la possibilità di una transizione da movimento lento a movimento estremamente rapido e con notevole espandimento verso valle (ossia con possibilità di espandersi andando ad occupare ampie aree a valle del fenomeno). La variabilità dei fenomeni e delle loro interazioni con elementi di diversa tipologia costituiscono caratteri fondamentali per l'individuazione degli strumenti di modellazione. Ne consegue che pochi modelli consentono di descrivere tutte le tipologie di fenomeno e le loro fasi evolutive, e quindi non possono supportare tutte le fasi di studio e le necessità di valutazione dei valori soglia connessi. Per superare tali limitazioni si possono adottare differenti tecniche di modellazione utilizzandole sia separatamente che in modo complementare o accoppiato.

I modelli statistici non sono fisicamente basati, ossia non includono una descrizione fisico meccanica del fenomeno e dei processi in atto, ma possono fornire delle indicazioni di correlazioni tra le variabili di interesse (per esempio, spostamento o accelerazione e precipitazione intensa e/o cumulata). I modelli basati sulle tecniche di analisi di grandi serie di dati, per esempio *deep learning* o *machine learning* o strategie di analisi di questo tipo, consentono di analizzare relazioni complesse, basate su serie di dati sufficientemente complete, ma in genere non forniscono una vera e chiara modellazione del fenomeno, ossia non ne forniscono una chiave di lettura di tipo fisico-meccanico. I modelli statistici/probabilistici sono di comune utilizzo per la definizione di soglie di precipitazione per frane superficiali, ma possono essere impiegati anche per altre tipologie di fenomeni. L'adozione di tali soglie si basa sull'elevato numero e densità di fenomeni osservati in occasione di fenomeni idrologici di particolare intensità. Nel caso di dati sufficientemente numerosi è possibile associare una probabilità di

accadimento ai fenomeni in esame, probabilità che può essere messa in relazione anche alla densità di fenomeni attesi. Modelli statistici più complessi o sistemi di *deep learning* possono essere impiegati sia per frane distribuite che per fenomeni specifici e possono consentire la definizione delle condizioni critiche che possono portare all'evoluzione di instabilità, per combinazioni critiche di valori di variabili monitorate.

La modellazione tramite funzioni empiriche e semi-empiriche è un'altra opzione che spesso sfrutta delle serie storiche di dati (es. spostamenti, emissioni acustiche) e le analizza tramite funzioni matematiche stimandone la performance in termini statistici. In tali casi va tenuta presente l'empiricità dell'approccio ossia la necessità di serie storiche sufficientemente lunghe, rappresentative, significative del meccanismo che si vuole analizzare e molto spesso non in grado di tenere conto della variazione di comportamento, delle perturbazioni (per esempio, incremento delle intensità di precipitazione, della velocità di scioglimento della copertura nevosa) e della sensibilità del sistema a tali variazioni (a seguito di variazioni delle proprietà fisico meccaniche nonché della loro distribuzione spaziale).

La modellazione numerica di tipo fisico meccanico può garantire l'analisi di tipo "deterministico" del fenomeno ma, come detto in precedenza, è anche il risultato della costruzione di un modello concettuale (ossia della schematizzazione del problema) e della qualità e quantità di informazioni disponibili, nonché dello strumento di modellazione disponibile o selezionato. Tali modelli possono essere in grado di fornire indicazioni circa l'evoluzione del fenomeno in funzione delle variazioni delle condizioni esterne (per esempio, precipitazioni, modifiche della geometria del pendio) così come di variazioni interne (per esempio, variazione del livello piezometrico, delle proprietà dei materiali) ma alcune delle scelte fatte possono favorirne, sfavorirne o limitarne le capacità previsionali. Un approccio di questo tipo applicato alle frane superficiali, citate in precedenza per i modelli statistici, si esplica nella modellazione dei processi di infiltrazione delle precipitazioni entro i materiali coinvolti, della filtrazione verso il piede del pendio, includendo gli effetti di

convergenza topografica, di parziale o completa saturazione, e nell'esame della stabilità connessa alla pendenza e alle proprietà fisico meccaniche di base dei materiali. Modelli più avanzati riescono a suggerire una distinzione tra fenomeni che potranno evolvere come movimenti di scorrimento con piccoli spostamenti e movimenti in massa che possono evolvere come flussi di materiale.

Modelli del continuo, del discontinuo e modelli ibridi (continuo-discontinuo), così come vengono definiti nella letteratura tecnico-scientifica, possono essere utilizzati in funzione del tipo di fenomeno, dei materiali coinvolti, del grado di conoscenza del fenomeno e dei materiali, degli spostamenti attesi, delle trasformazioni possibili per i materiali e della necessità di considerare spostamenti di entità molto differenti. Tali modellazioni possono consentire di approfondire i legami tra fenomeni di instabilità di versante e fenomeni di instabilità o di danneggiamento di strutture e infrastrutture. Questi approcci possono essere impiegati sia per la progettazione di strutture e infrastrutture, per il loro rinforzo, per la progettazione di opere di stabilizzazione, per la previsione di collassi o per l'indicazione degli elementi monitorabili di una struttura.

In tutti i casi gli scopi della modellazione, per quello che riguarda un sistema di allertamento, possono essere:

- la definizione di valori soglia di variabili monitorate e monitorabili con continuità, per cui si possa osservare una chiara variazione di comportamento del fenomeno o il passaggio da condizioni di equilibrio fino a condizioni di disequilibrio, o a condizioni di spostamento e velocità critiche;
- l'indicazione di diversi valori soglia posti in una sequenza che possa essere indicativa di una progressiva variazione di comportamento, anche legata ad una variazione delle proprietà dei materiali o della loro sensibilità ai fattori esterni, sia che questa avvenga in un breve o lungo tempo e che porti a condizioni via via di maggiore criticità;
- la simulazione di variazioni geometriche e fisiche che possono essere indispensabili per la formulazione di scenari evolutivi (per esempio la

variazione dei volumi coinvolti, l'attivazione di settori più profondi o con maggiore estensione areale a monte, a valle o lateralmente al corpo di frana iniziale);

- l'identificazione e simulazione di comportamenti che possano risultare fondamentali per una corretta pianificazione e implementazione/miglioramento di un sistema di monitoraggio e di *early warning*;
- la possibilità di fornire informazioni circa il livello di sollecitazione su strutture e/o infrastrutture per le quali siano state definite le condizioni (soglie) che possono portare alla transizione da uno stato limite ad uno successivo e più critico (per esempio stato limite di servizio, stato limite ultimo, stato limite di collasso, ossia che portino a perdita di stabilità di parte o dell'intera struttura o alla rottura di sezioni critiche della struttura; instabilità per accumulo di una deformazione eccessiva che portino, per esempio, ad una variazione eccessiva di geometria della struttura).

Per quanto abbiamo detto e per quanto è possibile immaginare, tutti i modelli possono e dovrebbero essere implementati/aggiornati col passare del tempo e con l'acquisizione di nuove informazioni e dati che possono chiarire le trasformazioni ed evoluzioni dei fenomeni. Modellazione e monitoraggio devono essere quindi visti come elementi di un processo iterativo che si ripete periodicamente al cambiare dei comportamenti o alla acquisizione di nuove informazioni indicative di un cambiamento del comportamento del sistema monitorato. Ciò potrebbe consentire di riconoscere variazioni del sistema, di adeguare e migliorare le previsioni, e quindi di alzare o abbassare i valori soglia in funzione delle modalità di transizione attese per il comportamento del fenomeno verso situazioni più o meno critiche.

Tutti i modelli possono peraltro essere affetti da una incertezza che si diversifica in funzione del livello di conoscenza per le variabili di controllo. Ogni fattore di controllo (per esempio, la geometria del corpo di frana, le caratteristiche fisico meccaniche, il loro trend di evoluzione nello spazio e nel tempo, la distribuzione dei

fattori innescanti) è caratterizzato da un grado di incertezza che è connesso alla fase di studio e alla fase evolutiva del fenomeno, e che si ripercuote sul risultato della fase di modellazione. La definizione dell'incertezza e la sua riduzione sono quindi passi fondamentali ai fini della costruzione di modelli robusti ed affidabili e di conseguenza di previsioni significative. Valori di incertezza più o meno elevati si possono quindi ripercuotere sui valori soglia definiti.

Allo stesso modo vanno tenuti in conto altri tre aspetti che possono essere rilevanti ai fini della definizione delle soglie e della gestione di un sistema di allertamento:

- la necessità o la preferenza da parte dei gestori e/o degli esperti di modellazione per opzioni più o meno conservative (ossia a favore della sicurezza) da adottare durante la fase di modellazione;
- la possibilità che la modellazione statistica o matematica/numerica risulti in valori soglia con una elevata precisione tale da richiedere attenzione nell'impiego e nella comunicazione;
- la necessità di definire soglie di rientro a seguito dell'emissione di una fase di allertamento per superamento del valore soglia.

Il primo caso rappresenta per esempio la situazione in cui valori più bassi di resistenza dei materiali o più elevati dei carichi esterni o delle perturbazioni vengano scelti per caratterizzare i materiali o le condizioni al contorno, così come scenari più onerosi in termini di volumi e masse in gioco.

Il secondo caso è il risultato delle operazioni "matematiche" eseguite e dell'eventuale grado di dettaglio spazio-temporale con cui si decide di analizzare i dati o di restituire i risultati. In molti casi la precisione che può essere rappresentata in termini di numeri decimali o interi del valore soglia può essere molto incerta di per sé o poco significativa e gestibile nelle operazioni di *early warning* e di protezione civile che ne possono conseguire.

Il terzo caso è una situazione di estrema difficoltà di previsione e di gestione ed è quella che spesso richiede massima attenzione soprattutto per le pressioni

esercitate da parte delle comunità esposte e/o da politici e amministratori. In molti casi la risposta in fase di attivazione e di disattivazione (per esempio, accelerazione decelerazione) di una instabilità di versante non è simmetrica come non lo è la sensibilità a un evento innescante (precipitazione, scioglimento nivale, sisma) di pari entità ma in stretta successione o ravvicinato alla fase di picco. In tali casi la modellazione può supportare l'analisi di tali scenari e sconsigliare, per esempio, un ritorno affrettato alla normalità. In molti casi è necessario supportare il ritorno a condizioni pre emergenza sulla base di una modellazione fisica e fenomenologica (descrittiva dei possibili scenari), ma anche sull'aggiornamento dello stato delle conoscenze a seguito dell'evento di superamento della soglia, che può avere modificato il comportamento del sistema (evoluzione delle proprietà e della geometria).

3 ATTIVITÀ E FASI DELLA PROGETTAZIONE

La progettazione è la parte più importante e nello stesso tempo più complessa relativa alla realizzazione di una rete di monitoraggio.

L'obiettivo base di una rete di monitoraggio è quello di una migliore, più approfondita e più precisa conoscenza di un fenomeno franoso. È altrettanto vero che la progettazione di un sistema di monitoraggio non può prescindere da una, spesso purtroppo solo preliminare, conoscenza del fenomeno stesso. Ne consegue che, in generale, la progettazione di una rete di monitoraggio prende avvio con un quadro conoscitivo che viene implementato proprio in virtù della realizzazione della rete.

Per la progettazione di una rete di monitoraggio si può dunque fare riferimento ad un flusso circolare di lavoro di seguito riportato:

- acquisizione delle conoscenze disponibili ed acquisibili relativamente al fenomeno franoso;
- progettazione e realizzazione della rete di monitoraggio;
- acquisizione, mediante attivazione della rete di monitoraggio, di maggiore conoscenza sul fenomeno franoso;
- implementazione della progettazione e quindi della rete di monitoraggio.

Si possono pertanto rappresentare le fasi di progettazione – realizzazione - utilizzo di una rete di monitoraggio come illustrato nella Figura 3.



Figura 3 – Fasi di lavoro

Ricordato tale aspetto, che ci evidenzia quindi come spesso ad una prima progettazione si susseguano fasi integrative, va considerato che ogni progettazione trae origine e si basa sullo scopo a cui ci si prefigge di pervenire con la realizzazione dell'opera progettata.

Per quanto riguarda le reti di monitoraggio dei fenomeni franosi andrà pertanto e primariamente tenuto conto di quale finalità, all'interno delle due macrocategorie richiamate nel capitolo precedente (conoscitiva e di *early warning*), si debba raggiungere.

Sulla base di quanto precedentemente illustrato nelle presenti Linee Guida si rileva che le scelte da effettuare nella fase di progettazione (numero, ubicazione, tipologia di installazioni/sensori, nonché modalità di acquisizione-trasmissione dei dati, ecc.) potranno essere sostanzialmente differenti a seconda che la finalità sia conoscitiva o di allertamento; di conseguenza l'indicazione della finalità costituisce un elemento chiave della progettazione.

Quanto sopra determina il fatto che, prima di avviare la progettazione, debba essere specificata dal richiedente la finalità del monitoraggio del fenomeno franoso.

In estrema sintesi, è possibile affermare che una rete di monitoraggio deve venir progettata avendo lo scopo di rispondere alle richieste che alla stessa vengono fatte; qual è il problema che si stabilisce di risolvere con questa rete?

Sulla base di ciò la progettazione dovrà determinare:

- strumenti/acquisitori/accessori/sistemi trasmissione ecc.;
- ubicazione di tutto quanto al punto precedente;
- modi e tempi (frequenze) di acquisizione dei dati;
- modalità/costi gestione (misure, analisi, manutenzioni ecc.);

Il tutto, si ribadisce, dovrà tenere conto delle conoscenze disponibili al momento della redazione del progetto, relative a:

- conoscenze geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e geotecniche del sito in oggetto;
- informazioni geografiche (con particolare riferimento alla quota ed all'esposizione);
- modalità di accessibilità alle aree.

La progettazione dovrà inoltre valutare l'opportunità e le modalità di integrazione della eventuale strumentazione di monitoraggio già presente in frana.

Riguardo le fasi di progettazione di seguito illustrate è opportuno ricordare che nell'ipotesi in cui la rete di monitoraggio abbia la finalità di supportare la progettazione di un'opera di ingegneria civile (struttura/infrastruttura o, in particolare, di un intervento di stabilizzazione), le attività, le scelte, ecc. connesse alla definizione della rete di monitoraggio conoscitiva saranno integrate nella complessiva progettazione dell'opera (LL.GG. AGI - ISPRA 2021) e potranno fare comunque riferimento a quanto suggerito nelle presenti Linee Guida.

3.1 PROGETTO DI FATTIBILITÀ

Il progetto di fattibilità dovrà anzitutto descrivere lo stato di conoscenza del fenomeno franoso esplicitando la finalità cui sarà preposta la rete di monitoraggio. In particolare, dovranno essere sintetizzate le conoscenze di tipo geologico e geotecnico sull'area in frana e descritti accuratamente tutti i dati di monitoraggio pregressi con ubicazione degli strumenti e grafici/tabelle delle misure.

In funzione a quelli che saranno i quesiti a cui ci si prefigge di dare risposta (es. a quale profondità è localizzato il piano di scivolamento, oppure quando il movimento dell'ammasso assume una tipica velocità da *creep* terziario ecc.) e delle caratteristiche cinematiche e geometriche ipotizzabili sulla base delle conoscenze sui caratteri stratigrafici, geomorfologici e geotecnici del versante, si andranno ad individuare le tipologie dei sensori da utilizzare (es. sensori profondi, sensori/strumenti per verifica movimento superficiali ecc.). Nel progetto di fattibilità andranno anche valutate possibili alternative alla tipologia di sensori previsti e giustificate le caratteristiche tecniche principali (quali, risoluzione, fondo scala, precisione ed accuratezza) degli strumenti di misura individuati.

Da non trascurare, ove presenti, una sintetica descrizione dei sistemi di acquisizione, alimentazione e trasmissione dei dati.

In questa fase, mediante cartografia in scala adeguata del versante, andranno definiti il numero di sensori (cercando di garantire un'adeguata ridondanza), le loro posizioni (in planimetria e lungo le verticali di monitoraggio), le modalità e la frequenza di misura/acquisizione-archiviazione dei dati nonché l'eventuale modalità di trasmissione degli stessi.

Gli ulteriori aspetti da considerare e definire, di particolare rilevanza per la realizzazione della rete di monitoraggio, riguardano:

- l'accessibilità alle aree e le autorizzazioni eventualmente necessarie;
- le azioni necessarie per garantire il rispetto della normativa di sicurezza in connessione alla gestione della rete di monitoraggio (esecuzione

delle misure, manutenzioni della rete, ecc.);

- la definizione di un quadro economico di spesa, quanto più possibile preciso, e la/e possibile/i fonti di finanziamento, fondamentale per la fattibilità del progetto;
- la predisposizione di un cronoprogramma, seppur di massima, che individui i tempi per la progettazione esecutiva e la realizzazione della rete, nonché quelli previsti per le attività successive.

In particolare, andranno esplicitati in maniera chiara sin da questo livello di progettazione (fattibilità) i vincoli determinati dalle normative ambientali e edilizie nonché quelli derivanti da titoli di proprietà sui fondi in cui si andrà ad operare.

Infine, per far sì che il decisore/committente abbia a disposizione tutte le informazioni necessarie per ponderare le proprie scelte, si suggerisce di evidenziare, in particolare, eventuali limiti determinati dalla tipologia di rete illustrata negli atti di progetto.

3.1.1 Documentazione progetto di fattibilità

Posto che la documentazione di progetto è identificata da specifiche norme e regolamenti, che ne definiscono anche nomenclatura e contenuti, di seguito si fornirà un elenco, calibrato sulle necessità della progettazione di reti di monitoraggio, suscettibile di integrazioni e/o modifiche per quanto normativamente disposto:

- relazione tecnica di progetto;
- quadro economico della spesa;
- cronoprogramma;
- corografia di inquadramento a scala 1:25.000 oppure 1:50.000 e planimetria, in scala adeguata, dell'area interessata dalla rete di monitoraggio;
- piano particellare dei mappali interessati dalle opere;
- relazione contenente prime indicazioni relative agli aspetti di sicurezza dei luoghi di lavoro ed alle attività di misura/manutenzione.

3.2 PROGETTO DEFINITIVO ED ESECUTIVO

La progettazione definitiva ed esecutiva potrà essere intrapresa una volta stabiliti in via definitiva gli aspetti relativi alle scelte concernenti la rete, gli importi economici e l'accessibilità e occupazione delle aree di interesse.

Eventuali atti autorizzativi derivanti dalla normativa urbanistico/edilizia, ambientale, idraulica o forestale dovranno essere richiesti mediante la presentazione della documentazione relativa alla progettazione definitiva.

Di seguito si esplicherà, per i due livelli in esame (definitivo ed esecutivo), la documentazione necessaria per la progettazione di reti di monitoraggio per frane. Vale per queste fasi quanto già detto al Paragrafo 3.1.1 circa le necessità integrative determinate dalla specifica normativa.

3.2.1 Documentazione progetto definitivo

Il progetto definitivo dovrà essere composto dagli elaborati di seguito riportati:

- relazione tecnica di progetto: in questa relazione saranno sviluppati i contenuti già anticipati nel livello di fattibilità ponendo particolare attenzione a:
 - definizione e motivazione delle scelte relative a tipologia, profondità, modalità di esecuzione dei sondaggi necessari per la realizzazione della rete di monitoraggio;
 - definizione e motivazione delle scelte relative ai sensori (numero, tipo di trasduttore, escursione, modalità di installazione e lettura);
 - definizione delle modalità di acquisizione e verifiche sulla modalità di trasmissione;
 - scelta e motivazione del sistema di alimentazione e dell'eventuale necessità di contratti di fornitura;
 - completa definizione dei vincoli che gravano sull'area interessata dalle installazioni ed acquisizione dei permessi necessari per la realizzazione dell'installazione e l'esecuzione

- delle misure;
- valutazione della necessità o meno di predisposizione del Piano Sicurezza e Coordinamento;
- illustrazione della necessità o meno di letture manuali e loro eventuale cadenza;
- definizione delle modalità di accesso alle aree.
- descrizione e specifiche tecniche per la manutenzione della rete;
- definizione analitica del quadro economico;
- corografia di inquadramento a scala 1:25.000 o 1:50.000;
- cartografia a scala di dettaglio (comunque mai inferiore a 1:2.000), relativa ai punti di installazione della strumentazione ed opere accessorie;
- tavole grafiche descrittive di eventuali opere edili (pilastrini, recinzioni, ricoveri, piste, piazzole, ecc.);
- elenco prezzi unitari;
- computo metrico estimativo;
- piano particellare delle aree interessate dalle opere.
- cronoprogramma esecutivo;
- schema di contratto;
- capitolato speciale d'appalto;
- specifiche tecniche di tutte le forniture, installazioni, lavori e servizi;
- corografia di inquadramento a scala 1:25.000 o 1:50.000;
- cartografia a scala di dettaglio (comunque mai inferiore a 1:2.000), relativa ai punti di installazione della strumentazione ed opere accessorie;
- tavole grafiche descrittive di eventuali opere edili (pilastrini, recinzioni, ripari, piste, piazzole, ecc.);
- elaborazione e rappresentazione degli schemi di impianto, dei cablaggi e delle specifiche di ogni componente;
- piano particellare di occupazione delle aree interessate dalla rete di monitoraggio;
- eventuale predisposizione di Piano di Sicurezza e Coordinamento ai sensi del D.Lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.;
- eventuale Computo metrico relativo alla quantificazione degli oneri della sicurezza ai sensi del D.Lgs. 81/2008 e ss.mm.ii.

3.2.2 Documentazione progetto esecutivo

Per il progetto esecutivo è da prevedere la precisazione e l'aggiornamento degli elaborati già prodotti per il progetto definitivo. In particolare, dovranno essere aggiornati gli atti progettuali sulla base di eventuali prescrizioni autorizzative che devono essere acquisite prima della conclusione di questo livello di progettazione. In sintesi, gli elaborati da predisporre sono quelli di seguito riportati:

- relazione tecnica di progetto;
- piano di manutenzione con definizione delle attività previste per almeno due anni di funzionamento della rete (gli oneri dovranno essere presenti nel quadro economico);
- elenco prezzi unitari;
- computo metrico estimativo definitivo;

4 MISURE

Il monitoraggio dei movimenti franosi può essere effettuato attraverso strumenti differenti a seconda delle finalità per cui un sistema di controllo viene progettato; inoltre, possono essere posti sotto controllo parametri diversi, che correlati tra loro concorrono a costruire un quadro del fenomeno franoso via via più completo. In generale le principali modalità di effettuazione delle misure sono riconducibili a:

- misure manuali – effettuate sulla base di una programmazione prefissata in funzione dello stato di attività del dissesto e della finalità che ci si prefigge (misura periodica conoscitiva o misura di calibrazione di strumentazione con acquisizione in continuo) o utilizzate in maniera non programmata su aree ritenute in accelerazione (verificando preliminarmente la fattibilità e comunque limitando al minimo indispensabile la presenza dei tecnici) qualora si debba verificare la validità del dato acquisito con la strumentazione elettronica o per misure speditive;
- misure in continuo – effettuate attraverso strumentazione in grado di acquisire il dato in continuo e, generalmente, di trasmetterlo in tempo quasi reale; nel monitoraggio di tipo conoscitivo tali misure possono contribuire ad arricchire le conoscenze sul fenomeno franoso, ma non sono considerate essenziali. Viceversa, nel caso di una rete con finalità di allertamento l'acquisizione dei dati in continuo e la loro trasmissione in tempo quasi reale risultano essere condizioni imprescindibili.

Di seguito vengono descritte le attività di misura, manuali e in continuo, che vengono abitualmente impiegate nello studio delle frane, distinte in misure di spostamento superficiale, misure in foro e misure meteo-pluviometriche. Occorre ricordare che esistono in commercio ulteriori sistemi di monitoraggio, impiegati prevalentemente in campo geotecnico, che in particolari condizioni possono essere utilizzati per il controllo della

stabilità dei terreni, come ad esempio le celle di pressione totale che consentono di verificare le interazioni terreno/manufatto durante e dopo le fasi di costruzione.

Per lo scopo che ci si è prefissi in queste linee guida risulta di particolare importanza standardizzare alcuni comportamenti che l'operatore a campo dovrà tenere nell'acquisizione della misura manuale, affinché sia possibile limitare la variabile "umana" interferente con la ripetibilità della misura.

4.1 MISURE DI SUPERFICIE

4.1.1 Misure distometriche

Si tratta di misure manuali molto diffuse in relazione alla economicità e facilità di esecuzione.

Sono misure di precisione in cui le variabili, determinate dalle condizioni ambientali e dalla capacità dell'operatore, sono di gran lunga più importanti della precisione strumentale, che è dell'ordine del decimo di millimetro.

La finalità delle misure distometriche è quella di tenere sotto controllo il movimento differenziale che si manifesta fra due punti A e B, posti sul versante o su una struttura, misurandone periodicamente la distanza.

Presupposto fondamentale è quindi quello che i due punti A e B si muovano a velocità differente (es. A fermo e B in movimento oppure A con velocità V1 e B con velocità V2) così che, ripetendo nel tempo le misure, si possa osservare un incremento o un decremento della distanza fra il punto A ed il punto B.

Tipicamente per il monitoraggio delle frane queste misure vengono effettuate in contiguità di fratture che delimitano una parte di versante stabile, od a movimento ridotto (punto A), da una in movimento o in forte movimento (punto B).

Come si è compreso la misura distometrica restituisce perciò esclusivamente una misura relativa al sistema di riferimento A-B.

Per una interpretazione dei movimenti dell'intero versante, quindi per discernere se l'area sottesa al punto A sia ferma o solamente a minor movimento, è pertanto necessario disporre, in aggiunta alle distometriche, di una misura del punto A effettuata con altra strumentazione (es. misure topografiche, GNSS, misure interferometriche da satellite o da terra ecc.).

Più in generale bisogna inoltre tener conto che la significatività delle misure è fortemente influenzata da un adeguato posizionamento, sia per quanto riguarda la materializzazione a terra che per quanto riguarda l'orientamento della linea di misura, dei caposaldi distometrici A-B ed a questo proposito si rimanda a quanto specificato nell'Appendice Paragrafo A.1.1.

Procedura operativa di esecuzione della misura

L'esecuzione della misura prevede che ad uno dei due ancoraggi (se possibile quello di monte, in caso di impossibilità utilizzare quello di valle purché le misure si ripetano sempre nella medesima modalità) sia collegato lo strumento, dal quale parte un nastro d'acciaio, che verrà collegato al secondo ancoraggio (Figura 4). La ripetibilità delle letture è assicurata dal fatto che il nastro, una volta collegato alle due estremità, viene portato a tensione costante mediante uno speciale dispositivo dinamometrico.

In ogni caso, onde ridurre al minimo le imprecisioni, è importante che l'insieme caposaldo – nastro – distometro possa operare in maniera quanto più lineare possibile e che la medesima misura sia ripetuta, sganciando e riagganciando lo strumento, per almeno tre volte avendo cura di annotare il valore medio.



Figura 4 - Misure distometriche a Branzi (BG). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

4.1.2 Misure estensimetriche

Sono misure automatizzate che hanno come finalità quanto già detto nel paragrafo precedente per le misure distometriche, ossia tenere sotto controllo il movimento differenziale che si manifesta fra due punti A e B (collegati con un filo in materiale a basso coefficiente di dilatazione termica), posti sul versante o su una struttura, misurandone periodicamente la distanza. È possibile porsi nella condizione di creare basi di misura fino ad alcune decine di metri utilizzando un'apposita prolunga anch'essa a basso coefficiente di dilatazione termica.

La tipologia più diffusa è quella che prevede la presenza di un sensore rotativo di tipo potenziometrico. Questo sensore, parte di un circuito elettrico, ruoterà in funzione degli allungamenti/accorciamenti del filo estensimetrico. Per la legge di Ohm ($V = R \times I$) stabilizzando la differenza di potenziale sul circuito

elettrico si otterrà una intensità di corrente (I) funzione esclusivamente della resistenza (R) del circuito. Non appena il filo si allunga la resistenza varia e così anche l'intensità rilevabile all'estremità del circuito subirà una trasformazione che si potrà correlare linearmente ad un movimento.

Il trasferimento immediato del dato così rilevato permette di avere costantemente il controllo dei movimenti fra i due punti.

Per l'interpretazione del dato estensimetrico vale quanto si dirà nel paragrafo successivo relativamente ai fessurimetri. Per le specifiche tecniche degli estensimetri si rimanda al Paragrafo A.1.2.

4.1.3 Misure fessurimetriche

I fessurimetri sono strumenti che vengono installati a cavallo di fratture di pareti o ammassi rocciosi e permettono di misurare le variazioni di spostamento, sia in apertura che in chiusura. A differenza degli estensimetri, tali strumenti sono costituiti da aste telescopiche in acciaio inox rigide e sono indicati per misurare aperture minime, dell'ordine dei centimetri. Lo spostamento genera un segnale elettrico o di tensione che viene convertito in misura ingegneristica. Per tale conversione, si applicano formule matematiche generalmente fornite dal costruttore dello strumento che

contengono coefficienti specifici propri della tipologia di strumento. I dati misurati possono essere trasmessi in *near real time* mediante una stazione di acquisizione fornita di modem GPRS con frequenze predefinite (30 minuti, un'ora, ecc.), oppure registrati su datalogger e scaricati periodicamente.

Per una corretta interpretazione dei dati, è utile anzitutto essere a conoscenza se lo strumento dovrà misurare movimenti in apertura (nel caso, ad esempio, di fessurimetro montato alla testa di un blocco roccioso isolato dalla parte retrostante), oppure in chiusura (si supponga di monitorare una frattura alla base di un blocco soggetto a ribaltamento). Nel caso invece non fosse ben chiara la tipologia di movimento atteso (in chiusura o in apertura), è possibile montare lo strumento con l'asta parzialmente chiusa in modo tale da misurare anche l'altro verso di movimento.

Per l'interpretazione dei movimenti, spesso può essere utile il confronto dei dati raccolti con quelli – se disponibili – di temperatura: a seconda dell'esposizione dello strumento e della parete monitorata, i valori possono essere influenzati dalla dilatazione termica dei materiali, con un andamento ciclico giornaliero (soprattutto nelle giornate con forti escursioni termiche, Figura 5), oppure stagionale. Per le specifiche tecniche dei fessurimetri si rimanda al Paragrafo A.1.3.



Figura 5 - Influenza della temperatura (in arancione) sulle misure fessurimetriche (in verde) dello strumento installato sulla chiesa di Dossena (BG). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

4.1.4 Misure inclinometriche a parete

Gli inclinometri da parete (o clinometri) sono utilizzati per misurare la variazione di inclinazione di pareti rocciose o di strutture in cui sono attesi spostamenti con componenti rotazionali. Lo spostamento genera un segnale elettrico che viene convertito in misura ingegneristica. Per tale conversione si applicano algoritmi di trasformazione dipendenti da fattori di sensibilità e di conversione riportati sul certificato di taratura fornito dal costruttore dello strumento. I dati misurati possono essere trasmessi in *near real time* mediante una stazione di acquisizione fornita di modem GPRS (o altro sistema di trasmissione) con frequenze predefinite (ogni 30 minuti, ogni ora, ecc.), oppure registrati su datalogger e scaricati periodicamente.

Per una corretta interpretazione dei dati, è utile consultare le modalità di installazione fornite dal costruttore, oltre che essere a conoscenza della posizione dello strumento e se quindi sono attese inclinazioni con un segno positivo o negativo, a seconda della convenzione utilizzata sul segno, e in aumento o in diminuzione nel tempo. I dati registrati possono essere influenzati, come per altre tipologie di strumenti, da fattori ambientali, come la temperatura (verifiche condotte hanno infatti evidenziato una dipendenza dalla temperatura generalmente discriminabile dal dato reale).

Per le specifiche tecniche degli inclinometri da parete si rimanda al Paragrafo A.1.4.

4.1.5 Misure topografiche tradizionali

Le misure topografiche sono una metodologia che potremmo definire, a differenza delle restanti misure descritte nel presente capitolo, parzialmente da remoto (in quanto l'operatore le esegue da fuori frana ma necessitano della presenza di riflettori all'interno del corpo frana), utilizzata per analizzare gli spostamenti superficiali di un versante.

Lo schema base della rete per misure topografiche vede:

- una o più postazioni, esterna all'area di frana e possibilmente frontale ad essa, dove l'operatore

installa periodicamente la stazione topografica per l'esecuzione del rilievo;

- una serie di target riflettenti (mire ottiche) posizionate su punti stabili e significativi (perché rappresentativi della dinamica della frana e/o ridondanti rispetto ad altre misure presenti, vedi ad esempio Figura 2 Paragrafo 2.2.1) per il monitoraggio dei movimenti superficiali della frana;
- almeno due, preferibilmente tre, mire posizionate esternamente all'area di frana, su aree stabili, con funzione di master di controllo/riferimento per l'esecuzione delle misure (per le specifiche tecniche vedi Paragrafo A.2.1).

Per campagne topografiche manuali l'operatore si reca periodicamente sul punto di misura ed effettua la misurazione preferibilmente utilizzando la stazione totale in modalità automatizzata, così da poter mantenere una elevata precisione di collimazione ed una omogeneità delle misure indipendentemente dal cambio dell'operatore (Figura 6).

Per la facilità di esecuzione, la completezza dell'informazione di movimento acquisita (il dato, rappresentabile su tre assi, è definibile completamente nello spazio 3D) e la possibilità di ampliare facilmente l'area di monitoraggio e/o la densità dei punti di misura sull'area prescelta, è uno dei metodi più comuni per il monitoraggio di movimenti superficiali.

Le misure topografiche scontano però alcune limitazioni ed alcune fonti di errore di cui l'operatore dovrà tener conto.

Per quanto riguarda le limitazioni, oltre all'ovvia intervisibilità fra punto di misura ed area di frana, andrà tenuto conto della portata massima dello strumento ed ancor più delle precisioni che si intendono raggiungere (per precisioni millimetriche è importante non discostarsi eccessivamente da distanze di 1000 - 1500 metri in quanto la precisione strumentale è spesso dell'ordine di 1 mm + 1 ppm).

Per quanto riguarda le fonti di errore che incidono sull'accuratezza della misura si possono considerare i seguenti tre tipi:

- errori legati al punto di esecuzione delle misure:

possiamo far rientrare in questa categoria i problemi di instabilità del pilastrino di misura, il mancato o errato settaggio dei parametri di temperatura, umidità e pressione che permettono per ogni stazione di applicare una specifica correzione, nonché l'eventuale distorsione del raggio di misura (determinato ad es. dall'attraversamento del vetro di cui all'alloggiamento di protezione; vedi Appendice Paragrafo A.2.1) o l'effetto di riflessione (es. se la linea di misura è esattamente ortogonale al vetro della cassetta di protezione);

- errori legati alla linea di vista della misura: consideriamo qui sia il banale ostacolo determinato per esempio dalla vegetazione che le condizioni atmosferiche non omogenee lungo la linea di misura;
- errori legati al target di misura: dovuti sia all'instabilità della mira che alla non ottimale orientazione della stessa rispetto al punto di rilievo.



Figura 6 - Esempio di esecuzione misura topografica a controllo del dissesto Ruinon in comune di Valfurva (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Procedura operativa di esecuzione della misura

Dopo aver realizzato la rete di monitoraggio (per una descrizione delle modalità costruttive vedi Paragrafo A.2.1) l'operatore addetto al rilievo topografico si reca periodicamente sul punto di monitoraggio, dove avrà

precedentemente materializzato un pilastrino stabile e predisposto all'aggancio della stazione totale, procedendo all'installazione della stazione stessa.

Più in generale ed al fine di minimizzare "l'interferenza ambientale" è consigliabile standardizzare una serie di procedimenti come sotto riportati:

- pianificare la campagna di misura in giornate con condizioni di ottima visibilità e stabilità meteorologica;
- pianificare l'orario di attività mantenendo costante il periodo del giorno per l'esecuzione delle misure. Evitare periodi del giorno con insolazione diretta sulle mire ottiche;
- effettuare una perfetta messa in bolla (se presente attivare il compensatore a doppio asse) ed una adeguata acclimatazione dello strumento una volta giunti in loco;
- rilevare le condizioni di temperatura, umidità e pressione atmosferica presenti al momento della misura;
- effettuare il centramento della stazione totale sul master in maniera da garantire l'omogeneità fra le differenti campagne di misura (è consigliabile realizzare una piccola marcatura/segno sulla piastra d'ancoraggio).

Prima di avviare la campagna di misurazione, che andrà effettuata utilizzando la stazione totale in modalità automatizzata, è fondamentale che sia verificata l'orientazione ottimale dei prismi topografici o mire ottiche e la loro visibilità (soprattutto nei periodi primaverili/estivi si manifestano interferenze determinate dalla crescita della vegetazione).

A tal fine gli operatori in frana provvederanno ad orientare le mire ed a rimuovere eventuali rami o cespugli che impediscano la perfetta visibilità dei prismi.

Una volta acquisiti i cicli di misura necessari per un buon risultato (3-5 cicli di misura in dritto e rovesciato²

² I cicli di misura effettuati con la stazione totale in modalità "dritte e rovesce" cioè ruotando su sé stessa di 180° la stazione di acquisizione, sono utilizzate per ottenere una misura più attendibile mediando i dati acquisiti

sono sufficienti) è consigliabile scaricare subito su PC ed elaborare con software dedicati i dati misurati al fine di effettuare un primo confronto con il database storico. Quest'ultima attività, se effettuata a campo, permetterà, in caso di dubbi sulla qualità di quanto acquisito, di correggere eventuali errori e ripetere immediatamente la campagna di misura senza dover ritornare sul punto di misura (a volte l'accesso ai siti di misura è piuttosto complicato ed occupa analogo se non maggior tempo rispetto a quello necessario per il solo rilievo).

Per quanto riguarda la procedura automatizzata e continua delle misure topografiche vale tutto quanto già detto per l'esecuzione periodica, salvo che le misure sono cadenzate a brevi intervalli di tempo (anche una ogni ora) e le stesse si svolgono senza la presenza a campo dell'operatore. I dati così raccolti possono essere inviati per l'analisi in continuo degli stessi.

4.1.6 Misure GPS/GNSS

Il GPS, *Global Positioning System*, è un sistema di posizionamento globale messo a punto dal Dipartimento della Difesa statunitense alla fine degli anni '70, basato sull'utilizzo del sistema satellitare NAVSTAR. Nei decenni successivi si sono aggiunte altre costellazioni, tra le quali la russa GLONASS, l'europea Galileo e la cinese BeiDou. Per questo sempre più diffusamente, oggi, non si parla più di GPS ma di GNSS, *Global Navigation Satellite System*, intendendo con questo acronimo l'insieme dei diversi sistemi di posizionamento satellitari. La trasmissione del segnale satellitare prescinde dalle condizioni meteorologiche e non necessita dell'intervisibilità tra le singole stazioni GPS/GNSS, essa però è disturbata dalla presenza di ostacoli (piante, fogliame, strutture antropiche, ecc.). Pertanto, la postazione di misura richiede la presenza di un orizzonte il più possibile libero. Il monitoraggio di un'area in frana viene condotto utilizzando la metodologia GPS/GNSS in modalità differenziale, ovvero misurando la posizione di una o più stazioni all'interno dell'area in studio (stazioni *rover* o di monitoraggio) rispetto a una o più stazioni di riferimento (*Master* o *Base*) posizionate in aree stabili o relativamente più stabili rispetto a quella in studio e

determinando il vettore (*baseline*) come espressione della differenza di coordinate. L'inquadramento delle stazioni di riferimento in un sistema di coordinate internazionale permette di passare da misure relative a misure assolute, ma questo non è sempre necessario e dipende dalle finalità del monitoraggio. Nel caso di una frana, per la quale l'obiettivo è la definizione degli spostamenti all'interno del corpo di frana relativamente ad un punto considerato stabile, può essere correttamente utilizzato un sistema di riferimento locale. In generale la metodologia di rilievo GPS/GNSS è condotta nelle seguenti modalità:

- statica con acquisizione periodica;
- statica con acquisizione continua;
- statico-rapida;
- cinematica in tempo reale o con post-processamento.

La scelta del metodo dipende dalle finalità, dalla precisione che si vuole raggiungere, dal tempo necessario e dal *budget* a disposizione. Il monitoraggio finalizzato allo studio della cinematica di una frana, o come intervento sulla medesima di tipo non strutturale, deve essere realizzato, preferibilmente, in modalità statica con acquisizione periodica o in continuo. Inoltre, nei settori della frana caratterizzati da una cinematica più rapida, potrebbe essere condotto un monitoraggio in modalità statico-rapida.

Il numero di stazioni di monitoraggio e di riferimento da installare dipende dalle dimensioni e dalle caratteristiche del fenomeno, dalle problematiche logistiche e dal numero di strumenti disponibile. Poiché si tratta di misure differenziali, i punti di monitoraggio devono essere occupati nello stesso intervallo di tempo in cui sono occupate le stazioni di riferimento, al fine di eliminare o ridurre gli errori strumentali e quelli legati alla distanza satellite-ricevitore (errori di *pseudorange*).

La rete di monitoraggio periodica potrà essere, in una seconda fase, integrata da stazioni in acquisizione continua, o trasformata interamente in una rete permanente, in cui le coppie ricevitore/antenna saranno posizionate su un'adeguata monumentazione fissa e dotate di opportuna alimentazione (Figura 7) (vedi

Appendice A.2.2). Anche per questo tipo di rete è necessario progettare, oltre alle stazioni di misura nell'area in frana, almeno una stazione Master di riferimento (se possibile più di una) in un'area stabile e, al fine di ridurre gli errori nel post-processamento, alla minima distanza e con il minimo dislivello possibile rispetto alle stazioni *rover*. Grazie ad una rete in continuo sarà possibile seguire gli andamenti stagionali dei movimenti e le loro relazioni con le piogge, fornire i parametri per la definizione del modello cinematico del versante, stimare le soglie di innesco ed eventualmente valutare l'utilità di configurare la rete con sistemi di *early warning*.

Nel caso di frane veloci (almeno 5 cm/giorno) e che non necessitano di misure con precisioni inferiori al decimetro, o nel caso in cui ci sia la necessità di mappare gli elementi morfologici e i margini del corpo di frana, potrà essere utilizzato il rilievo cinematico in modalità RTK (*Real Time Kinematic*) con una coppia di ricevitori in doppia frequenza (ricevitore *rover* in movimento e ricevitore Base in acquisizione statica) o con un unico ricevitore (*rover*) e un collegamento via modem ad una rete di posizionamento in tempo reale. Il rilievo cinematico può essere condotto prevedendo il post-processamento (PPK-*Post Processing Kinematic*) al fine di ovviare a problemi di eventuali interruzioni della trasmissione delle correzioni in tempo reale e per contenere i costi.



Figura 7 – Monitoraggio in modalità statica con acquisizione in continuo (Frana di Lago, CS). Fonte: archivio GEO-GFI ISPRA

Procedura operativa di esecuzione della misura

Le sessioni di misura in modalità statica possono avere lunghezza da qualche ora fino alla durata giornaliera con frequenza di campionamento compresa tra 5 e 30 s. Per le acquisizioni periodiche sono consigliate sessioni non inferiori alle 6 ore nel caso di movimenti molto lenti o estremamente lenti. Con questa modalità sarà necessario effettuare almeno due sessioni, in giorni diversi, al fine di stimare correttamente l'errore associato alla misura. Per quanto attiene il numero di campagne di misura da effettuare la frequenza dipenderà dalla velocità e pericolosità del fenomeno, dalle problematiche logistiche e, non ultimo, dalle disponibilità economiche. Invece, nel caso di un monitoraggio in continuo, con stazioni GNSS permanenti, le sessioni di misura saranno impostate

con una lunghezza di 24 ore e una frequenza di campionamento di 30 secondi.

Le operazioni di misura attraverso campagne periodiche devono prevedere prima di tutto il centrimento dell'antenna, facendo molta attenzione a posizionarla perfettamente sulla verticale del punto. A tal fine saranno utilizzati, nel caso di centrini materializzati a terra o su strutture sufficientemente ampie, treppiedi e basamenti dotati di piombo ottico che permetteranno il corretto posizionamento dell'antenna e la sua messa in orizzontale (Figura 8). Particolare attenzione deve essere posta nella misura dell'altezza dell'antenna rispetto al caposaldo. Questa misura deve essere effettuata utilizzando un'asta metrica graduata che permetta di determinare la distanza tra la base dell'antenna (anche detto ARP – *Antenna Reference Point*) e il punto di stazione attraverso la misura della distanza inclinata tra il centro del caposaldo e il punto di riferimento sul bordo dell'antenna. Il calcolo della distanza verticale tra ARP e caposaldo potrà essere ottenuto in automatico tramite i software di elaborazione dei dati, oppure calcolata conoscendo tutti gli *offset* dell'antenna utilizzata (in base alle sue caratteristiche geometriche).

I dati registrati a bordo dei ricevitori devono essere scaricati il prima possibile al fine di avere un back up del dato stesso. Successivamente i dati in formato binario (*raw data*) saranno trasformati in formato *RINEX* (file in formato di scambio - vedi Paragrafo 6.1) utilizzando software commerciali o il software, liberamente fornito dall'UNAVCO (*University Navstar Consortium*), contenente un insieme di strumenti per il pre-processamento GPS (*Teqc-Translation, Editing and Quality Checking*³).

La precisione raggiungibile in planimetria con la modalità statica è, nel caso di misure periodiche, di 5-15 mm in funzione della durata delle sessioni e alla lunghezza delle basi, inferiore ai 5 mm per le acquisizioni in continuo. Per quanto attiene alla quota, in entrambe le modalità, sarà circa il doppio.

La modalità statico-rapida, a differenza della statica, richiede un tempo di acquisizione dell'ordine di circa 10 minuti per punto (per basi fino 10 km) e un passo di campionamento tra 5 e 15 s. Questo tipo di rilievo prevede solitamente l'utilizzo di una palina telescopica dotata di livella sferica per il posizionamento dell'antenna sulla verticale del caposaldo. Si tratta di una procedura di misura caratterizzata da una minore accuratezza rispetto alla modalità statica, ma consente una maggiore produttività.

Tutte le metodologie di acquisizione descritte, ad esclusione di quella RTK, richiedono il post-processamento. Questo permette di minimizzare gli errori dovuti a imprecisione delle orbite dei satelliti trasmesse, ai ritardi dovuti all'atmosfera terrestre (troposfera e ionosfera), ad imprecisioni dell'orologio del satellite e del ricevitore e a fenomeni di *multipath*. Nel caso non siano necessarie una precisione ed una accuratezza elevate, è possibile utilizzare dei servizi di elaborazione a pagamento *online*, mentre per misure statiche e statico-rapide, che necessitano di una precisione centimetrica con basi entro i 10 km, è possibile utilizzare software commerciali. Diversamente, nel caso di applicazioni scientifiche e/o con basi lunghe (>10 km), in cui sono richieste precisioni inferiori al cm, sarà necessario utilizzare software scientifici, molto più sofisticati e complessi, a pagamento (Bernese, GIPSY/OASYS) o gratuiti (GAMIT/GLOBK). Per i dati registrati in continuo esistono software commerciali automatici, dotati di moduli di elaborazione e restituzione grafica delle soluzioni, in grado di gestire anche *allarmi* per soglie prestabilite. Inoltre, risulta utile il controllo preliminare della stabilità delle stazioni Master prima del calcolo delle coordinate delle stazioni Rover. Tale controllo può essere effettuato calcolando le *baseline* tra le stazioni Master in occasione di ogni rilievo periodico e verificando che le variazioni osservate ricadono all'interno del *range* dell'errore strumentale. Nel caso di un'unica stazione di riferimento è possibile effettuare un controllo analogo utilizzando uno o più punti stabili appartenenti ad una rete esterna.

³ <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>



Figura 8 – Monitoraggio in modalità statica con l'utilizzo dei treppiedi (in primo piano) e di un dispositivo con bolla su caposaldo autocentrante (in secondo piano). Fonte: archivio GEO-GFI ISPRA

4.1.7 Misure Lidar

I sistemi LiDAR (*Light Detection and Ranging*), e più in generale tutti quelli che sono in grado di acquisire modelli digitali del terreno, possono essere impiegati nel campo del monitoraggio delle frane per una valutazione delle variazioni morfologiche prodotte dall'evoluzione della frana. Attraverso una comparazione di DTM acquisiti in tempi successivi, è infatti possibile riconoscere e misurare l'entità delle deformazioni topografiche occorse nel periodo intercorso tra i vari rilievi disponibili. Questo approccio si dimostra molto efficace per una caratterizzazione multi-temporale dello stato di attività della frana e per l'identificazione degli eventuali domini cinematici. Considerando fenomeni più ampi e complessi, è infatti molto comune la presenza di settori caratterizzati da tassi di movimento più elevati ed altri meno attivi. Uno studio di carattere areale permette il riconoscimento e la delimitazione di questi settori ed una valutazione numerica delle variazioni occorse. Per contro, la frequenza di campionamento che caratterizza questi sistemi (con particolare riferimento al LiDAR aereo) spesso è piuttosto bassa e quindi è necessario considerare questo approccio per lo più non adatto ad un monitoraggio del fenomeno di dissesto in continuo o ad alta frequenza.

Il Lidar, nella sua versione terrestre o aerotrasportata, è uno strumento di rilevamento topografico utilizzato per la generazione di superfici tridimensionali dell'oggetto ripreso. Tali strumenti, in linea generale, emettono impulsi laser e ne ricevono gli echi riflessi generando una nuvola di punti tridimensionale in un sistema di riferimento arbitrario e/o geografico (assoluto). Esistono sostanzialmente due macrocategorie di Lidar: la versione aerotrasportata e la versione terrestre, solitamente chiamato laser scanner terrestre (per le specifiche tecniche vedi Paragrafo A.2.3).

Le ultime generazioni di sistemi Lidar sono detti *full waveform*. Questo significa che il sistema è in grado di acquisire tutta la forma d'onda dell'impulso laser di ritorno e di caratterizzare la nuvola di punti in funzione della lunghezza d'onda di riflessione dell'oggetto colpito. Soprattutto con impulsi emessi da Lidar più potenti, la possibilità di avere più echi di ritorno derivati dal singolo impulso emesso permette di descrivere con maggior dettaglio la superficie (o gli oggetti) indagati. L'esempio classico è un impulso Lidar emesso da un sistema aereo che attraversa della vegetazione ad alto e basso fusto prima di colpire il suolo. In questo caso la nuvola di punti sarà caratterizzata da echi di ritorno appartenenti ai diversi elementi che hanno generato la risposta del segnale lungo il suo percorso. Attraverso opportuni algoritmi, software dedicati sono in grado di procedere ad una classificazione della nuvola di punti ed isolare gli echi provenienti dalle diverse tipologie di riflettori. In questo modo è possibile, per esempio, isolare il dato appartenente alla vegetazione da quello relativo alla superficie del terreno e a agli edifici. Nello studio e monitoraggio delle frane, solitamente l'eco definito "*ground*" e appartenente al terreno rappresenta l'informazione più importante. Purtroppo, talvolta tale dato è pesantemente mascherato dalla presenza di vegetazione o di altri ostacoli che limitano il numero di punti che sono in grado di raggiungere il terreno e generare un eco di ritorno. Una corretta progettazione delle modalità di rilievo, sia esso terrestre o aereo, rappresenta quindi un elemento importante per poter avere la certezza di ottenere la tipologia di informazione voluta. Risulta quindi fondamentale, in funzione del

contesto in cui si trova l'oggetto ripreso, effettuare un'accurata pianificazione delle operazioni di misura.

Nel caso in cui si debba operare con LiDAR aerotrasportato, sarà quindi necessario valutare la risoluzione di progetto in termini di densità di punti al suolo al netto del filtraggio vegetativo (dato *ground*) e la risoluzione a terra del prodotto ortofotografico. Questi due dati consentono di determinare, in funzione dei sensori utilizzati, velocità e quota relativa dell'aeromobile utilizzato.

Per la versione terrestre invece, buona regola è quella di effettuare un sopralluogo preventivo per la determinazione delle postazioni di misura. Sarà infatti necessario identificare tutti gli oggetti/manufatti generanti coni d'ombra sulla scansione, determinando il numero minimo di scansioni necessarie per riprendere nella sua interezza l'oggetto di studio.

Per la versione terrestre è inoltre generalmente fondamentale determinare e misurare la rete di appoggio topografica/geodetica necessaria per la rototraslazione di tutte le scansioni in un sistema di riferimento assoluto.

Processamento LiDAR aerotrasportato: generalmente le operazioni successive all'esecuzione del volo pianificato comprendono vari sub-steps necessari per la produzione di una nuvola di punti correttamente georiferita, classificata e filtrata.

Diversamente dai sistemi a scansione laser terrestri, il sistema LiDAR aerotrasportato genera un primo flusso di dati bidimensionale che diventa tridimensionale successivamente al processamento della traiettoria di volo GNSS con i dati del sistema inerziale a bordo (INS-GPS).

Una volta che la traiettoria di volo GNSS è stata processata, compensata e verificata (previa misura e verifica di tutti gli offset strumentali tra antenna GPS - sensore Lidar - IMU e camera fotogrammetrica), è possibile procedere alla prima estrazione delle strisciate (*flightlines*) non calibrate. Si procede quindi alla determinazione degli angoli di disallineamento esistenti e caratteristici di ogni volo (*boresight calibration*),

giungendo ad una matrice di "calibrazione" da applicare alle *flightlines*.

Infine, vengono applicati algoritmi geometrici e/o basati sulla forma d'onda che consentono di effettuare operazioni di filtraggio e classificazione sulla nuvola di punti. Tali algoritmi consentono di determinare, con margini di affidabilità variabili in funzione dei parametri di classificazione immessi, l'appartenenza della nuvola di punti al piano campagna, vegetazione e/o manufatti antropici.

Processamento LiDAR terrestre: diversamente dal suo omologo aerotrasportato, generalmente i sistemi a scansione laser terrestri sono sistemi nativamente tridimensionali poiché presuppongono il rilevamento da postazione fissa (es. treppiede topografico) in modalità rotazionale della testa laser (tridimensionalità dell'informazione).

Per ridurre la presenza di coni d'ombra, spesso le scansioni sono effettuate da punti di scansione diversi e non sono nativamente correlate le une alle altre (in termini di sistema di riferimento interno). È quindi necessario che i blocchi di scansione riprendano oggetti e/o punti di riallaccio comuni e definiti in un sistema di riferimento esterno e omogeneo (sia esso locale che assoluto), su cui basare il riallaccio delle differenti scansioni.

In fase di *postprocessing* sarà quindi necessario verificare e vincolare tali punti di riallaccio (assegnando ad essi coordinate di riferimento) di ciascun blocco di scansione, verificando la bontà di rototraslazione in un unico progetto tridimensionalmente univoco.

Tutte le operazioni successive (classificazione e filtraggio) normalmente avvengono sulla nuvola di punti riallacciata e calibrata con software di *processing* dedicato.



Figura 9 – Rilevamento con Lidar terrestre della frana di Le Ayas (TO - archivio CNR IRPI)

Per quanto riguarda lo studio dei fenomeni franosi, il Lidar viene impiegato in due differenti modalità: i) come supporto ad altre attività di ricerca e monitoraggio fornendo un modello digitale del terreno ad alta risoluzione; ii) come sistema di monitoraggio delle variazioni morfologiche di una determinata area di studio. Per quanto riguarda il supporto ad altre attività, il Lidar si dimostra spesso molto efficace nella generazione di modelli digitali del terreno a media ed alta risoluzione. Il Lidar terrestre (Figura 9) è maggiormente indicato per rilevamenti di porzioni di territorio non molto estese e ad alta acclività. Un esempio classico di utilizzo di questo sistema è legato allo studio di pareti rocciose finalizzate all'identificazione delle principali discontinuità che possono dare origine a crolli di blocchi o di porzioni più o meno estese dell'ammasso roccioso. Per quanto riguarda il Lidar aerotrasportato, questo apparato è

molto vantaggioso per il rilevamento di aree più vaste (diversi km quadrati) al fine di fornire modelli digitali del terreno da utilizzare come base dati per qualunque attività di studio o monitoraggio dei fenomeni franosi. Quest'ultima tipologia di dato si dimostra molto efficace per lo studio, l'identificazione e la mappatura di frane superficiali in quanto è possibile usare in maniera combinata il modello digitale del terreno nelle sue diverse rappresentazioni e l'ortofoto acquisita contestualmente (Figura 10).

Nel campo del monitoraggio dell'evoluzione di un fenomeno franoso, il Lidar viene solitamente impiegato per acquisire una serie di modelli digitali del terreno della stessa porzione di territorio in tempi diversi. Questi DTM possono essere confrontati per identificare e misurare le eventuali differenze. L'analisi multi-temporale di modelli digitali è funzionale, all'individuazione dell'avvenuto distacco di blocchi rocciosi in parete o alla valutazione delle differenze morfologiche di frane superficiali o a cinematisma complesso. Nel caso in cui si provveda ad effettuare delle analisi multi-temporali è fondamentale verificare prima il corretto allineamento dei modelli digitali del terreno per evitare che possibili offset tra i modelli possano portare a valutazioni errate. Il confronto preventivo dell'allineamento su punti stabili rappresenta un passaggio imprescindibile. Successivamente, è possibile confrontare i modelli digitali identificandone le differenze legate all'evoluzione del fenomeno di dissesto. Comparazioni più semplici sono in grado di restituire le variazioni altimetriche occorse tra i due rilievi mentre attraverso calcoli più complessi è possibile ottenere delle stime delle variazioni occorse anche in termini volumetrici (Giordan *et alii*, 2013). Nel confronto multi-temporale è fondamentale considerare con attenzione i limiti della tecnica, soprattutto la risoluzione e l'accuratezza dei modelli digitali disponibili, in modo da non considerare come spostamento l'incertezza della misura legata all'accuratezza del dato. Il confronto tra modelli può così essere effettuato attraverso un'analisi delle variazioni altimetriche occorse tra i due modelli in modo da identificare i tratti che hanno subito delle variazioni positive da quelli che ne hanno invece fatto registrare di negative. Un'altra possibile

applicazione è l'utilizzo di tecniche di *digital image correlation*; attraverso questa tecnica è possibile identificare delle *feature* omologhe in diverse riprese e misurarne gli spostamenti planimetrici. Questa tecnica si applica sia all'ortofoto che a rappresentazioni ottenute partendo dal modello digitale del terreno. Un ultimo aspetto molto importante è legato alla possibilità di misurare la variazione volumetrica occorsa in una determinata area. Attraverso la comparazione delle

nuvole di punti è possibile individuare le variazioni occorse e misurare il delta volumetrico tra due rilevamenti effettuati in tempi diversi. Tale applicazione è molto efficace se utilizzata, per esempio, per lo studio di fenomeni di crollo in roccia o di processi gravitativi compositi, in cui l'accumulo di frana può evolvere in colata (Baldo *et alii*, 2009).

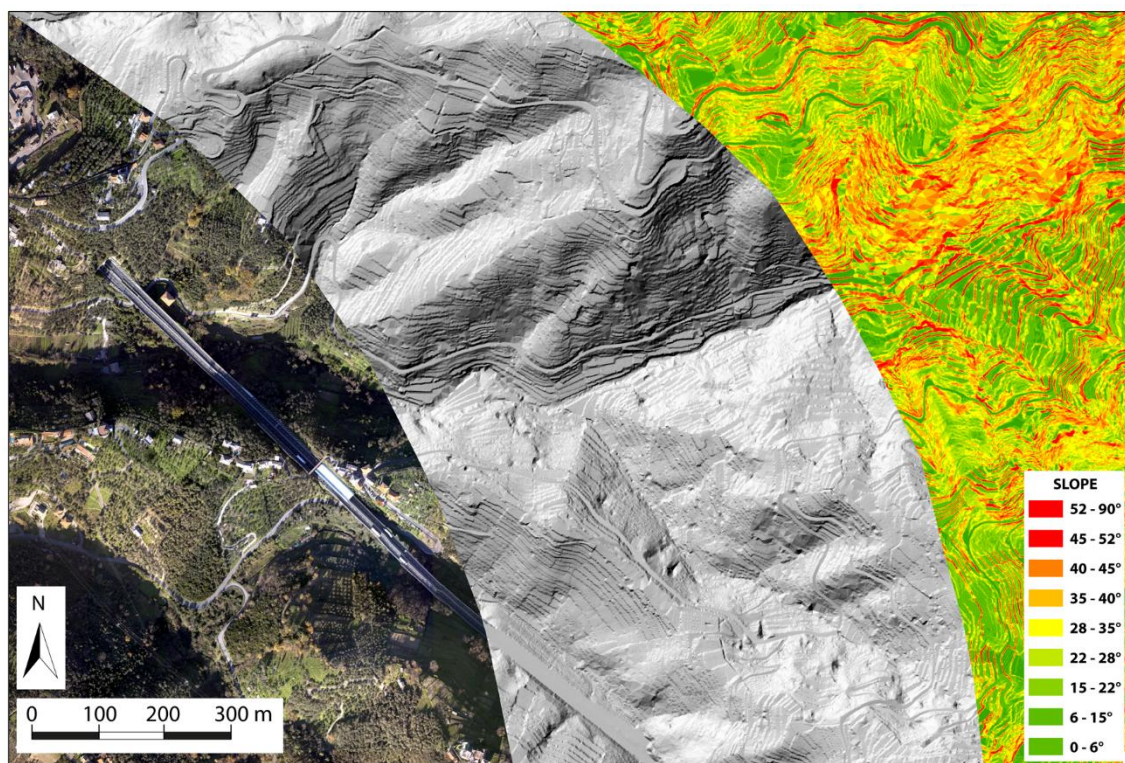


Figura 10 – Esempio di utilizzo combinato di ortofoto e DTM di aree anche densamente vegetate (dato derivato dal rilevamento LiDAR effettuato dal CNR IRPI in seguito agli eventi alluvionali che hanno interessato il territorio ligure nell'autunno 2014). Il DTM può essere rappresentato utilizzando diverse soluzioni come gli shaded relief o le carte delle pendenze per enfatizzare le caratteristiche geomorfologiche del terreno che possono aiutare all'individuazione dei fenomeni franosi. Fonte: archivio CNR IRPI

4.1.8 Misure interferometriche da terra

Stante la netta prevalenza di utilizzo nel monitoraggio delle frane, verranno di seguito indicate come misure con radar da terra esclusivamente quelle effettuate con radar ad apertura sintetica.

In sintesi, questa tecnica consente di misurare lo spostamento di un bersaglio inviando verso di esso due segnali microonde in tempi diversi e registrandone coerentemente l'ampiezza e la fase del segnale retrodiffuso. Se, durante l'intervallo di tempo occorso fra le due misure, si è verificato uno spostamento dello scenario osservato, viene registrato uno sfasamento tra le due onde, dal quale è possibile calcolare l'entità del movimento. Tale misura è riferita alla direzione congiungente sensore bersaglio, definita linea di vista (*Line Of Sight*, LOS). In particolare, vengono prodotte mappe multi-temporali e spazialmente continue delle deformazioni superficiali dell'intero campo visivo dello strumento, con una risoluzione metrica (variabile a seconda del modello, della lunghezza d'onda impiegata, dell'ampiezza dell'apertura sintetica e della distanza dello strumento dal pendio da monitorare) e un'accuratezza fino a sub-millimetrica nella misurazione degli spostamenti.

Per ottenere immagini a microonde ad elevata risoluzione sarebbero necessarie antenne radar di

notevoli dimensioni (apertura reale - *Real Aperture Radar* RAR); in alternativa, il sensore viene fatto scorrere su di un binario rettilineo (Figura 11), realizzando in questo modo un'antenna ad apertura sintetica (*Synthetic Aperture Radar* SAR) di pari lunghezza. Quest'ultimo approccio, originariamente sviluppato per le applicazioni satellitari sfruttando il movimento della piattaforma lungo l'orbita, si è in seguito efficacemente diffuso anche per piattaforme basate a terra.

Il funzionamento prevede l'installazione in posizione frontale al dissesto e l'avvio di scansioni a distanza di pochi minuti.

I dati di monitoraggio vengono rappresentati in forma di mappe di spostamento. Per ogni pixel dell'immagine è quindi possibile estrarre serie temporali di spostamento cumulato e di velocità sulle quali possono essere impostate opportune soglie di allertamento.

Il funzionamento, anche solo per i pochi giorni necessari per una campagna di misura periodica, richiede la presenza di alimentazione elettrica della rete fissa oppure di alimentazione mediante generatore di energia elettrica o di impianto fotovoltaico con batteria di accumulo. Per una buona restituzione dei risultati è inoltre necessario acquisire un DSM aggiornato ed affidabile dell'area oggetto di monitoraggio.



Figura 11 – Monitoraggio con radar interferometrico

Procedura operativa di esecuzione della misura

Come accennato, l'esecuzione della misura con radar da terra è possibile anzitutto installando, in posizione stabile e frontale rispetto all'area di frana, un binario con lunghezza di alcuni metri sul quale alloggiare il sistema radar. Se si intende ripetere la campagna di misura nel corso dei mesi/anni successivi è fondamentale che il binario, oltre alla stabilità, garantisca l'immobilità nel tempo. In ambienti dal clima particolarmente ostile è possibile, anche per campagne periodiche, garantire la protezione della strumentazione mediante apposite strutture chiuse mediante pannelli.

Detta installazione dovrà, prima della realizzazione, essere autorizzata sia dal proprietario del sedime che dagli enti competenti sotto il profilo urbanistico/edilizio ed eventualmente, a seconda del posizionamento,

ambientale/forestale/idraulico. L'orientazione della barra su cui scorrerà il binario dovrà, quanto più possibile, essere perfettamente orizzontale (verificare con apposito livello) ed ortogonale alla direzione di massimo movimento prevista.

La postazione di misura dovrà essere raggiungibile da alimentazione elettrica da rete fissa o dovrà essere predisposto l'alloggiamento del generatore di energia elettrica.

Una volta predisposta la piazzola di misura (posa del binario ed alimentazione elettrica; vedi Figura 12) sarà possibile avviare, per il numero di giorni ritenuto necessario, la campagna di acquisizione delle immagini con il radar da terra ad apertura sintetica (per le specifiche tecniche vedi Paragrafo A.2.4).



Figura 12 – Monitoraggio periodico con radar interferometrico del versante del Mater in Comune di Madesimo (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

4.1.9 Misure interferometriche da satellite

Le tecniche radar interferometriche utilizzano la differenza di fase tra immagini acquisite da sensori Radar a Apertura Sintetica (SAR) e stimano eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione avvenuti tra le acquisizioni. In particolare, le tecniche interferometriche radar satellitari multi-temporali chiamate PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) si basano sull'analisi di lunghe serie di immagini radar acquisite da satellite su una stessa area in tempi diversi, all'interno delle quali vengono identificati bersagli radar, naturali e antropici, che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti superficiali del terreno (Ferretti *et alii*, 2001). Questo approccio è basato sul riconoscimento di bersagli radar puntiformi, costituiti da riflettori permanenti chiamati PS (acronimo di *Persistent Scatterers*), che mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini satellitari al variare dell'acquisizione e delle condizioni climatiche e atmosferiche, preservando l'informazione di fase nel tempo. Utilizzando questi punti, si riducono gli effetti di decorrelazione temporale (causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche dei bersagli radar tra i diversi giorni di acquisizione satellitare), ed effetti di decorrelazione geometrica (causati dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal satellite durante l'acquisizione delle immagini), ed è possibile individuare tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminare i contributi spuri legati a riflettività, rumore, disturbi atmosferici, isolare il contributo che descrive la variazione di cammino dell'onda elettromagnetica e, quindi, derivare i movimenti subiti dal bersaglio radar nell'arco temporale tra acquisizioni radar successive. I PS sono elementi già presenti al suolo e a riflettività costante, tipicamente strutture di origine antropica (ad esempio edifici, ponti, ferrovie, elementi metallici) o riflettori naturali stabili (suoli nudi o rocce esposte), per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade per la vegetazione che è facilmente influenzabile da vento e umidità e che muta di continuo in base alla stagione. Dall'elaborazione delle immagini radar, per ogni singolo

PS viene ricavata la posizione geografica opportunamente georiferita, la velocità media annua (espressa in mm/anno e stimata con accuratezza millimetrica) e la serie temporale di spostamento per tutto il periodo di acquisizione del satellite. L'insieme dei PS costituisce pertanto una sorta di "rete geodetica naturale" di bersagli radar già presenti sul suolo e a riflettività costante, utilizzati come capisaldi di riferimento per la misura degli spostamenti millimetrici del suolo, con una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata, fino a diverse centinaia di PS/km² in aree urbanizzate.

Nelle aree caratterizzate da assenza o scarsità di riflettori naturali sufficientemente coerenti già esistenti al suolo è possibile ricorrere all'installazione di riflettori artificiali (*Corner Reflector* - CR). Un riflettore artificiale è un manufatto metallico progettato e installato opportunamente con forma, dimensione e orientazione tali da fornire una risposta radar ben visibile e coerente, comportandosi come un riflettore naturale (Figura 13). I CR possono essere pertanto utilizzati per incrementare i punti di misura o per il monitoraggio di aree di specifico interesse.



Figura 13 – Riflettore artificiale installato. Fonte: archivio UniFI

Tutte le misure sono calcolate lungo la congiungente sensore-bersaglio (linea di vista del sensore, LOS - *Line*

Of Sight), che è inclinata rispetto alla verticale di un certo angolo θ (angolo di incidenza o angolo di vista) che varia a seconda del satellite utilizzato. Inoltre, tutte le misure sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra (*reference points*), di coordinate note e supposti fermi (su basi geologiche oppure indicati come tali, ad esempio, da misure GPS o di livellazione ottica). Infine, tutte le informazioni di movimento fornite dai PS sono relative e non assolute, cioè sono riferite temporalmente alla data di acquisizione dell'immagine *master*, usata come misura "zero" (es. prima acquisizione disponibile nell'arco temporale analizzato).

I satelliti (vedi Paragrafo A.2.5) percorrono orbite quasi-polari lungo i meridiani e illuminano lateralmente verso destra la scena osservata. In particolare, vengono percorse orbite discendenti (passaggi da Nord a Sud, che riprendono aree approssimativamente da Est verso Ovest) e ascendenti (passaggi da Sud a Nord, che riprendono aree approssimativamente da Ovest verso Est). Combinando queste traiettorie del satellite con il moto di rotazione della Terra, tutta la superficie terrestre viene via via osservata da due punti di vista differenti.

I punti di misura PS sono classificati secondo la velocità media annua di movimento (espressa in mm/anno), con la classe di stabilità definita dell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica, ovvero sulla base della deviazione standard dell'insieme di dati utilizzati. Le velocità con segno negativo, corrispondono a movimenti in allontanamento dal satellite lungo la linea di vista sensore-bersaglio, mentre quelle con segno positivo a movimenti in avvicinamento.

Limiti e vantaggi

I principali punti di forza delle tecniche radar satellitari interferometriche rispetto ai tradizionali sistemi di monitoraggio delle deformazioni in situ possono essere così riassunti:

- vasta disponibilità di dati radar su molte aree, che permette pertanto di condurre delle analisi storiche (*back analysis*), ovvero delle indagini a ritroso nel passato, di fondamentale importanza per comprendere l'evoluzione di fenomeni di dissesto

già avvenuti, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio basate a terra;

- possibilità di ricostruire la componente verticale e orizzontale (sul piano E-O e verticale) delle deformazioni, quando si dispone di due geometrie di acquisizione e di una densità di PS sufficientemente elevata;
- possibilità di ottenere stime accurate della velocità di spostamento, con accuratezza millimetrica su una rete di misurazione molto densa, soprattutto in aree urbanizzate, senza la necessità di contatto diretto con la zona di indagine e senza dover installare strumentazione invasiva e/o apparecchiature a terra.

È importante sottolineare anche le limitazioni delle tecniche radar satellitari multi-interferometriche, dovute alla fisica del segnale radar e al tipo di elaborazione. Di seguito vengono elencate le principali:

- assenza o scarsità di misure in aree boscate, agricole, con copertura nevosa perenne o in aree umide: questa limitazione è dovuta al metodo con cui i punti PS vengono scelti. Infatti, il requisito necessario e imprescindibile per la definizione di un PS è che la superficie a cui esso si riferisce non cambi nel tempo;
- capacità di rilevare deformazioni lungo la direzione della LOS: le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò una componente di deformazione del vettore reale dello spostamento; a seconda dell'orientazione dei versanti, gli spostamenti potranno essere prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi. Il valore di velocità rilevato sarà tanto più vicino a quello reale quanto più il movimento del bersaglio si sposta lungo la direzione coincidente con la LOS. Nel caso di moto ortogonale alla linea di vista del satellite lo spostamento misurato è nullo;
- mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S: data la geometria di acquisizione e la traiettoria orbitale dei satelliti è possibile apprezzare solo deformazioni verticali e allineate

circa in direzione E-W;

- capacità di stimare deformazioni entro un determinato campo di velocità rilevabile: le tecniche radar satellitari multi-temporali interferometriche sono in grado di rilevare deformazioni all'interno di un preciso campo di velocità (velocità della componente lungo LOS);
 - limite superiore: una delle leggi base dell'interferometria definisce lo spostamento massimo misurabile tra due acquisizioni come pari a $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda del segnale radar. Ad esempio, per il satellite Sentinel-1 questo limite è uguale a 1,4 cm tra due acquisizioni. La velocità massima misurabile è invece pari a 85 cm/anno; velocità maggiori possono essere comunque misurate, ma richiedono ulteriori elaborazioni e interpretazioni per risolvere i problemi legati all'ambiguità di fase;
 - limite inferiore: bersagli con velocità lungo LOS entro l'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica (e.g. ± 2 mm/anno, *range* variabile in base alla deviazione standard delle velocità della popolazione di bersagli radar).

Applicazioni

Le tecniche interferometriche satellitari rappresentano un efficace strumento per individuare e misurare movimenti sulla superficie terrestre grazie alla loro precisione e al basso rapporto costi-benefici. Queste tecniche infatti offrono un utile supporto, economico e non invasivo, nella identificazione dei movimenti lenti del terreno, fornendo velocità di deformazione facilmente aggiornabili, su vaste aree, con grande accuratezza (fino a 1 mm), alta risoluzione spaziale, buona copertura temporale (dal 1992 a oggi) e con possibile frequenza di aggiornamento di 6 giorni grazie alla costellazione Sentinel-1.

Le analisi tramite tecniche interferometriche radar satellitari multi-temporali PSI, integrate opportunamente con altri dati geotematici e ausiliari, sono state utilizzate

con successo nell'ultimo decennio per la mappatura, la caratterizzazione e il monitoraggio di frane, sia a scala regionale che locale.

L'interpretazione dei prodotti interferometrici deve avvenire attraverso il confronto e l'integrazione con dati geologici, idrogeologici e geomorfologici e quindi grazie alla conoscenza del territorio in cui si opera. Nell'interpretazione dei dati PS occorre tenere presente una serie di elementi e limitazioni, legati principalmente alle caratteristiche intrinseche della tecnica e alla natura del dato. Le tecniche interferometriche da satellite possono essere utilizzate come supporto in parallelo a tecniche di monitoraggio tradizionali basate a terra e a validazioni e verifiche in situ. Per la definizione e caratterizzazione delle deformazioni registrate, pertanto, non è possibile fare riferimento esclusivamente al dato PS in quanto esso rappresenta solo uno tra gli elementi che, unitamente agli altri strumenti di monitoraggio a terra e ai più tradizionali rilievi di terreno, fotointerpretazione, monitoraggio, dati storici, ecc., concorrono alla loro caratterizzazione.

Il processo interpretativo prende il nome di "radar interpretazione", cruciale per poter analizzare criticamente il dato interferometrico senza incorrere in valutazioni erranee. Una corretta radar interpretazione passa attraverso il confronto tra i dati radar satellitari e i dati ancillari disponibili, quali ad esempio ortofoto multi-temporali che permettono di valutare i cambiamenti nel tempo in una determinata zona, prodotti derivati da modelli digitali del terreno (DEM), inventari frane, misure di spostamento *in situ* (e.g. misure inclinometriche, clinometriche, fessurimetriche, GPS ecc.), dati geologici, geomorfologici, idrogeologici, geotecnici a scala locale.

Considerando la precisione delle misure, la copertura spaziale e temporale e i più recenti sviluppi delle tecniche di interferometria radar satellitare, i campi di applicazione primari dei dati interferometrici per lo studio delle frane sono (Figura 14):

- Monitoraggio a scala locale di una singola frana: è possibile monitorare la velocità media annua delle deformazioni del terreno, ricostruire l'evoluzione temporale degli spostamenti della frana nel periodo

- di osservazione satellitare attraverso la consultazione delle serie storiche dei PS al fine di poter valutare la presenza di possibili precursori, e infine verificare la presenza di altre instabilità nell'area di interesse (Zhao *et alii*, 2018; Herrera *et alii*, 2013; Tofani *et alii*, 2013; Notti *et alii*, 2011).
- Mappatura e aggiornamento di inventari frane: è possibile effettuare mappature speditive dei fenomeni franosi tramite procedure di radar interpretazione e fotointerpretazione integrando tutti i dati ancillari disponibili (ortofoto, supporti topografici, carte geologiche ecc.). In tal modo si perviene alla perimetrazione (conferma o modifica – in genere ampliamento - dell'estensione areale di frane mappate in precedenti inventari e/o individuazione di nuovi fenomeni) e alla valutazione dello stato di attività dei dissesti tramite il confronto di dati multi-temporali e l'uso di matrici di contingenza (Oliveira *et alii*, 2015; Cigna *et alii*, 2013; Bianchini *et alii*, 2012).
 - Stima di cedimenti differenziali di strutture in aree in frana: è possibile eseguire valutazioni speditive della deformazione differenziale a carico degli edifici ubicati in aree in frana, ricostruendo entità e direzione di cedimento differenziale delle strutture tramite il calcolo dei parametri di cedimento verticale massimo (δv) e distorsione angolare (β) stimati con i dati radar satellitari interferometrici (Mateos *et alii*, 2017; Peduto *et alii*, 2017; Bianchini *et alii*, 2014).
 - Supporto per mappe di suscettibilità e stima dell'intensità delle frane: i dati PS possono essere utilizzati per migliorare l'accuratezza delle mappe di suscettibilità da frana, riducendo il numero di falsi negativi (e.g. terreni instabili, ma classificati come stabili) (Ciampalini *et alii*, 2016; Piacentini *et alii*, 2015) o per stimare l'intensità dei fenomeni franosi a cinematica lenta, attraverso matrici di contingenza basate sulle classi di suscettibilità e sulle velocità di deformazione del suolo dei PS (Bianchini *et alii*, 2012; 2017).
 - Analisi di hotspot mapping su vasta scala: il dato interferometrico può essere elaborato attraverso analisi statistiche volte all'individuazione di cluster di punti PS che per caratteristiche fisiche e spaziali possono rappresentare indizi di geo-processi. Infatti, grazie all'elevata mole di informazioni fornite a scala regionale, i dati radar satellitari interferometrici possono essere usati per procedure di individuazione su vasta scala delle aree con i più elevati tassi di deformazione del terreno, mediante l'applicazione di tecniche semi-automatiche di clusterizzazione e mappature del tipo *hotspot analysis* (Solari *et alii*, 2019; Lu *et alii*, 2012; Bianchini *et alii*, 2012; Meisina *et alii*, 2008).
 - Monitoraggio satellitare in continuo e individuazione di anomalie di movimento: grazie alla disponibilità di misure frequenti e regolari (ad es. con Sentinel-1) e all'aumento delle capacità computazionali e di elaborazione, è oggi possibile effettuare un monitoraggio radar satellitare continuo e sistematico delle deformazioni del terreno a scala regionale. L'elaborazione sistematica delle immagini radar ad ogni nuova acquisizione satellitare permette l'aggiornamento in continuo dello scenario deformativo in atto. Inoltre, l'uso di algoritmi di analisi semi-automatica delle serie temporali dei dati PS aggiornate ad alta frequenza (ad es. ogni 12 giorni seguendo il tempo di rivisita di Sentinel-1) consente l'individuazione di punti di misura che mostrano "anomalie" di movimento (accelerazioni, variazioni repentine della velocità, cambi di trend rispetto all'andamento temporale pregresso), utilizzabili come segnalazioni di precursori di criticità geomorfologiche in atto (Raspini *et alii*, 2018; Bianchini *et alii*, 2018).

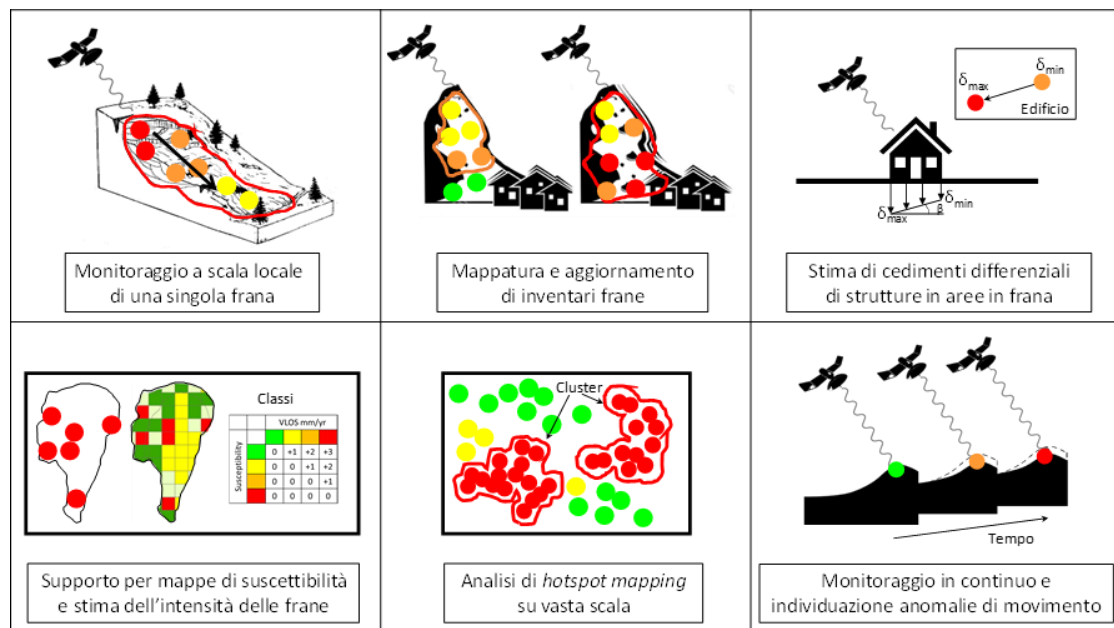


Figura 14 – Esempi di applicazioni dell'uso di dati radar satellitari interferometrici per studio e monitoraggio di frane

4.1.10 Misure con radar doppler

Alcune tipologie di dissesto idrogeologico a cinematica rapida — quali la caduta massi e le colate detritiche — sono molto spesso prive di precursori significativi. Ne consegue che le strategie di mitigazione del rischio non sono di norma incentrate sul monitoraggio preventivo di parametri misurabili prima dell'evento, ma bensì sulla progettazione di opere strutturali di difesa attiva o passiva. Sulla base di tale premessa sono stati recentemente sviluppati dei sofisticati sistemi radar che, sfruttando la tecnica “Doppler” (vedi Paragrafo A.2.6), sono invece atti ad esercitare un'effettiva attività di monitoraggio in tempo reale, vale a dire ad emettere una segnalazione di allarme durante l'accadimento dell'evento stesso.

In sintesi, il principio di funzionamento consiste nell'emissione di un segnale elettromagnetico nel dominio delle microonde da parte di un sensore radar a onda continua modulato in frequenza. Il segnale di ritorno viene captato da più antenne riceventi e

analizzato al fine di determinare l'eventuale presenza di corpi in rapido movimento lungo il versante — movimenti di entità sufficiente a creare appunto uno scostamento nella frequenza del segnale, o effetto doppler. Gli avvisi di rilevamento possono essere personalizzati secondo opportuni criteri spaziali e vengono filtrati mediante specifici algoritmi al fine di discriminare quelli reali da quelli indesiderati (come quelli dovuti a disturbi atmosferici o all'oscillazione delle chiome degli alberi). Il sistema è quindi in grado di misurare in tempo reale la velocità del fronte franoso e di geolocalizzarne con precisione la traiettoria di propagazione. In termini generali, è possibile rilevare la presenza di corpi aventi volume superiore a circa un metro cubo che si muovono a velocità superiori a qualche metro al secondo a una distanza inferiore a circa 2 km dal sensore. È inoltre possibile tracciare più eventi simultaneamente, posto che questi siano separati da una distanza reciproca maggiore di almeno 10 m. L'intervallo temporale che intercorre fra istante di

innesco dell'evento e risposta dello strumento equivale a pochi secondi.

L'unità di controllo associata al sensore radar è preposta all'invio delle notifiche di allarme (SMS ed email) e può essere collegata a dispositivi di sicurezza quali semafori, sirene, o sbarre a chiusura automatica (Figura 15). A titolo esemplificativo, questa soluzione può risultare particolarmente conveniente nel caso di tratti di strada che si snodano alla base di pareti rocciose o versanti detritici interessati da diffusi e ripetuti fenomeni di instabilità (Figura 16). L'immediata interdizione al traffico in seguito all'attivazione di un allarme fa sì che i veicoli cessino di transitare attraverso la potenziale area di propagazione fintantoché sussiste la presenza di un corpo in rapido movimento lungo il versante; l'unità di controllo può quindi essere configurata in maniera tale da disattivare l'allarme autonomamente al termine dell'evento, nel caso in cui esso non si propaghi fino a coinvolgere la strada. L'interfacciamento fra radar e dispositivi di sicurezza può avvenire mediante trasmissione radio o collegamento cablato in fibra ottica.

I radar doppler condividono le caratteristiche dei radar interferometrici basati a terra per quanto riguarda l'operatività in qualsiasi condizione atmosferica e di visibilità, la capacità di riferire le misure soltanto alla linea di vista sensore-bersaglio e la necessità di un'alimentazione elettrica da rete fissa o generatore. Sono contraddistinti dall'assenza di componenti mobili e da una più agevole portabilità; possono infatti essere montati su un singolo palo metallico infisso nel terreno, su muretti in cemento o su analoghe strutture stabili. Allo scopo di facilitare la tempestiva valutazione da remoto delle segnalazioni di allarme, le misure con radar doppler vengono comunemente integrate con una telecamera ad alta risoluzione deputata alla ripresa in streaming dell'area monitorata. Le informazioni relative agli eventi osservati sono caricate su una piattaforma cloud dedicata; con il progressivo popolamento del database nel tempo, esse possono costituire un fondamento oggettivo su cui realizzare analisi statistiche di zonazione del rischio e raffinare modelli previsionali di propagazione.



Figura 15 – Schema concettuale per il monitoraggio in tempo reale di fenomeni di dissesto idrogeologico a cinemática rapida mediante misure con radar doppler. Fonte: UniFI

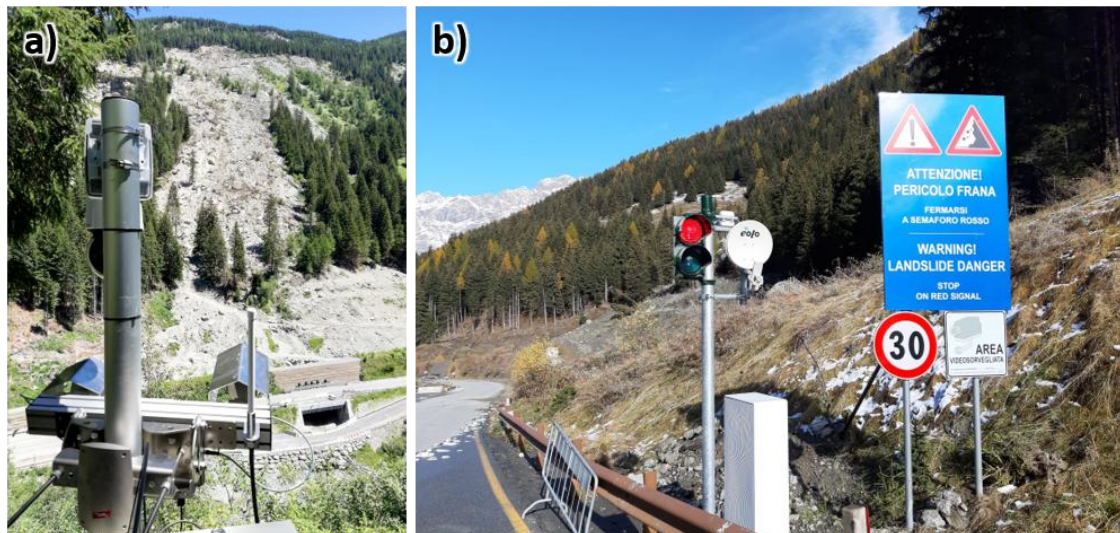


Figura 16 – Radar doppler (a) e relativo impianto semaforico (b) installati in corrispondenza della frana del Ruinon (Comune di Valfurva, SO) allo scopo di mitigare il rischio da caduta massi e colata detritica per i veicoli in transito lungo il tratto di strada sottostante. Fonte: archivio UNIFI

4.1.11 Misure per mezzo di droni – UAV

I Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto (SAPR), anche chiamati *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) o, più comunemente, droni, sono dei sistemi in grado di volare senza un pilota a bordo ma controllati da remoto e di trasportare un carico (*payload*) che può essere composto da strumentazione dedicata anche allo studio ed al monitoraggio delle frane (Giordan *et alii*, 2018). Questi sistemi hanno avuto uno sviluppo esplosivo negli ultimi anni e rappresentano oggi un sistema interessante per svolgere rilevamenti aerei a bassa quota su aree limitate con sistemi a basso costo. Dal punto di vista teorico, i SAPR possono essere suddivisi in base al peso al decollo, alla forma della struttura o al fatto che siano più leggeri (es. palloni sonda) o meno dell'aria.

La diffusione di questi sistemi deriva dalla loro notevole versatilità ma anche dalla disponibilità di un approccio molto funzionale al trattamento di sequenze di immagini bidimensionali chiamato *Structure from Motion* (SfM). La SfM è una tecnica sviluppata nel campo del

computer graphic che permette la ricostruzione di modelli digitali tridimensionali partendo da una serie di fotografie dell'area di studio acquisite da punti diversi e caratterizzata da una elevata percentuale di sovrapposizione. Semplificando, l'algoritmo è in grado di identificare punti omologhi presenti nelle diverse immagini, ricostruire l'orientazione dei punti di presa delle immagini e ricreare una nuvola di punti tridimensionale basata su punti omologhi. Successivamente, i software commerciali che adottano questa tecnica sono in grado di ricreare una nuvola di punti molto più densa e da questa una serie di prodotti derivati, come ortofoto o immagini solide. La SfM ha di fatto semplificato molto il processamento di fotosequenze di immagini, amplificando molto le potenzialità dei droni equipaggiati con sistemi di ripresa ottici. Sfruttando questa possibilità, i droni attualmente in commercio sono sempre più spesso in grado di gestire autonomamente dei piani di volo che sono funzionali ad acquisire delle sequenze di immagini utilizzabili dalla SfM per ottenere un DSM (*Digital Surface Model*) dell'area da rilevare ed una serie di

ulteriori prodotti derivati. La pianificazione del volo è un passaggio molto importante per la riuscita dell'operazione. A prescindere che il volo venga operato autonomamente dal drone o gestito manualmente dal pilota, ci sono una serie di elementi che devono essere accuratamente considerati in fase di pianificazione (Giordan *et alii*, 2020). Ovviamente ci sono una serie di aspetti legati alla sicurezza del volo che, per brevità, non possono essere trattati in questa guida ma che sono un elemento centrale nella fase di pianificazione. La normativa ENAC di riferimento per la gestione dei droni è in continua evoluzione e si segnala in questa sede che l'uso di questi sistemi è in gran parte relegato a persone che hanno ottenuto patentini riconosciuti. Per quanto riguarda gli aspetti legati all'acquisizione delle immagini, i principali parametri da tenere in considerazione sono il grado di ricoprimento tra i fotogrammi successivi della stessa strisciata e il ricoprimento tra le strisciate. Come anticipato, per poter usare efficacemente la SfM il grado di ricoprimento deve essere molto elevato; i valori di riferimento comunemente consigliati prevedono un ricoprimento del 60–85% in avanzamento e di almeno il 60% tra strisciate adiacenti (*forward and side-overlap*). Un altro parametro molto importante è la risoluzione a terra (GSD – *ground sampling distance*): questo parametro è funzione della risoluzione della camera e dell'altezza/distanza relativa di volo rispetto all'oggetto ripreso. Essendo nota la risoluzione della camera, nella pianificazione del volo assume molta importanza la quota relativa di volo. Un'altra impostazione che deve essere tenuta in considerazione è l'orientazione della camera. I sistemi ad ala fissa solitamente hanno una camera con un asse di presa verticale (nadirale), mentre i multi-rotori possono modificare l'orientamento della camera ed acquisire delle strisciate oblique. L'orientazione obliqua della camera risulta essere particolarmente efficace per l'acquisizione di elementi sub-verticali come, per esempio, le pareti rocciose. Un ulteriore elemento che va considerato con molta attenzione nella fase di pianificazione del volo è l'uso dei *ground control points* (GCPs). Il passaggio da un sistema di coordinate locali ad uno assoluto è legato all'utilizzo di informazioni della posizione dei centri di

presa delle immagini e/o di punti a terra chiaramente identificabili di cui si conoscono le coordinate in un sistema di riferimento assoluto. I droni più recenti sono in grado di associare ad ogni immagine i dati di posizionamento acquisiti dal ricevitore GNSS a bordo e quindi di fornire una stima metrica dei punti di presa. Per aumentare l'accuratezza del posizionamento, vengono disposti a terra dei *target* facilmente riconoscibili (la cui dimensione deve essere commisurata con il GSD del piano di volo) di cui vengono acquisite le coordinate con sistemi di rilevamento topografici (spesso ricevitori GNSS RTK). In questo modo, l'accuratezza del posizionamento assoluto può essere notevolmente migliorata. Diversi droni di ultima generazione hanno dei sensori GNSS RTK a bordo che permettono un notevole miglioramento dell'accuratezza della misura del centro di presa in tempo reale, rendendo generalmente superfluo l'appoggio a terra su target di coordinate assolute note. È comunque buona norma prevedere target di controllo a terra al fine di valutare la bontà del posizionamento assoluto del prodotto di elaborazione (nuvola di punti e/o ortofotomosaico).

La SfM permette la ricostruzione di una prima nuvola di punti, solitamente piuttosto rada, che corrisponde ai punti omologhi riconosciuti dal software nelle diverse immagini. Questa prima nuvola di punti permette di considerare la distribuzione reciproca delle immagini nello spazio e di effettuare una prima valutazione della ricostruzione geometrica dell'area rilevata. Una volta effettuata questa prima ricostruzione, i software sono in grado di procedere ad un infittimento della nuvola di punti e poi a creare una immagine solida. Si fa presente che il risultato finale del processamento dei dati corrisponde ad un modello digitale della superficie. Diversi software offrono dei *tool* di elaborazione dei dati finalizzati ad effettuare dei filtri per poter classificare la nuvola di punti in diverse classi. Il filtraggio viene fatto su basi geometriche e sul dato RGB della nuvola di punti. Tipicamente, le classi più frequenti sono: *ground*, *buildings* e *vegetation*. Una limitazione che va attentamente considerata nell'uso di sequenze di immagini da UAV è la presenza di vegetazione. Utilizzando una sequenza di immagini si ottiene un

modello digitale della superficie (DSM) e, in aree densamente vegetate, questi modelli possono non avere dati relativi al terreno ma solo alla copertura vegetale. Un filtraggio porta quindi all'eliminazione del dato legato alla vegetazione ma può non restituire il dato *ground*. In questo caso, la soluzione più complessa ma più efficace può essere quella di ricorrere ad un sistema di rilevamento attivo come un drone equipaggiato con un sensore Lidar. In questo modo si uniscono i vantaggi del Lidar a quelli del drone.

I droni rappresentano un'ulteriore soluzione operativa che permette l'acquisizione di modelli digitali del terreno ad altissima risoluzione in poco tempo e con costi

solitamente molto ridotti. La possibilità di acquisire immagini da diversi punti di vista riduce le criticità legate ai coni d'ombra tipiche, per esempio, dei laser scanner terrestri e permette rilevamenti molto dettagliati anche di pareti rocciose caratterizzate da geometrie molto articolate. Per contro, la necessità di dover utilizzare dei GCPs deve essere attentamente valutata soprattutto se l'area di studio presenta dei rischi per gli operatori. Sulle pareti verticali, l'acquisizione dei GCPs può essere molto complessa ed onerosa.

Per le specifiche tecniche dei droni si rimanda al Paragrafo A.2.7.

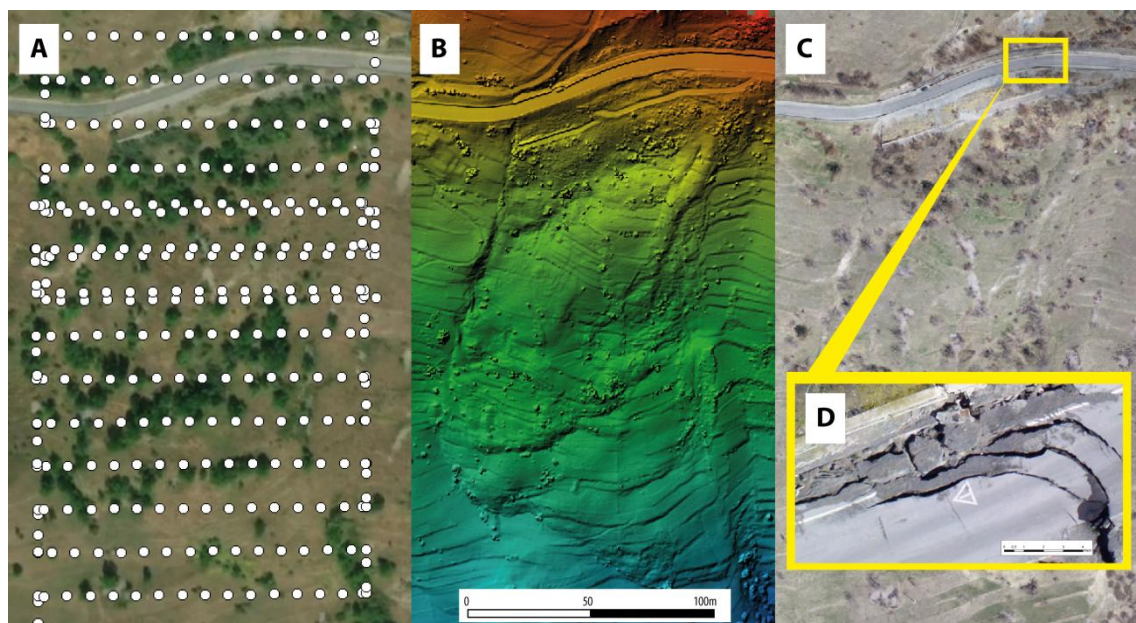


Figura 17 – Esempio di ripresa con drone di una frana che ha interessato la SP 23 (comune di Sestriere – TO); nell'immagine sono visibili: A) il versante oggetto del rilievo con i centroidi di tutte le foto scattate da drone; B) il DSM ottenuto tramite SfM; C) l'ortofoto; D) un dettaglio dell'ortofoto che dimostra l'elevata risoluzione del rilievo effettuato (4cm/pixel)

4.1.12 Misure per mezzo di fotomonitoraggio

L'attuale patrimonio fotografico, derivante dall'ormai diffusissimo utilizzo di apparati fotografici di largo consumo, racchiude enormi potenzialità per l'analisi, il monitoraggio e il controllo dei fenomeni franosi.

Le tecniche di fotomonitoraggio vengono utilizzate per l'identificazione e la misura dei cambiamenti e degli spostamenti superficiali del terreno e delle strutture, mediante il confronto di immagini acquisite in tempi diversi da piattaforme terrestri, aeree e satellitari. Tali tecniche si basano su algoritmi avanzati di elaborazione di immagini digitali implementati su software presenti in commercio.

Con il termine "fotomonitoraggio" si intende quindi l'esecuzione di analisi di immagini ottiche, multispettrali, iperspettrali e radar in intensità, in grado di fornire informazioni qualitative e quantitative relative all'evoluzione temporale dei processi che inducono cambiamenti e/o spostamenti del terreno e/o delle strutture.

Le analisi possono essere eseguite su dataset di immagini acquisite dalla stessa tipologia di piattaforma, su una stessa area di interesse, in tempi diversi, e possono essere condotte mediante specifici algoritmi che consentano di valutare l'eventuale variazione delle caratteristiche radiometriche (*Change Detection*) e/o lo spostamento verificatosi nell'intervallo di tempo coperto dall'acquisizione delle immagini (*Digital Image Correlation*).

La precisione delle analisi può raggiungere 1/10 di pixel (*sub-pixel resolution*) o maggiore in condizioni ottimali. A titolo puramente esemplificativo, considerando un sistema installato a terra (*ground-based*), si può affermare che utilizzando camere fotografiche commerciali (es. DSLR da 24MP) a distanze di centinaia di metri (es. 300 m) è possibile raggiungere una dimensione del pixel a terra di ordine centimetrico (GSD, *Ground Sampling Distance*), ovvero la risoluzione spaziale, permettendo di eseguire analisi fino a precisione millimetrica. Naturalmente, la *Ground Sampling Distance* dipende dalle caratteristiche geometriche della fotocamera (dimensione sensore e

distanza focale impiegata) oltre che dalla distanza tra sensore fotografico e scenario indagato (altezza di volo nel caso di piattaforma aerea). Dunque, in funzione di queste variabili, è possibile individuare le caratteristiche del sistema (es. tipologia di sensore e ottica, ubicazione del sistema) tali da raggiungere le condizioni ottimali richieste per effettuare il monitoraggio ed il controllo del fenomeno franoso oggetto di indagine.

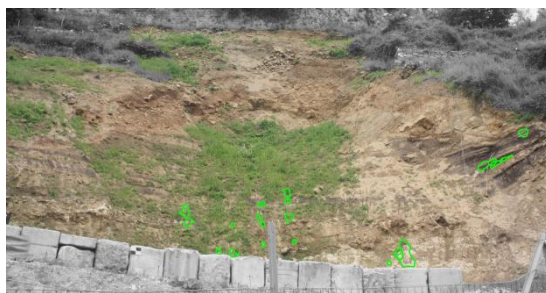


Figura 18 – Esempio di individuazione di aree interessate da cambiamenti (poligoni in verde) mediante l'analisi di immagini fotografiche con algoritmi di *Change Detection* su versante in frana

Gli algoritmi ad oggi disponibili consentono di eseguire sia analisi tra due immagini che tra più immagini consecutive (analisi *multi-master*), al fine di ottenere vettori spostamento e serie temporali di spostamento per i pixel caratterizzati da un buon rapporto segnale/rumore.

Utilizzando acquisizioni e trasferimento dati in continuo (con intervalli di pochi minuti) ed elaborando i dati acquisiti in automatico è possibile condurre, mediante l'utilizzo di specifici software, delle analisi in tempo reale con risultati disponibili in tempi brevi (es. dopo pochi minuti dall'acquisizione delle immagini stesse). In aggiunta alle analisi supervisionate da parte di tecnici specializzati, è possibile implementare tecniche di fotomonitoraggio combinate a sistemi efficienti di acquisizione e trasferimento dati, così da poter supportare in modalità automatica funzionalità e procedure di allertamento (*Early Warning*).



Figura 19 – Esempio di individuazione di aree interessate da spostamenti (freccie e pixel colorati) mediante l'analisi di immagini fotografiche con algoritmi di *Digital Image Correlation* su versante in frana

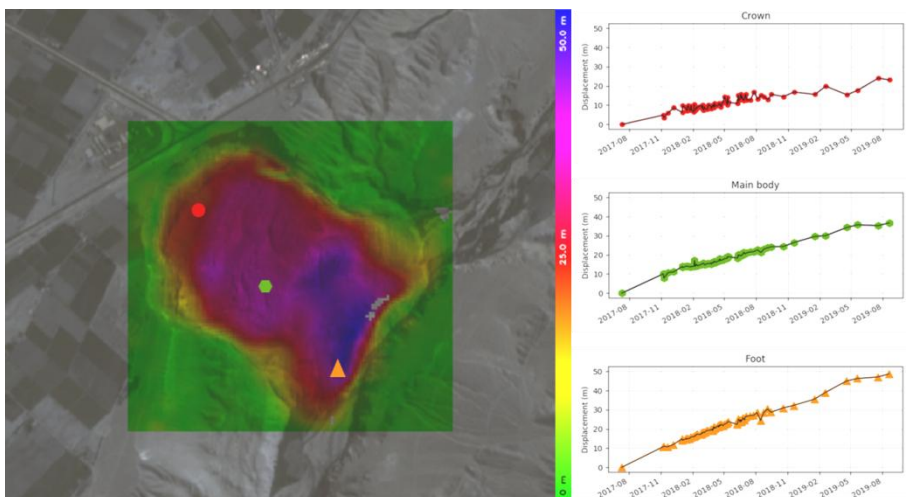


Figura 20 – Esempio di analisi di fotomonitoraggio multi-immagine (*multi-master*) eseguita tramite l'utilizzo di immagini ottiche satellitari. Sulla destra le serie temporali di spostamento per i pixel selezionati

4.1.13 Misure per colate rapide

Le misure per le colate rapide (colate di detrito e di fango) possono essere distinte in misure post-evento in aree non attrezzate e misure in aree dotate di strumentazione per il monitoraggio. I due contesti differiscono sia per le misure che possono essere effettuate, sia per le caratteristiche dei dati ottenibili.

Nel caso dei rilievi post-evento è l'accadimento dei fenomeni a determinare le aree nelle quali sono condotte le misure per la documentazione delle colate rapide e la determinazione dei loro principali parametri quantitativi. Tali rilievi rivestono particolare importanza in quanto pochi bacini interessati da colate detritiche sono strumentati e i dati raccolti post-evento sono utili per incrementare le conoscenze sul fenomeno anche al fine di progettare opere di difesa e sistemi di monitoraggio e allarme.

Parte dei rilievi post-evento per le colate detritiche è simile alle osservazioni condotte per altri tipi di frana o per eventi di piena: raccolta di documentazione fotografica da terra e, se possibile, da aeromobile e rilievo degli eventuali danni a strutture e infrastrutture. Nel quadro di questi rilievi rientra anche l'individuazione dei punti d'inizio della colata, accompagnata dal riconoscimento dei fattori predisponenti (tipologia e spessore del materiale mobilizzato e di quello ancora potenzialmente mobilizzabile, acclività, ecc.), delle cause innescanti (piogge intense, cedimento di ostruzioni d'alveo, svuotamento d'invasi proglaciali effimeri, ecc.) e, se possibile, dei processi all'origine del fenomeno (ad esempio, erosione da parte di deflusso concentrato o innesco da frana). Notevole interesse hanno le interviste a testimoni dell'evento, i quali possono fornire informazioni sull'ora di accadimento e sulla durata dei fenomeni e sulle principali caratteristiche della colata (ad esempio: presenza o meno di un'onda precorritrice fluida, variazioni apparenti nella concentrazione solida e nel trasporto di massi e legname grossolano nel corso dell'evento). Si sottolinea l'importanza dell'acquisizione di documentazione fotografica e di video registrati dai testimoni o dalle telecamere di sorveglianza eventualmente presenti. Si

rammenta di prestare attenzione ad uniformare gli orari, utilizzando l'ora solare come riferimento univoco per le analisi post-evento.

Altre osservazioni di terreno riguardano il riconoscimento della presenza di materiale legnoso grossolano e la caratterizzazione granulometrica dei depositi. I rilievi granulometrici dei depositi riguardano sia il materiale superficiale, che può essere misurato mediante tecniche di rilievo numerali, sia la matrice fine, dalla quale possono essere raccolti campioni da sottoporre ad analisi ponderale e per sedimentazione.

Nel quadro delle misure post-evento, sono di particolare interesse la mappatura dei depositi e la valutazione del loro volume. Il volume di una colata detritica è una variabile di primaria importanza per la valutazione della severità dell'evento e ha un ruolo importante nel dimensionamento di opere di difesa. Idealmente la determinazione del volume dovrebbe riguardare tutti i depositi della colata, compresi quelli lasciati lungo il corso del torrente all'interno del bacino idrografico. Se questo non fosse possibile, ad esempio per la difficile accessibilità del canale, si dovrebbero almeno rilevare i depositi terminali, che solitamente si espandono sul conoide alluvionale. I metodi tradizionali per questi rilievi consistono nella delimitazione dei depositi e nella valutazione sul terreno dei loro spessori, per pervenire ad una determinazione del volume depositato. La presenza di piazze di deposito costruite per trattenere il sedimento trasportato fornisce la possibilità di fare valutazioni abbastanza precise dei volumi depositati. Il recente sviluppo di tecniche di rilievo che permettono la rapida realizzazione di modelli digitali del terreno ad elevata risoluzione, ad esempio *Structure from Motion* mediante rilievi da drone – UAV, ha fornito un importante contributo alla determinazione dei volumi dei depositi delle colate detritiche, nonché dei volumi erosi, se i rilievi post-evento si estendono ai settori del canale e dei versanti interessati da erosione. La determinazione del volume delle colate detritiche tramite il confronto di modelli digitali del terreno presuppone la disponibilità di un modello digitale del terreno ad alta risoluzione precedente l'evento, che può derivare da rilievi LiDAR, tecnologia sempre più diffusa

e con copertura regionale. La differenza fra i due modelli digitali del terreno deve essere calcolata mediante tecniche che tengano conto degli errori propri di entrambi i modelli abbinando un'incertezza di stima sul volume calcolato. Nella determinazione dei volumi è opportuno tener conto del fatto che, quando la colata raggiunge il fondo della valle principale, parte del materiale può venire asportata dal corso d'acqua ricevente. Ne consegue che i volumi depositati sul conoide sono spesso sottostimati.

La ricostruzione della portata di picco della colata tramite le tracce lasciate sulle sponde del canale è d'indubbio interesse ma è spesso non agevole, anche per ragioni logistiche e di accessibilità dei siti, ed implica uno studio approfondito delle caratteristiche del flusso. Il rilievo di sezioni del canale percorso dalla colata e dei livelli raggiunti sulle sponde costituisce premessa per la ricostruzione della portata di picco. Queste misure possono essere condotte con tecniche topografiche tradizionali o mediante rilievi fotogrammetrici (da terra o da aeromobile, compresi UAV) seguiti dalla creazione di modelli digitali ad elevata risoluzione del canale interessato dalla colata. Nell'esecuzione di questi rilievi si deve prestare attenzione a distinguere il livello della colata da quello raggiunto da eventuali spruzzi fangosi. Ulteriori fonti d'incertezza possono provenire dal trasporto di massi di grandi dimensioni e di legname grossolano che protrude dalla superficie della massa fluente. La determinazione della portata di picco può quindi essere effettuata mediante modelli numerici o formule dell'idraulica, tenendo presenti le caratteristiche reologiche della colata.

Le misure per le colate rapide nelle aree dotate di strumentazione per il monitoraggio presentano differenze rilevanti a seconda che il monitoraggio sia condotto per finalità di allertamento o di studio. La strumentazione utilizzabile nei due casi è descritta nella sezione A.3; qui si accenna ai criteri generali per la scelta dei siti da strumentare.

Nel caso del monitoraggio con finalità di allertamento, la scelta del bacino/torrente da attrezzare è dettata dalla pericolosità dello stesso e dalla presenza di elementi da

proteggere. Data questa condizione a priori, è fondamentale aumentare, per quanto possibile, il tempo di preavviso, che è funzione della distanza tra il sito in cui avviene il rilevamento delle colate detritiche e gli elementi a rischio. Ne consegue la necessità d'installare la strumentazione per l'allertamento il più possibile a monte lungo i canali potenzialmente interessati dalle colate. Inoltre, per supportare al meglio le azioni di Protezione Civile e aumentare i tempi dell'allertamento, occorre monitorare sempre due distinte fasi legate all'evento:

- 1) nei pressi della zona d'insacco, le precipitazioni intense in grado di innescare il fenomeno d'instabilità;
- 2) il transito della colata detritica, possibilmente in più sezioni lungo il canale.

L'esigenza di ridurre i falsi positivi ed evitare nel modo più assoluto i mancati allarmi, comune a tutte le attività di allertamento, è particolarmente sentita nel caso delle frane veloci, fra le quali rientrano anche le colate di fango e di detrito. L'intero sistema di monitoraggio ed allertamento, compreso l'impianto di alimentazione elettrica, deve essere progettato con criteri di ridondanza.

Nel caso del monitoraggio delle colate di detrito per finalità di studio, si pone il problema della scelta del bacino in cui installare la strumentazione. Il principale criterio per questa scelta deve essere l'elevata frequenza di accadimento degli eventi. È questo un aspetto essenziale, da cui dipende il successo di un sistema di monitoraggio. Nella maggior parte dei bacini interessati da colate detritiche in Italia la frequenza media degli eventi è bassa, molto inferiore ad un evento all'anno. Si consideri il caso di un bacino in cui si verifica in media una colata detritica ogni 3-4 anni: una tale frequenza è rilevante per possibili problemi gestionali legati, ad esempio, alla necessità di rimuovere il materiale depositato o all'interferenza con il corso d'acqua ricevente (e di sicurezza, nel caso siano presenti strutture a rischio), ma è evidentemente inadeguata per garantire una soddisfacente raccolta di dati sperimentali.

Un secondo aspetto di rilievo per la scelta di un sito di monitoraggio per le colate rapide è la presenza di un canale non soggetto ad eccessive divagazioni: questa condizione è particolarmente rilevante per l'installazione di strumentazione di monitoraggio sui conoidi alluvionali, potenzialmente soggetti ad avulsioni.

Pur non costituendo criterio discriminante per la scelta di un sito di monitoraggio, da un punto di vista pratico è di grande utilità la disponibilità di alimentazione da rete elettrica almeno nel punto in cui sono installate le apparecchiature (datalogger, *data server*) per la raccolta e l'eventuale trasmissione dei dati. Sempre con riguardo agli aspetti pratici, è importante prestare attenzione all'accessibilità dei siti in cui installare la strumentazione. Questo aspetto rileva per l'esecuzione di interventi di manutenzione, come pure per l'eventuale disinstallazione nel periodo invernale (ad esempio in aree interessate da valanghe di neve).

Grazie alla presenza di strumentazione che rileva il passaggio delle colate, la stessa misura delle precipitazioni, effettuata possibilmente in più punti del bacino idrografico ed in prossimità, dal punto di vista planimetrico e altimetrico, delle zone d'innescio delle colate, permette la determinazione della pioggia innescante con una precisione non ottenibile in bacini non monitorati, nei quali l'ora di accadimento delle colate è nota con approssimazione solitamente più grossolana.

Un ruolo centrale nel monitoraggio delle colate detritiche ha la registrazione degli idrogrammi, misurati tramite sensori di livello radar o ad ultrasuoni (Paragrafo A.3.1). Le vibrazioni prodotte dalla colata possono essere misurate tramite geofoni (Paragrafo A.3.2): questi sensori sismici, in ragione delle loro apprezzabili caratteristiche di economicità e facilità d'installazione, e nonostante che l'elaborazione dei loro segnali possa essere abbastanza complessa, sono assai diffusi nei bacini attrezzati per la misura delle colate detritiche. Le registrazioni video della colata, utili sia per descrivere e interpretare lo sviluppo dei fenomeni, sia per la determinazione delle velocità superficiali (Paragrafo A.3.4), costituiscono parte essenziale di un sistema di monitoraggio. È auspicabile, ancorché spesso non

facile da realizzare, l'installazione di più telecamere, in grado di documentare la colata detritica dalla sua formazione nella parte superiore del bacino fino alla propagazione ed al deposito nelle parti inferiori del torrente.

A questi strumenti, che costituiscono il nucleo di un sistema di monitoraggio per le colate rapide in bacini torrentizi, possono aggiungersi altri sensori, quali sensori di pressione e d'impatto o per il rilievo di infrasuoni generati dalla colata.

La presenza di strumentazione per il monitoraggio delle colate rapide non esime i gestori di un sito attrezzato dall'esecuzione di rilievi post-evento, i quali, anzi, aumentano il valore dei dati raccolti tramite i vari tipi di sensori. Fra le misure post-evento si ricorda, in primo luogo, il rilievo topografico delle sezioni strumentate con sensori per la misura dei livelli, necessaria per la determinazione delle portate di picco e dei volumi defluiti. In presenza di depositi confinati in piazze di deposito o su aree ben definite del conoide alluvionale, il rilievo topografico dei volumi accumulati può essere utilmente confrontato con i volumi defluiti calcolati in base agli idrogrammi della colata. L'eventuale disponibilità di rilievi LiDAR multitemporali a scala di bacino costituisce, ancora una volta, una preziosa base informativa in grado di permettere il calcolo di un bilancio di massa relativo agli eventi del periodo ricoperto.

4.1.14 Misure con sensori a fibra ottica

Negli ultimi anni sono stati proposti diversi sensori in fibra ottica (FOS) per la misurazione di profili di deformazione, temperatura e vibrazione, in ambito geotecnico, compreso il monitoraggio delle frane. Yoshida *et alii* (2002) hanno posto le basi per le odierne applicazioni di "*optical time domain reflectometry*" di Brillouin (BOTDR) per il monitoraggio delle frane, evidenziando importanti elementi relativi alla deformazione misurata nella fibra rispetto allo spostamento effettivo del terreno. Higuchi *et alii* (2007) hanno introdotto la riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR) come tecnologia di rilevamento distribuita per rilevamento dello spostamento del suolo,

tuttavia ottenendo una precisione spaziale molto limitata. Nello stesso periodo, altri autori si sono concentrati sull'analisi ottica del dominio del tempo (BOTDA) di Brillouin, ottenendo una risoluzione spaziale sulla scala del metro, sufficiente per determinare preliminarmente la perimetrazione di un'area in frana.

Nello specifico, per quanto riguarda i sensori in fibra ottica è fondamentale distinguere fra **sensori puntuali** e **sensori distribuiti**. I sensori puntuali consentono una misura solo puntuale dei parametri d'interesse: ne sono un esempio i cosiddetti sensori a reticolo di Bragg costituiti da reticoli foto-incisi nelle fibre stesse. Per loro natura, i sensori puntuali non si prestano a misure spazialmente distribuite su grandi distanze. Tale limitazione può essere superata grazie all'uso di sensori distribuiti laddove una singola fibra ottica consente di ricostruire, con elevata risoluzione spaziale, il profilo deformativo e/o termico per tutto il tratto strumentato, sino a lunghezze di alcune decine di chilometri. Da qui l'indubbio vantaggio di tenere sotto controllo la grandezza di interesse in ogni punto dell'elemento (struttura, terreno, manufatto, ecc.) a cui la fibra è resa solidale, a prescindere da una scelta a priori dei punti, ritenuti critici, da tenere sotto controllo. Infatti, a seconda del tipo di monitoraggio la fibra può essere ancorata direttamente nel terreno in punti definiti, vincolata ad una struttura di protezione e/o di rinforzo o anche accoppiata a sistemi convenzionali come gli inclinometri.

Le fibre ottiche possono quindi fornire informazioni su deformazione e/o temperatura attraverso i sistemi BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometer*) e BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*). Sviluppi recenti integrano le applicazioni di cui sopra con sistemi DTS (*Distributed Temperature Sensor*), per depurare la misura di deformazione dagli effetti termici e con sistema DAS (*Distributed Acoustic Sensor*) o DVS (*Distributed Vibration Sensor*), per rilevare e localizzare vibrazioni ed emissioni acustiche.

I FOS possono quindi essere installati con limitata invasività su qualunque struttura, ovunque vi sia la

necessità di monitorare profili termici e/o deformativi, consentendo la realizzazione di così dette "strutture intelligenti" capaci di fornire, in continuo, informazioni sul loro stato e sulla loro integrità (*Structural Health Monitoring – SMH systems*). Le fibre ottiche consentono, pertanto, di verificare l'affidabilità di una struttura o dell'interazione terreno struttura, durante la sua intera vita operativa, rappresentando un sistema di monitoraggio permanente, e possono fornire anche fondamentali informazioni finalizzate alla realizzazione di sistemi di *early warning*.

Nel campo del monitoraggio dei fenomeni franosi, i rilevamenti deformativi possono essere applicati ad aree spazialmente molto estese, per valutare la dimensione di dissesti sia in terra che roccia, come pure in accoppiamento con inclinometri ed estensimetri.

Nella Figura 21 è rappresentato uno dei tre sistemi di monitoraggio in fibra ottica installati a Civita di Bagnoregio (VT) nel 2017, per il controllo delle deformazioni associate a potenziali fenomeni di crollo nella parte superiore della rupe vulcanica. Il sistema prevede un cavo duplex in fibra ottica monomodale ancorato alla placca tufacea in punti individuati come strategici, in grado di rilevare qualsiasi anomalia tensionale perpendicolarmente od obliquamente al fronte stesso. In particolare, il cavo impiegato è un cavo con compensazione della temperatura recando al suo interno due fibre ottiche, una ancorata solidalmente alla guaina esterna del cavo - in maniera tale da assorbirne lo strain - ed una svincolata dalla guaina stessa attraverso l'annegamento in uno speciale gel. I dati sono stati acquisiti con un a specifica centralina che nel caso di specie, connessa al sensore in fibra ottica garantisce una risoluzione spaziale minima di 20 cm, per un range di misura massimo di 5 km, ed un tempo di acquisizione di circa un minuto.

In questo modo, è possibile discriminare le variazioni della frequenza di Brillouin imputabili a variazioni dello stato tenso-deformativo del cavo (e quindi della struttura al quale è ancorato) da quelle imputabili alle variazioni della temperatura.



Figura 21 – Sistemi di monitoraggio in fibra ottica installato a Civita di Bagnoregio (VT) nel 2017, per il controllo delle deformazioni associate a potenziali fenomeni di crollo della placca tufacea

Nell'esempio soprariportato di Civita di Bagnoregio, l'ancoraggio del cavo a tutti i potenziali blocchi identificati tramite rilievo geo-strutturale consente di ottenere risultati particolarmente affidabili sul processo evolutivo di ogni singolo blocco (Figura 22).

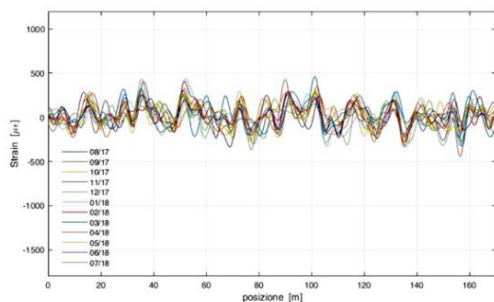


Figura 22 – Misurazioni di strain lungo il profilo evidenziato in rosso di Figura 21. L'asse orizzontale rappresenta la lunghezza del cavo in fibra ottica.

Infine, considerando che l'elemento più costoso della rete di monitoraggio è la centralina di acquisizione, tale attrezzatura può essere integrata nel tratto in osservazione e quindi consentire un rilievo in tempo reale, oppure la stessa centralina essere utilizzata per il controllo di più reti, durante i sopralluoghi periodici dei tecnici incaricati. Ciò in funzione della tipologia dei processi da investigare.

Le caratteristiche sopra evidenziate rendono l'utilizzo della tecnologia a fibre ottiche molto competitiva, anche dal punto di vista economico, in particolare per le applicazioni dove è richiesta un'elevata robustezza, grande copertura spaziale e/o una elevata densità di

punti di misura anche in continuo. Il monitoraggio geotecnico per applicazioni ai fenomeni franosi e il monitoraggio di strutture sono tra queste principali applicazioni.

4.2 MISURE IN FORO

4.2.1 Misure inclinometriche

Misure inclinometriche manuali

La misura inclinometrica rappresenta un metodo di precisione per l'analisi in profondità degli spostamenti orizzontali che caratterizzano le frane.

Nello specifico la stessa rileva, lungo il tubo inclinometrico, l'inclinazione della sonda rispetto alla verticale, su due piani A e B tra loro ortogonali individuati dalle guide opposte nel tubo stesso (Figura 23).

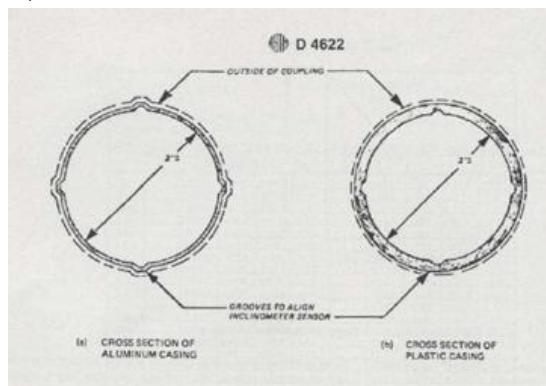


Figura 23 – Sezione del tubo inclinometrico con le scanalature delle guide. Fonte: ASTM D 4622-86

L'operazione da effettuarsi prima di iniziare le letture è quella di segnare la guida di riferimento (stimata in base o alla direzione dello spostamento atteso oppure alla direzione del nord) in corrispondenza della testa del tubo e con accuratezza rilevare l'azimut tra suddetta guida (1) e la direzione del nord magnetico. Il corretto rilievo dell'azimut consente una precisa orientazione degli assi, definita convenzionalmente "azimutale", e quindi una definizione ottimale della direzione del movimento del versante nello spazio.

La sonda inclinometrica, prima di effettuare la lettura, è inserita nel tubo ed abbassata fino a fondo foro: il primo inserimento nel tubo dovrà avvenire in modo che la rotella di riferimento della sonda scorra lungo la guida 1, definita per convenzione quella iniziale (Figura 24).

La prima misura è definita "di zero" e corrisponde alla lettura a cui fare riferimento ovvero rispetto alla quale si calcoleranno gli spostamenti della tubazione inclinometrica. Le misure successive sono chiamate "di esercizio".

È buona norma effettuare la misura di zero nei 7-10 giorni successivi l'installazione della tubazione inclinometrica e su quattro guide. La campagna di misura di zero è importante, in primo luogo, per il collaudo della colonna inclinometrica, la cui tolleranza rispetto alla verticale non deve superare 1,5-2% (la ISO 18674-3 indica in modo preciso la tolleranza che in ogni punto del tubo non deve discostarsi dalla verticale di oltre $\pm 2^\circ$). Utilizzando le sonde biassiali la lettura di zero fornirà i valori dell'inclinazione del tubo, alle varie profondità, nelle otto componenti cui corrispondono quattro ripetizioni di misura.

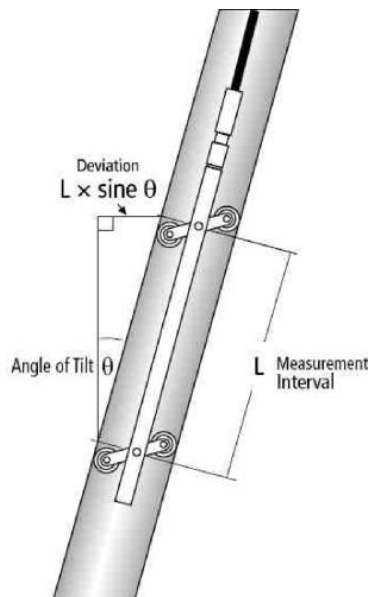


Figura 24 – Il passaggio da valori angolari a spostamenti avviene mediante una funzione trigonometrica. Fonte: Slope Indicator

Le misure di esercizio sono di norma eseguite sulle guide 1-3. Qualora si riscontrassero criticità dovute all'acquisizione di valori strumentali anomali della sonda inclinometrica o alla presenza di forti deformazioni della colonna inclinometrica, si potranno effettuare misure su tutte le guide.

Le letture si eseguono da fondo foro risalendo verso la testa, ad intervalli di 0,5 m (o 24" se strumentazione anglosassone; distanza che intercorre tra i carrelli): tale procedura consente una rappresentazione continua degli spostamenti, poiché tutte le misure vengono riferite al fondo della colonna inclinometrica, intestata nella parte stabile. In casi particolari (es. per il controllo dei corpi di scarica, in cui siano presenti teli di impermeabilizzazioni sul fondo, o di frane con una evoluzione veloce, per le quali si prevede una rapida deformazione del tubo in profondità) è anche possibile procedere con la misura dall'alto verso il fondo: la procedura è analoga a quella inversa, considerando che, in questo caso, la prima lettura è quella in testa. Tali misure inclinometriche devono essere

possibilmente accoppiate con rilievi topografici della testa dell'inclinometro.

Si deve tenere presente che tali misure, essendo di precisione, possono essere affette da errori che dipendono in varia misura dall'operatore, dalla strumentazione e dalla tubazione. La letteratura esistente in materia (DGSi - *Durham Geo Slope Indicator*), riporta che per un'installazione inclinometrica standard di 30 m di lunghezza, sottoposta a letture incrementali con passo di 0,5 m, l'accuratezza del sistema è di circa ± 8 mm. Il valore di accuratezza pari a ± 8 mm è considerato cautelativo (infatti in letteratura sono presenti analisi che indicano come il valore di ± 8 mm sottostimi l'accuratezza delle misure manuali o automatiche) e deriva dalla somma del contributo degli errori di tipo casuale e di quelli a carattere sistematico.

La bibliografia tecnico-normativa e le raccomandazioni delle case costruttrici indicano che per garantire la continuità delle caratteristiche di precisione del sistema occorre eseguire la calibrazione periodica della sonda, con cadenza possibilmente annuale, utilizzando tutti gli elementi che compongono la catena di misura (sonda, cavo e centralina di misura).

Procedura operativa di esecuzione delle misure

Le letture devono essere eseguite secondo le seguenti modalità:

- verifica, preventiva ad ogni ciclo di misurazione, dello stato della tubazione per mezzo della sonda testimone, facendola scorrere lungo le guide della tubazione per tutta la sua lunghezza, in modo che si possa verificare l'accessibilità delle stesse. In condizioni di forti deformazioni, si può utilizzare una telecamera da foro, per osservare direttamente la deformazione del tubo in corrispondenza della superficie di scorrimento;
- inserimento fino a fondo foro della sonda nel tubo inclinometrico lungo la guida 1, precedentemente contrassegnata;
- mantenere a fondo foro la sonda ferma per almeno 10 minuti, in attesa della completa stabilizzazione della lettura per effetto della temperatura di fondo

foro. I valori che compaiono sul display dovranno risultare sostanzialmente costanti;

- abbassamento/sollevamento della sonda (in funzione del tipo di acquisizione, in discesa o in risalita) fino a far coincidere la tacca del cavo con il livello stratigrafico corrispondente, prestando attenzione a non far aderire la sonda con il fondo foro;
- effettuare le letture, ad intervalli prestabiliti generalmente 0,5/1,00 m), attendendo sempre qualche secondo ad ogni stazionamento per garantire la stabilizzazione dei valori (Figura 25);
- recupero della sonda inclinometrica e, una volta in superficie, rotazione della stessa di 180° e nuovo inserimento della stessa nel tubo inclinometrico, con la rotella di riferimento nella guida 3 (opposta alla guida 1); esecuzione delle letture secondo le modalità descritte sopra;
- per l'esecuzione delle letture sulle quattro guide, una volta terminata l'acquisizione dei dati sulla guida opposta ad 1, vengono eseguiti i cicli di letture nelle altre guide.



Figura 25 – Datalogger in funzione durante l'acquisizione dei dati inclinometrici. Fonte: archivio ARPAL

Avendo cura di mettere in atto quanto sopra sottolineato, i dati acquisiti dalla centralina vengono successivamente scaricati su computer attraverso un software dedicato ed elaborati con programma specifico

o foglio elettronico, che permette di ordinare i *dataset* per la restituzione grafica.

L'elaborazione *assoluta* o misura di zero, viene effettuata prendendo in considerazione la prima lettura e serve per definire la verticalità fittizia del foro, cui andranno riferite tutte le misure esercizio successive.

L'elaborazione principale fa riferimento al grafico della risultante *differenziale integrale*, che attraverso la somma algebrica di tutti i singoli valori acquisiti *in situ*,

definisce lo spostamento totale rispetto alla misura di zero (Figura 26).

L'elaborazione *differenziale locale*, a differenza della precedente, non somma i singoli valori, bensì essi vengono restituiti singolarmente alle rispettive quote; questo tipo di elaborazione può essere utile nel caso si voglia evidenziare a quale quota si presenta una determinata deformazione.

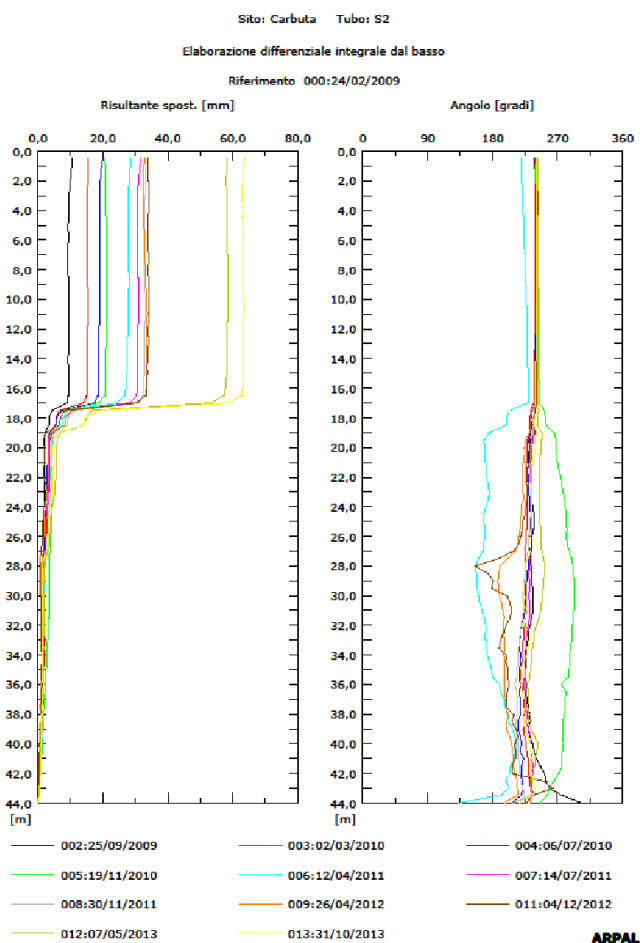


Figura 26 – Esempio di elaborazione differenziale integrale con evidente superficie di scivolamento Fonte: da software INCLI - ARPAL

I dati del monitoraggio inclinometrico sono sottoposti ad una procedura di validazione per la verifica della presenza di eventuali errori strumentali e la valutazione della precisione delle letture (analisi dei “checksum” e loro “deviazione standard”) che è effettuata per ogni ciclo di misura.

In tale contesto il “checksum” rappresenta un termine di grande importanza nel processo di analisi ed elaborazione delle misure e viene definito come la semisomma delle opposte letture (es. [valore guida 1+valore guida 3]/2) rilevate allo stesso intervallo di profondità. I valori del *checksum* non devono risultare elevati in valore assoluto e rimanere pressoché costanti lungo tutta la colonna inclinometrica; pertanto, il *checksum* costituisce il più importante strumento di controllo per la verifica della qualità e attendibilità delle letture.

Misure inclinometriche automatiche

L'evoluzione della tecnologia e la necessità di monitoraggi in continuo inducono a dotarsi di sistemi inclinometrici automatici nei siti di frana che necessitano di dati giornalieri da confrontare con dati in continuo piezometrici e dati meteo.

L'utilizzo di sonde inclinometriche fisse, in grado di registrare dati in continuo, ha permesso di ridurre gli eventuali errori occasionali e/o sistematici presenti nelle misure inclinometriche mobili, nonché di disporre in tempo reale, di indicazioni utili sui movimenti franosi in atto (Figura 27).

Le sonde ad esempio del tipo servoaccelerometro, installate nei tubi inclinometrici, rilevano in profondità gli eventuali incrementi dello spostamento delle fasce di dislocazione.

I sensori sono installati in una o più unità all'interno di uno stesso tubo e lasciati in posizione fissa. Le sonde trasmettono il dato acquisito mediante apposito cavo segnale che giunge fino a testa tubo e poi al data logger. Il collegamento tra i vari elementi di misura è assicurato da un cavetto in acciaio inox oppure da aste in acciaio inox e la loro profondità viene stabilita di volta in volta in fase di installazione. Tutta la colonna così

costituita è sospesa alla sommità del tubo monitorato, per mezzo di una testa di sospensione. Ogni sensore viene fornito con un certificato di collaudo che attesta i risultati della prova eseguita e le caratteristiche elettromeccaniche della stessa.



Figura 27 – Pannello solare e datalogger collegato con sonda inclinometrica automatica e piezometro automatico. Fonte: archivio ARPAL

L'installazione delle sonde, che possono essere anche collegate tra loro in numero indefinito, deve avvenire a seguito di un periodo sufficientemente lungo di letture manuali: l'intervallo di tempo che può variare da pochi mesi a qualche anno è necessario per rilevare la/i superficie/i di scorrimento.

Il rilievo di una superficie di scorrimento deve avvenire dopo che la stessa sia stata riconosciuta dopo un numero sufficiente di letture manuali; le deformate inclinometriche devono risultare morfologicamente concordi ed in progressione nel tempo come valori assoluti dello spostamento.

Un'installazione sbrigativa di sonde fisse potrebbe portare ad una perdita di tempo durante l'analisi dei dati che non corrispondono a zone di deformazione e quindi non mostrano particolari incrementi o addirittura potrebbero portare ad errate valutazioni.

I dati ottenuti dall'acquisizione automatica di una o alcune sonde fisse costituiscono in modo oggettivo lo

spostamento locale nel punto di lettura e quindi non rappresentano in nessun modo un dato globale che consideri tutta la potenza della massa franosa.

Qualora si rilevino spostamenti importanti dalla sonda fissa con valori locali di parecchi centimetri, si può decidere se sfilare lo strumento e prevedere, quindi, una nuova installazione, oppure se portare a fine vita lo strumento anche oltre lo schiacciamento del tubo. Quest'ultima scelta, a scapito della perdita economica, consente di allungare la vita di misura della sonda e registrare un numero maggiore di dati anche durante la deformazione dell'inclinometro.

Di seguito sono elencate le principali operazioni da seguire in campo (fatta salvo la presenza di dispositivi di trasmissione/telecontrollo e analisi dei dati da remoto) (Figura 28):

- 1) accedere al datalogger di lettura automatica e verificare che i led di funzionamento siano correttamente accesi;
- 2) collegare il datalogger ad un dispositivo portatile e procedere quindi al download dei dati grezzi rappresentativi dei sensori;
- 3) il file generato contiene, generalmente, le informazioni relative all'angolo di deviazione dalla verticale.



Figura 28 – Scarico dati inclinometrici da sensore servo-accelerometrico biassiale. Fonte: archivio ARPAL

I dati ottenuti sono elaborati, come nel caso dei dati inclinometrici manuali, per ottenere lo spostamento alla profondità di installazione (risultante locale). Quello che si ottiene è un grafico che rispecchia il trend della deformazione nel tempo.

Il grafico di Figura 29 mostra le deformazioni giornaliere registrate in automatico: come già osservato, tali misure costituiscono il movimento lungo la superficie di scorrimento rilevata da una sonda biassiale fissa.

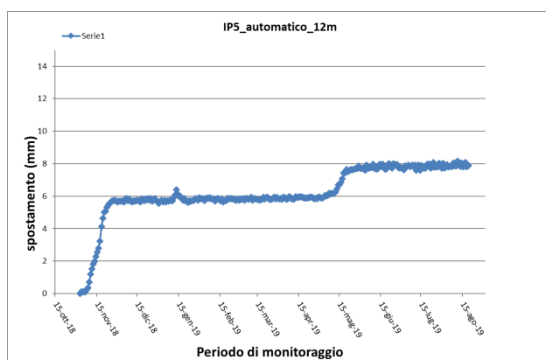


Figura 29 – Deformazione in evoluzione lungo il piano di taglio a -12m rilevato da sonda biassiale automatica. Sito IP5 (Pero-Varazze). Periodo ottobre 2018 - agosto 2019. Fonte ARPAL

Per le specifiche tecniche dei tubi inclinometrici e delle sonde si rimanda ai Paragrafi A.4.1, A.4.2 e A.4.3.

4.2.2 Misure multiparametriche

Nell'ultimo decennio si è affacciata sul mercato delle strumentazioni di monitoraggio una nuova categoria di strumenti che permettono l'esecuzione di misure automatiche finalizzate al monitoraggio in continuo della deformazione del terreno nonché all'acquisizione di informazioni relative a piezometria, temperatura ed accelerazione (da qui il termine multi), utilizzata prevalentemente in foro ma con applicazioni anche in parete.

Da un punto di vista concettuale le colonne multiparametriche sono strumentazioni costituite da catene di sensori collocati ad intervalli regolari (ad es. ogni metro) lungo una colonna flessibile, avente sia

funzione portante che di alloggiamento dei cavi di trasmissione dei dati e di alimentazione (Figura 30 e Figura 31; Paragrafo A.4.4).

Rientrano in questa categoria quelle strumentazioni che, seppure con configurazioni costruttive differenti a seconda del produttore, sono in grado di:

- rilevare e monitorare i parametri di deformazione del terreno, accelerometrici⁴, e fisici quali temperatura del terreno e pressioni neutre;
- monitorare le grandezze di cui sopra con continuità fino a profondità anche di 250 m dal piano di campagna;
- acquisire i dati di cui sopra, soprattutto di deformazione, con una elevata risoluzione temporale (oraria o inferiore) per lunghi intervalli di tempo (anche anni);
- gestire i dati con diramazione di allerte al seguito del superamento di soglie prestabilite.

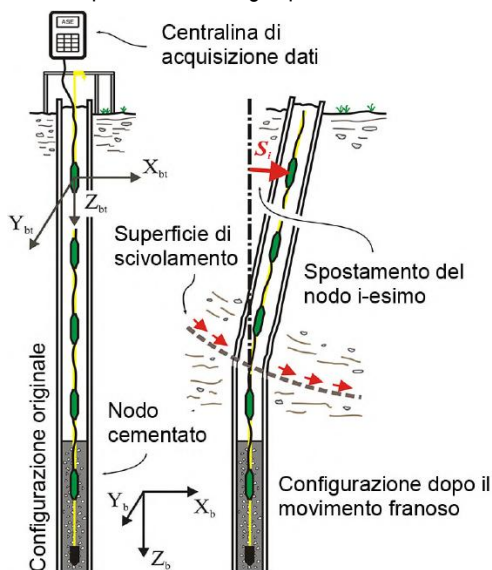


Figura 30 – Esempio di colonna multiparametrica costituita da una catena di sensori. Fonte: A.S.E. s.r.l.

Il dato acquisibile con le misure eseguite con colonne multiparametriche si fa particolarmente apprezzare per il monitoraggio di quei fenomeni franosi di tipo complesso, caratterizzati da superfici di scorrimento multiple a diverse profondità, e risulta particolarmente utile nella gestione dei sistemi di monitoraggio di frane con finalità di *early warning*, quando è richiesto un monitoraggio in continuo, finalizzato ad individuare eventuali settori di corpi di frana prossimi al collasso.

Altre applicazioni delle colonne multiparametriche riguardano il monitoraggio geotecnico in galleria, in ambiente minerario e su fronti di scavo in genere o versanti instabili (Figura 32).



Figura 31 – Esempio di colonna multiparametrica costituita da una catena di sensori montata su un reeler prima dell'installazione (Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia)

⁴ Con il termine parametro accelerometrico si intende la misura che individua la variazione di velocità dello spostamento del sensore



Figura 32 – Operazioni di installazione di una colonna multiparametrica su di un volume roccioso instabile a protezione del cantiere di consolidamento a monte di una strada regionale in Valle d'Aosta (fonte: Regione Valle d'Aosta)

Dal punto di vista dell'affidabilità delle letture di deformazione, l'impiego delle colonne multiparametriche non è accettato in tutti i contesti. Ad esempio, nel settore delle letture inclinometriche per le dighe, dove è richiesta un'estrema affidabilità e precisione delle letture, continuano ad essere preferite le letture inclinometriche di tipo tradizionale, in quanto alcuni esperti continuano a sollevare perplessità circa le modalità di accoppiamento della sonda multiparametrica al tubo di rivestimento (sia esso inclinometrico in metallo o fenestrato in materiale plastico).

Tuttavia, si deve tener presente che la teoria dell'errore per quanto riguarda le misure inclinometriche (Mikkelsen, 2003) è valida anche per le colonne multiparametriche. In questo caso il vantaggio rispetto ai sistemi manuali risiede anche nel fatto che l'errore

viene minimizzato grazie all'analisi statistica delle misure effettuate con un campionamento elevato. Si va inoltre ad eliminare totalmente la quota parte di errore sistematico (umano) dovuto all'operatore che manovra la sonda.

Ai fini della scelta della strumentazione più idonea da installare in foro, un aspetto fondamentale da tenere sempre in considerazione nel momento in cui si progetta una campagna di sondaggi geognostici è quello di valutare preliminarmente l'entità degli spostamenti previsti. Questo può essere fatto con diverse tecnologie "classiche" topografiche, quali misure con stazione totali su punti prestabiliti (prismi), campagne di rilievo con tecnologia GNSS statico a cadenza opportuna, oppure, grazie alla disponibilità dei satelliti delle missioni, ad esempio, Sentinel dell'Agenzia Spaziale Europea, con elaborazioni di PS dislocati sul settore di indagine. Questi aspetti, che misurano evidentemente deformazioni esclusivamente superficiali, possono però dare importanti informazioni sull'intervallo massimo di tempo che può intercorrere tra la conclusione del sondaggio geognostico e l'inizio delle potenziali deformazioni del tubo (inclinometrico o piezometrico), aspetto che potrebbe impedire fisicamente l'infissione delle colonne multiparametriche (a volte pochi giorni possono già creare problemi di installazione).

Sul mercato esistono alcune ditte che propongono diversi prodotti di tipo "multiparametrico". In Italia i modelli in commercio si rifanno a pochi produttori. Ogni soluzione deve essere studiata, costruita ad hoc in base alle informazioni pregresse di tipo geologico, idrogeologico e geotecnico, soprattutto nel caso in cui occorra prevedere l'inserimento di più sensori di pressione interstiziale. In tal caso, poiché si suppone l'esistenza di più acquiferi confinati all'interno dell'ammasso in frana, occorre porre molta attenzione alle quote alle quali installare, sia in fase di perforazione, sia in fase di installazione, i *packer* per isolare gli acquiferi.

Inoltre, si deve tener conto che ogni prodotto ha caratteristiche peculiari dal punto di vista tecnico, ma soprattutto dal punto di vista dell'installazione, ad

esempio per quanto riguarda i diametri interni del foro. È pertanto molto importante, prima della progettazione di un nuovo sondaggio, anche identificare quale sarà lo strumento utilizzato e quale sarà la sua conformazione.

Fatta questa lunga ma doverosa premessa su finalità e modalità di progettazione della misura con colonne multiparametriche si può concludere che l'interpretazione delle misure risulta piuttosto elementare e, per quanto riguarda le misure di deformazione, del tutto analoga a quella delle sonde inclinometriche tradizionali.

4.2.3 Misure TDR (*Time Domain Reflectometry*)

Si tratta di misure qualitative (non permettono cioè di determinare l'entità dello spostamento), eseguite su cavi coassiali che sono posati per lo più in accoppiamento a tubi inclinometrici o, in casi particolari, a tubi piezometrici. In altri casi, il cavo viene installato all'interno di tubi già fortemente deformati (tuttavia deve essere ancora possibile installare il cavo fino a fondo foro) oppure in fori dedicati.

La misura viene eseguita collegando il capo del cavo presente a bocca foro ad un ecometro mediante dei morsetti. Effettuato il collegamento è possibile generare un impulso elettrico, con ampiezza di fase nota, che attraversando il cavo verrà riflesso in corrispondenza di una discontinuità (es. una curvatura determinata dal movimento della frana) dello stesso.

La distanza di tale discontinuità dal misuratore è proporzionale al tempo impiegato nel percorso di andata e ritorno del segnale dopo che questo è stato riflesso: ciò permette di individuare la profondità della superficie di deformazione. Sono misure rapide; se eseguite su cavi accoppiati a tubo inclinometrici, possono costituire un'utile conferma della profondità di movimento. Considerata la maggiore elasticità del cavo alle deformazioni, questa tecnica consente di proseguire, seppur solo qualitativamente, il monitoraggio sullo stesso foro anche quando il tubo inclinometrico risulta interrotto, permettendo così di individuare eventuali ulteriori superfici di movimento oltre alla principale; inoltre, a differenza delle misure inclinometriche con sonda a carrello, non sussiste il

rischio di perdere la strumentazione. Di contro, tali misure consentono solo un confronto qualitativo tra una campagna e la successiva, non permettendo di valutare la reale entità dello spostamento.

Procedura operativa di esecuzione delle misure

Le misure devono essere svolte con le seguenti modalità:

- estrazione del cavo dal pozzetto e sua pulizia;
- collegamento dei morsetti al cavo di misura: una polarità (è indifferente quale sia) è collegata al nucleo di rame del cavo, l'altra alla treccia in metallo esterna schermata (Figura 33);
- accensione dello strumento e settaggio dei parametri propri del cavo (lunghezza, solitamente sono presenti intervalli di profondità, ad esempio 50-100-200 m; impedenza – in Ω ; fattore di velocità cioè il rapporto tra velocità dell'onda e la velocità della luce) e dell'impulso di misura (ampiezza o durata che può variare da 6 nanosecondi a 20 ns per i cavi più lunghi; potenza d'onda, che viene variata per ridurre il rumore, con valori tipici di 2 per cavi lunghi fino a 100 metri, 4 per cavi di 200 metri);
- registrazione della misura. In assenza di movimento sul display comparirà (Figura 34) una retta delimitata alle due estremità da due tipiche anomalie determinate dal tratto iniziale di cavo non interrato e dall'interruzione del cavo stesso a fondo foro. Qualora si manifestino spostamenti si osserveranno deformazioni nella retta.



Figura 33 – Collegamento dello strumento al cavo, frana del Monte Mater nel Comune di Madesimo (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

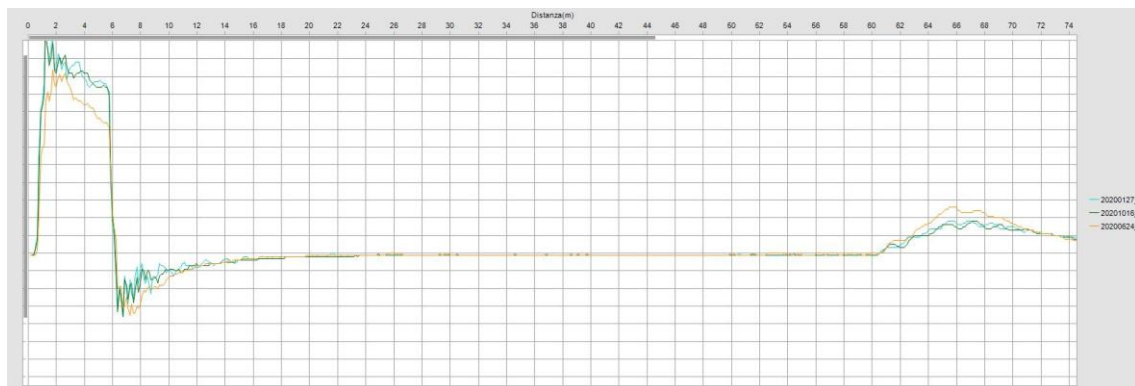


Figura 34 – Esempio grafico di misura. Foto archivio CMG Arpa Lombardia

Misure TDR automatiche

Le misure TDR possono essere automatizzate collegando i terminali dei cavi coassiali a un ecometro automatico che trasmette impulsi elettrici ad intervalli programmati. Lo strumento deve esser poi collegato a un impianto di trasmissione GPRS (o altro media trasmissivo) per l'invio dei dati, oppure essere dotato di adeguata memoria per lo scarico periodico secondo le procedure del costruttore.

Per le specifiche tecniche del cavo TDR ed ecometro in foro si rimanda al Paragrafo A.4.5.

4.2.4 Misure estensimetriche multibase

Si tratta di misure finalizzate al controllo degli spostamenti presenti a differenti profondità in un foro appositamente realizzato.

Gli strumenti (vedi Paragrafo A.4.6) vengono installati in fori dedicati, che possono presentare diverse inclinazioni (da suborizzontali a subverticali), utilizzati prevalentemente per il monitoraggio di deformazioni in roccia.

In sintesi, si può affermare che lo spostamento relativo, delle aste rispetto alla testa di riferimento installata in superficie, permette di determinare i movimenti rispetto alle basi cementate dell'ammasso. Lo spostamento degli ancoraggi è trasmesso integralmente dalla

profondità in superficie lungo le aste o i fili (che sono liberi di scorrere all'interno della guaina).

La misura dello spostamento, ricavato per differenza da una misura di configurazione iniziale, può essere eseguita meccanicamente con l'uso di un comparatore centesimale (Figura 35, Figura 36) o automaticamente, installando trasduttori di spostamento elettrici (potenziometrici) o a corda vibrante sulla testa di ciascuna base.

È importante specificare che le letture possono essere effettuate anche in fori pieni d'acqua o comunque orientati.

Procedura operativa di esecuzione delle misure manuali

Le misure di estensimetri in foro manuali sono piuttosto rapide e di semplice esecuzione (Figura 35, Figura 36). Sono misure eseguite con un comparatore analogico o digitale. L'esecuzione di tali misure prevede inizialmente la rimozione della copertura della testa di protezione, dei tappi e l'eventuale pulizia delle basi.

La modalità di esecuzione delle misure è la seguente:

- 1) rimuovere le protezioni delle basi (testa di protezione e tappi);
- 2) montare le aste di prolunga sul comparatore (se necessario);
- 3) nel caso di comparatori digitali, azzerare il display;
- 4) appoggiare il comparatore ai raccordi della piastra

- e spingere l'asta fino ad arrivare a battuta;
5) annotare il valore rilevato.



Figura 35 – Estensimetro multibase – versante del monte Leteè (Dorio – LC). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia



Figura 36 – Estensimetro multibase automatico – loc. Campo Frascaia (Lanzada – SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Misure automatiche estensimetri multibase

È possibile integrare la testa delle basi estensimetriche con dei sensori per la misura automatica degli spostamenti.

Al segnale in uscita del sensore, che varia in base alla tipologia dello stesso (corrente, tensione o frequenza nel caso di strumenti a corda vibrante) deve essere applicato un fattore di conversione – riportato nel foglio

di taratura dello strumento – per ottenere la misura in unità ingegneristiche (mm). Lo spostamento genera un segnale (elettrico/tensione/frequenza) che viene convertito in misura ingegneristica. Per tale conversione, si applicano formule matematiche generalmente fornite dal costruttore dello strumento che contengono coefficienti specifici propri della tipologia di strumento. I dati misurati possono essere acquisiti e trasmessi a frequenze programmate oppure registrati su datalogger e scaricati periodicamente.

4.2.5 Misure assestimetriche

Sono misure effettuate in fori dedicati alla misura di eventuali cedimenti in atto tra due o più punti lungo l'asse verticale comune. È possibile ricavare, note le proprietà meccaniche del terreno, il valore delle tensioni. Le misure possono essere eseguite sia manualmente, con apposite sonde, oppure in modo automatico. A seconda della tipologia di armatura del foro (cfr. Appendice A.4.7 relativa alle modalità di realizzazione e installazione degli assestimetri), è inoltre possibile eseguire nello stesso foro misure inclinometriche in modo tale da ottenere anche gli spostamenti in planimetria.

Le misure assestimetriche sono misure relative: dopo l'installazione dell'assestometro, viene infatti eseguita una misura di zero, che costituisce il valore iniziale a cui faranno riferimento tutte le successive misure. La presenza di fori piezometrici e di strumentazione meteorologica (completa di pluviometro e termometro) in continuo nelle vicinanze permette di osservare eventuali correlazioni tra precipitazioni-falda-cedimenti.

L'elaborazione del dato permette di seguire il cedimento in corso lungo l'asse verticale; nel caso di colonne estenso-inclinometriche è possibile avere indicazioni anche sullo spostamento in planimetria, oltre che sulla direzione stessa del movimento.

Procedura operativa di esecuzione delle misure manuali

Le misure manuali, a seconda della tipologia di assestometro, possono essere eseguite con sondino di misura magnetico (per assestimetri a punti magnetizzati tipo BRS, vedi Figura 37) dotato di nastro centimetrato

(lo strumento è simile a un freatimetro), con apposita sonda dotata di alette sporgenti (Figura 39), oppure con sonde estensimetriche incrementali manuali (Figura 38).

Le misure con sonda di misura magnetica sono eseguite in fori con anelli magnetici installati tra l'intercapedine del tubo e le pareti del sondaggio. La testa del foro, possibilmente, dovrà essere controllata periodicamente con rilievo topografico.

Le modalità di esecuzione sono le seguenti:

- 1) rimuovere la copertura del foro;
- 2) calare la sonda nel foro fino a intercettare il primo anello magnetico: la sonda emetterà un suono 2-3 cm prima del punto di misura;
- 3) continuare a calare lentamente la sonda fino a che lo strumento non smette di suonare;
- 4) annotare la profondità di interruzione dell'avviso acustico leggendo il cavo centimetrato alla testa del foro (tale zona, costituisce, di fatto, il punto di misura);
- 5) continuare a calare la sonda fino ad intercettare i successivi anelli magnetici, annotando la profondità dove la sonda interrompe il suono;
- 6) raggiunto il fondo del foro, ripetere le misure in risalita con le stesse modalità di esecuzione;
- 7) terminata la misura, pulire la sonda da eventuale fango e chiudere il pozzetto.

Per ridurre gli errori di misura, sarebbe opportuno eseguire almeno due misure consecutive sullo stesso foro, in modo tale da avere più valori di profondità da mediare per lo stesso anello (2 misure in discesa e 2 in risalita).



Figura 37 – Sonda di misura magnetica. Fonte: Pizzi Instruments S.r.l.

Se gli anelli magnetici sono installati all'esterno di un tubo inclinometrico, le misure vengono eseguite con una sonda estensimetrica incrementale collegata a un datalogger mediante un cavo con tacche di misura generalmente poste ogni metro. Per determinare i movimenti complessivi del tubo dovrà essere eseguita nello stesso giorno anche la relativa misura inclinometrica.

Le misure con estensimetri incrementali sono eseguite secondo le seguenti modalità:

- 1) rimuovere la copertura del foro;
- 2) calare la sonda a fondo foro e attendere circa 10 minuti per la sua stabilizzazione termica;
- 3) dopo il tempo di stabilizzazione, si può iniziare la misura procedendo dal basso verso l'alto oppure si recupera la sonda e si inizia la misura partendo dalla bocca del foro. L'anello magnetico installato a fondo foro o quello in prossimità della bocca foro saranno considerati punti fissi in fase di elaborazione del dato a seconda che la misura sia eseguita dal basso verso l'alto o viceversa;
- 4) acquisire il dato dell'anello di riferimento;
- 5) sollevare (o calare) la sonda fino a intercettare il successivo anello di riferimento;
- 6) acquisire la distanza misurata;
- 7) muovere la sonda fino ad intercettare gli altri anelli e acquisire il dato.

È importante effettuare le misure sempre sulla stessa guida del tubo (si consiglia di utilizzare la guida di riferimento della misura inclinometrica).



Figura 38 – Sistema incrementale T-Rex per la misura di cedimenti. Fonte: foto Sisgeo S.r.l.

La sonda con alette sporgenti a molla (Figura 39) montata in testa a un cavo metrato è invece utilizzata in fori attrezzati con tubi inclinometrici realizzati alternando sezioni più grandi con tratti a sezioni minore. Le misure con tale sonda sono condotte secondo le seguenti modalità:

- 1) rimuovere la copertura del foro;
- 2) calare la sonda fino a intercettare la prima zona a minore sezione;
- 3) superata la prima sezione ristretta, far risalire la sonda finché le alette si arrestano sul bordo dello spezzone a minor diametro. Annotare quindi la profondità;
- 4) calare la sonda fino a intercettare i successivi spezzoni a minor diametro e ripetere le operazioni descritte nel punto precedente;
- 5) raggiunto il fondo del foro, ritirare le alette e procedere con il recupero dello strumento;
- 6) pulire la sonda da eventuale fango e chiudere il pozzetto.



Figura 39 – Assestometro con alette sporgenti e retrattili. Fonte: foto Pizzi Instruments S.r.l.

Misure assestimentriche automatiche

Gli inclinometri con anelli magnetici possono essere automatizzati con l'installazione, a quote fisse, di strumentazione estensimetrica incrementale oppure con estenso-inclinometri. Questi ultimi strumenti consentono la misura anche dell'inclinometria.

Lo spostamento genera un segnale che viene convertito in misura ingegneristica (mm per l'assestometro e gradi per l'inclinazione). Per tale conversione, si applicano formule matematiche generalmente fornite dal costruttore dello strumento che contengono coefficienti specifici propri della tipologia di strumento.

4.2.6 Misure piezometriche

Misure piezometriche manuali

La misura del livello di falda, con riferimento allo studio della stabilità dei pendii, riveste un ruolo rilevante, in quanto la variazione del regime delle pressioni interstiziali comporta, a parità di altre condizioni, una modifica del fattore di sicurezza e, pertanto, costituisce una delle principali cause innescanti delle frane.

Inoltre, le misure della falda e della sua escursione risultano propedeutiche alla progettazione di interventi di mitigazione del rischio di frana.

Le misure piezometriche vengono effettuate, tramite l'utilizzo di un freatimetro e consentono di determinare la profondità del livello di falda rispetto al piano di campagna. Esse rappresentano una tipologia di dati fondamentale per il confronto della posizione del livello di falda e delle sue escursioni con la profondità della superficie di rottura della frana. Le misure vengono condotte secondo le seguenti modalità:

- 1) verifica della sensibilità del freatimetro agendo sul *trimmer* (vite) di controllo manuale, immergendo la sonda in un secchio d'acqua;
- 2) misura del livello statico della falda tramite freatimetro. Questa operazione si effettua calando la sonda nel pozzo/piezometro fino al raggiungimento del livello dell'acqua (che il freatimetro segnala mediante l'emissione di un segnale sonoro e/o luminoso) e annotando tale

profondità su apposita scheda di monitoraggio. Al fine di ottenere una misura rappresentativa, dopo l'emissione del primo avviso acustico, sollevare leggermente la sonda fino al suo spegnimento e ripetere la prova almeno due volte;

- 3) riferire la misura, in metri e in valore assoluto, sempre alla bocca del pozzo/piezometro. In caso di prima ispezione, o comunque per eventuale controllo, annotare la misura del Δh tra bocca pozzo e piano campagna (indicare con numero positivo se il bocca pozzo è sopraelevato rispetto al piano campagna; in caso contrario, annotare la misura con numero negativo);
- 4) pulizia della sonda freatimetrica.

Un monitoraggio di questo tipo ha quindi la funzione di verificare, ad una scala di tempi estesa negli anni, il comportamento della falda rispetto al/ai piano/i di scorrimento e di definire un livello medio che costituisce una buona base conoscitiva, specie nel caso di fenomeni franosi di grandi dimensioni a cinematisimo lento.

Misure piezometriche automatiche

Le escursioni che interessano la falda nel breve periodo e che possono determinare un peggioramento delle condizioni di stabilità del versante hanno bisogno di un approccio di studio differente che necessariamente deve considerare un monitoraggio automatico con acquisizioni giornaliere o orarie.

L'aggiornamento tecnologico per lo sviluppo di una Rete di monitoraggio deve essere mirato all'utilizzo di un numero sempre maggiore di sonde freatimetriche

automatiche. Queste, essendo relativamente poco costose e di facile installazione, portano senza dubbio ad un miglioramento delle condizioni di acquisizione soprattutto considerando la frequenza di registrazione.

Inoltre, a prescindere dal tipo di strumentazione che si intende utilizzare (sensori piezometrici elettrici, circuiti idraulici chiusi, sensori di temperatura per compensazione, sonde multiparametriche) le operazioni da effettuare sono molteplici.

Nel caso di sonde freatimetriche automatiche, le operazioni da eseguire sono:

- 1) effettuare sempre una misura freatimetrica manuale per tarare il datalogger o per controllare eventuali anomalie;
- 2) collegare, un dispositivo portatile con la sonda freatimetrica fissa, che può funzionare anche da datalogger, e attivare quindi lo scarico dei dati mediante software dedicato;
- 3) controllare in campo, mediante grafici, l'andamento delle freatimetrie nel tempo, individuando eventuali comportamenti anomali nella registrazione;
- 4) elaborare a tavolino i dati in foglio di calcolo e creare grafici orari e/o giornalieri da confrontare alle curve inclinometriche e/o pluviometriche.

Nel grafico sottostante (Figura 40) si evidenzia un possibile confronto tra i dati piezometrici automatici con i dati inclinometrici.

Per le specifiche tecniche dei tubi piezometrici, dei freatimetri e delle sonde automatiche si rimanda ai Paragrafi A.4.8, A.4.9 e A.4.10.

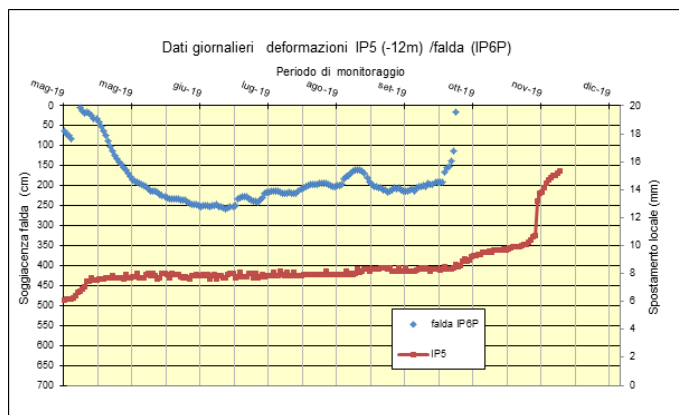


Figura 40 – Confronto dei dati piezometrici automatici con l'evoluzione della deformazione nell'inclinometro IP5 - Sito del Pero - Varazze (SV) (dati giornalieri - elaborazione) Fonte: ARPAL

4.2.7 Misure di suzione

La pressione dell'acqua di porosità, con le sue oscillazioni, condiziona in maniera significativa il comportamento meccanico dei terreni. In condizioni di parziale saturazione essa è negativa (vale a dire minore della pressione atmosferica). In effetti nella letteratura tecnica dedicata ai terreni parzialmente saturi si preferisce far riferimento alla suzione, cioè alla differenza fra pressione dell'aria e pressione dell'acqua di porosità. Per valutare le condizioni di sicurezza che caratterizzano questi terreni è necessario eseguire accurate misure di suzione.

I tensiometri commerciali (vedi Paragrafo A.4.11) sono strumenti in grado di misurare la pressione interstiziale negativa, operazione che i piezometri non sono in grado di eseguire. Nella versione più semplice il tensiometro consiste in un tubo di materiale sintetico dotato alla base di un elemento ceramico (capsula), attraverso il quale il tubo cede l'acqua in esso immagazzinata al terreno circostante, fino al raggiungimento della condizione di equilibrio idraulico. In questa condizione la suzione nella capsula ceramica uguaglia quella nel terreno con cui è a contatto; ciò avviene dopo un certo tempo detto di equalizzazione o di risposta.

La misura della pressione dell'acqua nel tubo può essere effettuata mediante un vacuometro analogico

installato all'estremità superiore del tubo, laddove esso fuoriesce dal terreno. In tal caso la misura deve essere eseguita manualmente da un operatore, con una frequenza preventivamente fissata dal piano di monitoraggio, in funzione del tipo di strumento, ma soprattutto della permeabilità non satura del terreno. Se invece si intende automatizzare il sistema di misura, è necessario installare in luogo del vacuometro analogico un trasduttore digitale, acquisito secondo una prefissata scansione temporale e automaticamente mediante un data logger con idonea capacità di memorizzazione o predisposto per trasmettere i dati in tempo reale ad un centro di raccolta ed elaborazione.

Sia nel caso di monitoraggio manuale sia automatico la suzione viene misurata alla testa del tubo (s_m) e per essere riportata alla profondità della capsula ceramica (s_c) deve essere corretta: nel tubo la distribuzione di suzione è idrostatica a partire dal valore che regna nella capsula (Figura 41). È necessario quindi sottrarre alla suzione misurata quella corrispondente alla colonna d'acqua (h) fra capsula e punto di misura:

$$s_c = s_m - h \cdot \gamma_w$$

Il simbolo γ_w indica il peso specifico dell'acqua.

I tensiometri, poiché cedono acqua al terreno, tendono a desaturarsi nel giro di alcuni giorni o al più di qualche settimana in dipendenza del tipo di terreno e delle condizioni atmosferiche, per cui devono essere accuratamente mantenuti, cioè periodicamente riempiti di acqua distillata. Dopo il riempimento il tensiometro non è più in equilibrio idraulico con l'acqua di porosità del terreno circostante, per cui bisogna attendere il tempo di equalizzazione per riprendere le misure. La manutenzione rappresenta un problema abbastanza rilevante perché, soprattutto quando si allestisce un sito strumentato con misura automatica dei dati, si tende a non inviare frequentemente personale sul sito.

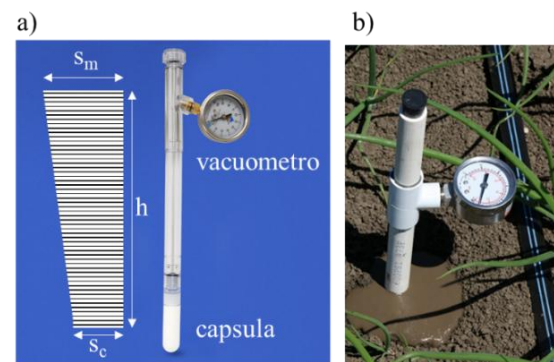


Figura 41 – Tensiometro: a) elementi costitutivi e profilo di suzione all'interno del tubo, b) installazione in sito

Sfortunatamente la suzione negli strati superficiali può attingere valori molto elevati che, soprattutto nel periodo estivo e in terreni poco vegetati, superano di gran lunga il fondoscala degli strumenti tradizionali. È pur vero che quasi sempre l'interesse tecnico per le misure di suzione è decisamente maggiore nel periodo umido, quando vengono attinti i valori minimi, anche di pochi kPa (sono questi che condizionano i problemi di stabilità).

La sola suzione in genere non è sufficiente a definire lo stato del terreno, né la sua resistenza, in quanto il comportamento idraulico di un terreno non saturo è isteretico e quindi non univocamente dipendente dalla suzione. Deve essere contestualmente misurato anche

il contenuto d'acqua (in genere con sonde TDR) alla stessa profondità a cui sono installati i tensiometri.

Strumenti alternativi

Sono stati sperimentati in laboratorio prototipi di trasduttori (Ridley & Burland, 1993; Tarantino e Mongiovi, 2003) per la misura diretta della suzione, con fondoscala anche piuttosto elevato, vale a dire di alcune centinaia di kPa basati su diversi principi di funzionamento. Le applicazioni di queste misure al sito sono però esigue.

Più promettente appare la sperimentazione di trasduttori basati sulla dissipazione di calore (FTC sensors), nei quali viene misurato l'incremento di temperatura nella capsula porosa che costituisce la presa del tensiometro, per effetto di un'assegnata quantità di energia fornita ad hoc all'atto della misura. Per ovvie ragioni, legate all'elevata capacità termica dell'acqua, l'incremento di temperatura è tanto maggiore quanto minore è il contenuto di acqua della capsula ceramica. Questi trasduttori sono stati sperimentati con successo in sito, mostrando affidabilità e soprattutto bassissima necessità di manutenzione.

Compatibilità fra strumenti e terreni

Si possono correttamente eseguire misure di suzione in tutti gli strati di terreno di granulometria da limo-argillosa a sabbiosa; restano escluse le ghiaie (ad esempio le pomice) in cui, a causa della granulometria grossolana, non sembra possibile allo stato attuale delle conoscenze eseguire affidabili misure in sito, per la difficoltà di assicurare il contatto tra capsula e grani.

Rappresentazione e interpretazione delle misure

Il modo più usuale ed efficace di rappresentare le misure di suzione è diagrammarle in funzione del tempo, sovrapponendo le misure a diverse profondità (Figura 42). Gli strumenti più prossimi al piano campagna mostrano oscillazioni più pronunciate e più pronte (rapide) rispetto ai tensiometri profondi, in virtù della loro minore distanza dal bordo su cui è applicata la condizione idraulica che regola il fenomeno. Queste

oscillazioni sono conseguenza di un complesso fenomeno di interazione tra l'umidità del sottosuolo e l'atmosfera, consistente nell'infiltrazione d'acqua nei giorni di pioggia e nell'evapotraspirazione nei giorni asciutti e in particolare soleggiati.

In genere si osserva una rapida riduzione di suzione a seguito dell'evento di pioggia (rappresentato in Figura 42 da un avvicinamento del diagramma al piano campagna) e un processo decisamente più lento di ripristino delle condizioni precedenti nei giorni successivi.

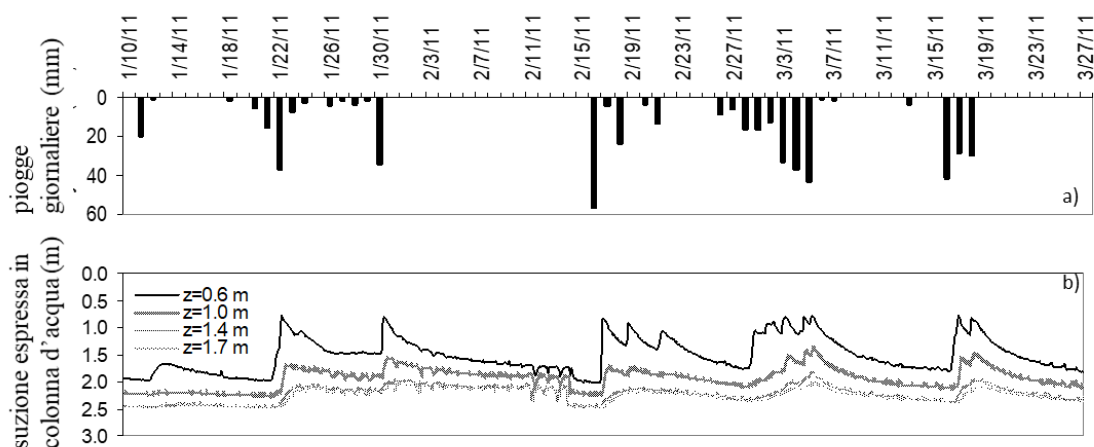


Figura 42 – Misure in un sito sperimentale: a) piogge giornaliere, b) suzione misurata a varie profondità; la suzione è espressa in colonna d'acqua (s_d/γ_w), come profondità dal piano campagna. Fonte: Urciuoli *et alii*, 2016

4.3 MISURE METEO-PLUVIOMETRICHE

4.3.1 Misure pluviometriche

Le precipitazioni rappresentano un fattore fondamentale nel determinare condizioni di pericolosità idrogeologica.

Che la stabilità dei versanti sia influenzata dalle variabili meteorologiche è un fatto assodato. In molti casi, i movimenti di massa sono dovuti ad un aumento delle pressioni interstiziali, con una conseguente diminuzione della resistenza al taglio dei suoli. Le piogge brevi e intense sono alla base del verificarsi di frane superficiali e di colate rapide, al contrario di quelle profonde che sembrerebbero, sulla base di molteplici studi e approfondimenti, essere attivate, nella maggior parte dei casi, da piogge poco intense ma prolungate nel tempo.

Le misure a terra e puntuali della precipitazione avvengono tramite il pluviometro (vedi Paragrafo A.5.1). Per valutare la pluviometria di un'area occorrono quindi più stazioni collocate sul territorio secondo una maglia, interpolando i valori misurati da tutte le stazioni della rete. La consistenza della rete (cioè il numero di pluviometri per km²) è fondamentale al fine di ottenere i dati necessari per le previsioni e le valutazioni del rischio idrogeologico nel tempo, andando a ricostruire il campo di precipitazione. Quando si progetta una rete di stazioni, si deve tenere presente che l'analisi dei dati è molto più semplice se si utilizzano le stesse tipologie di strumenti di misura, ubicati secondo criteri omogenei.

La densità ottimale della rete viene determinata sulla base dell'errore di stima accettabile. Il valore massimo accettabile dell'errore di stima deve essere valutato in relazione alle caratteristiche delle precipitazioni nelle

differenti zone omogenee. L'esigenza tecnico-scientifica di disporre di un'elevata densità informativa dei dati pluviometrici deve conciliarsi con quella economico-finanziaria, non solo legata alla realizzazione della rete di monitoraggio ma anche ai costi della manutenzione con orizzonti di lungo periodo.

La disposizione topologica a maglie quadrate è quella che meglio consente di ricostruire la distribuzione spaziale della precipitazione di interesse.

In zone montane, con orografia complessa e forti dislivelli, i valori di pioggia possono differire in maniera sensibile da punto a punto anche in occasione dello stesso evento. Le differenze di intensità dipendono da molti fattori, tra i quali vanno segnalate l'orientazione delle valli, la quota e i venti. Diventa di fondamentale importanza quindi la progettazione di una rete di pluviometri, in prossimità della frana da monitorare, che consenta di correlare l'evolversi del dissesto con le precipitazioni registrate nel sito.

In caso di territori particolarmente vulnerabili, caratterizzati da numerose frane di diversa natura, può essere utile un sistema integrato che metta in rete fra loro i diversi tipi di monitoraggi predisposti su ogni singola area di dissesto. La zona di riferimento può essere ampia come una regione oppure ridursi ad una vallata. Il principale obiettivo di queste soluzioni è di accentrare in un'unica sala operativa il controllo del monitoraggio e l'analisi di molti dissesti in tempo reale. I dati derivanti dal monitoraggio di ogni dissesto costituiscono informazioni preziose che aiutano a comprendere la possibile evoluzione dei fenomeni di frana di quella specifica zona.

Pur garantendo un adeguato posizionamento della stazione di misura pluviometrica (secondo le indicazioni dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia) permangono comunque diverse concause di errore di misura. La più rilevante deriva dall'accelerazione, verticale ed orizzontale, del vento in corrispondenza del pluviometro, che devia la traiettoria delle più piccole gocce d'acqua (effetto *splash*). Ne deriva che la quantità d'acqua raccolta è minore della quantità d'acqua che effettivamente cade al suolo. La turbolenza al di sopra del pluviometro può essere ridotta

scegliendo un sito protetto dall'effetto del vento, ma che non determini la diminuzione della quantità di precipitazioni raccolta dallo strumento.

In funzione del particolare fenomeno franoso analizzato assume particolare importanza lo studio e l'analisi delle precipitazioni in termini di altezza o intensità oraria/sub-oraria (es. per fenomeni superficiali e colate detritiche) o di cumulata su più giorni o settimane (fenomeni profondi) (Figura 43).

Inoltre, spesso uno dei fattori determinanti per l'innescare della frana è la condizione iniziale di imbibizione, cioè la pioggia precipitata 15-30 giorni antecedenti l'evento, che unitamente alle proprietà idrologiche del suolo, contribuisce a determinare le condizioni necessarie ad innescare l'evento.

L'acquisizione dei dati pluviometrici tramite rete di monitoraggio in telemisura pone inoltre la necessità di automatizzare le procedure di controllo e validazione dei dati in tempo reale in modo da eliminare valori anomali o errati e se possibile correggerli/ricostruirli, in conseguenza dell'esigenza di una tempestiva pre-validazione degli stessi, anche sito specifica, in fase di monitoraggio dei versanti.

Se si vuole conferire al monitoraggio pluviometrico funzione di allertamento, occorre pervenire alla definizione di soglie pluviometriche critiche (Paragrafi 2.2.3 e 2.2.4), oltre le quali è assai probabile che il fenomeno controllato evolva in maniera rapida in una frana. L'identificazione di tali soglie è l'elemento più critico rispetto ai processi di governo del rischio frane orientando conseguentemente i criteri di installazione delle stazioni di monitoraggio. Per ogni frana occorre creare, sulla base di una serie storica, un modello che possa portare alla definizione di soglie critiche. Il processo è comunque complesso con ampi margini di indeterminazione e incertezza e una soglia, identificata con tali criteri, deve comunque essere intesa in termini probabilistici e con funzione di preallarme. Frane superficiali e colate detritiche sono alcune delle tipologie il cui innesco ed evoluzione sono direttamente dipendenti dalle precipitazioni registrate. Le soglie vanno aggiornate periodicamente con l'acquisizione di nuovi dati e informazioni.

In particolare, le soglie pluviometriche identificano il valore minimo o massimo di precipitazione necessaria per innescare o meno un processo per fissata durata. La soglia minima definisce il valore sotto il quale il processo non si verifica mai; la soglia massima, invece, definisce il valore sopra il quale il processo si verifica sempre. La precipitazione viene espressa in termini di intensità o altezza e dunque la soglia viene descritta da una relazione funzionale di potenza sul piano intensità/altezza-durata i cui parametri vengono stimati empiricamente dall'analisi degli eventi meteorici storici che hanno innescato eventi franosi. In fase di monitoraggio i valori di pioggia registrati dalla rete pluviometrica vengono confrontati con le soglie pluviometriche tenendo conto anche della pioggia antecedente l'evento e quindi del grado di saturazione iniziale del suolo, determinando le fasi di allertamento.

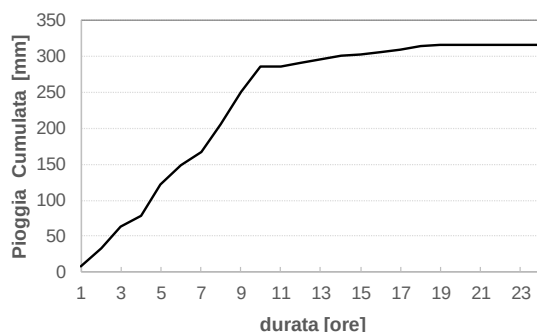


Figura 43 - Esempio grafico pioggia cumulata del 28 Novembre 2020 registrata da una stazione della rete di monitoraggio di ARPA Sardegna.

4.3.2 Misure anemometriche

In una rete per il monitoraggio delle frane gli anemometri (vedi Paragrafo A.5.4) sono utilizzati per la stima dell'effetto meccanico del vento. Il monitoraggio può essere di tipo diretto, ovvero dello strato limite superficiale, oppure a più grande scala, ovvero dello strato limite planetario appena al di sopra dello strato limite superficiale.

La prima misura permette di misurare la forzante meccanica diretta del vento su una specifica porzione di

una frana mentre la seconda misura è utile per conoscere il campo di vento su un'area più vasta, ad esempio su un'intera frana o su un sistema più grande.

Per la misura diretta dello strato limite superficiale è utile posizionare un anemometro vicino al terreno; in generale si predilige l'altezza di 2 m, ma non sono da escludere altre altezze dal suolo in funzione della conformazione del terreno da monitorare.

Per avere una misura che rappresenti meglio il campo di vento a grande scala è invece necessario posizionare l'anemometro a 10 m d'altezza in un punto possibilmente privo di ostacoli.

La stima dell'effetto meccanico del vento su una frana dipende dalle caratteristiche del terreno, dall'eventuale presenza di vegetazione o dallo stato di eventuali manufatti presenti dell'area.

Tuttavia, una stima media dell'effetto del flusso laminare del vento può essere ricavata dalla Scala Beaufort internazionale (Tabella 2) che descrive gli effetti medi di un vento che soffi per 10 minuti in maniera costante a 10 m d'altezza rispetto al suolo. Si tratta di una stima del tutto teorica e di carattere generale, ma che può essere utilizzata come un'indicazione per ipotizzare i possibili effetti causati da episodi di vento.

Tra gli effetti indiretti della misura di vento sul monitoraggio di una frana vi è il contributo alla stima dell'evapotraspirazione che, a sua volta, è un elemento del bilancio idrico del terreno. Il vento misurato a 2 m dal suolo, infatti, entra nelle diverse formule di Penman (Penman, Penman FAO e Penman-Monteith), cioè in una delle famiglie di formule più comunemente adottata per calcolare l'evapotraspirazione di riferimento.

In questo secondo caso è importante che la misura anemometrica rappresenti quanto più possibile la porzione di frana di cui si intende stimare il bilancio idrico.

L'effetto standard dato dalla descrizione visiva della Scala Beaufort è relativo ad un vento che abbia registrato un'intensità media su 10 minuti a 10 m d'altezza.

Tabella 2 – Scala Beaufort internazionale ed effetti sulla terraferma

GRADO	TERMINE DESCRITTIVO	INTENSITÀ		DESCRIZIONE VISIVA DEGLI EFFETTI SULLA TERRAFERMA
		[nodi]	[m/s]	
0	Calma	< 1	$0,0\text{m/s} \leq V < 0,3\text{m/s}$	Il fumo sale verticalmente.
1	Bava di vento	1÷3	$0,3\text{m/s} \leq V < 1,6\text{m/s}$	La direzione del vento è visibile dal movimento del fumo ma non dalla banderuola segnamento.
2	Brezza leggera	4÷6	$1,6\text{m/s} \leq V < 3,4\text{m/s}$	Si avverte il vento sulla faccia; le foglie si agitano; banderuole ordinarie in movimento.
3	Brezza tesa	7÷10	$3,4\text{m/s} \leq V < 5,5\text{m/s}$	Foglie e ramoscelli in movimento costante; le bandiere leggere iniziano a spiegarsi.
4	Vento moderato	11÷16	$5,5\text{m/s} \leq V < 8,0\text{m/s}$	Si sollevano polvere e pezzi di carta; rami degli alberi in movimento.
5	Vento teso	17÷21	$8,0\text{m/s} \leq V < 10,8\text{m/s}$	Gli alberelli ondeggiano; si increspano le acque interne (laghi, stagni, ecc.).
6	Vento fresco	22÷27	$10,8\text{m/s} \leq V < 13,9\text{m/s}$	Grossi rami in movimento; difficoltà nell'uso degli ombrelli.
7	Vento forte	28÷33	$13,9\text{m/s} \leq V < 17,2\text{m/s}$	Interi alberi in movimento; camminando controvento si prova fastidio in faccia.
8	Burrasca	34÷40	$17,2\text{m/s} \leq V < 20,8\text{m/s}$	Si spezzano i rami degli alberi; generale impedimento all'avanzamento.
9	Burrasca forte	41÷47	$20,8\text{m/s} \leq V < 24,5\text{m/s}$	Si verificano leggeri danni alle costruzioni (si spostano piccoli oggetti e le tegole).
10	Tempesta	48÷55	$24,5\text{m/s} \leq V < 28,5\text{m/s}$	Considerevoli danni alle abitazioni; sradicamento di alberi; onde molto alte in mare.
11	Tempesta violenta	56÷63	$28,5\text{m/s} \leq V < 32,7\text{m/s}$	Danni ingenti su vasta scala.
12	Uragano	> 63	$V \geq 32,7\text{m/s}$	Danni ingentissimi in breve tempo su vasta scala.

5 INSTALLAZIONE E SISTEMI DI ACQUISIZIONE

Come anticipato nel Capitolo 3, il progetto dovrà prevedere, tra la documentazione allegata, anche tutte le specifiche dettagliate di installazione dei componenti principali (es. strumenti, tipologia di collegamento, tipologia e schema di acquisizione/trasmisione) e le indicazioni per la stesura di monografie per ciascuna stazione di misura.

Più il sistema risulterà complesso (sistema non standard), maggiore attenzione andrà riposta negli allegati grafici e documentali.

Una attenzione particolare dovrà essere dedicata a tutti gli aspetti relativi alle connessioni e ai collegamenti, più frequentemente soggetti a danneggiamento accidentale e/o a deterioramento nel tempo. La scelta dei cavi dei sistemi di collegamento, sia quelli di alimentazione che quelli di trasmissione del segnale dovranno rispondere ai migliori standard in relazione alle caratteristiche elettriche, meccaniche e ambientali.

Nella fase di installazione dei sistemi di acquisizione e nella definizione delle specifiche, tutte le componenti relative alla sicurezza nelle aree di lavoro dovranno essere tenute debitamente in considerazione in funzione della peculiarità del sistema adottato (scavi e perforazioni in terra e rocce per i cablaggi, realizzazione di manufatti di appoggio in cls, realizzazione di linee elettriche e di trasmissione dati).

Bisognerà preventivamente prendere in considerazione l'utilizzo di mezzi speciali (es. elicotteri per i cantieri in quota) così come di personale specializzato. In alcuni casi la stazione appaltante dovrà richiedere anche la formazione specifica dei propri tecnici sia per l'installazione che per la realizzazione delle relative opere accessorie qualora necessarie (es. linee elettriche dedicate, ingressi e uscite cavi, dispositivi di apertura o chiusura, sistemi di regolazione termica, protezioni meccaniche e carter, cavidotti).

Fondamentale è la valutazione preliminare delle condizioni ambientali di contesto al fine di prevedere un adeguato sistema di protezione dei singoli componenti anche da possibili manomissioni esterne (es. atti vandalici, animali) o dalla presenza di eventuali ostacoli (es. sviluppo di vegetazione). Anche l'impossibilità di accesso agli strumenti in seguito all'installazione dovrà essere tenuta debitamente in conto in fase di installazione ed implementazione del sistema.

La modalità di installazione dovrà essere chiaramente definita nelle schede e nei manuali della strumentazione e della componentistica. Tutta la documentazione tecnico amministrativa (permessi e autorizzazione, licenze, schede tecniche di installazione, certificati e conformità degli strumenti) dovrà essere verificata e custodita.

Per quanto riguarda il sistema di acquisizione, le sue caratteristiche e la sua definizione sono funzione della finalità stessa della rete di monitoraggio. Esso quindi, per una rete con finalità conoscitiva avrà dei vincoli di ridondanza e funzionalità inferiori rispetto, ad esempio, ad uno con finalità di sorveglianza e/o di allertamento (Paragrafo 2.1 e 2.2).

Oltre alla finalità, il sistema di acquisizione dipenderà strettamente dal tipo di monitoraggio richiesto: i) manuale quando il sistema spesso coincide con lo strumento di acquisizione portatile; ii) automatico con acquisizione centralizzata o distribuita; iii) misto come somma delle due precedenti.

Ultimo ma non meno importante parametro da tenere in considerazione nella fase di installazione, è la verifica della presenza di fenomeni di disturbo ai segnali diretti o indiretti, che può da solo inficiare l'affidabilità del dato e dell'intero sistema.

Per maggior dettaglio sull'installazione e l'acquisizione si rimanda comunque alle specifiche tecniche previste in appendice A per ogni singolo strumento.

5.1 STRUMENTAZIONE DI MISURA

La scelta della strumentazione deve tener conto di un insieme di condizioni imprescindibili quali la tipologia di frana da monitorare, le velocità messe in gioco e le grandezze fisiche, chimiche ed elettriche da misurare (Figura 44). Inoltre, bisogna tenere in considerazione alcune caratteristiche che per ogni singolo strumento ne possono giustificare l'utilizzo o meno, in particolare:

- campo di misura;
- limiti di utilizzo (ad esempio *range* di temperatura, quota, ecc.);
- precisione;
- accuratezza;
- ripetibilità della misura;
- affidabilità;
- disponibilità del dato (sistemi di memorizzazione interna);
- necessità energetiche per il funzionamento;
- controllabilità da remoto;
- sistemi di interrogazione e configurazione semplici (*user friendly*);
- necessità logistiche per l'installazione;
- facilità nella manutenzione programmata o straordinaria.



Figura 44 – Esempio di strumentazione di misura (GNSS) installata in campo. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

Generalmente, oltre alla strumentazione di misura, gli apparati che si trovano nei sistemi automatizzati sono i seguenti:

- 1) sistema di mantenimento dell'alimentazione elettrica (si veda Paragrafo 5.3 per dettagli);
- 2) datalogger;
- 3) workstation o server di acquisizione ed elaborazione (posizionate solitamente nella Sala monitoraggi). Possono essere presenti anche sistemi analoghi al punto 2 per la ricezione dei dati (si veda Paragrafo 5.6 per dettagli);
- 4) sistema di trasmissione dati (si veda Paragrafo 5.5 per dettagli);
- 5) server FTP o sFTP per passaggio dei dati secondo protocolli definiti caso per caso per *switch* tra diverse sottoreti (si veda Paragrafo 5.6 per dettagli).

5.2 CABLAGGI E ACCESSORI PER L'INSTALLAZIONE

Come già visto nei paragrafi precedenti, un sistema di monitoraggio si compone di diverse parti, le quali comunicano tra di loro mediante cablaggi. Al fine di poter garantire un collegamento duraturo e stabile nel tempo, occorre predisporre una installazione che abbia determinate caratteristiche tecniche. In particolare, laddove fattibile ed economicamente sostenibile, potrebbe essere opportuno adottare le seguenti misure:

- predisposizione platea di dimensioni adeguate, con traliccio per accogliere il sistema di alimentazione elettrico (se fotovoltaico), i quadri che accolgono gli apparati di registrazione e trasmissione, oltre ad eventuali accessori esterni (antenne, sistemi GPS, ecc.). Per alcune installazioni, può essere prevista anche la realizzazione di apposite costruzioni in legno o cemento, oppure protezioni con gallerie prefabbricate;
- impiego di cavi elettrici con caratteristiche di robustezza ed isolamento elettrico tali da garantirne l'utilizzo in ambienti esterni. Meglio sarebbe predisporre passacavi integrati nella platea.

Per quanto riguarda l'installazione sul campo, questo aspetto dipende dalle condizioni al contorno e va studiato in modo accurato, per identificare ad esempio il mezzo di trasporto più idoneo (furgone, autocarro, elicottero, ecc.) (Figura 45, Figura 46, Figura 47).



Figura 45 – Realizzazione di un intervento particolarmente importante per la protezione dei sistemi. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura 46 – Esempio di passacavo interrato per ottimizzare alcune installazioni particolarmente complesse. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura 47 – Fase di costruzione di un monitoraggio idrogeologico, che integra nella platea la parte di cavi e cablaggi. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

5.3 SISTEMI DI ALIMENTAZIONE

I sistemi di alimentazione rappresentano uno dei punti nevralgici di una intera rete di monitoraggio, in quanto, ogni apparato, per quanto poca energia elettrica consumi, ha comunque necessità di ricevere la sua fonte energetica per garantire la continuità di funzionamento di un intero sistema.

Occorre scegliere il sistema di alimentazione più idoneo per l'installazione, considerando che generalmente viene data la seguente graduatoria di priorità:

- alimentazione da rete 230 V (vedi Figura 48). Laddove è disponibile, a scapito di costi di installazione maggiori, si tratta della soluzione che garantisce la continuità dei dati soprattutto in zone di montagna dove spesso durante l'inverno manca totalmente l'irraggiamento solare;
- sistemi di alimentazione ad isola. Usualmente, il sistema più diffuso è rappresentato dall'alimentazione con pannelli fotovoltaici (vedi Figura 49), dimensionati in modo tale da poter erogare il corretto quantitativo di corrente elettrica nel periodo più gravoso dell'anno (inverno);
- gruppi elettrogeni e batterie tampone. Laddove l'energia proveniente da sole non è sufficiente, si può optare per gruppi elettrogeni a motore endotermico. La soluzione può risultare più gravosa dal punto di vista della gestione,

necessitando di frequenti rabbocchi di carburante nel serbatoio;

- altri sistemi, di cui è presente un dettagliato approfondimento negli allegati tecnici.



Figura 48 – Alimentazione da rete, con impianto realizzato ad hoc dall'impianto di illuminazione di una galleria su Strada Regionale.
Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura 49 – Esempio rappresentativo di impianto con pannelli fotovoltaici, ampliato nel corso del tempo. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

5.4 STRUMENTAZIONE PER L'ACQUISIZIONE DEI DATI

La strumentazione per acquisire le misure viene usualmente scelta in base alla tipologia e alla criticità del settore da tenere sotto controllo, e deve rispondere alle esigenze di poter seguire, possibilmente con il minor dispendio energetico possibile (sia dal punto di vista della necessità dell'alimentazione elettrica, sia per quanto riguarda gli interventi "umani" necessari al mantenimento in funzione del sistema), l'evoluzione del fenomeno nel breve, medio o lungo periodo.

A seconda quindi della finalità ultima, occorrerà costruire una infrastruttura di misurazione, acquisizione, trasmissione ed elaborazione dati che potrà avere componentistica con caratteristiche tecniche diverse.

Il datalogger è quindi uno dei principali elementi costitutivi di una installazione di monitoraggio, e può prevedere al suo interno diverse componentistiche, e può integrare, ad esempio, anche le operazioni di trasmissione dei dati (vedi Figura 50).

La scelta della tipologia di datalogger dovrà tenere in considerazione i seguenti aspetti fondamentali:

- utilizzo di protocolli di registrazione dati in formato open, oppure convertibili in formati open mediante apposito software fornito dal produttore;

- possibilità di configurazione da remoto, ivi compresa la taratura delle grandezze misurate;
- un *range* di funzionamento che sia idoneo con le condizioni ambientali alle quali è destinato;
- la possibilità di poter disporre di un congruo numero di slot di espansione, per il collegamento di ulteriori e futuri strumenti integrativi.

È auspicabile, inoltre, nella scelta della centralina, che questa disponga di modalità di riavvio o hard reset da remoto.

Da pochi anni sono disponibili centraline “*all-in-one*”, vale a dire che diversi produttori integrano all'interno della propria strumentazione sia la parte di acquisizione del segnale, sia la parte di comando della strumentazione, sia gli apparati di trasmissione del dato. In questi casi, usualmente viene resa disponibile una GUI *web-based* che incorpora un sistema operativo e che permette la gestione di tutta la procedura di monitoraggio.

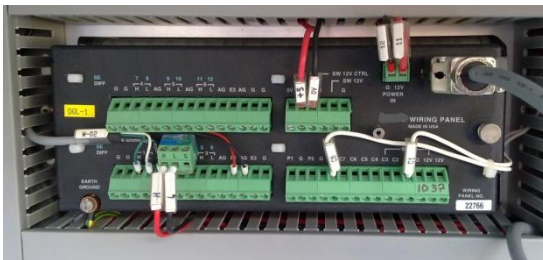


Figura 50 – Esempio di datalogger di largo impiego. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

5.5 SISTEMI DI TRASMISSIONE DEI DATI

Uno dei punti critici per la funzionalità del sistema di monitoraggio di una frana, specialmente quando questo è finalizzato all'*early warning*, è dato dalla possibilità di acquisire i dati con le modalità desiderate, secondo le specifiche di progettazione. È infatti facile immaginare le conseguenze che si possono avere se in una situazione di emergenza, coloro che sono delegati all'interpretazione dei dati e alla diramazione delle allerte non ricevessero informazioni. Eppure, le stesse condizioni che determinano l'emergenza dovuta alla frana, possono essere le stesse che mandano in crisi

una rete di trasmissione dati. Basti pensare ad un evento meteorico intenso e temporalesco, che può mandare in crisi un sistema di trasmissione radio.

È quindi molto importante valutare, quando necessaria, la ridondanza dei sistemi di trasmissione al fine di non perdere il flusso dati utile a supportare le decisioni per l'eventuale attivazione di misure di emergenza.

Le apparecchiature per la trasmissione dei dati sono, per ovvi motivi, quasi universalmente di tipo radioelettrico. Negli ultimi anni, l'evoluzione della tecnologia ha portato ad utilizzare apparecchi che sfruttano frequenze allocate sempre più nella parte alta dello spettro elettromagnetico (spettro EM), in quanto ciò permette di usufruire di una maggiore larghezza di banda.

La maggiore larghezza di banda consente di impiegare con successo strumentazioni di monitoraggio che trasmettono grandi volumi di dati, come i radar interferometrici e le webcam di videosorveglianza, ed è quindi diventata uno dei requisiti fondamentali delle reti di trasmissione quando si impiegano queste apparecchiature. Ad oggi, quindi, i sistemi di trasmissione dati impiegano frequenze che sono situate nelle bande UHF (*Ultra High Frequency*) dello spettro elettromagnetico, corrispondente ad intervalli di frequenza tra i 380 MHz e i 2.600 MHz.

Nello spettro della banda UHF ricadono sia le reti di trasmissioni dati a frequenza più bassa (es.: 460 MHz) sia i servizi PMR (Professional Mobile Radio), che le frequenze di trasmissione della telefonia cellulare, quali la GSM (900 e 1.800 MHz) e la UMTS (800-2.600 MHz).

In base a quanto finora affermato, quindi, risulterebbe vantaggioso l'impiego di frequenze di telefonia cellulare, impiego che è reso anche agevole dalla diffusione sul mercato di una gran quantità di equipaggiamenti (modem, router, antenne, ecc.) a basso costo, in quanto ciò permette di disporre di una notevole larghezza di banda a costi ragionevolmente bassi.

Prima di indirizzare la propria scelta verso tali tipi di attrezzature GSM/UMTS occorre compiere alcune ulteriori valutazioni:

- 1) I segnali ad alta frequenza possono essere schermati dalle asperità del terreno. In condizioni di montagna o collina occorre tener presente che il trasmettitore del sistema di monitoraggio deve avere in portata ottica almeno un ripetitore della rete GSM o UMTS. Occorre quindi verificare la presenza del segnale di rete sul sito d'intervento prima di adottare la trasmissione tramite rete cellulare;
- 2) Al contrario, reti di tipo UHF a frequenza più bassa possono permettere la trasmissione dei dati su distanze maggiori ed in presenza di ostacoli (vedi Figura 52);
- 3) Le reti GSM/UMTS sono gestite da aziende private che non hanno un obbligo di continuità del servizio. In altre parole, nel caso in cui il monitoraggio persegua finalità di tutela della pubblica incolumità, si dovrà valutare accuratamente la possibilità di ridondare la trasmissione dei dati attraverso sistemi alternativi (vedasi più avanti). Tale valutazione dovrà essere contestualizzata alla particolare situazione critica da gestire e non è possibile dare indicazioni particolari in questa sede.

Premesso quanto sopra, non si può quindi escludere che in alcuni casi risulti più conveniente impiegare sistemi di trasmissione dati eserciti da soggetti pubblici, quali ad esempio le reti radio regionali di protezione civile o le reti meteorologiche dei centri funzionali, la cui disponibilità può permettere di disporre di flussi radio garantiti o anche solo mettere a disposizione siti attrezzati per l'installazione di piccoli ripetitori.

Per la ridondanza del segnale a banda larga, una soluzione in zone di difficile accesso può essere oggi rappresentata, in alcuni casi critici, da sistemi internet satellitari (vedi Figura 51).

Si tratta di sistemi usati anche nell'ambito della protezione civile che, con abbonamenti dal costo inferiore a 1.000 €/anno, permettono di disporre di una copertura a prova di condizioni meteo avverse e con copertura su tutto il territorio nazionale. Unico punto critico di questa soluzione è rappresentato dal forte assorbimento di energia (cfr. Paragrafo A.6.3).



Figura 51 - Esempio di installazione di sistema broadband satellitare (antenna a parabola bidirezionale in basso) per la ridondanza dei dati del sistema di monitoraggio della Frana del Mont de La Saxe (Aosta): Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura 52 - Esempio di installazione di comunicazione punto-punto in UHF (antenna a parabola bidirezionale in basso) per la trasmissione di dati accelerometrici dalla cresta della Brenva nel Massiccio del Monte Bianco. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

5.6 SERVER DI ACQUISIZIONE

Una volta configurato l'intero sistema di monitoraggio sul campo, occorre fare in modo che i dati raccolti vengano trasferiti nella sala di monitoraggio, ubicata generalmente presso gli uffici dell'ente competente in materia.

Una volta individuata la miglior tecnologia per la trasmissione dei dati, occorre prevedere una infrastruttura informativa a valle atta ad accogliere i dati. I sistemi più usualmente utilizzati sono:

- workstation collegata agli apparati di trasmissione, configurata per le chiamate dirette via modem, radiomodem, ecc.;
- server FTP o sFTP su cui i dati vengono depositati. Tali server sono dei sistemi di appoggio, dai quali i dati vengono successivamente recuperati e depositati nei database interni alla sala monitoraggio;
- cloud. Molti sistemi moderni si basano sulla creazione di database online, che permettono, mediante autenticazione, l'interrogazione e la graficazione dei dati direttamente da browser. In tal caso, è comunque importante richiedere la possibilità di esportare i dati nei più comuni formati per l'utilizzo nei più noti software di elaborazione dati, oppure secondo specifiche date dalla Committenza. Può risultare conveniente che i sistemi di visualizzazione online siano compatibili con strumenti di tipo touch, e che siano *responsive*, cioè che si adattino alla risoluzione dello schermo a seconda del dispositivo utilizzato (es. smartphone, tablet o pc portatili).

5.7 MONOGRAFIE

Ogni stazione/strumento di misura esistente possiede una scheda di riferimento, chiamata **monografia**, nella quale sono inseriti le principali caratteristiche tecniche e lo stato funzionale di ciascun elemento costituente il punto di monitoraggio. La monografia, a qualsiasi tipologia di misura si riferisca, è fondamentale e imprescindibile al fine della corretta ripetibilità delle misure. Essa, infatti, permette di identificare in maniera

inequivocabile ogni singola stazione/strumento. La monografia consentirà all'operatore di ripetere le misure, a distanza di tempo, con le medesime modalità tali che le misure siano più accurate possibile.

Appare chiaro che la monografia dovrà contenere tutte le informazioni necessarie a localizzare la stazione di misura, accedere al punto e permettere di effettuare la misura in maniera tale che possa essere confrontata con le precedenti. Pertanto, la monografia dovrà riportare oltre al nome del punto, della località e del comune anche le informazioni che riguardano la raggiungibilità del sito. Conterrà, quindi, la geolocalizzazione del punto ovvero le coordinate planimetriche e la quota s.l.m., le informazioni ausiliarie come, ad esempio, l'attrezzatura necessaria per consentire l'accesso (es. "munirsi di scala"), ed infine le foto di dettaglio e panoramiche e/o lo stralcio topografico alla scala opportuna. Nell'eventualità la stazione si trovi in area protetta, per la quale l'accesso è consentito previa autorizzazione o disponibilità di chiavi di accesso, sarà necessario riportare i riferimenti del personale/ufficio e i riferimenti telefonici. La monografia dovrà contenere anche indicazioni sugli eventuali accessori necessari per effettuare la misura. La scheda può essere redatta su carta, e successivamente potrà essere informatizzata, oppure direttamente inserita in un adeguato sistema informativo. Condizione assolutamente necessaria è che tale sistema sia condiviso in rete al fine di disporre di dati sempre attendibili e sincronizzati da parte di tutti gli utenti.

5.7.1 Monografie e schede di campagna di stazioni inclinometriche e piezometriche

La funzione della monografia, quindi, è quella di fissare alcuni parametri che identificano in modo univoco lo strumento di riferimento: tale documento evidenzia la sua utilità nel corso del tempo, specie quando dopo anni dall'installazione si rende necessario rivedere alcune caratteristiche sia costruttive sia di monitoraggio.

La monografia contiene i dati significativi del sito di rilevazione. Si riporta in Figura 53 un esempio di monografia per inclinometro in cui i parametri raccolti

sono: i dati anagrafici, costruttivi (nome del punto, localizzazione, caratteristiche del foro, caratteristiche del tubo, dati amministrativi, corografia, pianta a scala adeguata, foto della testa tubo, foto d'insieme), lo stato di manutenzione, efficienza e funzionalità della strumentazione. Tale documento costituisce la 'carta d'identità' del punto di misura.

Inoltre, ad ogni giornata di monitoraggio corrisponde un resoconto (scheda di rilevamento o campagna) sulla

quale sono annotate le effettive misure eseguite sia negli inclinometri sia nei piezometri e le eventuali variazioni osservate (Figura 55).

Le informazioni di cui ai punti sopra, se esistenti, saranno considerate indispensabili e vincolanti sia che la strumentazione sia impiegata ai fini delle misurazioni previste nell'ambito della rete, sia utili per la valutazione del comportamento della strumentazione installata e la comprensione del fenomeno monitorato.

REMOVER - Rete regionale di monitoraggio dei versanti instabili

CATASTO STRUMENTAZIONE

SCHEDA N.

MONOGRAFIA INCLINOMETRO

IP6

Localizzazione

Provincia	Savona	CTR n. 229031		
Comune	Varazze	Scala 1:5000	Coordinate (GAUSS BOAGA)	X 1463819 Y 4914973
Bacino	Codice sito	Toponimo	Quota (m sim)	151
T. Teiro		Il Pero		
Data installazione	Caratteristiche foro	Caratteristiche costruttive		
24/10/2018	Diametro (mm) 101 Prof. (m) 40	Lungh. tubo (m) 39.5 Diam. tubo (mm) 76.2 (3")	Materiale	ABS (plastica) Alluminio X
Dati amministrativi				
Ente attuatore ARPAL	Proprietà Privata	Azimut guida (A1) 330° N	Tipo terminale	Capitello in elevazione Chiusino carrabile X

Lucchetto con chiavi SI No Riferimento ARPAL - Settore Geologia e Dissesto

CTR

Foto

Ortofoto

Particolare terminale

Note: Lettura di zero il 24/10/2018

Data compilazione: 26/10/2018

Redattore: Dott. Geol. Gianluca Beccaris

Figura 53 – Esempio di monografia per inclinometri di ARPAL

REGIONE LIGURIA

REMOVER - Rete regionale di monitoraggio dei
versanti instabili

CATASTO STRUMENTAZIONE

ARPAL

Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente ligurica

SCHEDA N.		MONOGRAFIA PIEZOMETRO	IP6P
-----------	--	-----------------------	------

Localizzazione

Provincia	Savona	CTR n. 213121	Toponimo	Pero
Comune	Varazze	Scala 1:5000	Coordinate (GAUSS BOAGA)	X 1463819 Y 4914970
Bacino	T. Teiro	Codice sito	Quota (m slm)	151
Data installazione	Caratteristiche foro	Caratteristiche costruttive		
24/10/2018	Diam. (mm) 101	Prof. (m) 20	Piezometro a tubo aperto X	Piez. tipo Casagrande X
			Lunghezza tubo (m)	19,70
Dati amministrativi		Diametro tubo (mm)	2"	
Ente attuatore	Proprietà	Posizione filtri	da 0 a 20	Tipo terminale
ARPAL	Privata	(prof. dal p.c. in m)	da a	Capitello in elevaz. (altezza dal p.c. in cm)
			da a	Chiusino carrabile X
Lucchetto con chiavi	Sì X	Dreno	da a	Materiale
	No	(prof. dal p.c. in m)	da a	Ghiaia
			da a	Ghiaietto calibrato
Riferimento consegnatario chiavi		Cementazione	da a	Altro (specif.)
Nominativo: ARPAL - Settore Geologia e Dissesto		(prof. dal p.c. in m)	da a	Cemento
			da a	Cemento+bentonite
			da a	Argilla

CTR

Foto

Ortofoto

Particolare terminale

Note. Prima lettura falda a -2,75m. Installazione sonda freaticometrica automatica 12/03/2019

Data compilazione: 26/10/2018

Redattore: Dott. Geol. Gianluca Beccaris

Figura 54 – Esempio di monografia per piezometri di ARPAL



REGIONE LIGURIA

REMOVED - Rete regionale di monitoraggio dei versanti instabili



ARPAL
Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente ligure

SCHEDA DI RILEVAMENTO

Denominazione sito		Il Pero		Provincia	Genova
Codice sito				Comune	Varazze
Data	Operazioni effettuate	Letture inclinometriche n. 4			
23/10/2019		Misure freatiche n. 3			
Codice inclinometri	Codice piezometri	Livello falda (in m dal boccapazzo)		Note	
Inclinometro IP1				Lettura di esercizio ogni 0,5m dalla profondità di 24m sulle guide A1/A3 con sonda servoaccelerometrica biassiale S094-15	
Inclinometro IP5				Scarico dati sonde fisse	
Inclinometro n.IP6				Lettura di esercizio ogni 0,5m dalla profondità di 39,5m sulle guide A1/A3 con sonda servoaccelerometrica biassiale S094-15	
Inclinometro n.IP7				Lettura di esercizio ogni 0,5m dalla profondità di 38,5m sulle guide A1/A3 con sonda servoaccelerometrica biassiale S094-15.	
	Piezometro IP6P	0 (p.c.)		Pianoro della zona della chiesa saturo fino a quota del piano campagna, Scarico dati automatici,	
	Piezometro IP7P	TA -14,94 C 18,68		Scarico dati automatici in TA,	
Resoconto:					
Operatori: Gianluca Beccaris – Monica Solimano – Cinzia Picetti					

Figura 55 – Esempio di scheda di rilevamento di ARPAL

5.7.2 Monografie e schede di campagna di stazioni GPS

Analogamente a quanto discusso per gli inclinometri e i piezometri, anche nel caso di reti di misura GPS è necessario compilare una monografia per ciascun punto di misura, sia periodico sia in continuo, che consenta di raggiungere la stazione di monitoraggio e di effettuare in modo idoneo, nel caso di misure periodiche, la misura nel tempo. La monografia dovrà contenere, oltre alle informazioni utili alla localizzazione del punto, anche le caratteristiche del tipo di caposaldo installato, o del tipo di monumentazione realizzata nel caso di un punto di misura in continuo.

Per le stazioni di misura permanente può essere utile redigere anche un *site-log*⁵ che oltre a contenere la geolocalizzazione del punto, le caratteristiche sintetiche della monumentazione, la data di inizio acquisizione ed, eventualmente, di fine, conterrà anche specifiche informazioni sul tipo di strumentazione (ricevitore/antenna), sull'altezza e sulla presenza di eventuali offset. Rispetto alla monografia, che costituisce una foto del momento in cui è stata realizzata, il *site-log* conterrà anche la storia della stazione ovvero tutti gli eventuali cambi di ricevitore ed antenna effettuati e le relative date.

Inoltre, durante ciascuna campagna di misura si procederà alla compilazione delle schede di campagna che dovranno contenere, per ciascun punto di misura, tutte le informazioni necessarie a elaborare ed archiviare il dato (Figura 56). Pertanto, oltre alla data di misura, sarà indicato il supporto per l'antenna utilizzato ovvero treppiedi, pilastro autocentrante, basamento topografico con opportuno adattatore, ecc. Sarà necessario, inoltre, predisporre uno spazio per poter di volta in volta riportare il tipo di ricevitore e antenna utilizzati, i rispettivi numeri seriali, il tipo di altezza misurata (verticale o inclinata) e la misura registrata. Saranno inoltre riportati eventuali offset registrati che permetteranno al momento dell'elaborazione del dato di correggere l'altezza. Inoltre, la scheda di campagna dovrà contenere uno spazio libero dove appuntare note,

ad esempio, che riguardano le condizioni ambientali al contorno durante lo svolgimento delle misure (condizioni meteo, presenza di disturbi elettromagnetici, ecc). Verranno registrate, inoltre, tutte quelle informazioni eventualmente necessarie ad aggiornare la monografia come, ad esempio, le modalità di accesso o le variate condizioni di esecuzione della misura.

⁵ https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/site_information/index.html

ISPRA				Servizio Geologico d'Italia			
Scheda rilievo GPS/GNSS							
nome stazione				nome rete/progetto			
codice punto (4 car.)							
tipo caposaldo							
località				nome campagna			
operatori				ENTE			
inizio rilievo				fine rilievo			
data				data			
ora (locale)				ora (locale)			
fuso orario							
tipo ricevitore							
marca/modello				campionamento (s)			
numero seriale				elevation mask			
tipo antenna							
marca/modello				numero seriale			
sistema di centramento tipo di supporto				altezza antenna			
treppiedi				h antenna inizio (m)			
pilastrino lungo				h antenna fine (m)			
pilastrino corto				tipo di altezza antenna			
piastra IGM				verticale			
adattatore fisso				inclinata			
altro				altro			
NOTE				MONOGRAFIA			

Figura 56 – Modello scheda di campagna GPS/GNSS

5.7.3 **Format monografia SNPA**

Con l'obiettivo di uniformare nella forma e nei contenuti le informazioni necessarie a qualsiasi operatore che debba descrivere un nuovo punto di misura o raggiungere ed effettuare operazioni su una stazione, sia essa periodica sia continua, l'SNPA adotta il seguente format di monografia (Figura 57) e ne raccomanda l'utilizzo.

Quella che si allega è la maschera contenente le informazioni per geolocalizzare il punto e poter accedere alla postazione, a prescindere dalle caratteristiche specifiche della strumentazione di

misura. Per quanto attiene alle coordinate si consiglia come standard comune l'utilizzo delle coordinate assolute geografiche WGS84 (World Geodetic System 1984). La documentazione grafica dovrà contenere, possibilmente, l'ubicazione del punto su una base cartografica ufficiale, o una ortofoto, alla scala non inferiore al 10.000, una fotografia panoramica ed una di dettaglio.

Una seconda pagina potrà contenere la tipologia con le caratteristiche tecniche e lo stato funzionale della strumentazione, eventuali modifiche apportate nel tempo, e potrà essere predisposta dai singoli gestori.

Area protetta
Unità di appartenenza
Specifica strumentazione

Monografia stazione GPS

Modalità di Acquisizione (Periodica, Continua) <i>Stazione GPS Periodica</i>	NOME STAZIONE CIAR		Regione/Provincia Sicilia/Catania
Anno di Installazione 2005	Coordinate WGS84	Lat. 37°35'41.76" N	Comune Acireale
Ente Attuatore ISPRA		Long. 15°9'7.15" N	Località Cimitero Comunale
Proprietà ISPRA	Quota 200 m s.l.m.		
	CTR n° 625140		
Note E' necessario dotarsi di una scala lunga almeno 2 m		Descrizione Posizione Posizionato a circa 160m a Est dell'entrata principale del cimitero, sul muro di cinta, a sinistra del cancello carroia secondario, in cima al pilastro	
Lucchetto con chiavi ☒ SI ☐ NO	Inserire eventuali nominativi e numeri telefonici a cui rivolgersi Comunicare al guardiano all'interno del cimitero		

Stralcio CTR

Foto

Foto aerea

Dettaglio

A cura di SNPA

Figura 57 – Monografia SNPA compilata per una stazione periodica di ISPRA

89

6 ARCHIVIAZIONE, GESTIONE E FORMATO DATI

Nell'ambito della gestione dei dati di monitoraggio occorre porre particolare attenzione alla scelta dei software e del formato dati utilizzati, in tutte le fasi del processo: acquisizione, trasmissione, archiviazione e divulgazione delle informazioni. Le scelte tecnologiche fatte in fase di progettazione possono influire sulle possibilità di mantenimento e sulla futura evoluzione della rete. In generale è buona prassi adottare soluzioni basate su tecnologie e standard aperti. Progettare un sistema aperto permette infatti: di mantenere una maggiore autonomia nella gestione del sistema di monitoraggio, di limitare al massimo il *lock-in* tecnologico legato all'utilizzo di formati proprietari e di agevolare il riuso del software e delle conoscenze all'interno della Pubblica Amministrazione.

Nel corso degli ultimi anni le PP.AA., in linea con le direttive della Comunità Europea⁶, stanno infatti promuovendo l'adozione di soluzioni aperte sia per quanto riguarda la componente software sia per la scelta dei formati di comunicazione, archiviazione e scambio dei dati digitali. In particolare, la normativa italiana stabilisce che il formato dei dati digitali si definisce "aperto" quando ne viene resa pubblica, mediante esaustiva documentazione, la sintassi, la semantica, il contesto operativo e le modalità di utilizzo (art. 68, comma 3 del CAD - Codice dell'Amministrazione Digitale⁷). Tali informazioni, unitamente ad una guida all'uso del formato, orientata alla lettura da parte dell'utilizzatore, devono essere

presenti in uno o più documenti rilasciati dall'ente proponente lo standard.

6.1 FILE DATI E FORMATO DI SCAMBIO

Nello specifico l'allegato 2 al DPCM del 3 dicembre 2013 indica le caratteristiche sulla base delle quali devono essere valutati i formati adottati: la diffusione, ossia il numero di persone ed organizzazioni che li adotta; la portabilità, correlata all'impiego di standard documentati e accessibili che permette di utilizzare il dato su diverse piattaforme; la sicurezza, cioè la capacità di essere immune dall'inserimento di codice maligno e le funzionalità che mette a disposizione. Altre caratteristiche importanti sono la capacità di occupare il minor spazio possibile in fase di memorizzazione e la possibilità di gestire i metadati⁸, compresi i riferimenti a chi ha eseguito modifiche o aggiunte. Tra i formati aperti suggeriti da AGID (l'AGenzia per l'Italia Digitale), quelli che meglio si adattano ai sistemi di monitoraggio sono:

- il formato XML o *Extensible Markup Language*: è un metalinguaggio derivato da SGML (ISO 8879) per la definizione di linguaggi di *markup*, ovvero un linguaggio che tramite l'utilizzo di *tag* (etichette personalizzate) permette di definire il significato degli elementi contenuti. Il principale vantaggio è sicuramente quello di permettere una maggiore flessibilità e ricchezza nella strutturazione delle informazioni veicolate. Il formato XML permette infatti di archiviare sia i dati che i metadati dell'informazione;
- il formato TXT: un formato universalmente

⁶ Vedi in particolare la Direttiva 2003/98/CE del Parlamento Europeo del 17 novembre 2003 relativa al riutilizzo dell'informazione del settore pubblico.

⁷ Il CAD è il testo unico che riunisce e organizza le norme riguardanti l'informatizzazione della Pubblica Amministrazione nei rapporti con i cittadini e le imprese. Istituito con il decreto legislativo 7 marzo 2005, n. 82, è stato successivamente modificato e integrato prima con il decreto legislativo 22 agosto 2016 n. 179 e poi con il decreto legislativo 13 dicembre 2017 n. 217 per promuovere e rendere effettivi i diritti di cittadinanza digitale.

⁸ I metadati sono l'insieme di informazioni che descrivono i dati. Tipicamente vengono riportate tutte le informazioni in merito alle modalità e al periodo di acquisizione, alla proprietà del dato, alle modalità di utilizzo e ogni altra informazione utile al loro corretto utilizzo.

utilizzato per i file di tipo non binario. Per questo formato le codifiche più comuni (cioè la corrispondenza tra il valore dei byte, che è sempre un numero intero da 0 a 255, e il carattere rappresentato) sono quella ASCII, quelle dello standard ISO 8859 e la EBCDIC. Il principale vincolo di questo formato è la difficoltà ad archiviare informazioni aggiuntive, cioè i metadati.

Per agevolare al massimo l'interoperabilità dei sistemi di monitoraggio, oltre alla tipologia di file utilizzato (XML o TXT) è importante definire le specifiche comuni con cui i dati vengono memorizzati al suo interno. Per alcune tipologie di strumentazione sono già disponibili specifiche che permettono la memorizzazione e lo scambio dei dati indipendentemente dal ricevitore, come ad esempio lo standard RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) per i sistemi GNSS. Le specifiche del formato RINEX sono rese disponibili dall'IGS (*International GNSS service*)⁹ Al contrario, per la maggioranza degli altri sensori non esistono formati ben documentati e definiti, ed ogni produttore adotta un proprio standard.

Risulta inoltre fondamentale associare una corretta ed esaustiva metadocumentazione, che riporti in modo chiaro quale tipo di informazione viene descritta (tipo di sensore, grandezza fisica misurata), l'unità di misura utilizzata e il formato adottato. È poi importante che venga dichiarata la codifica utilizzata (*charset*) e che vengano utilizzati al suo interno solo caratteri standard.

Per la trasmissione dei dati si raccomanda l'utilizzo del formato CSV (*Comma Separated Values*) con codifica ASCII, cioè un file TXT dove i valori sono separati da un carattere predefinito. Le specifiche tecniche di dettaglio sono descritte al Paragrafo 6.1.1. I vantaggi principali di questo formato sono sicuramente la compattezza e la facilità di lettura rispetto al formato XML, limitando quanto più possibile la dimensione dei file trasmessi. Sebbene il continuo incremento della velocità delle reti di trasmissione metta a disposizione una sempre maggiore banda disponibile, le condizioni dei sistemi di monitoraggio delle frane, posti spesso in quota e in

zone con scarsa copertura, richiedono di limitare quanto più possibile la quantità di dati trasmessi, anche per ridurre il consumo del sistema, quando alimentato mediante batteria. Per la lettura del formato CSV sono disponibili le librerie per tutti i principali linguaggi di programmazione che permettono di effettuare il processamento del file in modo semplice.

Per quanto riguarda la gestione dei dati e delle informazioni dei sensori tramite *WEBServices* un importante contributo viene dato dagli standard implementati dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC), come ad esempio lo standard SOS. Il Servizio di Osservazione del Sensore è un servizio web per interrogare i dati dei sensori sia in tempo reale sia come serie storiche e fa parte della più ampia iniziativa *Sensor Web* (SW) per creare piattaforme e prodotti che raccolgono, condividono e rendono interoperabili le osservazioni raccolte da dispositivi *web-based*. Il dato offerto comprende descrizioni dei sensori stessi, che sono codificati nel *Model Language Sensor* (SensorML) ed i valori misurati nelle osservazioni e misurazioni (O&M).

SOS fa parte della più ampia iniziativa *Sensor Web* (SW), di cui fanno parte altre specifiche come: *Sensor Model Language* (SensorML), *Trasduce Model Language* (TML), *Sensor Planning Service* (SPS), *Sensor Alarm Service* (SAS) e *Web Notification Service* (WNS). Tutti vanno nella direzione di proiettare su piattaforma web dati provenienti da stazioni di monitoraggio o osservazione, siano esse composte da sensori *in situ* (es. temperature, piogge, livelli idrometrici, ecc.) o dinamici e mobili (come immagini webcam o sensori montati su satellite).

6.1.1 Specifiche tecniche per la trasmissione e il trattamento dei dati grezzi

I file contenenti i dati grezzi (cioè quelli derivanti direttamente dai datalogger) devono seguire le seguenti specifiche:

- come separatore di campo sono consentiti solo caratteri di uso comune (ad esempio virgola, punto e virgola, *pipe* – cioè la barra verticale, spazi o tabulazioni) che non rischino di essere confusi con

⁹ <https://www.igs.org/>

altri componenti del file. Non è possibile utilizzare il punto come separatore dei campi. Il separatore utilizzato deve essere indicato nella metadocumentazione;

- i record devono essere separati dalla coppia di caratteri CR (*carriage return* - codice ASCII 0x0D) e LF (*line feed* - codice ASCII 0x0A);
- la prima linea del file (*header*) deve contenere i nomi dei campi. Non sono ammessi caratteri speciali o caratteri che possano essere confusi con i separatori di campo. Visto che il file può contenere valori relativi a più di un sensore il nome campo deve permettere di associare l'informazione alla relativa anagrafica (cfr. paragrafo successivo);
- per l'identificazione temporale della misura (*timestamp*), si consiglia di seguire le specifiche dello standard ISO 8601:2019 (*Data elements and interchange formats – Information interchange – Representation of dates and times*)¹⁰. Il campo data deve essere riportato nel formato YYYY-MM-DDTHH24:MM:SSTZD, (ad esempio 2020-01-10T18:30:45+01:00). L'ora è riportata nel formato 24h; l'indicazione dell'ora locale (TZD - *Time Zone Designator*) può essere omessa solo nel caso questa venga specificata nell'anagrafica del sensore. Per acquisizioni con frequenza inferiore al secondo è possibile aggiungere ai secondi i valori decimali (ad es: 2020-01-10T18:30:45.1254+01:00). Il *timestamp* deve essere univoco: non sono ammesse due misure sullo stesso sensore con lo stesso *timestamp* poiché ambigui. Una definizione chiara e univoca del momento dell'acquisizione della misura è fondamentale per poter confrontare tra loro dati che derivano da strumenti differenti (ad esempio di superficie o di profondità) o dati di natura differente (dati di spostamento e dati meteo);
- come divisore delle cifre decimali deve essere utilizzato il punto (secondo lo standard anglosassone) e non la virgola, come spesso avviene in Italia;
- i dati devono essere raccolti e archiviati utilizzando unità di misura omogenee. Occorre far riferimento alle indicazioni riportate dal **Sistema internazionale di unità di misura (SI)**. Anche in questo caso l'utilizzo di unità di misura standard permetterà di confrontare in modo più agevole dati provenienti da strumenti differenti. In alcuni casi può essere utile utilizzare sottomultipli delle unità di misura, che permettono una lettura più agevole del dato. Ad esempio, per gli spostamenti è spesso più agevole riportare le indicazioni in millimetri (mm) piuttosto che in metri (m). In questo caso occorre specificare chiaramente nel metadato del sensore l'unità di misura utilizzata;
- i dati devono essere archiviati utilizzando un numero di cifre significativo, congruente con la precisione del sensore.

Una volta acquisiti, i dati grezzi devono essere archiviati e opportunamente processati per ottenere delle misure corrette e validate. Il processamento può avvenire direttamente in situ, oppure una volta trasferiti presso il server centrale. La fase di trattamento e validazione del dato è un momento molto importante del processo di trasformazione dalla misura grezza al risultato finale. Il trattamento del dato può essere più o meno complesso in funzione della tipologia di strumento. Essendo legato alla tipologia di strumento utilizzato, si rimanda a documentazione specifica la fase di trattamento caratteristica. Si fa tuttavia presente che, vi sono una serie di operazioni, come quelle legate alle compensazioni (per limitare, ad esempio, gli effetti legati a variazioni termiche o di altri fattori) che sono comuni a gran parte della strumentazione disponibile. Anche il filtraggio dei dati palesemente fuori scala è tipica di tutte le strumentazioni. La validazione può essere svolta in maniera molto semplice oppure utilizzando approcci statistici anche molto complessi. Si sottolinea come il processo di validazione debba sempre prendere in considerazione due approcci: quello di correttezza dal punto di vista matematico e quello geologico e/o geotecnico. Solamente un dato opportunamente trattato matematicamente ed in linea con il modello geologico e/o geotecnico di riferimento

¹⁰ <https://www.iso.org/iso-8601-date-and-time-format.html>

può considerarsi un risultato attendibile. Attraverso un processo iterativo, il modello geologico e/o geotecnico viene impiegato per validare i nuovi dati, che vengono utilizzati, successivamente, per un eventuale affinamento del modello geologico e/o geotecnico stesso. Un esempio di validazione del modello geologico può essere quello di esclusione di dati che hanno direzioni di movimento non congruenti con quelle attese e confermate da altri indicatori.

6.1.2 Banca dati

I sistemi di monitoraggio moderni, soprattutto quando applicati alle grandi frane complesse, permettono di raccogliere una notevole quantità di informazioni, derivanti da diverse tipologie di sensori: informazioni di spostamento superficiale (sistemi GPS, sistemi topografici ottici, GB-InSAR, estensimetri, ecc.) o misure di profondità (inclinometri, piezometri, colonne multiparametriche, TDR, ecc.); le serie temporali raccolte possono essere relative anche a lunghi periodi.

Il gestore del sistema si può così trovare in breve tempo a dover gestire un'enorme mole di dati, con caratteristiche proprie in termini di parametri misurati, frequenza di aggiornamento, formato di archiviazione e unità di misura utilizzate. Ai dati recenti si possono poi aggiungere quelli raccolti nel passato, aumentando ulteriormente la difficoltà di gestione integrata delle varie fonti di informazioni.

Per poter amministrare correttamente un sistema di tale complessità è fondamentale integrare l'intero processo di gestione del dato all'interno di un'unica infrastruttura centralizzata, che sia in grado di superare i vincoli spesso creati dalle applicazioni impiegate dai singoli produttori di strumenti di monitoraggio, permettendo inoltre di rendere l'informazione quanto più omogenea possibile.

L'utilizzo di un database relazionale per l'archiviazione e la gestione dei dati permette di definire standard di archiviazione e procedure di filtraggio e validazione che siano trasversali ai singoli sistemi di monitoraggio e che permettano di superare i problemi derivanti dai formati di localizzazione utilizzati nelle diverse nazioni, in modo da evitare problemi di rappresentazione e di confronto

tra le varie serie storiche. Anche la condivisione attraverso gli ormai comuni canali web risulterà in questo modo notevolmente agevolata.

6.1.3 Anagrafiche dei sensori

I dati di misura, perché abbiano valore, devono sempre essere accompagnati da una precisa descrizione delle caratteristiche del sensore utilizzato, della sua localizzazione, delle caratteristiche dei dati trasmessi (unità di misura, precisione ecc.), delle modalità con cui viene effettuata la misurazione e di tutte quelle informazioni che permettano di interpretare in modo corretto la misura stessa. La descrizione della maggior parte delle specifiche dei sensori può essere demandata alla scheda tecnica fornita dal produttore del sensore. Il gestore della rete dovrà fornire tutte le informazioni specifiche per ogni stazione di misura contenute nelle monografie, schede di rilievo e site-log (Paragrafo 5.7).

Lo standard SensorML2.0¹¹, definito dall'OGC, fornisce specifiche dettagliate e condivise a livello internazionale per la descrizione delle anagrafiche dei sensori. Questo standard è basato sul formato XML, che permette di archiviare le informazioni in modo più complesso e strutturato rispetto al più semplice formato TXT. L'adozione in toto di questo standard, seppur auspicabile in linea generale, può risultare nello specifico molto complesso. Si consiglia pertanto di prendere a riferimento almeno le indicazioni generali in merito alle informazioni che devono essere obbligatoriamente fornite per ogni sensore, e cioè:

- **Periodo di validità:** `<validTime>` indica il periodo temporale a cui si riferisce la metadocumentazione (data di inizio `<beginPosition>` ed eventualmente data di fine `<endPosition>`). Nel caso una delle informazioni vari (ad esempio in seguito alla sostituzione del sensore), occorre fornire un nuovo file di descrizione relativo al nuovo periodo di validità.
- **Identificatore univoco:** `<identifier>` codice definito dal gestore della rete che identifichi in modo

¹¹ <https://www.ogc.org/standards/sensorml>

univoco il sensore all'interno della rete stessa.

- **Nome:** *<name>* denominazione generica del sensore.
- **Modello e numero di serie:** *<model>* codice fornito dal costruttore che permetta di risalire alle caratteristiche specifiche del sensore.
- **Ubicazione geografica:** *<origin>* posizionamento nello spazio del sensore. Devono essere fornite le coordinate X, Y ed eventualmente la quota, fornendo anche il codice EPSG¹² del sistema di riferimento utilizzato.
- **Parametro fisico misurato:** *<parameter>* descrizione del tipo di parametro misurato e dell'unità di misura utilizzata.
- **Descrizione testuale:** *<description>* descrizione estesa del sensore.

Quando i dati vengono forniti a terzi, oltre all'anagrafica del sensore devono essere fornite ulteriori informazioni:

- **Contatti:** *<contacts>* tutte le informazioni che permettano di identificare e contattare il proprietario e/o il gestore del dato.
- **Vincoli d'uso:** eventuali indicazioni sulle limitazioni relative all'utilizzo dei dati *<useRestrictions>* e sulle modalità di distribuzione *<licence>*.

È importante che in futuro vengano definite ontologie comuni per la descrizione dei dizionari utilizzati all'interno dei vari campi, come ad esempio per la definizione dei parametri fisici misurati.

¹² l'elenco ufficiale dei codici EPSG può essere consultato all'indirizzo <http://www.epsg-registry.org/>

7 ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE

Per poter fornire dati affidabili e continui nel tempo gli strumenti costituenti le reti di monitoraggio dei fenomeni franosi devono trovarsi stabilmente in buone condizioni di funzionamento. Tuttavia, gli ambienti in cui gli stessi devono operare li espongono, spesso per lungo tempo, a condizioni ambientali critiche e a subire possibili interferenze da parte di macchine operatrici (agricole, spartineve, ecc.).

La loro regolare manutenzione è pertanto un cardine imprescindibile nella gestione di un sistema di monitoraggio; per quanto questo possa sembrare ovvio, spesso gli oneri tecnici ed economici per tale voce non vengono adeguatamente stimati in fase progettuale, quando non completamente ignorati.

Fin dalle fasi propedeutiche all'installazione è necessario valutare attentamente le ubicazioni di postazioni e punti di misura, preferendo, ove ciò non influisse negativamente sulle informazioni attese, posizioni defilate rispetto alle attività antropiche; i punti di misura necessiteranno di materializzazioni robuste, protezioni e segnalazioni (paline e targhette, possibilmente recanti denominazione e recapito del gestore) che possano ovviare l'occultamento da parte di neve e vegetazione spontanea.

È altresì preferibile il posizionamento in proprietà pubbliche; ove ciò non sia possibile è fatto obbligo acquisire il consenso scritto della proprietà alla realizzazione del punto di misura e all'accesso del personale incaricato dei successivi interventi di misura e manutenzione, esplicitando che l'attività di monitoraggio potrà interessare l'area per un arco temporale significativo (definito in funzione della tipologia di fenomeno osservato e della sua potenziale velocità di evoluzione).

Generalmente, l'attività manutentiva si distingue in:

- preventiva;
- correttiva.

Per dettagliare le attività e gli interventi in cui si articolano le suddette tipologie, occorre inoltre differenziare la strumentazione di monitoraggio secondo le due principali modalità di acquisizione dei dati:

- misure condotte con Strumenti amovibili a Lettura Manuale (SLM) da tecnici specializzati in occasione di periodiche campagne;
- misure condotte con postazioni installate permanentemente in sito (Strumenti a Lettura Continua - SLC), alimentate elettricamente, che eseguono autonomamente le misure, le memorizzano, e, qualora dotate di apparati di trasmissione (Strumenti a Lettura Remotizzata - SLR), le inviano presso la sede del gestore per le opportune elaborazioni e interpretazioni.

7.1 MANUTENZIONE PREVENTIVA

Rientrano nella manutenzione preventiva (o ordinaria) quegli interventi necessari a prevenire il naturale decadimento della strumentazione, e per garantire il periodico accesso alla stessa.

7.1.1 Punti di misura

I punti di misura (supporti e "guide", materializzati su terreno o su manufatti, che consentono la ripetibilità delle misure: tubazioni inclinometriche/piezometriche, basi distometriche, prismi/elementi riflettenti per misure topografiche, pilastrini e basamenti di supporto, ecc.) sono, per gran parte della loro vita utile, completamente privi di controllo; ciò nonostante, devono trovarsi pienamente accessibili, integri e funzionali nel giorno stabilito per l'effettuazione della misura, per evitare di vanificare l'intervento programmato.

La manutenzione ordinaria dei punti di misura deve quindi prevedere attività semplici, ma cicliche e adeguatamente pianificate nell'arco dell'anno:

- il taglio periodico della vegetazione e la pulizia da terra, detriti o depositi di materiali vari,

- neve/ghiaccio (ove possibile);
- la lubrificazione dei lucchetti e delle cerniere di pozzetti e recinzioni;
- la verifica che siano adeguatamente segnalati (con paline/targhette di segnalazione) e protetti, al fine di evitarne il danneggiamento.

Tali operazioni e controlli non richiedono personale particolarmente specializzato; inoltre dovrebbero essere svolte nell'imminenza delle campagne di misura o comunque preventivamente ad esse, onde consentire di rilevare anticipatamente eventuali necessità di riparazioni senza rallentare, differire o inficiare le operazioni di acquisizione dei dati.

7.1.2 Strumenti manuali (SLM)

La manutenzione preventiva degli strumenti portatili, sostanzialmente, si traduce in:

- calibrazioni e tarature periodiche, programmate in funzione della frequenza di utilizzo e di quanto raccomandato dai costruttori;
- controlli su parti mobili, minuterie, guarnizioni;
- aggiornamenti software/*firmware* delle unità di controllo.

Tali interventi richiedono generalmente particolari specializzazioni, attrezzature o certificazioni, che raramente sono nella disponibilità del gestore della rete di monitoraggio. La strumentazione deve essere pertanto inviata ai costruttori o a laboratori certificati esterni. Nella pianificazione delle campagne di misura, il gestore dovrà tenere presente i tempi (che possono essere noti o stimabili a priori, in quanto trattasi di interventi standard) di indisponibilità della strumentazione per tali specifici controlli.

Vi sono inoltre alcune semplici attenzioni che, quando adottate sistematicamente dai tecnici nello svolgimento del servizio, possono concorrere a garantire il mantenimento delle parti meccaniche ed elettroniche in efficienza, pur non essendo operazioni di manutenzione in senso stretto. Si riportano a titolo di esempio le seguenti buone prassi nel trasporto, utilizzo e immagazzinamento degli strumenti:

- trasporto con cura all'interno delle apposite custodie chiuse, evitando sobbalzi e urti;
- svolgere con attenzione le operazioni di assemblaggio e smontaggio, sia degli strumenti dai rispettivi punti di misura, sia dei singoli componenti della catena di misura (sonde, cavi, unità di controllo); ciò permette di verificare le condizioni delle giunzioni meccaniche ed elettriche, oltre che lo stato di usura di eventuali parti mobili;
- rimozione di acqua, umidità, polvere e altri eventuali residui dell'attività di campagna; tale attività deve essere speditivamente svolta già in sito, dopo ogni misura, e ripetuta con maggiore cura al rientro in sede;
- conservazione, tra una misura e la seguente, in ambienti chiusi e protetti da agenti esterni;
- carica/sostituzione periodica batterie, specie a seguito di inutilizzo prolungato;
- estensivamente, anche l'elaborazione delle misure, in particolare nei metodi di misura più complessi (ad esempio quelli topografici e inclinometrici), può essere intesa come supporto alla manutenzione ordinaria, in quanto in grado di evidenziare anomalie (derive) nei risultati riconducibili alla necessità di interventi sui sensori o su altri elementi della strumentazione. A questo proposito è auspicabile che sia lo stesso soggetto ad occuparsi sia dell'acquisizione, sia dell'elaborazione dei dati.

Tali operazioni possono talvolta risultare ridondanti; tuttavia, mentre la loro incidenza in termini di tempo è marginale, il loro valore aggiunto nella prevenzione delle rotture improvvise e nella programmazione degli interventi di manutenzione può rivelarsi significativo.

7.1.3 Strumenti automatizzati (SLC-SLR)

Alcune accortezze in fase di progettazione e realizzazione delle reti di monitoraggio sono utili a prevenire malfunzionamenti e danneggiamenti. A titolo di esempio si cita:

- la predisposizione dei punti di misura con cavidotti,

interrati o cementati nei tratti orizzontali, per la protezione dei cablaggi che eventualmente e successivamente si vorrà/potrà aggiungere;

- l'adozione di sistemi Wi-Fi a corto raggio, laddove fossero necessari lunghi cablaggi per il collegamento tra sensori e unità di acquisizione dei dati; questa soluzione consente di prevenire le fulminazioni, con un aggravio di costi di fornitura, per installazioni in zone esposte a tali rischi, quasi sempre inferiore agli eventuali costi di ripristino.

Per quanto riguarda la **manutenzione preventiva**, si richiamano quegli interventi periodici, già citati nel Paragrafo 7.1.1, aggiungendo le attenzioni rivolte al mantenimento dei supporti e infrastrutture (elementi più o meno complessi che, pur non concorrendo alla generazione del dato, sono indispensabili per la protezione e conservazione degli apparati) e i controlli dedicati alle componenti elettriche, elettroniche e meccaniche:

- il taglio della vegetazione spontanea di disturbo per pannelli fotovoltaici e strumentazione;
- la verifica di armadi, pali, supporti e altre infrastrutture (recinzioni, opere civili, ecc.);
- la verifica dei sistemi di alimentazione (rete,

fotovoltaici, batterie), compresi cablaggi, dispositivi di protezione, eventuali batterie tampone, regolatori di carica, con la sostituzione delle componenti usurate o malfunzionanti;

- sostituzione delle batterie di alimentazione; scarico dei dati (SLC);
- la verifica dei sistemi di trasmissione (SLR);
- la verifica del corretto funzionamento di sensori e la pulizia degli stessi e/o dei loro elementi protettivi;
- la sostituzione delle batterie dei trasmettitori radio (sistemi wireless);
- ulteriori controlli specifici, propri delle tipologie di sensore/strumento di misura e infrastrutture/supporti associati (capannine per strumenti topografici, tubazioni in PVC e supporti per estensimetri a filo, ecc.).

7.1.4 Frequenza

Per quanto riguarda la programmazione della **manutenzione ordinaria/preventiva**, si suggerisce il seguente schema (Tabella 3):

Tabella 3 – Frequenza degli interventi di manutenzione preventiva

Tipo di monitoraggio	Punti di misura (SLM-SLC)	SLM	SLC	SLR
Conoscitivo	Annuale	Annuale/ semestrale*	Quadrimestrale	Semestrale
Allertamento	Annuale	Annuale/ semestrale*	Quadrimestrale	Semestrale

*in funzione della tipologia e frequenza di utilizzo

7.2 MANUTENZIONE CORRETTIVA

Rientrano nella manutenzione correttiva (o straordinaria) quegli interventi necessari per il ripristino dei punti e degli strumenti di misura a seguito di danneggiamenti e malfunzionamenti.

7.2.1 Punti di misura

Al verificarsi dell'eventualità, si ricorre alla manutenzione correttiva dei punti di misura:

- riparazione di materializzazioni accidentalmente urtate da macchine operatrici;
- videoispezione delle tubazioni, per la verifica di eventuali ostruzioni constatate durante le operazioni di misura pregresse; talvolta potrebbe infatti trattarsi di corpi estranei rimovibili con operazioni di spurgo, che restituirebbero la piena funzionalità al punto di misura;
- sostituzione/installazione *ex-novo* di punti di misura di facile e immediata materializzazione (ad esempio infissione di tasselli in roccia/manufatti).

Qualora svolti da soggetti diversi dai tecnici addetti alle misure, gli interventi correttivi devono sempre essere preventivamente autorizzati e, se possibile, supervisionati dai tecnici stessi, in quanto variazioni nella materializzazione dei punti di misura (riparazione e/o rifacimento di: terminali protettivi, sommità di tubazioni inclinometriche schiacciate, caposaldi topografici, tasselli distometrici, ecc.) potrebbero modificare i riferimenti delle misurazioni e generarne di nuovi e, quindi, compromettere la ripetibilità delle serie storiche. La sottovalutazione di tali basilari accortezze può falsare i risultati delle successive elaborazioni e creare notevoli difficoltà di interpretazione.

7.2.2 Strumenti manuali

Per quanto riguarda gli interventi di manutenzione correttiva, si segnalano:

- calibrazioni e tarature straordinarie, a fronte di dati anomali, di inutilizzo prolungato, a seguito di riparazioni;

- riparazioni per danneggiamenti accidentali;
- sostituzione/riparazione di componenti/conessioni usurati, anche per scarsa osservanza di quanto descritto nel Paragrafo 7.1.2;
- richiami straordinari per aggiornamento *firmware*.

Gli interventi di manutenzione correttiva, per loro natura generalmente non programmabili e non preventivabili, causano l'indisponibilità dell'attrezzatura di misura per un tempo spesso indeterminabile a priori. Ciò si ripercuote sulla programmazione delle campagne di misura, quindi nel caso si debba gestire una rete di monitoraggio manuale particolarmente estesa, o qualora il gestore abbia nel proprio mandato l'esecuzione di misure su richiesta e in tempi stretti, è opportuno prevedere la disponibilità di strumenti di riserva (valutando attentamente le questioni relative alla ripetibilità delle misure).

7.2.3 Strumenti automatizzati

La manutenzione correttiva (sostituzione di componenti o sensori, sostituzione o riparazione di infrastrutture e supporti) può essere conseguente a quella ordinaria, laddove dalle verifiche programmate sopra elencate emergessero malfunzionamenti e/o danneggiamenti, ed essere svolta nell'ambito del medesimo sopralluogo; oppure, se gli apparati sono remotizzati, può essere attivata a seguito della mancata ricezione dei dati presso la sede del gestore/appaltatore, oppure da anomalie riscontrabili dall'analisi dei dati correttamente ricevuti (picchi anomali, derive, cali di tensione della batteria). E' pertanto fondamentale il controllo a stretta periodicità, anche con sistemi semi-automatici, dei dati trasmessi, a prescindere dalla finalità del monitoraggio (conoscitivo o di allertamento); potrà casomai cambiare la frequenza e la complessità dei controlli, anche in funzione del periodo di eventuale interruzione dei dati che si ritiene accettabile. A questo proposito, va da sé che nel caso di strumentazione automatica senza teletrasmissione dei dati, il periodo di interruzione delle misurazioni per problemi tecnici o danneggiamenti può essere uguale al tempo intercorso tra due successivi interventi programmati.

Tabella 4 – Frequenza interventi manutenzione correttiva

Tipo di monitoraggio	Punti di misura (SLM-SLC)	SLM	SLC	SLR
Conoscitivo	Entro la successiva campagna di misura	Entro 1 mese	Entro 1 mese	Entro 5 gg lavorativi
Allertamento	Entro la successiva campagna di misura	Entro 1 mese	Entro 1 mese	Entro 8÷72 h compresi giorni festivi*

*a seconda della componente malfunzionante/danneggiata

7.2.4 Frequenza

Per quanto riguarda la **manutenzione straordinaria/correttiva**, si suggeriscono le seguenti tempistiche orientative per il ripristino della corretta funzionalità dei sistemi di misura (Tabella 4):

Il possesso di un magazzino-ricambi adeguato, al fine di ridurre e semplificare i tempi e gli interventi di ripristino, è un'opportunità da valutare, nel caso di reti di monitoraggio conoscitivo, mentre diventa una necessità quando la finalità è l'allertamento.

7.3 ASPETTI GESTIONALI

7.3.1 Rapporti e documentazione

Dopo ogni intervento di manutenzione, sia ordinaria sia straordinaria, l'esecutore dovrà compilare in ogni sua parte un dettagliato rapporto dell'attività svolta. È necessario stabilire il tempo massimo entro cui produrre tale documentazione, che dovrà essere archiviata nella base dati per finalità statistiche e gestionali; tale tempo può essere orientativamente fissato in 3/4 giorni.

I rapporti saranno corredati dai risultati dei test e delle prove eseguite, da eventuali immagini e, qualora fosse necessaria la calibrazione dei sensori/data logger, dai relativi certificati; dovranno inoltre essere redatti e sottoscritti dal tecnico che ha eseguito l'intervento.

7.3.2 Mezzi di trasporto e attrezzature

Oltre a disporre di un numero sufficiente di automezzi idonei al raggiungimento o all'avvicinamento dei sistemi

di misura, il gestore dovrà prevedere l'eventuale ricorso a mezzi speciali, a causa della difficoltà di accesso ad alcuni sistemi e della necessità di garantire tempistiche di esecuzione rapide. Si dovrà quindi valutare l'opportunità di stringere accordi per l'utilizzo di impianti a fune o mezzi cingolati, in caso di accessi innevati, e di elicottero.

Fra le attrezzature necessarie per effettuare controlli e riparazioni, oltre ad una buona dotazione degli utensili più comuni, può essere necessario dotarsi di:

- cerca metalli: per rilevare la presenza di pozzetti e terminali di inclinometri e piezometri sepolti da terra o asfalto;
- telecamera per ispezioni in foro: per verificare visivamente lo stato delle tubazioni inclinometriche e piezometriche (lesioni delle pareti dei tubi, ostruzioni a causa di corpi estranei, non corretto allineamento dei giunti, verifica dei tratti di tubo fenestrati, ecc).

8 COMUNICAZIONE DELLE INFORMAZIONI

La condivisione e la diffusione dei dati di monitoraggio rappresentano il punto finale nell'attività di controllo dei fenomeni franosi. I dati infatti vengono raccolti e prodotti al fine di renderli disponibili a tutti i tecnici coinvolti. È pertanto necessario definire non solo una modalità di gestione dei dati raccolti ma anche una strategia di comunicazione dei risultati ottenuti. Schematicamente, possono essere distinti due approcci: i) la diffusione di dati non elaborati; ii) la diffusione di dati elaborati e commentati.

8.1 DIFFUSIONE DEI DATI

Secondo la normativa italiana i dati di monitoraggio dei fenomeni franosi sono assimilati ai dati ambientali, e quindi, in base alla convenzione di Aarhus¹³, qualsiasi persona, fisica o giuridica, ha il diritto di chiedere e ottenere un'informazione senza bisogno di dimostrare uno specifico interesse o una specifica ragione in relazione alla propria richiesta.

Occorre però prestare particolare attenzione nella diffusione di dati perché possono essere soggetti a errate interpretazioni da parte di utenti a cui manca un'adeguata preparazione tecnica o che semplicemente non conoscono in modo approfondito il fenomeno monitorato o i limiti tecnici del sistema di monitoraggio adottato.

La diffusione dei dati può avvenire con finalità di allertamento o di aggiornamento. Nel primo caso i dati sono solitamente a supporto di un sistema di gestione di soglie e allarmi che attivano delle procedure. In tale ambito, i dati devono essere utilizzati preferibilmente attraverso canali di comunicazione predefiniti tra personale che ha ricevuto il dovuto addestramento e che ha chiare le procedure da intraprendere in caso di eventuali superamenti di soglie.

Nel caso di sistemi di monitoraggio con finalità di allertamento, la diffusione di questi dati può risultare controproducente e indurre ingiustificati allarmismi o, al contrario, una falsa sicurezza nella popolazione o da parte degli amministratori pubblici.

Nel caso in cui invece il dato venga comunicato con finalità di aggiornamento, sarà necessario accompagnare sempre tali aggiornamenti con una breve descrizione che prenda in considerazione: i) le finalità del monitoraggio; ii) la frequenza di aggiornamento dei dati; iii) i limiti di utilizzo degli stessi; iv) la possibilità che questi possano (o non possano) essere impiegati a fini di allertamento.

In linea generale, è pertanto consigliabile limitare la diffusione di dati non opportunamente commentati ai soli tecnici esperti e, in ogni caso, quando sia necessario che questi vengano forniti a terzi, è fondamentale che siano accompagnati da una metadocumentazione dettagliata ed esaustiva, che riporti chiaramente i limiti strumentali e tecnici. Rimane tuttavia preferibile adottare strategie di comunicazione del dato differenziate, che si adattino al target comunicativo a cui sono rivolti.

8.2 COMUNICAZIONE DELLE INFORMAZIONI ELABORATE

La gestione di una rete di monitoraggio è un'attività interdisciplinare che coinvolge una grande varietà di soggetti, dalle figure professionali come ingegneri e geologi, agli amministratori degli enti pubblici (politici e tecnici comunali provinciali o regionali) fino alla popolazione. Tutti questi soggetti partecipano (direttamente o indirettamente) alla gestione del fenomeno sia per le azioni di allertamento che di pianificazione e pertanto la loro collaborazione è fondamentale. Nella fase di condivisione delle informazioni è importante definire un'appropriata strategia di comunicazione che tenga conto sia del profilo tecnico delle persone verso cui è rivolta sia delle

¹³ convenzione di Aarhus:

https://www.isprambiente.gov.it/it/garante_aia_ilva/normativa/Normativa-sull-accesso-alle-informazioni/normativa-sovranaazionale/convenzione_aarhus_25_06_1998.pdf

finalità per cui è stato realizzato il monitoraggio (allertamento o conoscitivo, cfr. Cap. 2).

È necessario sviluppare un approccio più complesso che unisca la gestione dei dati e le procedure che assicurino una corretta comunicazione agli interessati. Nel caso di sistemi di allertamento deve anche essere presa in considerazione la comunicazione dei diversi livelli di allerta raggiunti al superamento delle soglie predeterminate.

Giordan *et alii* (2019) hanno proposto di differenziare la comunicazione sulla base di 4 profili di utenti differenti:

- **gruppo 1.** *Amministratori* (sindaco, tecnici comunali, politici, ecc.). Sono in genere responsabili delle decisioni finali riguardanti la pianificazione e la gestione della sicurezza. La loro conoscenza tecnica sui fenomeni naturali è limitata, quindi necessitano di informazioni sul sistema di monitoraggio semplici, chiare e sintetiche;
- **gruppo 2.** *Personale tecnico* (ad esempio *Ingegneri, geologi e tecnici* o membri della protezione civile). Necessitano di informazioni di dettaglio sull'evoluzione della frana, sul livello di pericolo attuale e nel caso del sistema di allertamento dei risultati aggiornati dei modelli cinematici di evoluzione del fenomeno;
- **gruppo 3.** *Tecnici esperti di sistemi di monitoraggio*, responsabili della gestione del sistema di monitoraggio e incaricati del mantenimento in efficienza della rete di monitoraggio, dell'analisi, della validazione e dell'elaborazione dei dati. Necessitano dell'accesso diretto a tutti i dati grezzi per controllare che il sistema funzioni correttamente;
- **gruppo 4.** *Popolazione* (persone coinvolte indirettamente nella gestione del rischio). L'adeguato coinvolgimento della popolazione è fondamentale per la corretta gestione della percezione del rischio e per far comprendere le scelte di pianificazione effettuate dall'amministrazione. Solo una popolazione ben informata risponderà correttamente durante le fasi

più critiche dell'emergenza. La conoscenza tecnica del fenomeno è generalmente limitata e quindi si deve fornire una comunicazione semplice, essenziale e di facile comprensione in particolare se i cittadini devono mettere in atto delle azioni contenute in una procedura di protezione civile.

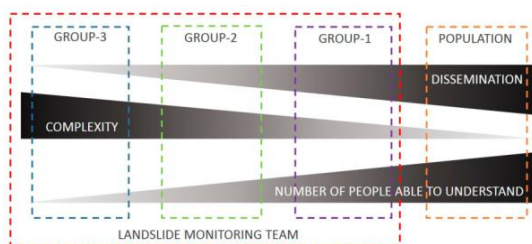


Figura 58 – Profili di utenti differenti per la comunicazione (da Giordan *et alii* 2019 modificata)

I prodotti forniti devono tener conto anche delle finalità per cui è stato realizzato il sistema di monitoraggio. Nel caso di finalità di allertamento, sarà fondamentale fornire prodotti di sintesi tempestivi e con elevata frequenza (in genere giornaliera nei momenti di maggiore attività della frana). Anche il controllo di funzionalità della strumentazione e la validazione dei dati di dettaglio dovranno avvenire con frequenza ravvicinata da parte degli operatori del gruppo 3 (Figura 58).

Nel caso del monitoraggio conoscitivo la frequenza di aggiornamento dei prodotti e il controllo del sistema potrà avvenire con una cadenza più rada, anche in presenza di sistemi che acquisiscono dati orari. Rimane tuttavia fondamentale che vengano realizzati prodotti di sintesi (con frequenza generalmente da mensile a semestrale) che permettano agli amministratori e ai tecnici di conoscere l'andamento del fenomeno monitorato.

Per quanto riguarda la tipologia di prodotti, è essenziale valutare con attenzione la complessità del documento in funzione delle categorie di utenti a cui si rivolge. Nello specifico, si suggerisce di adottare delle rappresentazioni che abbiano un grado di complessità compatibile con la preparazione tecnica scientifica

presunta del gruppo a cui tali informazioni sono rivolte. Semplificando, è quindi funzionale adottare dei bollettini informativi semplificati rivolti alla popolazione e/o al personale che non ha una preparazione specifica sui sistemi di monitoraggio. In questi casi, si suggerisce di ridurre al minimo la quantità di informazioni numeriche lasciando maggiore spazio a rappresentazioni infografiche.

L'uso di bollettini è molto importante in quanto costituisce un mezzo con il quale si riesce a condividere non solo il dato della rete di monitoraggio ma anche un commento più o meno articolato relativo al livello di attività della frana e alla severità della criticità in cui si trova l'area potenzialmente a rischio. Gli amministratori, e a maggior ragione la popolazione possono avere difficoltà a distinguere tra le diverse finalità di monitoraggio (allertamento/conoscitivo) descritte nel Capitolo 2. Si ribadisce pertanto che occorre comunicare in modo molto chiaro e facilmente comprensibile per quale motivo si sta effettuando il monitoraggio, in modo che le informazioni fornite possano essere correttamente contestualizzate dai fruitori.

Mano a mano che sale il livello di preparazione del personale a cui si rivolgono i bollettini cambia anche il rapporto tra dato numerico e infografica. Nella documentazione tra addetti ai lavori viene solitamente dato ampio spazio a grafici e valori numerici che sono in grado di fornire una valutazione di tipo quantitativo dell'evoluzione della frana.

Nel caso delle modalità di comunicazione all'interno del personale dedicato alla gestione dei dati di monitoraggio, l'approccio suggerito è invece maggiormente orientato ad una condivisione del flusso di dati provenienti dalle reti di monitoraggio, con la possibilità di accedere sia ai dati grezzi che elaborati. In caso di allertamento, tale gruppo dovrà anche essere messo nelle condizioni di ricevere dei messaggi di allerta che contengono delle informazioni (per esempio sotto forma di grafico) dell'avvenuto superamento di una soglia. Le modalità di rappresentazione dovranno essere in grado di evidenziare agevolmente i dati sopra soglia e supportare gli operatori nel processo di

validazione della eventuale condizione di allerta legata all'effettivo superamento di una soglia strumentale.

Nel caso del monitoraggio conoscitivo invece, l'accesso ai dati di dettaglio permetterà agli esperti di dominio di effettuare analisi e correlazioni approfondite finalizzate ad affinare il modello geologico e/o geotecnico o a valutare le migliori soluzioni operative a supporto della pianificazione e della progettazione di opere per la mitigazione del rischio.

Nel mondo della comunicazione, va attribuita un'importanza rilevante al ruolo dei social media ed al rapporto con le testate giornalistiche. Per quanto riguarda in particolar modo i giornalisti, è necessario valutare sempre attentamente le modalità di trasferimento di concetti talora complessi a persone che non sempre hanno una preparazione scientifica specifica. Come precedentemente descritto, è quindi necessario adattare il livello delle comunicazioni alla sensibilità delle persone a cui è rivolto. Al fine di sviluppare una migliore sinergia con i mezzi di comunicazione di massa ed avere un rapporto migliore soprattutto durante le emergenze, è necessario investire preventivamente delle risorse per trasferire una serie di concetti di base ai giornalisti più attivi sul territorio di riferimento. In questo modo, è possibile far crescere una maggior consapevolezza ed una preparazione specifica migliore nei confronti degli argomenti che riguardano il monitoraggio delle frane.

In ogni caso, è fondamentale evitare approcci sensazionalistici che potrebbero essere anche oggetto di strumentalizzazioni o di messaggi distorti. A tal proposito, si reputa necessaria l'istituzione di un canale di comunicazione ufficiale con i media che sia in grado di gestire con continuità ed efficienza il flusso di comunicazioni.

APPENDICE

A. STRUMENTAZIONE: SPECIFICHE TECNICHE E INSTALLAZIONE

Nella presente appendice verranno descritte sia le principali caratteristiche tecniche di sensori, strumentazione e accessori, necessari per la realizzazione di una rete di monitoraggio dei dissesti, che le modalità di installazione al fine di renderne ottimale ed omogeneo il funzionamento. Nell'allegato alle Linee guida sarà possibile consultare i costi di riferimento di quanto qui descritto.

A.1 STRUMENTAZIONE SUPERFICIALE

Si intende di seguito illustrare la strumentazione utile per le misurazioni di movimenti che si manifestano in superficie, mediante aperture di fratture, o la sensoristica atta alla misura della variazione di verticalità di strutture fuori terra.

A.1.1 Distometri a nastro

Il distometro a nastro è utilizzato per effettuare misure manuali di precisione fra due punti fissi (caposaldi distometrici). Sostanzialmente è costituito da nastro millimetrato in acciaio, da telaio dotato di borchie per l'aggancio, da un tensionatore per il nastro e da un sistema digitale o analogico per la lettura della misura. La precisione strumentale deve essere inferiore a 0,1 mm e il distometro deve essere fornito con apposito telaio o banchetto di calibratura per poter effettuare periodicamente (almeno una volta all'anno) misure di calibrazione. Generalmente sono disponibili distometri con differenti lunghezze (al massimo alcune decine di metri) del nastro in acciaio in funzione della massima distanza fra i capisaldi distometrici.

Installazione

Fondamentale per l'affidabilità e la rappresentatività di una rete distometrica è l'ottimale posizionamento dei caposaldi distometrici. I caposaldi, necessari per l'aggancio al misuratore di convergenza, dovranno

essere in acciaio inox e dotati di testa filettata 3/8"; la lunghezza totale sarà di circa 100 mm di cui la parte inferiore (zigrinata e con diametro di almeno 10 mm) da cementare, in roccia/cemento o da fissare su struttura metallica, mentre quella superiore, come detto con filettatura a vite 3/8", andrà protetta, durante i periodi di non utilizzo, con tappi in plastica o acciaio filettati femmina 3/8". I caposaldi andranno infissi, mediante resine epossidiche, su punti inamovibili e ritenuti significativi per la misura. A parità di altre condizioni è opportuno progettare linee di misura distometriche i cui caposaldi siano quanto più vicini possibile. Fondamentale per la buona rappresentatività della misura è che i caposaldi siano posati in modo che la direzione di misura sia quanto più possibile simile al vettore di massimo spostamento previsto per la frana.

A.1.2 Estensimetri

Gli estensimetri a filo (Figura A.1) sono utilizzati per valutare quantitativamente l'apertura/chiusura di fessure in roccia/terreno. I sensori possono generare segnali in tensione o corrente. Sono costituiti da un sensore di misura (protetto all'interno di una scatola in acciaio inox) e da un filo, in materiale a basso coefficiente di dilatazione termica, tenuto in tensione da un sistema a molla. Ogni movimento lineare del cavo di acciaio dovuto allo spostamento tra la scatola del sensore e l'ancoraggio di riferimento produce una variazione del segnale elettrico che potrà essere facilmente riferito ad una misura di spostamento lineare.

Il trasduttore di spostamento dovrà avere campo di misura elettrico adeguato alla tipologia di movimento attesa per il dissesto oggetto di monitoraggio, la risoluzione dovrà essere migliore di 1 mm e l'accuratezza non superiore al valore di +/- 0,5 mm. Generalmente è sufficiente che lo strumento garantisca un intervallo di operatività fra -20 °C e + 60 °C.

La fornitura di un estensimetro dovrà tenere conto di poter disporre di una escursione del filo (in acciaio) adeguata in funzione dei movimenti attesi così da evitare frequenti riallineamenti.

Per una più agevole installazione è consigliabile che gli estensimetri forniti presentino già un cavo precablato (è sufficiente una lunghezza di 2-3 metri) per il collegamento al sistema di trasmissione/alimentazione.



Figura A.1 - Estensimetro a filo area di Sassavin - Valdisotto (SO).
Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Installazione

Fondamentale per una significativa rappresentatività del dato acquisito sarà il posizionamento della linea estensimetrica (rappresentata dal cavo di tensionamento e dal cavo di collegamento con l'ancoraggio di riferimento) che dovrà essere quanto più possibile parallela al vettore di massimo spostamento previsto per la frana.

Gli estensimetri verranno di norma montati su apposito pilastrino, reso solidale al substrato, o più frequentemente saranno fissati su roccia o su altre strutture adeguate mediante l'utilizzo di apposite piastrelle e carpenteria che ne permettano l'ottimale orientazione e garantiscano la linearità della misura.

In ogni caso le basi di monte e di valle delle linee estensimetriche dovranno essere posizionate su punti fissi che permettano di materializzare in parallelo una

linea di misura distometrica che permetta la verifica del dato automatizzato.

Poiché la misura può essere condizionata da variabili ambientali (es. neve sul filo, passaggio di animali ecc.) è opportuno proteggere il filo con tubazioni esterne in plastica con giunto a bicchiere o elementi modulari metallici (Figura A.2).

Per ragioni di sicurezza si suggerisce di posizionare, in prossimità dei sensori di misura estensimetrici, corde ad alta visibilità e/o cartellonistica indicante la presenza dei cavi. Come già detto al Capitolo 5 al termine di ogni installazione dovrà essere fornita la scheda di installazione dello strumento (marca/modello, *serial number*, data installazione, coordinate geografiche base di monte, lunghezza e azimuth linea di misura, immagine fotografica strumento in posto) e certificato di taratura.



Figura A.2 - Estensimetro a filo protetto da tubo in pvc, vertice frana di Val Pola- Valdisotto (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

A.1.3 Fessurimetri

Il fessurimetro (Figura A.3) è costituito da un corpo in acciaio inox montato su supporto orientabile al cui interno è alloggiato il sensore di misura. Un'asta di misura in acciaio inox può scorrere all'interno del corpo principale. Una variante, necessaria qualora oltre al movimento in apertura o chiusura della frattura si possa attendere anche un movimento verticale (che non verrà però misurato), considera l'installazione di una piastra

metallica/squadretta metallica da fissare a parete e che permette così all'asta telescopica di appoggiarsi e scorrere all'interno del corpo in acciaio inox (entro il quale trova alloggiamento il sensore di misura). Tale tipologia di strumentazione può essere installata qualora la frattura presenti un gradino per cui è difficile procedere con l'installazione di un fessurimetro classico.

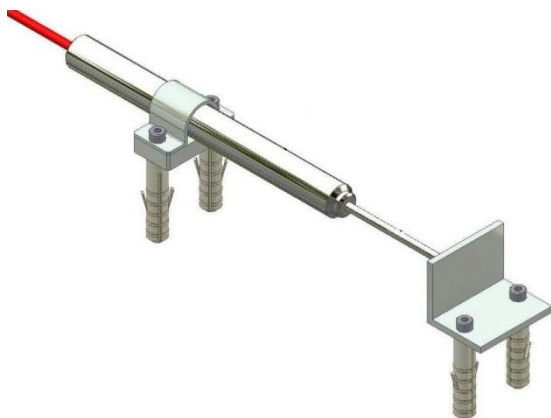


Figura A.3 – Schema di mini fessurimetro. Fonte: SISGEO S.r.l.

Una seconda tipologia intermedia tra i fessurimetri e gli estensimetri veri e propri è costituita dai deformometri che consistono in una piastra da fissare sulla quale sono alloggiati:

- 1) il corpo sensore;
- 2) una carrucola;
- 3) un'asta di misura che può scorrere all'interno del corpo sensore e alla cui estremità è fissato un cavetto in kevlar o altro materiale poco sensibile alle variazioni termiche;
- 4) un tassello o altro ancoraggio dove fissare l'estremità libera del cavetto in kevlar.

Quest'ultima tipologia (es. Figura A.5) è consigliata per la misura di fratture che possono presentare già un'apertura rilevante (fino a 10 metri) e non si riesca a ricorrere all'installazione di estensimetri.

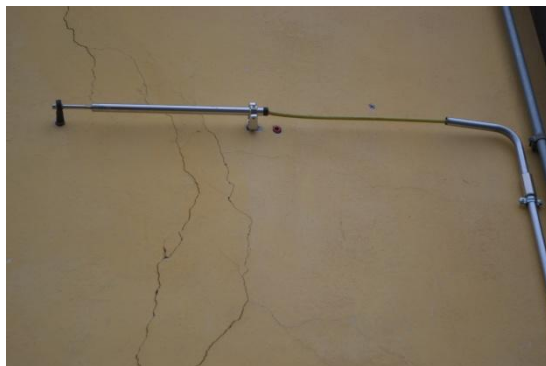


Figura A.4 - Fessurimetro elettrico a controllo di una serie di crepe sulla chiesa parrocchiale di Dossena (BG). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia



Figura A.5 - Deformometro elettrico, parete rocciosa "Rocce di Vignola" – Ponte Nizza (PV). A destra (lato di monte frattura) si osserva la piastra di fissaggio che ospita la carrucola, la testa di misura e il corpo sensore, a sinistra l'ancoraggio di valle del filo in kevlar. La frattura mostra un'apertura alla base di circa 1,5 m. Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Nel caso di fessurimetri elettrici, la variazione della posizione dell'astina collegata al trasduttore genera un segnale elettrico che viene convertito in misura ingegneristica. Nei fessurimetri a corda vibrante, una corda in acciaio armonico posta all'interno, registra spostamenti in allungamento o in accorciamento variando conseguentemente la frequenza di vibrazione

della corda da cui è possibile ricavare l'entità dello spostamento.

Il sensore dovrà avere campo di misura adeguato alla tipologia di movimento attesa (i *range* tipici sono compresi tra 10 fino a 150 mm, in alcuni casi fino a 500 mm), con una precisione totale <0,5% del valore di fondo scala (F.S.) per i fessurimetri a corda vibrante e < 0,3% F.S. per i fessurimetri elettrici e deformometri. Generalmente è sufficiente che lo strumento garantisca un intervallo di operatività fra -20 °C e +60 °C.

Installazione

Come per gli estensimetri, per una significativa rappresentatività del dato è fondamentale il corretto posizionamento dello strumento, che dovrà essere allineato nel verso del massimo spostamento atteso (ove non lo fosse, infatti, si andrebbe a misurare solo una parte dello spostamento massimo).

Qualora fossero attesi spostamenti in apertura, in fase di installazione bisognerà avere l'accortezza di posizionare l'asta di misura con la minore estensione possibile; al contrario, per movimenti in chiusura l'asta dovrà essere estesa al massimo così da evitare successivi o frequenti riposizionamenti.

Nel caso di installazione di deformometri, è necessario che il sistema costituito dalla piastra di fissaggio – asta di misura – carrucola sia correttamente orientato in modo tale che non si generi attrito tra il cavo di collegamento in kevlar e la carrucola.

I fessurimetri e i deformometri sono di norma fissati con tasselli o barre filettate, opportunamente resinati al fine di rendere solidale lo strumento al substrato.

I fessurimetri, considerato che sono formati da un corpo sensore in acciaio e da un'asta telescopica, non necessitano (a differenza degli estensimetri) di protezioni particolari; solo nel caso di installazione lungo pareti rocciose si potrà valutare l'aggiunta di tubi o cupole in metallo a protezione da eventuali cadute di blocchi. Per i deformometri, analogamente agli estensimetri, è possibile prevedere la protezione del filo e valutare la necessità di posizionare per ragioni di

sicurezza corde ad alta visibilità e/o cartellonistica indicante la presenza dei cavi.

Come per gli altri sensori al termine di ogni installazione dovrà essere fornita scheda di installazione dello strumento (marca/modello, *serial number*, data installazione, coordinate geografiche, tipologia dello strumento, immagine fotografica strumento in posto) e certificato di taratura.

A.1.4 Inclinatori da parete

I clinometri da parete (Figura A.6, Figura A.7) sono utilizzati per la misura delle variazioni di inclinazione di un corpo rigido – come, ad esempio, una parete rocciosa – in cui sono attesi spostamenti con componenti rotazionali. A seconda della tipologia del sensore installato, è possibile misurare l'inclinazione secondo una direzione (sensore monoassiale) o in due direzioni ortogonali tra loro (sensore biassiale).

Il sensore è alloggiato all'interno di un corpo in metallo a tenuta stagna fissato solitamente attraverso una piastra metallica o inox (alcuni modelli possono essere fissati anche solo mediante viteria – Figura A.6, Figura A.7), alla parete da monitorare, è di tipo MEMS¹⁴ oppure servoaccelerometrico. A seconda dei modelli, una staffa orientabile o uno snodo sferico presente tra il corpo sensore e la piastra consente di mettere in bolla lo strumento.

Il sensore dovrà avere campo di misura adeguato alla tipologia di movimento attesa (i *range* solitamente sono compresi tra -2,5°/+2,5° e -15°/+15°, alcune case costruttrici propongono modelli in grado di misurare fino a +/-30° di inclinazione), una risoluzione di 0,001° e una temperatura di esercizio compresa tra -20 °C e +50 °C. È inoltre importante che il corpo in metallo mostri un grado di protezione almeno IP66 o superiore.

Sul mercato sono disponibili strumenti con incorporato un sensore per la misura della temperatura (termistore) per la correzione del dato reale (spesso il dato è infatti influenzato da questo fattore); alcuni modelli, inoltre,

¹⁴ *Micro electro mechanical systems*, ovvero sensori microelettronici dalle dimensioni compatibili con quelle della microelettronica, consumi di potenza elettrica ridotti e costo competitivo

sono forniti anche di sensore d'urto con soglia di reazione regolabile (ciò potrebbe essere utile in vicinanza di strade, ferrovie o cave).

Per una più agevole installazione è consigliabile che la strumentazione presenti un cavo precablato (almeno un metro per facilitare le attività in campo) e un connettore per il collegamento al sistema di trasmissione/alimentazione.

Installazione

Prima di procedere all'installazione della piastra provvista di nodo sferico/staffa di supporto, è necessaria la pulizia preliminare della superficie. Dopo aver fissato la piastra con delle viti/tasselli di espansione, è buona prassi, prima di procedere all'installazione dello strumento vero e proprio, una verifica di funzionalità del sensore, impostando un'inclinazione nota (anche grossolanamente) e verificando con un datalogger portatile la proporzionalità tra segnale elettrico generato e l'inclinazione. Al termine di questa verifica, si procede con l'installazione del corpo sensore, regolandone la sua orientazione con le viti/bulloni dello snodo o staffa di supporto, fino a far sì che lo strumento assuma una posizione verticale o orizzontale. Per facilitare l'orientazione, si utilizza una livella a bolla (alcuni strumenti hanno una bolla sferica per facilitare queste operazioni) o si verifica con il datalogger portatile.

Al termine di ogni installazione dovrà essere fornita scheda di installazione dello strumento (marca/modello, numero di serie, data installazione, coordinate geografiche, immagine fotografica strumento in posto) e certificato di taratura.



Figura A.6 - Clinometro da parete installato a controllo di un pilastro della palestra comunale di Dossena (BG). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

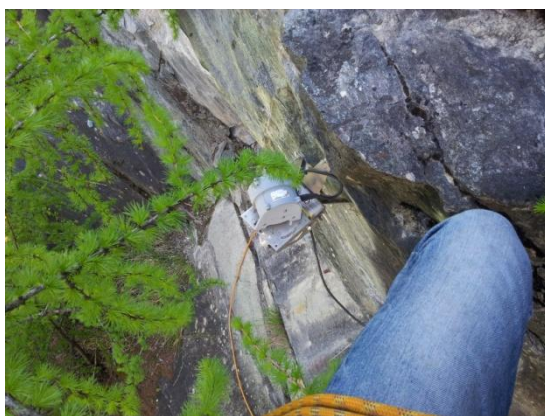


Figura A.7 - Clinometro da parete installato a controllo della parete del Sasso del Cane (Comune di Chiesa in Valmalenco – SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

A.2 STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA E RADAR

La strumentazione descritta nel presente paragrafo viene utilizzata per monitoraggi di spostamenti superficiali o per rilievi lidar e/o di immagini dall'alto. La Stazione Totale e la strumentazione GNSS misurano le medesime grandezze, esprimendo il risultato della misura su una terna di coordinate geografiche (le prime solitamente attraverso coordinate locali, mentre le seconde determinano le coordinate in un sistema di riferimento globale). Il radar interferometrico da terra o da satellite acquisisce una misura di distanza, relativa alla linea congiungente il proprio punto di vista al bersaglio misurato, comunemente definita con l'acronimo inglese LOS (*Line Of Sight*, cioè linea di vista).

A.2.1 Stazione totale e mire ottiche

Una rete di monitoraggio topografica è sinteticamente costituita da tre elementi:

- 1) punto (o punti) stazione, dove viene installata la stazione totale;
- 2) punti di riferimento (master), materializzati con dei prismi ottici o target installati all'esterno dell'area in movimento,
- 3) punti di controllo, anch'essi materializzati con prismi o target e ubicati a controllo dell'area in movimento.

A.2.1.1 Stazione totale

Nel presente paragrafo si descriverà il punto 1 lasciando al Paragrafo A.2.1.2 la descrizione delle mire ottiche o target.

La stazione totale è una strumentazione servoassistita che permette sia la misura di angoli che di distanze e può essere utilizzata sia in modalità periodica/manuale (con l'operatore che si reca sul punto di misura ed effettua la campagna) che in continuo strutturando una frequenza di campionamento plurigiornaliera (Figura A.8). È preferibile l'utilizzo della stazione totale in modalità automatizzata, anche per le misure manuali, al fine di mantenere una elevata precisione di collimazione

ed una omogeneità delle misure indipendentemente dall'operatore.

Per il monitoraggio degli spostamenti superficiali di una frana è opportuno che la precisione della strumentazione non sia inferiore a 0,00015 gon (0,5") per gli angoli ed a 1 mm + 1 ppm per le distanze. Ove però il gestore del monitoraggio ritenesse di utilizzare precisioni differenti è opportuno che le stesse vengano espressamente dichiarate.



Figura A.8 - Stazione totale per monitoraggio Val Genasca- S. Giacomo Filippo (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

La stazione totale dovrà disporre di dispositivo automatico di puntamento, ad inseguimento del prisma, e principio di autocollimazione elettronica che consenta collimazioni automatiche di alta precisione.

La portata del sistema di puntamento automatico e del distanziometro deve essere compatibile con l'utilizzo che ne viene fatto (va però tenuto conto come reti che prevedano misure ad oltre 1500-2000 metri di distanza risultano maggiormente affette da problemi di affidabilità e precisione).

Per quanto riguarda il cannocchiale dovrà essere ad ottica oculare con ingrandimento non inferiore a 30 X.

Poiché la stazione di misura potrà subire delle disconnessioni temporanee dalla corrente continua è indispensabile che la stessa sia dotata di batterie, che permettano il funzionamento della stazione per alcune

ore, e di scheda di memoria (minimo 64 MB) per la registrazione dei dati.

Il basamento della stazione totale dovrà garantire una altezza strumentale costante e dovrà permettere l'installazione su piastre con vite maschio 5/8".

La stazione totale utilizzata deve essere sempre perfettamente funzionante e calibrata come risultante da apposito certificato (in data non anteriore a 1 anno dalla data delle misure).

Installazione

Di fondamentale importanza, sia che si operi con misure periodiche che in continuo, risulta la realizzazione della rete di monitoraggio. La stazione totale dovrà preferibilmente essere posizionata su apposito master da realizzarsi in posizione frontale rispetto all'area di frana. La posizione, che dovrà collocarsi su substrato stabile, deve essere scelta al fine di avere una buona visibilità di tutta l'area oggetto di monitoraggio, minimizzare la distanza stazione-mire ottiche, avere una linea di misura stazione-prisma riflettente il più possibile orizzontale o comunque poco inclinata. Il master dovrà essere realizzato in calcestruzzo armato in opera (almeno rck 300 di cemento per metro cubo d'impasto). La fondazione, generalmente dalle dimensioni minime di 100×100×50 cm, andrà posta almeno a -100 cm da p.c. e comunque dovrà avere dimensioni e profondità tali da garantire la perfetta stabilità dell'opera (Figura A.9). Ove possibile la fondazione dovrà essere resa solidale con la roccia, mediante l'infissione di apposite barre in metallo.

Per l'aggancio dello strumento topografico al di sopra della parte più alta dovrà essere posata, perfettamente a livello, una piastra di fissaggio, in acciaio inox, con vite 5/8".

Qualora si preveda l'acquisizione in continuo dei dati la rete di monitoraggio dovrà essere strutturata prevedendo un ricovero (Figura A.10) per la stazione totale (con adeguate trasparenze che permettano l'osservazione della frana evitando la riflessione del raggio di misura), la presenza di un impianto elettrico a norma (per la continuità dei dati può essere utile

prevedere anche la presenza di autorimante per il ripristino automatico dell'alimentazione), di batteria tampone, di hardware e software per acquisizione dati e gestione comunicazioni.



Figura A.9 - Realizzazione pilastro per monitoraggio topografico.
Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

La piattaforma software deve essere in grado di interrogare e gestire la stazione totale, estrarre i dati e trasmetterli, secondo i formati standard definiti al Capitolo 6, nonché analizzare i dati acquisiti.

Mediante i software deve inoltre essere possibile configurare la stazione programmando la frequenza di campionamento ed impostando l'ordine di lettura delle mire ottiche.

Sia che le letture siano continue che periodiche le mire ottiche dovranno essere posizionate su capisaldi fissi e significativi per lo studio dei movimenti della dinamica dell'area di frana. All'esterno dell'area di frana, ma ad una distanza analoga a quella delle mire ottiche, andranno posizionati preferibilmente tre master di controllo da attrezzarsi con mire ottiche. Una volta realizzata la rete topografica, andrà predisposta cartografia d'insieme ed ogni singolo caposaldo sarà fotografato al fine di consentirne un primo inquadramento ambientale.



Figura A.10 - Ricovero per monitoraggio topografico in continuo frana di Val Genasca- S. Giacomo Filippo (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

A.2.1.2 Mire ottiche

Come detto una rete di monitoraggio topografica è costituita da stazione totale e mire ottiche collocate su capisaldi in acciaio inox e dotati di testa filettata a maschio 5/8" o su piolo sagomato per innesto a baionetta. Tali capisaldi dovranno essere fissati in roccia mediante resine, ove si rendesse indispensabile realizzare un pilastro lo stesso andrà adeguatamente fondato al fine di renderlo solidale con la dinamica del versante.

Per quanto riguarda la gestione delle mire una distinzione importante è determinata dalla modalità di esecuzione delle misure: nel caso di reti automatizzate i punti stazione, di riferimento e di misura non saranno rimossi; al contrario, nel caso di misure periodiche, si potrà valutare se installare i prismi di volta in volta oppure – ciò dipende anche dall'accessibilità o meno dei punti di misura – mantenerli in sito, adottando tutte le accortezze del caso (si veda in seguito).

Sul mercato esistono diverse tipologie di prismi ottici indicati per il monitoraggio di frane: dalle mire ottiche classiche, complete di montatura e piastra segnale a quelli a becco di flauto per ridurre le interferenze con la luce solare e gli agenti atmosferici (pioggia, neve), ai miniprismi per reti di ridotte dimensioni e distanze. I target topografici, dato i loro limiti legati alla lettura (in

condizioni standard, la lettura è di poco superiore ai 100 m), trovano scarsa applicazione nel monitoraggio di dissesti. Come sopra accennato, i prismi saranno posizionati su fittoni con attacco a baionetta o filettati, a loro volta infissi in modo stabile a strutture o alla roccia; le mire a becco di flauto saranno invece fissate al punto da monitorare mediante supporti a L o a U orientabili (Figura A.11). Se il punto di monitoraggio, materializzato con un fittone, è a piano campagna, si può utilizzare un'asta metallica (alluminio) porta prisma da fissare/avvitare sul fittone per migliorare l'intervisibilità con il punto stazione. L'altezza delle aste porta prisma generalmente è di 50 cm o suoi multipli. Per limitare rotazioni e movimenti dei prismi fissi, potrebbe essere opportuno bloccare lo strumento con mastici siliconici. Ciò è particolarmente consigliabile nel caso di reti topografiche automatizzate sia per ridurre gli interventi di riposizionamento delle mire, sia la presenza di operatori in aree pericolose, oltre che per evitare la perdita di letture.

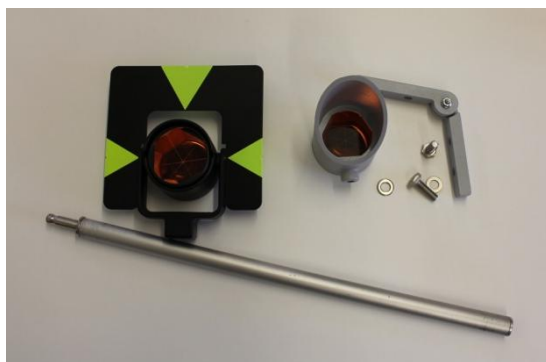


Figura A.11 - Mira ottica classica completa di piastra segnale (a sinistra), asta portaprisma (in basso), mira ottica a becco di flauto con carpenteria metallica per installazione (a destra). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

La mira ottica sarà costituita da vetro riflettente dal diametro non inferiore ai 60 mm, precisione di centramento inferiore a 1 mm e deviazione del raggio inferiore a 2". La portata dovrà essere di almeno 2000 m.

I miniprismi sono invece costituiti da un supporto orientabile (generalmente in alluminio) sul quale è installato il prisma. Il miniprisma è completo di vetro riflettente dal diametro di 24 mm e dovrà avere una portata di almeno 400 m.

Installazione

Nella progettazione di una rete topografica bisognerà valutare attentamente l'ubicazione dei vari prismi: a differenza di altre strumentazioni di monitoraggio (ad esempio, radar da terra ad apertura sintetica) che permettono un controllo areale più o meno ampio, queste sono misure puntuali.

In assenza di informazioni pregresse, i prismi dovranno essere installati lungo il corpo di frana/versante formando un reticolo, permettendo così di individuare le eventuali aree con maggiori spostamenti. Una serie di prismi dovrà essere prevista anche all'esterno della presunta area in movimento, in modo tale da controllare l'eventuale espansione laterale o una retrogressione della zona in spostamento. Generalmente, per una migliore compensazione dell'errore, deve essere previsto un numero adeguato di prismi (preferibilmente tre) all'esterno dell'area di frana che costituiranno i master di riferimento.

I prismi dovranno essere installati su postazioni stabili: per questo motivo, saranno fissati su ammassi e blocchi rocciosi, edifici (Figura A.12), muri di sostegno ecc., possibilmente evitando strutture che possano essere soggette a forti dilatazioni termiche (ad esempio, strutture metalliche, tralicci dell'alta tensione, ecc.); qualora ciò non fosse possibile, si potranno realizzare dei manufatti in calcestruzzo (per esempio, pilastri in elevazione, pozzetti prefabbricati riempiti con calcestruzzo, ecc.), resi solidali al terreno/substrato roccioso. Per reti topografiche che prevedono l'esecuzione di misure periodiche con prismi installati e rimossi ad ogni campagna di misura, bisognerà tener conto sia dell'accessibilità dell'area, sia della facilità di installazione della mira, che preferibilmente dovrà essere posizionata ad un'altezza inferiore ai 2 metri; al contrario, in presenza di prismi fissi, gli stessi devono essere installati in modo tale che non siano facilmente

oggetto di manomissioni dolose (atti vandalici o furti) o accidentali (urto da parte di animali). Per mantenere efficiente la rete topografica dovranno essere programmati degli interventi di pulizia e rimozione della vegetazione (solitamente è sufficiente prevedere due interventi all'anno, in primavera e in estate).

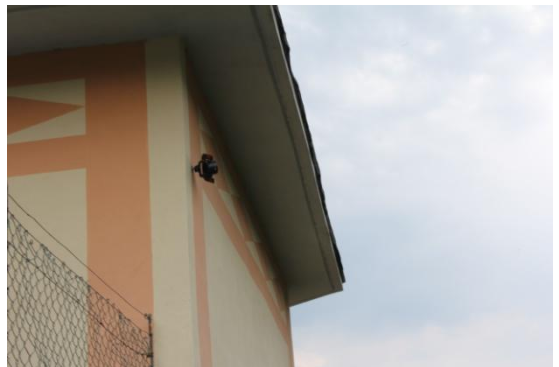


Figura A.12 - Mira ottica installata su edificio – Frana dei Tezzi in Comune di Gandellino (BG). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

A.2.2 Strumentazione GNSS

L'utilizzo di strumentazione GNSS per il monitoraggio delle deformazioni superficiali è ormai una tecnica consolidata sia per lo studio di fenomeni a scala regionale/continentale sia per lo studio ed il monitoraggio dei dissesti, fino ad arrivare al monitoraggio di strutture. La strumentazione utilizzata tradizionalmente è di tipo geodetico, poiché questa consente di raggiungere un livello di accuratezza ed affidabilità molto elevate, sfruttando tutte le frequenze. L'evoluzione della strumentazione GNSS nel corso degli anni ha sensibilmente ridotto il costo dei ricevitori a doppia frequenza, anche se si tratta comunque di cifre importanti (vedi Allegato). La scelta della strumentazione da utilizzare deve considerare il tipo di monitoraggio che si intende eseguire: campagne periodiche statiche, misure RTK (*Real Time Kinematic*), monitoraggio in continuo tramite stazioni automatizzate, ecc. Nei casi di misure periodiche sarà utile disporre di strumenti a doppia frequenza in grado di effettuare sia misure statiche di elevata precisione di tipo geodetico,

con elaborazione dei dati in post-processamento, sia rilievi cinematici. Tali strumenti potranno, pertanto, essere dotati di software in grado di utilizzare le correzioni in tempo reale e di modem per connettersi ad una seconda stazione base locale per eseguire rilievi RTK oppure, tramite rete GPRS o UMTS, alle Reti GNSS di posizionamento in tempo reale (NRTK).

Esistono in commercio anche ricevitori a singola frequenza che hanno costi inferiori (vedi Allegato), e che permettono di raggiungere una buona accuratezza della misura per applicazioni in *baseline* corte (entro i 10 Km). Il rilievo con tali sensori necessita, solitamente, di sessioni di misura statiche più lunghe (circa il doppio rispetto ai ricevitori doppia frequenza). Inoltre, negli ultimi anni sono stati sperimentati e realizzati sistemi di monitoraggio che utilizzano sensori GNSS, anche a doppia frequenza, a basso costo, più economici e con una accuratezza e precisione confrontabili rispetto a quelli geodetici tradizionali, previo l'utilizzo di antenne di alta qualità ed una adeguata manutenzione. Questi sensori potrebbero in futuro avere un campo di applicazione nel monitoraggio dei fenomeni franosi e affiancare o sostituire i ricevitori geodetici. Attualmente, possono essere utilizzati nel caso di fenomeni franosi molto veloci per i quali si richiede una precisione minore e/o ci possa essere il rischio di perdita dello strumento. È comunque necessario tener presente che, spesso, questi strumenti sono venduti/noleggianti soltanto unitamente al servizio di post-processing, necessitando di una particolare attenzione nel trattamento del dato.

Installazione

La scelta dei punti su cui effettuare le misure GNSS deve tenere conto di numerosi aspetti: la significatività dell'area in cui andrà materializzato il punto di misura ai fini del controllo della cinematica del fenomeno; l'assenza di ostacoli sopra l'orizzonte che impediscano la buona ricezione del segnale satellitare, e di possibili interferenze al segnale (tralicci dell'alta tensione, ripetitori per la telefonia cellulare, centrali di distribuzione dell'energia elettrica); la possibilità di raggiungere il sito per le operazioni di misura o di manutenzione nel caso di strumentazione in continuo. È

importante quindi individuare con cura il sito su cui materializzare il caposaldo (centrino o caposaldo autocentrante) o installare il supporto per la strumentazione in continuo, in modo che esso sia ben ancorato al *bedrock* o, nel caso di terreni sciolti, sufficientemente fondato nel terreno in modo da non essere troppo influenzato dalla deformazione della coltre superficiale. La materializzazione dei capisaldi andrà realizzata tenendo presente la necessità di consentire un monitoraggio a lungo termine dei movimenti, dovranno pertanto essere utilizzati materiali che garantiscano la durabilità nel tempo (ad es. centrini metallici in acciaio inox fissati con resine bicomponenti). Nel caso in cui i movimenti attesi siano molto lenti o estremamente lenti potrebbe essere necessario prevedere la materializzazione di capisaldi a centramento forzato che, tramite l'utilizzo di appositi sistemi di fissaggio dell'antenna, consentano di minimizzare gli errori di riposizionamento in planimetria e in quota (Figura A.13).



Figura A.13 - Caposaldo autocentrante di ISPRa (a sinistra) e centrino della Regione Abruzzo (a destra). Fonte: archivio GEO-GFI ISPRa

Il posizionamento dei capisaldi è una fase particolarmente delicata poiché deve permettere la ripetibilità nel tempo e garantire la significatività dei dati raccolti, sia in termini di bontà del segnale satellitare sia per la definizione della cinematica del fenomeno.

Nel caso di misure di alta precisione il posizionamento dell'antenna sui capisaldi a "centramento forzato" è effettuato tramite dispositivi di altezza nota, dotati di un sistema di messa in bolla, che possono essere avvitati al caposaldo o ad altri eventuali adattatori. Talvolta può

essere utile posizionare l'antenna GNSS in corrispondenza della testa dei tubi inclinometrici, anche in questo caso tramite appositi adattatori, con l'obiettivo di verificare se gli stessi abbiano raggiunto la superficie di scivolamento, ma anche per proseguire il monitoraggio nel caso in cui le deformazioni rendano impossibile quello profondo (Figura A.14).

La monumentazione delle stazioni fisse può essere realizzata direttamente sul terreno, su un pilastro di cemento armato ben fondato, come già descritto per la stazione totale (Paragrafo A.2.1), o tramite un tripode ancorato al *bedrock*, oppure su manufatti in cemento armato stabili e possibilmente non troppo alti. Le operazioni di monumentazione, in particolar modo per la stazione di riferimento, devono essere condotte con cura in modo da evitare che nel tempo la stazione subisca deformazioni dovute a movimenti locali del terreno o del supporto stesso dell'antenna. La progettazione e la realizzazione dei monumenti, su cui saranno installate le antenne, dovrà tener conto dello spessore della coltre superficiale, in particolare nel caso di frane in argille, per minimizzare i movimenti indotti dai fenomeni di deformazione superficiale (rigonfiamento/ritiro).

La gestione di una rete di monitoraggio in continuo può essere effettuata registrando le misure sulla memoria interna dei ricevitori, scaricando periodicamente i dati recandosi in sito, oppure utilizzando un sistema di teletrasmissione dei dati. Nel primo caso gli strumenti GNSS dovranno necessariamente essere forniti di una memoria interna che consenta di conservare per un periodo sufficientemente lungo, almeno qualche mese, i dati registrati. Nel caso di una gestione da remoto sarà necessario l'utilizzo di una piattaforma che consenta sia la configurazione da remoto, la trasmissione e l'archiviazione dei dati, sia l'elaborazione in automatico dei dati acquisiti e, eventualmente, anche la possibilità di impostare delle soglie di attenzione e di allarme. Inoltre, sarebbe utile la presenza di una memoria interna nei ricevitori, in modo da consentire l'archiviazione temporanea dei dati nel caso in cui il sistema di trasmissione si interrompa per un periodo.



Figura A.14 - Antenna posizionata sulla testa di un inclinometro (Frana di Costa della Gaveta-PZ). Foto da archivio GEO-GFI ISPRA

A.2.3 Lidar

Esistono sostanzialmente due macrocategorie di Lidar: la versione aerotrasportata, più complessa e la versione terrestre (solitamente chiamato laser scanner terrestre), più piccola e comodamente trasportabile. Sebbene il principio di base sia fondamentalmente lo stesso, le due strumentazioni sono molto diverse in quanto la prima, quella aerea, è configurata per scansioni in movimento (cinematiche) e quindi dotata di una serie di elementi accessori fondamentali come la IMU (*Inertial Measurement Unit*) e un ricevitore GNSS indispensabili per rilevare l'orientamento nello spazio e la traiettoria del sistema di acquisizione. Il laser scanner terrestre

nasce invece come strumento statico, solitamente messo in stazione su di un supporto topografico per acquisire modelli della superficie delle aree circostanti. Tra queste due macro-tipologie di strumenti esistono poi numerose configurazioni che compongono delle soluzioni ibride. I laser scanner terrestri possono infatti essere utilizzati in configurazione “mobile” mediante installazioni su veicoli o natanti per l’acquisizione da terra in modalità cinematica (con sensore in movimento durante le scansioni). In questo caso la configurazione del sistema diventa simile a quella di un sistema aerotrasportato (GNSS e IMU) ma con portate operative tipiche dei sistemi terrestri. Recentemente, cominciano ad avere una certa diffusione anche sistemi Lidar per droni, con caratteristiche di compattezza e livello di ingegnerizzazione decisamente interessanti, sebbene con performance decisamente ridotte rispetto ai classici sistemi *airborne*. Una delle caratteristiche fondamentali del Lidar è la potenza dell’emettitore laser, che ne determina anche la classe di emissione e il *range* operativo. I Lidar aerei sono caratterizzati da distanze operative (dell’ordine dei 700 - 1500 m tra il sensore e il terreno) molto più elevate e laser più potenti, i laser scanner terrestri e utilizzabili su droni sono invece solitamente laser di classe 1 e quindi con portate (e potenze) più contenute.

L’utilizzo del Lidar deve essere accompagnato dalla consapevolezza delle principali caratteristiche del sistema. Per prima cosa l’impulso laser del Lidar è caratterizzato da una portata minima e massima che sono caratteristiche di ogni strumento ma che variano anche in funzione dell’indice di riflettanza delle superfici dell’area ripresa. Solitamente, gli ammassi rocciosi sono caratterizzati da alti valori di riflettanza, mentre la presenza di acqua ha un effetto molto negativo sulla portata del sistema. La presenza di superfici umide sarà quindi un fattore importante da valutare in fase di pianificazione del rilievo. Un altro elemento considerare è l’effetto che ha la distanza tra lo strumento e il punto di scansione sulla precisione ed accuratezza del dato finale. Maggiore sarà la distanza, maggiore sarà la dimensione del cono del singolo punto laser (*beam divergence*); elemento che determina l’incertezza sul posizionamento dell’impulso di ritorno. Anche questo

elemento incide sulla bontà del risultato finale. Ultimo elemento molto importante da tenere in considerazione è legato alla presenza di ostacoli tra il punto di scansione e l’oggetto da rilevare. Tale limitazione può pesantemente condizionare il risultato finale soprattutto nel caso del laser scanner terrestre. Gli ostacoli (come, per esempio piante o asperità del terreno) possono creare dei coni d’ombra anche di notevoli dimensioni che creano dei vuoti negli elementi posti in secondo piano che spesso sono lo scopo del rilievo. Tale limitazione viene solitamente risolta nel caso del laser scanner terrestre adottando la tecnica della multi-ripresa: vengono effettuate scansioni da più punti di ripresa le cui nuvole di punti possono essere successivamente integrate in un unico risultato finale. La tecnica della multi-scansione si dimostra spesso molto efficace per limitare al massimo la presenza di zone non rilevate a causa della presenza di ostacoli. Ovviamente tale tecnica necessita di un’attenta pianificazione per ottenere alla fine delle nuvole di punti che abbiano delle buone porzioni di ricoprimento; in questo modo si evita di correre il rischio di rendersi conto della mancanza di alcuni settori solamente a posteriori, una volta unite tutte le scansioni. Per quanto riguarda il passaggio da coordinate relative ad assolute, il Lidar aereo è dotato di sistema GNSS e quindi le informazioni necessarie per ottenere la nuvola di punti in un *datum* di riferimento geodetico è acquisito contestualmente al rilievo stesso. Nel caso dei sistemi terrestri, spesso è necessario un appoggio topografico con GNSS e/o stazione totale in modo da acquisire le coordinate di una serie di elementi presenti all’interno della scansione. Spesso i software di gestione delle scansioni dei laser scanner terrestri hanno dei *tool* appositamente sviluppati per acquisire i valori di una serie di punti in coordinate assolute ed effettuare correttamente la rototraslazione necessaria.

Spesso il Lidar è abbinato ad una camera ottica che acquisisce una contestuale sequenza di immagini. Dall’unione della nuvola di punti e del dato fotografico è possibile ottenere una nuvola di punti a colori. Si tratta di una rappresentazione fotorealistica molto efficace nello studio dei fenomeni franosi. Tali modelli si

dimostrano solitamente molto efficaci, per esempio, per l'identificazione di discontinuità su parti rocciose.

Indicativamente, i rilevamenti Lidar da aereo hanno precisione assoluta dell'ordine dei 10-20 cm, mentre i laser scanner terrestri arrivano a valori di pochi cm. Per questo motivo è molto importante valutare correttamente la giusta tipologia di rilievo Lidar in funzione presunta dei movimenti della frana, scegliendo lo strumento più indicato.

Per quanto riguarda il LiDAR aereo, indicativamente a 1000 m di quota AGL (*above ground level*) i valori tipici sono i seguenti:

- accuratezza orizzontale: 25 cm (r.m.s);
- accuratezza verticale: 10 cm (r.m.s);
- densità di punti a raw (prima della classificazione): 10-20 punti/m²;
- densità di punti al suolo: variabile a seconda del contesto;
- risoluzione a terra prodotto ortofotografico (funzione della camera utilizzata): 5-15 cm.

Per quanto riguarda i rilievi mediante laser terrestre, si fa presente come tale categoria di strumenti si presti a molteplici usi nel campo dello studio e monitoraggio delle frane. Le finalità dei rilevamenti creano un vincolo sulle caratteristiche tecniche della nuvola di punti: i rilievi finalizzati alla caratterizzazione degli ammassi rocciosi hanno solitamente una nuvola di punti con una spaziatura di pochi cm (2-5 cm). Per quanto riguarda le applicazioni multi-temporali che possono essere considerate in senso stretto delle attività di monitoraggio, la nuvola di punti può arrivare anche a densità più basse, con una spaziatura di alcuni decimetri (10-30 cm). Si fa presente che la spaziatura più rada deve comunque consentire di riconoscere le forme necessarie ad effettuare l'analisi multi-temporale. Un'ulteriore tipologia di applicazione è l'acquisizione di un modello digitale del terreno a supporto di altre attività di monitoraggio; in questo caso, la densità della nuvola di punti può essere molto variabile in funzione del suo impiego finale. In base alle caratteristiche del sistema, si fa presente che i sistemi LiDAR nel campo del monitoraggio posso essere utilizzati quasi

esclusivamente in modalità multi-temporale e non con finalità di allertamento che, solitamente, richiedono elevate frequenze di acquisizione.

A.2.4 Radar interferometrico da terra

Gli ultimi 20 anni hanno visto l'affermarsi della tecnica dell'interferometria radar basata a terra per il monitoraggio di frane, dissesti idrogeologici ed altri fenomeni di interesse geologico e/o geotecnico applicativo (Atzeni *et alii*, 2001; Tarchi *et alii*, 2003; Monserrat *et alii*, 2014).

Le ragioni del successo di questa tecnologia sono da ricercarsi in una serie vantaggi rispetto agli strumenti tradizionali che si possono riassumere come segue:

- possibilità di effettuare misure spazialmente continue dello spostamento di un versante; ciò consente di elaborare delle mappe di spostamento bidimensionali e quindi di superare la limitazione degli strumenti tradizionali che ottengono misurazioni puntuali (cioè riferite solamente ad alcuni punti sparsi);
- accuratezza sub-millimetrica, in condizioni ottimali, delle misure;
- buona risoluzione spaziale (dipendente da una serie di variabili ma tipicamente metrica);
- elevata frequenza di campionamento, tale da consentire il monitoraggio di fenomeni fino alla classe di velocità moderata (ordine di grandezza: m/giorno);
- possibilità di effettuare il monitoraggio senza la necessità di accedere direttamente alla frana, spesso pericolosa o irraggiungibile per gli operatori;
- possibilità di gestire lo strumento e i dati di monitoraggio da remoto;
- possibilità di effettuare misurazioni in ogni condizione di luminosità e in condizioni atmosferiche avverse;
- buona durabilità della strumentazione;
- possibilità di operare h24.

Queste caratteristiche fanno del *Ground Based InSAR* (GB-InSAR) un valido e versatile strumento di *rapid mapping* e ne permettono la sua integrazione anche all'interno di un sistema di allertamento rapido (*early warning system*) (Casagli *et alii*, 2010; Dick *et alii*, 2015; Barla e Antolini, 2016). L'impiego dell'interferometria radar con sensori basati a terra costituisce quindi uno dei più evoluti approcci al monitoraggio di versanti interessati da frane, come dimostrato dalle esperienze pregresse e dal continuo e rapidissimo sviluppo tecnologico.

Il principale limite di questa tecnica si manifesta quando lo scenario da monitorare è coperto da vegetazione intensa, il cui movimento e la cui struttura caotica causano una riduzione di coerenza nelle immagini radar, rendendo di fatto impossibile estrarre informazioni attendibili sulle deformazioni in atto.

In casi particolari è possibile valutare l'utilità di integrare, in aree dove è difficile acquisire dati radar coerenti, la rete con posa di uno o più riflettori artificiali (*corner reflector*).

Attualmente esistono in commercio diverse tipologie di radar interferometrico da terra, sia ad apertura sintetica, che reale. Le caratteristiche tecniche principali che devono essere valutate per la scelta del modello più adatto per una specifica esigenza sono le seguenti:

- risoluzione in *range* (variabile da 0,2 m a 0,75 m);
- risoluzione in azimut (variabile fra 2,9 milliradiante a 28 milliradiante);
- precisione nominale (variabile fra 0,01 mm a 4 mm);
- tempo di acquisizione (variabile da 15 secondi a oltre 10 minuti);
- distanza operativa massima (variabile da 500 m a oltre 3 km);
- peso totale della strumentazione (da 90 kg a oltre 250 kg).

I sistemi ad apertura reale richiedono l'impiego di un'antenna parabolica di grandi dimensioni per ottenere una buona risoluzione e l'acquisizione dell'immagine radar è garantita dal movimento di tale antenna che

effettua una scansione dell'intero versante. Le dimensioni dell'antenna e del sistema di movimentazione richiedono l'utilizzo di un carrello per il trasporto e quindi rendono lo strumento poco mobile e meno versatile da un punto di vista logistico.

I sistemi ad apertura sintetica differiscono fra loro soprattutto per la lunghezza del binario (generalmente da 1 m a 4 m), la quale influenza la risoluzione in azimut delle immagini, e per gli algoritmi di processamento, che condizionano la rapidità delle acquisizioni e l'eliminazione dei disturbi del segnale (soprattutto quelli atmosferici e ambientali). Alcuni sistemi realizzano l'apertura sintetica non lungo un binario lineare ma lungo un percorso curvo, che prevede anche la rotazione delle antenne; ciò può essere utile in contesti in cui i versanti instabili sono localizzati tutto intorno al sistema e in cui si richiede che il radar abbia una posizione centrale tale da garantire una buona linea di vista con tutti i fenomeni di instabilità monitorati.

In scenari di misura particolari si possono utilizzare sistemi che prevedono la testa del radar installata su sistemi rotanti in grado di acquisire immagini fino a 360°.

Installazione

Tenendo conto delle caratteristiche dell'area e del fenomeno da monitorare, la scelta del punto di installazione del sistema radar deve rispettare i seguenti requisiti fondamentali:

- buona visibilità diretta dell'area da monitorare;
- linea di vista (LOS) il più possibile parallela alla direzione attesa del movimento;
- angolo di incidenza delle onde elettromagnetiche sullo scenario tale da garantire una buona retrodiffusione del segnale;
- assenza di indizi di instabilità nell'area di installazione.

Per sfruttare al meglio una delle caratteristiche principali della tecnica, ovvero l'elevata frequenza di acquisizione, è ottimale collegare il sistema alla rete

elettrica a bassa tensione (220 VAC e 50 Hz), anche se per alcuni modelli è possibile realizzare soluzioni che prevedono alimentazione mediante pannelli fotovoltaici o generatori di vario tipo.

Il binario deve essere montato orizzontalmente in un'area stabile. Se il piano di appoggio è costituito da terreno si può ricorrere a blocchi di varia natura e peso per un'installazione rapida in condizioni di emergenza (Figura A.15 A), se invece è rigido (roccia affiorante o soletta in cemento) è possibile utilizzare direttamente dei montanti dotati di piastra di ancoraggio (Figura A.15 B).



Figura A.15 - Esempi di installazione di sistemi radar ad apertura sintetica (A) su terreno, mediante appoggio su blocchi di calcestruzzo (Fonte: Barla e Antolini, 2016) e (B) mediante montanti ancorati su soletta di cemento (Fonte: archivio UniFi)

Sebbene la maggior parte degli strumenti siano realizzati per lavorare in esterno, per installazioni di lunga durata o in ambienti climaticamente ostili è opportuno provvedere a una struttura di protezione dotata di materiale che permette la propagazione del segnale elettromagnetico con bassa attenuazione (come il radome) (Figura A.16).

Generalmente, le immagini acquisite dallo strumento radar vengono in parte o totalmente elaborate direttamente in sito su un pc di controllo, al fine di ridurre la quantità di dati da trasferire e consentire

quindi la gestione da remoto del sistema mediante un comune modem 3G/4G.



Figura A.16 - Esempi di strutture di protezione della strumentazione. A) casotto con pannello di radome; B) cassone con cupola di radome (Fonte: archivio UniFi)

A.2.5 Sensori radar satellitari

I sistemi radar (acronimo di *radio detection and ranging*) sono sensori di tipo attivo, ossia inviano un segnale che viene riflesso dalla superficie terrestre e ricevuto dal sensore. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa, sia di giorno che di notte. Forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500 MHz e 10 GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale fino al metro.

Il principio di funzionamento è il medesimo per tutti i sistemi radar: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio prospiciente con un'onda elettromagnetica (con determinata lunghezza d'onda e frequenza) che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detection*) e, misurando il tempo di volo del segnale emesso e di quello ricevuto, valutare la distanza (*ranging*) a cui il bersaglio è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*). La direzionalità dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra

dimensione (detta di azimuth, ovvero la direzione parallela all'orbita del satellite).

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ - detto off-nadir - rispetto alla verticale) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure LOS (*Line Of Sight*, linea di vista del satellite).

La particolare combinazione tra il moto del satellite che orbita intorno alla Terra e il movimento di rotazione della Terra stessa, permette al sensore di rilevare la stessa area geografica secondo due differenti geometrie: ascendente e discendente.

Come conseguenza delle diverse geometrie di acquisizione si possono registrare deformazioni di segno opposto (positive oppure negative). Per convenzione si hanno segni positivi per spostamenti in avvicinamento lungo la congiungente sensore-bersaglio e segni negativi per allontanamenti rispetto al sensore. Un moto con componente prevalentemente verticale come la subsidenza determina velocità di deformazione simili in entrambe le geometrie sia come intensità che come segno (ovvero in allontanamento rispetto al satellite in entrambe le geometrie). Ugualmente, un fenomeno di sollevamento determina velocità di deformazione simili sia come intensità che come segno (anche se in questo caso si avrà un avvicinamento in entrambe le geometrie). Al contrario, un moto con componente orizzontale non trascurabile (come una frana) determina velocità di deformazione diverse nelle due geometrie, sia come intensità che come segno: in una geometria si hanno velocità negative (ovvero il sensore registra un allontanamento), nell'altra si hanno velocità positive (ovvero il sensore registra un avvicinamento).

Precisione e applicabilità

Un quadro di insieme delle precisioni della stima della velocità e della singola misura di spostamento ottenibili con un'analisi InSAR multi-immagine basata sulla stima del movimento di riflettori persistenti (Persistent Scatterers - PS) e distribuiti (Distributed Scatterers-DS), è dato nella Tabella A.1, nella quale vengono riportati i valori di deviazione standard (σ) della velocità

di spostamento media e la misura di deformazione singola (millimetri di spostamento in un certo intervallo temporale). Ogni PS risulta caratterizzato da un valore di velocità e deviazione standard, che indica di quanto varia la stima della velocità del punto in analisi rispetto al riferimento. La deviazione standard dipende dalla distanza tra il punto considerato ed il riferimento e dalla topografia dell'area di interesse. I valori di spostamento e di velocità di PS vicini tra loro (ad esempio, distanti qualche km) sono affetti da un errore di entità simile e quindi il loro moto relativo subisce variazioni notevolmente minori rispetto al valore della deviazione standard riportato in Tabella A.1.

Tabella A.1 - Precisioni ottenibili. Valori tipici per distanze < 1 km dal punto di riferimento per un dataset di almeno 5 anni

Parametro	Precisione (1σ)
Velocità media di spostamento	± 2 mm/anno
Misura singola	± 3 -5 mm

La stima delle velocità e della singola misura di spostamento viene degradata da due fonti principali di rumore:

- disturbo atmosferico, che varia lentamente nello spazio, per cui due PS vicini tra loro risultano affetti dallo stesso contributo per una data acquisizione. L'impatto di questo disturbo è funzione delle particolari condizioni atmosferiche presenti al momento dell'acquisizione;
- rumore di decorrelazione: introdotto dalla possibile variazione delle caratteristiche fisiche del bersaglio radar tra due diverse acquisizioni (temperatura, copertura vegetativa, ecc.). Ha un carattere spazialmente non correlato e presenta generalmente basso impatto.

Un quadro di insieme delle precisioni di georeferenziazione (coordinate geografiche del punto: nord, est, quota) dei dati ottenibili da una elaborazione di immagini SAR in banda C e in banda X è dato nella Tabella A.2. Il PS non è un punto materializzato a terra, quindi, non ha una sua coordinata geografica di

installazione. L'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- passaggio da coordinate nel sistema SAR (*range* ed azimuth) a coordinate geografiche;
- allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida.

L'errore di georeferenziazione è dovuto in prima istanza a:

- posizione del PS all'interno della cella di risoluzione a terra;
- distanza del PS dal punto di riferimento.

La precisione di georeferenziazione è un aspetto da non sottovalutare, specie se l'obiettivo dell'analisi si riduce a un singolo edificio o una parte di esso.

Tabella A.2 - Precisioni di georeferenziazione ottenibili con sensori radar in banda C e in banda X

Parametro	Precisione banda C	Precisione banda X
Posizione in Nord	± 2 m	± 1 m
Posizione in Est	± 7 m	± 4 m
Quota ellissoidica	$\pm 1,5$ m	$\pm 1,5$ m

L'apparente incongruenza tra la precisione di spostamento (millimetrica) e la precisione di posizionamento (metrica) dei punti a terra dipende dal fatto che lo spostamento è misurato come frazione della lunghezza d'onda, mentre la precisione di posizionamento è di fatto funzione della dimensione del pixel dell'immagine a terra (alcuni metri). Inoltre, bisogna considerare che nel caso di PS, il bersaglio radar corrisponde all'elemento dominante all'interno del pixel e che quindi la dimensione reale del punto monitorato a terra è in genere più piccola della dimensione del pixel dell'immagine. Dal punto di vista temporale, la velocità massima misurabile tra due successive acquisizioni satellitari è pari a 1/4 della lunghezza d'onda del segnale radar, per non incorrere in problemi di ambiguità della fase interferometrica. I sensori SAR montati sui satelliti utilizzati per le tecniche di interferometria radar acquisiscono in una delle

seguenti bande nel campo delle microonde: banda C (lunghezza d'onda 5,6 cm), banda X (lunghezza d'onda 3,3 cm), banda L (lunghezza d'onda 23 cm).

Considerando le suddette lunghezze d'onda del segnale radar e il tempo di rivisitazione dei satelliti attualmente operativi, gli spostamenti massimi misurabili da satellite risultano essere di circa qualche decina di cm/anno. La tecnica PSI è pertanto applicabile solo per la misura di movimenti lenti e continui del terreno, quali ad esempio frane a cinematica lenta, mentre non risultano essere misurabili frane ad evoluzione rapida e repentina.

Facendo riferimento alla classificazione di Cruden & Varnes (1996) e tenendo conto dei diversi materiali coinvolti per ogni tipologia di fenomeno si evidenzia che i fenomeni di crollo e ribaltamento sono difficilmente osservabili mediante interferometria da satellite a causa della rapidità con cui si sviluppano e la loro breve durata (spesso quasi istantanei). I fenomeni di scivolamento sono ben monitorabili con le tecniche radar interferometriche satellitari, sia movimenti traslativi che rotazionali.

Le grandi frane in roccia (e.g. DGPV, rock avalanche) caratterizzate da movimenti generalmente molto lenti distribuiti in maniera continua all'interno della massa spostata, risultano monitorabili mediante interferometria SAR da satellite.

Per le colate, in funzione del materiale coinvolto, si possono ottenere risultati diversi. Le colate in terra lo sono soltanto fino a quando il contenuto d'acqua è limitato e i movimenti rimangono molto lenti. Le colate di detrito, a causa dell'estrema rapidità con cui si sviluppano, non sono monitorabili con le tecniche interferometriche utilizzate. I fenomeni di espansione laterale possono essere parzialmente controllati, infatti, può essere misurata solo la componente sub-verticale delle deformazioni indotte da questa tipologia di fenomeni, legata alla subsidenza dei livelli competenti ed indotta dall'estensione sub-orizzontale di livelli sottostanti a minor competenza. Le espansioni di terreni a seguito di fenomeni di liquefazione non sono invece misurabili mediante interferometria da satellite a causa della loro rapidità.

Considerando le velocità dei fenomeni franosi secondo la classificazione di Cruden & Varnes (1996), l'interferometria radar satellitare è in grado di monitorare solamente movimenti classificati come "estremamente lenti" e "molto lenti".

Le dimensioni dei fenomeni influenzano l'applicabilità dell'interferometria poiché da queste dipende il numero di riflettori individuabili al loro interno, in quanto fenomeni di grandi dimensioni avranno una maggior probabilità di avere al loro interno un numero sufficiente di punti da analizzare.

L'uso del suolo influenza l'applicabilità dell'interferometria in quanto essa si basa sull'individuazione di bersagli già presenti a terra che devono essere "stabili" dal punto di vista di risposta elettromagnetica. Questa condizione è sempre verificata in aree urbanizzate, dove si ha un'elevata densità di edifici e infrastrutture, ma viene meno in presenza di importanti corpi idrici o zone densamente vegetate. Nelle zone agricole l'applicabilità di questa tecnica è invece limitata alla presenza di edifici sparsi e manufatti che possano essere utilizzati come riflettori, mentre nelle aree boscate e adibite a pascoli la presenza di bersagli radar è limitata a rocce esposte e edifici sparsi, rendendo quasi inefficace l'analisi interferometrica. A tal proposito, in questi casi è possibile installare dei riflettori artificiali (CR - Corner Reflectors) costituiti da tetraedri metallici opportunamente orientati, che possono essere facilmente identificati nelle immagini SAR successive alla loro messa in posto.

L'esposizione dei versanti è un altro importante fattore da tenere in considerazione, in quanto la topografia del territorio può portare a disturbi del segnale radar, creando zone di ombra (*shadowing*), distorsioni (*layover*) o sovrapposizione (*foreshortening*) del

segnale. Le aree non visibili al satellite a causa di deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno non contengono PS.

Disponibilità di dati

L'ampia disponibilità di dati SAR negli ultimi trent'anni (Figura A.17) proviene in primo luogo dalle immagini acquisite dai sensori dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) ERS-1 e ERS-2 nell'intervallo temporale 1992-2001, ENVISAT nell'intervallo temporale 2003-2010 e dalla costellazione Radarsat del CSA (Agenzia Spaziale Canadese). Tale famiglia di piattaforme satellitari opera in banda C, con tempi di rivisitazione sulla stessa scena di circa un mese (35 giorni per ERS/ENVISAT, 24 giorni per RADARSAT) e media risoluzione spaziale a terra dei dati acquisiti dell'ordine di 5-20 m.

I sistemi SAR ad alta risoluzione spaziale che acquisiscono in banda X usati per le misure interferometriche sono COSMO-SkyMed e TerraSAR-X, rispettivamente dall'Agenzia Spaziale italiana (ASI) e dall'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR). Con l'approssimarsi del limite di vita operativa dei quattro satelliti della missione CSK, lanciati tra il 2007 ed il 2010, è stata progettata la Seconda Generazione di COSMO-SkyMed, costellazione di due satelliti destinata a garantire l'estensione operativa e la continuità dei dati acquisiti. I sensori in banda X, grazie alle loro elevate risoluzioni spaziali (variabili in base alle modalità di acquisizione, e.g. fino a 1 m nella modalità di acquisizione denominata Spotlight) e ai loro tempi di rivisitazione estremamente ridotti (da circa 16-11 giorni fino a 6-4 giorni), permettono di rilevare fenomeni deformativi più rapidi e più localizzati spazialmente rispetto ai precedenti sensori di media risoluzione.

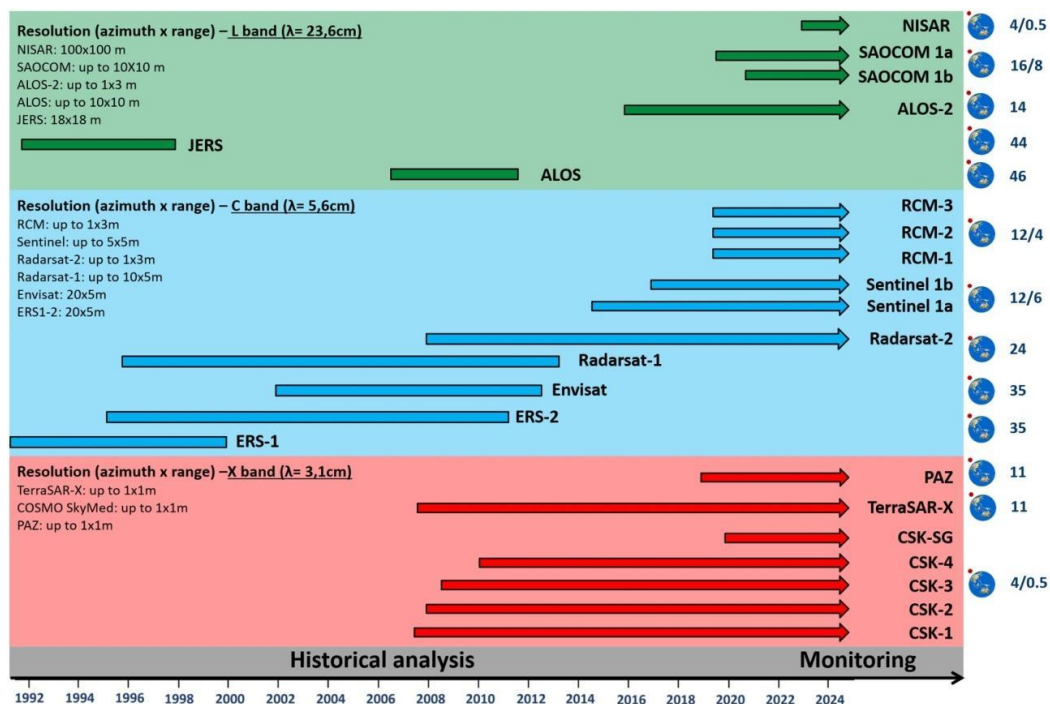


Figura A.17 - Sensori radar satellitari passati, presenti e futuri. Fonte: Casagli *et alii*, 2017

In generale, tali sensori hanno mostrato le loro potenzialità soprattutto per analisi locali e di dettaglio (grazie alla miglior risoluzione spaziale rispetto a Sentinel-1 che, a parità di estensione di territorio esaminato, consente di avere una maggior densità di punti di misura e pertanto un dato spazialmente più continuo) e rappresentano un supporto importante per analisi approfondite alla scala del singolo fenomeno. Il satellite spagnolo PAZ, lanciato con successo nel febbraio 2018, si aggiunge alla lista dei satelliti operanti in banda X.

Il satellite ALOS PALSAR di JAXA (Agenzia Spaziale Giapponese) ha acquisito in banda L nell'intervallo di tempo 2006-2011 con risoluzione spaziale nominale di 10 x 5 m e tempo di rivisitazione di 45 giorni. Il satellite ALOS-2 PALSAR di JAXA, attualmente operativo, acquisisce in banda L con risoluzione 1x3m per pixel nella modalità di acquisizione Spotlight e tempo di rivisitazione sulla stessa area di 14 giorni. SAOCOM

(Satellite Argentino di Osservazione COOn Microonde) è un sistema di due satelliti per l'osservazione della Terra della CONAE, l'ente spaziale argentino. Entrambi i satelliti del sistema, SAOCOM 1a e SAOCOM 1b sono anch'essi equipaggiati con un radar ad apertura sintetica in banda L. Infine, anche la missione NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar (NISAR), il cui lancio è previsto per il settembre 2022, sarà equipaggiata con sensore in banda L. Questi sensori risentono in modo minore della decorrelazione temporale e spaziale, sfruttando la maggiore lunghezza d'onda del segnale radar, che è caratterizzato da un maggior coefficiente di penetrazione al suolo, che permette l'identificazione di un maggior numero di bersagli radar anche in aree rurali e vegetate.

A.2.6 Radar doppler

La tecnica radar doppler è da lungo impiegata in un ampio spettro di campi applicativi; tuttavia, solo in tempi recentissimi sono stati introdotti sul mercato dei sistemi appositamente progettati con finalità di monitoraggio nell'ambito dei rischi idrogeologici.

Il modulo principale è costituito da un sensore radar a onda continua modulato in frequenza; esso opera in banda X ad una frequenza di base prossima ai 10 GHz e con una larghezza di banda variabile fra 40–100 MHz. Il sensore comprende un'antenna trasmittente e un array di antenne riceventi, così da poter ricavare la posizione angolare degli oggetti rilevati rispetto all'asse centrale di puntamento. A differenza delle misure interferometriche, le quali sono incentrate sull'analisi dell'informazione di fase, le misure radar doppler sfruttano principalmente la frequenza e l'ampiezza del segnale di ritorno, tramite cui è possibile identificare in tempo reale la presenza di corpi in rapido movimento all'interno dello scenario osservato e contestualmente stimarne velocità e distanza di *range*. Specifici algoritmi basati su tecniche di *machine learning* analizzano gli eventi rilevati e li classificano sia sulla base delle caratteristiche elettromagnetiche del segnale di ritorno che della geometria e coerenza temporale del movimento, allo scopo di discriminare fenomeni reali e fenomeni puri.

I dati di monitoraggio acquisiti sono continuamente elaborati da un'unità di controllo munita di PC industriale. Le informazioni relative agli eventi rilevati — così come quelle relative allo stato del sistema e agli eventuali dispositivi di sicurezza associati — sono trasmesse su una piattaforma cloud dedicata tramite connessione mobile, LAN, o rete Wi-Fi. Le notifiche di allarme e di eventuali malfunzionamenti vengono inviate all'utente via SMS e/o e-mail.

Un sensore GNSS integrato garantisce la georeferenziazione automatica della traiettoria di propagazione del fronte franoso; è inoltre possibile rilevare più eventi simultanei se questi sono separati da una distanza reciproca di circa 10 m. Tra le componenti aggiuntive figura spesso anche una telecamera ad alta risoluzione per la ripresa in streaming dell'area

monitorata. La registrazione di video o di fotografie in rapida sequenza si attiva simultaneamente all'istante iniziale di rilevamento di un evento, agevolando in tal modo la successiva verifica da remoto della tipologia di processo realmente in atto sul versante.

Le proprietà principali dei sistemi radar doppler possono essere riassunte come segue:

- copertura spazialmente continua all'interno del cono di vista del sensore, il quale è caratterizzato da un'apertura orizzontale che può variare fra 45°–90° e un'apertura verticale fra 20°–40°;
- sensibilità nei confronti di oggetti di volume superiore al metro cubo che si muovono a velocità superiori a qualche metro al secondo ad una distanza dal sensore inferiore a circa 2 km, ovverosia ben prima che l'occhio umano possa accorgersene;
- risoluzione in *range* ≤ 5 m e risoluzione angolare compresa fra 2°–3°;
- tracciamento in tempo reale e georeferenziazione degli eventi rilevati;
- invio della segnalazione di allarme entro pochi secondi dall'istante di innesco dell'evento;
- gestione automatizzata di dispositivi di sicurezza (semafori, sirene, sbarre a chiusura automatica, ecc.) interfacciati all'unità di controllo centrale mediante trasmissione radio o collegamento cablo in fibra ottica;
- flessibilità nell'impostazione di criteri personalizzati per l'attivazione e la disattivazione degli allarmi (ad esempio, disattivazione automatica dell'allarme se l'evento non si propaga fino a raggiungere una zona critica predefinita);
- possibilità di effettuare il monitoraggio senza accedere direttamente al versante e in qualsiasi condizione atmosferica e di visibilità;
- peso complessivo della strumentazione nell'ordine dei 50 kg, escluse componenti opzionali aggiuntive quali telecamere, batterie di riserva e generatori di corrente.

Installazione

Le principali componenti fisiche da installare sono costituite dal sensore radar in senso stretto e da un pannello in cui vengono alloggiati l'unità di controllo centrale e tutta l'elettronica adibita all'interfacciamento con i dispositivi di sicurezza esterni; a questi è raccomandabile aggiungere una telecamera ad alta risoluzione brandeggiabile (Figura A.18). L'alimentazione può essere realizzata grazie al collegamento alla rete elettrica a bassa tensione (220 VAC e 50 Hz) o tramite sistemi di alimentazione esterna quali pannelli fotovoltaici e generatori.

Il radar doppler deve essere installato in posizione frontale rispetto al versante da monitorare. In altre parole, la direzione di movimento attesa del fronte franoso deve essere quanto più possibile parallela rispetto alla linea di vista del sensore; parimenti,

l'angolo di incidenza delle onde elettromagnetiche deve essere tale da garantire una buona retrodiffusione del segnale. L'installazione implica solitamente il montaggio del sensore radar e delle altre componenti a esso associato su di un singolo palo metallico avente altezza e diametro approssimativamente pari a 2 m e 80 cm. Per l'ancoraggio del palo al terreno è necessario predisporre un basamento di fondazione costituito da un cubo in calcestruzzo di peso pari o superiore a 80 kg. La base del palo è comunemente resa solidale con la fondazione inserendo una serie di barre filettate fissate con ancorante chimico. È in alternativa possibile installare lo strumento sfruttando elementi già presenti sul territorio, quali alberi e muri di abitazioni. È in ogni caso perentorio che il sito di installazione non sia a sua volta interessato da fenomeni di instabilità.



Figura A.18 – Esempi di sistemi radar doppler per l'allertamento in tempo reale di fenomeni di dissesto idrogeologico a cinematica rapida. Fonte: archivio UNIFI

A.2.7 Droni - UAV

Nel campo dei droni, i sistemi attualmente più diffusi sono caratterizzati da una propulsione autonoma e dalla presenza di una o più eliche. Le tipologie di configurazioni più diffuse sono i multi-rotori o i sistemi ad ala fissa (Figura A. 19).

I primi sono dei droni caratterizzati da un numero di eliche uguale o superiore a quattro che sono in grado di decollare verticalmente e di volare in ogni direzione. Questi sistemi sono estremamente versatili in quanto non necessitano di ampie zone per decollo e atterraggio e possono volare seguendo traiettorie verticali, inclinate ed orizzontali. I sistemi ad ala fissa sono invece dei piccoli aeroplani con un sistema di propulsione generalmente posizionato sulla parte frontale o in coda. Questi sistemi richiedono spazi più ampi al decollo e sono caratterizzati da velocità e durata del volo generalmente superiori ai multi-rotori. Per contro, i sistemi ad ala fissa non possono seguire delle traiettorie di volo verticali o il volo stazionario, rendendoli meno indicati, per esempio, per il rilevamento di pareti rocciose.

Le componenti principali del drone sono (per maggiori informazioni si rimanda a Giordan *et alii*, 2020): i) il frame, ovvero la struttura portante del drone, ii) il sistema elettronico di pilotaggio (solitamente dotato di IMU e ricevitore GNSS), iii) le batterie, iv) i motori v) il

sistema di comunicazione radio con l'unità di pilotaggio a terra, vi) il payload, ovvero la strumentazione che può essere trasportata dal drone. La configurazione più semplice e diffusa prevede che il payload sia composto da un'unità in grado di acquisire foto e video digitali, spesso abbinata ad un sistema di stabilizzazione su più assi.

La risoluzione del risultato finale è funzione di diversi fattori che verranno qui di seguito brevemente elencati e descritti. Nel campo dell'acquisizione di immagini finalizzati all'utilizzo di tecniche di *Structure from Motion* (SfM), i due elementi che maggiormente influenzano il risultato finale sono il GSD delle immagini (ground sampling distance) e l'accuratezza del risultato finale che deriva dalla tecnica di posizionamento utilizzata. Il GSD è funzione principalmente della risoluzione della fotocamera impiegata e della quota di volo rispetto al terreno. Una maggiore risoluzione della fotocamera e una minore quota di volo relativa porta a valori di GSD più elevati. A titolo di esempio, con un drone commerciale ed una quota di volo di 70 m si possono ottenere GSD di pochi centimetri (2-8 cm).

Più complesso è il capitolo relativo all'accuratezza della georeferenziazione del rilievo effettuato. I software di structure from motion possono utilizzare i parametri di posizionamento del sensore GNSS a bordo o vincolare il risultato a punti a terra di coordinate note (*Ground Control Points* - GCPs).

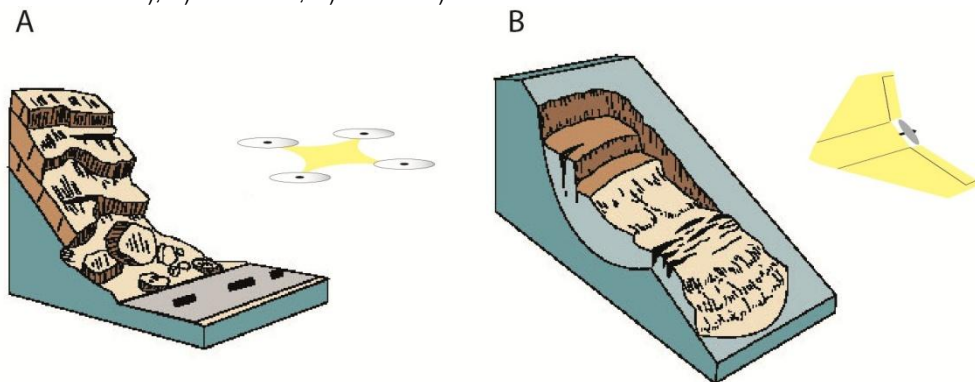


Figura A. 19 – A) Multi-rotori; B) sistemi ad ala fissa

L'uso dei GCPs offre solitamente garanzie di risultati decisamente migliori, con accuratezze che arrivano a pochi cm. Ovviamente il risultato finale è decisamente influenzato dalla tecnica utilizzata per acquisire la posizione dei GCPs: solitamente si utilizza un GNSS con correzione RTK per acquisire la posizione dei GCPs che possono essere costituiti da bersagli artificiali o da elementi presenti nell'area rilevata e chiaramente identificabili.

Nel caso in cui i GCPs non vengano utilizzati, l'accuratezza è decisamente inferiore e cautelativamente può essere stimata in alcuni metri (2-5 m).

A.3 STRUMENTAZIONE COLATE RAPIDE

La strumentazione per il monitoraggio delle colate rapide, intendendo con questo termine le colate di detrito (*debris flow*), presenta significative differenze rispetto a quella utilizzabile per gli altri tipi di frana, mentre si accosta, per più riguardi, alla strumentazione per il monitoraggio dei deflussi in corsi d'acqua torrentizi.

In questa sede si presentano alcuni dei sensori più comunemente utilizzati per il monitoraggio delle colate detritiche e per la realizzazione di sistemi di allarme. Altri sensori, propri di installazioni con finalità di ricerca, quali quelli per la misura degli infrasuoni generati dalle colate detritiche, delle pressioni indotte dalle stesse sul canale, e delle profondità di erosione, non sono qui considerati.

A.3.1 Sensori di livello

La misura del livello, ovvero della profondità di flusso delle colate detritiche, è un dato di primaria importanza per lo studio di questi processi. La misura in continuo dei livelli permette, infatti, di rappresentare gli idrogrammi delle colate detritiche, che forniscono una prima caratterizzazione di questi fenomeni. Inoltre, dalla misura dei livelli è possibile derivare altre variabili (velocità, portata, volume) di grande interesse per l'analisi quantitativa delle colate detritiche.

Le caratteristiche fisiche delle colate detritiche richiedono l'uso di sensori di livello che non entrino a contatto con la massa fluente. I sensori di livello più spesso utilizzati sono sensori ad ultrasuoni (i primi ad essere stati impiegati) e radar. Si tratta di sensori identici, dal punto di vista del funzionamento, a quelli impiegati per la misura del livello idrometrico in corsi d'acqua e laghi (o del livello in vasche e silo che contengono fluidi o materiali granulari). Il sensore - ad ultrasuoni o radar - emette degli impulsi ed analizza l'eco ricevuto dal *target*, rappresentato dal fondo dell'alveo o dalla superficie della colata (Figura A.20). È così possibile determinare la distanza del sensore dalla superficie *target* e, con semplici trasformazioni, il livello della superficie della massa fluente rispetto al fondo del canale. La distanza massima misurabile dipende dalle caratteristiche di fabbrica dei sensori. In fase di progettazione del sistema di monitoraggio, dunque, deve essere definito il *range* di distanza che si intende misurare. I sensori ad ultrasuoni sono provvisti di un termometro integrato che compensa il dato in base alla temperatura dell'aria. Le forti variazioni di livello caratteristiche delle colate detritiche richiedono un'elevata frequenza nella registrazione dei dati: l'acquisizione di 1 dato/s è necessaria per una corretta rappresentazione dell'idrogramma di una colata detritica, mentre intervalli di acquisizione fra 5 e 30 minuti sono generalmente idonei per la misura dei livelli idrometrici in corpi d'acqua naturali.

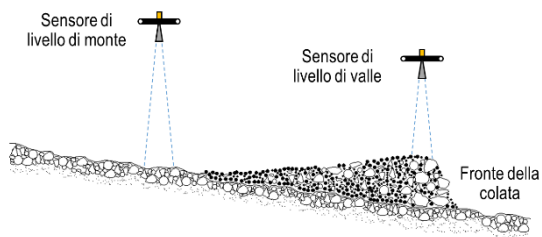


Figura A.20 - Rappresentazione schematica della profondità di flusso di una colata detritica misurata mediante sensori radar o ad ultrasuoni (scala orizzontale ridotta)

I campi di temperatura operativi ed i *range* di misura dei sensori di livello ad ultrasuoni e radar comunemente disponibili in commercio coprono ampiamente gli intervalli di temperatura e le distanze sensore-*target* nei quali può trovarsi ad operare un sistema di monitoraggio delle colate di detrito. Le specifiche tecniche dei sensori ad ultrasuoni e radar enunciano solitamente un'accuratezza di ± 1 o 2 mm, mentre la risoluzione ottenibile nella misura dei livelli delle colate detritiche è centimetrica. L'angolo di apertura del fascio con cui vengono emessi gli impulsi determina, unitamente alla distanza, la dimensione del *footprint* sul *target*. Un *footprint* ridotto evita che la misura del livello sia influenzata dalle sponde del canale e riduce il disturbo legato alle irregolarità della superficie della colata detritica.

Anche sensori laser possono essere utilizzati per la misura dei livelli delle colate detritiche. Rispetto ai sensori ad ultrasuoni e radar, i sensori laser, grazie al fatto di realizzare misure puntuali, consentono registrazioni più dettagliate della superficie della colata. I sensori laser sono però maggiormente sensibili agli spruzzi che si verificano in presenza di turbolenze nel flusso. Adeguate installazioni di sensori laser permettono anche di rilevare dei profili trasversali della superficie della colata detritica.

Installazione

La misura della profondità di flusso delle colate detritiche per mezzo di sensori ad ultrasuoni, radar o laser richiede la loro installazione sopra il canale. Ove realizzabile, l'installazione di un braccio che dalla sponda si protende verso il centro del canale rappresenta la soluzione ottimale, in quanto assicura la stabilità necessaria alla raccolta di misure affidabili. Spesso, tuttavia, questa soluzione non è realizzabile a causa della larghezza dell'alveo. Se presente, un ponte può essere idoneo per l'installazione di un sensore. In molti casi, tuttavia, l'unica soluzione praticabile per l'installazione dei sensori di livello consiste nel collegarli a cavi d'acciaio tesi fra le sponde del canale. Le misure così ottenute sono soggette alle oscillazioni del sensore dovute al vento: una conoscenza preliminare della

frequenza e della velocità del vento sono necessarie per valutare la praticabilità di questo tipo di installazione. Per aumentare la stabilità del sensore è consigliabile installarlo su una slitta sostenuta da due cavi anziché da uno solo, come mostrato nella Figura A.21. L'installazione su una slitta anziché su una piastra fissa permette di spostare agevolmente il sensore verso la sponda per gli interventi di manutenzione.

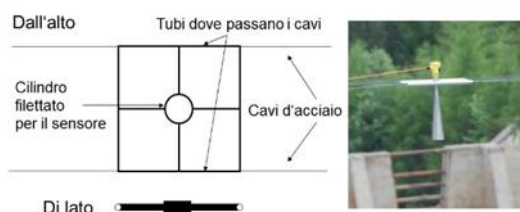


Figura A.21 - Installazione di un sensore di livello radar su cavi d'acciaio (Rio Gatria, BZ)

La sezione scelta per l'installazione dovrà essere contenuta fra sponde relativamente stabili ed il fondo dell'alveo dovrà essere, per quanto possibile, regolare: queste circostanze, tutt'altro che ovvie nel caso di canali interessati da colate detritiche, si riscontrano più spesso nelle parti inferiori dei torrenti. L'erosione delle sponde durante la colata detritica può arrivare a compromettere la stabilità delle strutture di sostegno. Inoltre, l'allargamento della sezione può modificare la forma dell'idrogramma. Del pari importante è la stabilità del fondo: solo se il fondo dell'alveo alla fine dell'evento si trova alla stessa quota che aveva prima dell'inizio si ottiene una compiuta rappresentazione dell'idrogramma. Per questo motivo, un tratto d'alveo sistemato con briglie o con soglie di fondo può essere consigliabile per l'installazione di sensori di livello: pur se potenzialmente soggetto a sovralluvionamento, l'alveo è almeno protetto dall'incisione.

A.3.2 Geofoni

Nel corso degli ultimi due decenni, i sensori di vibrazione del terreno (sismometri, accelerometri, geofoni) e i sensori acustici (microfoni, sensori ad

infrasuoni) sono progressivamente diventati strumenti comunemente impiegati per il monitoraggio delle colate detritiche. Entrambe le categorie di sensori rilevano le onde meccaniche prodotte dai movimenti franosi che si propagano rispettivamente nel terreno o nell'aria.

I sensori di vibrazione del terreno sono trasduttori passivi che convertono la vibrazione in segnale elettrico. Il segnale elettrico (in Volt) prodotto da questi sensori viene campionato con un convertitore analogico/digitale e registrato da un apposito sistema di acquisizione. La frequenza di acquisizione del segnale è scelta in base alle frequenze caratteristiche del fenomeno oggetto di studio, considerando il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon ossia che un segnale deve essere campionato a frequenza maggiore del doppio della frequenza caratteristica del fenomeno studiato. Le caratteristiche spettrali del segnale prodotto da una colata detritica dipendono dalle proprietà della sorgente (contenuto solido-liquido della miscela, velocità), dal mezzo di propagazione delle onde sismiche e dalla distanza sensore-sorgente (Coviello *et alii*, 2019). Per piccole distanze, l'intervallo di frequenza rappresentativo dell'energia sismica prodotta da una colata è compreso fra 10 e 80 Hz con una significativa concentrazione dell'energia in corrispondenza dei fronti di colata (10 - 30 Hz). Si raccomanda dunque una frequenza di campionamento di almeno 100 Hz. Geofoni mono-assiali di frequenza naturale 4,5 o 10 Hz sono adatti al rilevamento delle colate detritiche.

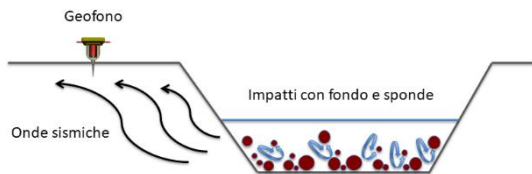


Figura A.22 - Rappresentazione schematica della propagazione delle onde sismiche generate dagli impatti del trasporto al fondo e rilevate da un geofono installato sulla sponda del corso d'acqua

I geofoni presentano alcuni importanti vantaggi rispetto ad altri sensori classicamente impiegati per il monitoraggio delle colate detritiche (sensori di livello,

videocamere, pendoli e cavi a strappo). Rispetto ai sensori installati in canale, i geofoni sono in grado di rilevare le vibrazioni della colata detritica a distanza e possono dunque essere installati sulle sponde, in posizione relativamente sicura (Figura A.22). Inoltre, essi sono piuttosto economici (vedi Allegato), sono sensori passivi che non necessitano di alimentazione per funzionare e sono facili e versatili da installare. Se impiegati a scopo di allertamento, i geofoni hanno l'ulteriore vantaggio di essere in grado di rilevare il fenomeno prima che questo raggiunga la sezione dove sono installati, in quanto le vibrazioni prodotte dal fronte di una colata detritica si propagano più velocemente del fronte stesso e sono rilevabili anche a centinaia di metri di distanza. Per utilizzare i geofoni a scopo di allertamento, tuttavia, è necessario l'impiego di algoritmi capaci di elaborare il segnale in tempo reale e riconoscere un segnale prodotto da un evento di colata, distinguendolo da altre tipologie di sorgente sismica.

Installazione

Una distanza che varia dai pochi metri alle decine di metri fra geofono e canale attivo consente di rilevare processi di colata anche di piccole dimensioni e basse velocità. Nel caso di reti lineari di geofoni disposte lungo il canale a scopo di allertamento, la distanza fra due geofoni deve essere maggiore della distanza sensore-centro canale (Coviello *et alii*, 2019). I metodi di installazione dei geofoni possono essere molteplici (nel terreno, su strutture o blocchi, in foro) e variano a seconda delle caratteristiche del sito di indagine e della distanza dalle sorgenti sismiche oggetto di studio (Figura A.23).

Un principio generale da rispettare è la facilità di accesso al sensore in caso di necessità di manutenzione, spostamento, o sostituzione cavi. Bisogna naturalmente tenere conto di una minima distanza di sicurezza dal canale attivo e dell'attenuazione che si può compensare impostando un valore di amplificazione del segnale dopo aver acquisito una finestra temporale di alcuni ore o giorni di rumore di fondo. In particolare, un geofono tassellato sul corpo di una briglia rileverà un segnale attenuato

rispetto ad un sensore installato alla stessa distanza dal canale ma direttamente nel terreno a causa dell'effetto di inerzia della struttura (Coviello *et alii*, 2015).



Figura A.23 - Installazione di un geofono (a) sulla parete di un pozzetto in cemento precompresso (Rio Gatria, BZ); (b) su un masso a bordo canale (Chalk Cliffs, CO, USA); (c) nel terreno sulla sponda del torrente (Rio Marderello, TO). Foto: V. Coviello

A.3.3 Cavi a strappo

I cavi a strappo sono un semplice dispositivo di monitoraggio consistente in un cavo d'acciaio, indicativamente del diametro di 4 o 5 mm, teso attraverso il canale ad un'altezza dal fondo tale da intercettare la colata e collegato ad un interruttore on/off: il passaggio della colata detritica provoca il tensionamento e lo strappo del cavo e l'attivazione dell'interruttore (Figura A.24).



Figura A.24 - Dettaglio dell'installazione di un cavo a strappo: collegamento del cavo all'interruttore sulla sponda in roccia di un canale da colata detritica. Fonte: CNR IRPI

L'informazione fornita dai cavi a strappo, consistente solamente nella registrazione del passaggio della colata detritica e dell'orario in cui esso è avvenuto, costituisce un serio limite in sistemi di monitoraggio con finalità di studio. Se è vero che più cavi installati a diverse altezze dal fondo del canale possono fornire una misura della massima profondità di flusso della colata detritica, resta il fatto che tale misura è comunque approssimativa. Per contro, semplicità e robustezza rendono i cavi a strappo ideali per sistemi di allertamento. Dopo l'attivazione di un cavo a strappo, questo deve essere riarmato. Il ripristino, tuttavia, non può avvenire in corso d'evento per ovvie ragioni legate ai tempi del fenomeno ed alla sicurezza degli operatori. L'allertamento generato dai cavi a strappo resta quindi limitato alla prima pulsazione che provoca l'attivazione degli stessi.

I cavi a strappo sono moderatamente sensibili ad attivazioni accidentali: queste possono essere causate dal rotolamento di massi lungo l'alveo, possibile specialmente in canali a forte pendenza nelle parti superiori dei bacini, o dalla caduta di piante da sponde boscate instabili. È raccomandabile l'installazione di due cavi nella medesima sezione al fine di ridurre la possibilità di falsi allarmi causati da strappi di natura accidentale.

Installazione

L'installazione dei cavi a strappo richiede una sezione stabile, per evitare gli opposti problemi dell'incisione e del sovralluvionamento del canale. L'incisione del canale, aumentando la distanza fra il fondo e i cavi a strappo, può far sì che la colata transiti senza essere intercettata. Per contro, il sovralluvionamento del canale può far sì che anche modeste piene con trasporto solido causino l'attivazione dei cavi a strappo o che gli stessi cavi a strappo risultino sepolti nel fondo dell'alveo. Una soluzione conveniente può consistere nell'installazione di cavi a strappo in corrispondenza del filtro di una briglia aperta all'uscita di una piazza di deposito per colate detritiche, o al di sopra del filtro stesso. Questo tipo di installazione riduce il rischio di attivazioni accidentali e assicura che l'attivazione avvenga quando la colata detritica raggiunge il filtro della briglia dopo aver riempito, del tutto o in parte, la piazza di deposito: circostanza sicuramente meritevole di una segnalazione di allarme.

La scatola contenente gli interruttori dei cavi a strappo deve essere ancorata in posizione tale da non essere danneggiata dal passaggio della colata detritica.

A.3.4 Telecamera/fotocamera

La possibilità di registrare immagini e video rappresenta un impareggiabile valore aggiunto nel contesto di un sistema per il monitoraggio delle colate detritiche. Analizzare visivamente il fenomeno permette, infatti, un miglior riconoscimento ed una più accurata interpretazione dello stesso. In caso di monitoraggio a fini di protezione civile, inoltre, avere la conferma visiva del fenomeno in atto consente alle autorità competenti un immediato riscontro, che facilita una rapida implementazione delle misure previste. Tra le più importanti caratteristiche delle colate che possono essere documentate mediante sistemi video ricordiamo le seguenti:

- variazioni di concentrazione solida e granulometria sia fra diverse colate che all'interno dello stesso evento;
- inizio della turbolenza che spesso caratterizza la

fase finale dell'evento;

- eventuale presenza di un'onda precorritrice (*precursory surge*) o di pulsazioni secondarie nel corso dell'evento e/o momenti di stasi sulla propagazione della colata;
- trasporto di legname da parte della colata.

Le caratteristiche menzionate sopra possono essere derivate mediante un'interpretazione visiva delle registrazioni. Alcune caratteristiche, quali granulometria e velocità del flusso, possono essere derivate in modo automatico o semi-automatico dall'analisi delle registrazioni. Di particolare interesse risulta la stima della velocità superficiale mediante registrazioni oblique o perpendicolari e grazie all'utilizzo di tecniche di *Large Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) (Figura A.25).

Le telecamere più comunemente impiegate per il monitoraggio delle colate detritiche sono prodotti analoghi a quelli per videosorveglianza in esterno, adatti a resistere alle condizioni ambientali che caratterizzano il sito di interesse. In particolare, è consigliabile una lunghezza focale ridotta (> 5mm) in modo da garantire l'inquadratura di un'ampia zona. Una buona risoluzione ($\geq 720p$) ed un *frame rate* piuttosto elevato ($\geq 20fps$) sono auspicabili al fine di riconoscere le caratteristiche del flusso, che non di rado raggiunge velocità di 3-5 m/s.

Lo scopo del monitoraggio, sia esso per fini di ricerca o di allerta, influenza in modo significativo le soluzioni operative da adottare. Ai fini di un'allerta efficace, la robustezza del sistema deve essere garantita e per questo motivo si può andare in deroga a quanto sopra espresso ed optare per basse risoluzioni e bassi *frame rate* che consentano un rapido controllo da remoto della situazione in atto più che costituire una buona base dati video per successive analisi.

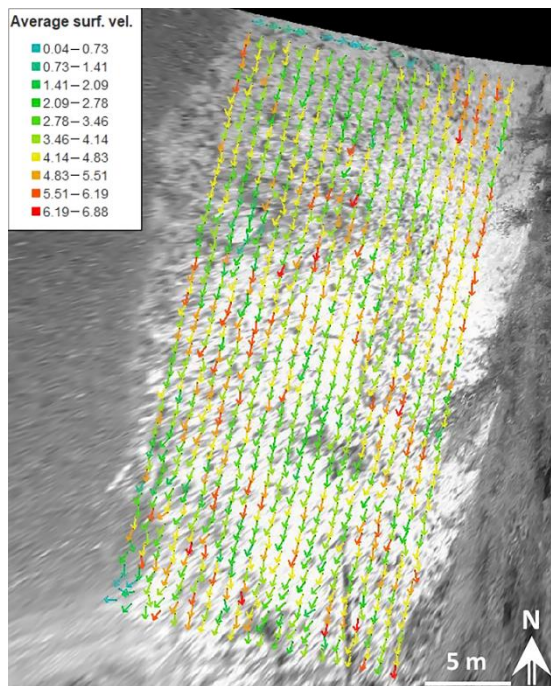


Figura A.25 - Velocità media (m s^{-1}) di un fronte di colata detritica (Rio Gatria, BZ). Fonte: Theule *et alii*, 2018

Il monitoraggio video può essere condotto anche mediante l'utilizzo di strumenti e/o tecniche più raffinate; a titolo di esempio si ricordano le fotocamere reflex (installazione singola o in stereocoppia) o stereocamere native. Questi strumenti da un lato consentono il *triggering* preciso dell'acquisizione immagine o simultaneo del video per una ricostruzione anche fotogrammetrica dell'evento, ma dall'altro rivestono ancora un ruolo marginale nel panorama del monitoraggio per l'oneroso *processing* che la risoluzione e/o la tecnologia adottata richiedono.

Infine, anche le telecamere termiche possono essere impiegate per il monitoraggio di colate detritiche essendo in grado di individuare la temperatura del flusso e del materiale trasportato. In generale l'alto costo di queste ultime e la loro risoluzione normalmente minore rispetto alle telecamere da videosorveglianza tendono a sfavorirne l'utilizzo, salvo i casi in cui si sia

interessati alla distribuzione di energia termica nella colata.

Installazione

Analogamente ai sensori di livello anche per le telecamere l'installazione deve essere robusta e basarsi su sostegni posti fuori alveo. Pali o tralicci a sbalzo rappresentano soluzioni consolidate per l'installazione di telecamere (Figura A.26). Se di primario interesse è l'analisi LSPIV, allora è opportuno evitare obiettivi grandangolari per limitare le distorsioni di bordo e limitarsi ad inquadrare una porzione limitata del canale perpendicolarmente alla direzione del flusso. Per superare le limitazioni dovute alla visione notturna si può optare per un'integrazione con illuminazione ad infrarossi. Se l'area da inquadrare è ampia o lontana dalla telecamera può essere opportuna l'integrazione di un faro (luce visibile o luce infrarossa) opportunamente comandato, ad esempio da un sensore di pioggia.



Figura A.26 - Esempio di installazione di webcam e relativo faro (Rio Gatria, BZ). Fonte: CNR IRPI

La tecnologia *Power over Ethernet* (PoE) consente di portare sia alimentazione che dati mediante un solo cavo (indipendentemente dal fatto che sia un'installazione cablata oppure isolata ed autonoma con pannello/batteria) rendendo così maggiormente robusta l'installazione stessa.

La trasmissione del dato può essere effettuata via cavo (es. ethernet) oppure via radio con ponti radio nel *range*

0,5-5 GHz che riescano a reggere il flusso video. Per evitare rallentamenti o inceppamenti nella trasmissione è opportuno inviare un flusso video compresso (e.g., H.264 o superiori).

Ai fini dell'analisi immagine si possono impostare algoritmi già implementati *on-board* sulle telecamere oppure limitarsi a registrare il video, in loco o da remoto, e delegare l'analisi dello stesso a successive elaborazioni. Database di immagini e video registrati dalla telecamera possono essere di vario tipo. A titolo esemplificativo si consiglia l'acquisizione di un'immagine a piena risoluzione ad intervallo desiderato come snapshot di facile reperibilità per prendere visione dello stato del sistema, combinata con l'acquisizione in continuo di spezzoni di video di lunghezza appropriata (30-60 minuti) in modo da non sovraccaricare il computer o la banda a disposizione durante l'elaborazione o la trasmissione degli stessi. In linea di principio, se opportunamente tarata la sensibilità al movimento derivata dall'analisi dell'immagine potrebbe consentire anche alle telecamere di lanciare allarmi per passaggio di colata detritica. Tuttavia, essendo questo approccio latore di falsi positivi (cambi luce, pioggia intensa, attivazione infrarossi), si sconsiglia tale soluzione se non a titolo sperimentale per valutare la praticabilità di questo approccio. L'accessibilità da remoto alla telecamera (o ad un pc in rete con la telecamera e, più in generale, al sistema di monitoraggio) è di fondamentale importanza specie quando il monitoraggio è condotto per fini di allerta. A tale scopo, ove non sia presente una rete dati cablata, vengono comunemente utilizzati modem (connettività $\geq$ 3G) con specifiche industriali o ponti radio dedicati (e.g., Protezione Civile). Infine, l'accortezza di utilizzare una *Virtual Private Network* (VPN) permette da un lato di garantire un *layer* di sicurezza ulteriore e dall'altro di poter sempre contattare la telecamera (o il sistema) indipendentemente dalle eventuali limitazioni introdotte dall'ISP (*Internet Service Provider*).

A.4 STRUMENTAZIONE IN FORO

A.4.1 Tubi inclinometrici

I tubi inclinometrici sono installati in fori di sondaggio (Figura A.27).

Di seguito si elencano solamente alcuni degli aspetti da considerare durante l'esecuzione dei sondaggi (la trattazione specifica della realizzazione di fori tramite sondaggio esula dalle presenti linee guida):

- durante la perforazione, condotta a distruzione di nucleo o a carotaggio continuo, si deve assicurare sempre la stabilità del foro e in ogni caso l'avanzamento dovrà essere sempre seguito dal rivestimento provvisorio del foro, anche qualora la perforazione incontrasse livelli potenti di roccia competente, data la natura franosa del materiale attraversato;
- il diametro deve essere sufficiente per l'inserimento del tubo inclinometrico, (diametro 101 mm standard e comunque non superiore a 150 mm);
- il rivestimento del foro dovrà essere estratto con movimenti di sola trazione e assolutamente senza rotazione della colonna del rivestimento;
- dovrà essere garantita la verticalità del foro durante le operazioni di avanzamento della perforazione;
- la base della tubazione inclinometrica deve essere ammorsata nel terreno stabile al fine di poter riferire le letture al fondo della colonna. Si raccomanda pertanto di intestare la tubazione per almeno 5 m nel terreno stabile al fine di poter disporre di un numero congruo di letture sulla colonna.

Al fine di garantire l'omogeneità delle misurazioni inclinometriche, si elencano le caratteristiche che i tubi inclinometrici devono rispettare:

- spezzoni di lunghezza non inferiore a 3 m, diametro interno tubo 76 mm, diametro interno in corrispondenza delle guide 82 mm, diametro esterno in corrispondenza delle guide 86 mm;
- materiale in alluminio o ABS (massa non inferiore a

1350 g/m e spessore minimo di 2 mm per tubi in alluminio, massa non inferiore a 600 g/m e spessore minimo di 3 mm per tubi in ABS);

- eventuale protezione tramite anodizzazione o verniciatura con vernici epossidiche;
- angolo di spiratura $< 0,5^\circ/\text{m}$;
- assoluta perpendicolarità delle sezioni terminali degli spezzoni di tubo rispetto all'asse, con la tolleranza di $\pm 1^\circ$.

I tubi sono assemblati mediante manicotti di giunzione che devono avere il diametro interno superiore di circa 1 mm rispetto al diametro esterno in corrispondenza delle guide del tubo. Tali manicotti devono già avere i fori per il fissaggio dei rivetti, al fine di forare i tubi nel punto ottimale (ovvero a 45° di distanza da ciascuna guida) per evitare che i rivetti possano interferire con il passaggio della sonda. Il gioco massimo di accoppiamento tra i tubi, dovuto ai soli manicotti, non dovrà essere superiore a $1^\circ/\text{giunto}$.

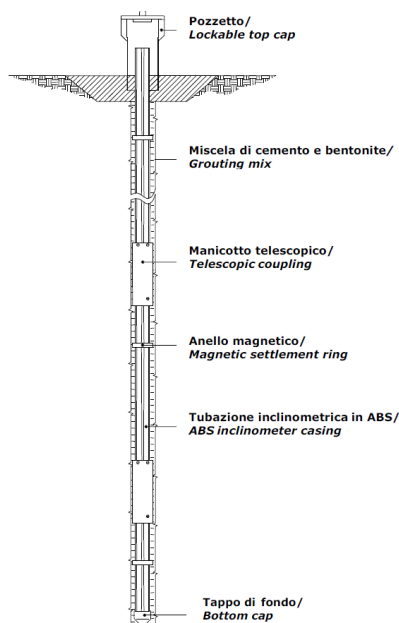


Figura A.27 - Tubi inclinometrici installati nel foro di sondaggio. Fonte: SISGEO

Installazione

La procedura di installazione riguarda le operazioni preliminari, la posa in opera e la verifica dell'integrità della colonna inclinometrica.

Operazioni preliminari

In cantiere, prima dell'installazione, dovrà essere verificato che:

- i tubi e manicotti non presentino lesioni o schiacciate dovute al trasporto, soprattutto nelle parti terminali;
- le guide interne al tubo inclinometrico siano integre e ben profilate;
- le estremità dei tubi e dei manicotti non presentino sbavature che possano compromettere il buon accoppiamento dei tubi e lo scorrimento della sonda inclinometrica;
- ci sia efficienza del tubo per l'iniezione della miscela di cementazione da applicare all'esterno della colonna inclinometrica;
- la composizione della miscela di cementazione sia costituita da acqua, cemento pozzolanico e bentonite (generalmente in proporzione di 100, 30 e 5 parti in peso);
- siano corretti il diametro delle punte del trapano, il diametro e lunghezza dei rivetti, tipo e scadenza del collante, efficienza della morsa di sostegno apposta.

Posa in opera

La posa in opera dei tubi inclinometrici dovrà avvenire in accordo con le seguenti modalità:

- lavare accuratamente la perforazione con acqua pulita;
- preassemblare i tubi in spezzoni di 6,0 m (ovvero due spezzoni di 3 m già giuntati), terminanti ad un estremo con un manicotto.

La realizzazione dei giunti dovrà avvenire nel modo seguente:

- inserire il manicotto sul tubo per metà della sua

lunghezza;

- praticare i fori per i rivetti (almeno 4 per ogni tubo) usando come riferimento i fori già praticati sui manicotti, lungo generatrici equidistanti dalle guide e a circa 50 mm dall'estremità del manicotto;
- mantenendo in posizione il manicotto mediante spine, introdurre l'altro tubo e forare, rimuovere il manicotto;
- applicare un sottile strato di mastice sul tubo ed all'interno del manicotto, attendere almeno 5 minuti;
- infilare il primo tubo sul manicotto e chiodare con rivetti;
- fasciare abbondantemente con nastro autovulcanizzante, evitando bruschi movimenti che possano causare torsioni;
- montare sul primo spezzone, già munito di manicotto, il tappo di fondo e fissare il tubo per l'iniezione;
- inserire nella perforazione il primo spezzone di tubo preparato (in terreni sotto falda o in fori in cui non vi sia drenaggio lungo le pareti riempire il tubo di acqua per contrastare la spinta di Archimede e favorire la discesa del tubo nel foro);
- bloccare il tubo mediante l'apposita morsa in modo che, dalla perforazione, fuoriesca solamente il manicotto di giunzione;
- inserire lo spezzone successivo ed eseguire l'incollaggio, la rivettatura e la sigillatura del giunto;
- allentare la morsa e calare il tubo nel foro (riempiendolo d'acqua se necessario) fissando nel contempo il tubo d'iniezione, bloccare la colonna con la morsa quando fuoriesce solamente il manicotto;
- procedere di seguito fino al completamento della colonna annotando la lunghezza dei tratti di tubo e la profondità dei manicotti.

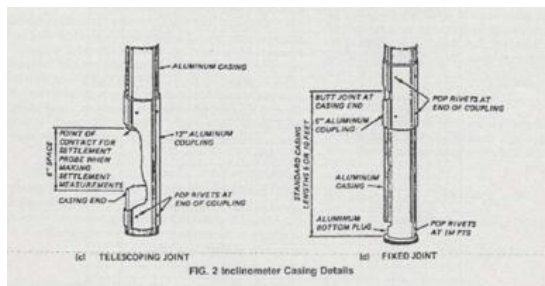


Figura A.28 - Dettaglio tubo inclinometrico (Fonte ASTM D 4622-86)

La colonna inclinometrica deve scendere nel foro unicamente sotto la sollecitazione del proprio peso e dell'acqua in essa eventualmente contenuta. In nessun caso è consentito esercitare pressione verso il basso utilizzando le attrezzature di perforazione in quanto il tubo in alluminio, sottoposto a sforzi di compressione, potrebbe deformarsi falsando le successive misure.

Completata la colonna, ha inizio la cementazione, che dovrà avvenire a bassa pressione ($p = 2 \text{ atm}$) attraverso il tubo d'iniezione, osservando la risalita della miscela nell'intercapedine tra tubo e foro. I rivestimenti di perforazione devono essere estratti, operando solo a trazione, non appena la miscela appare in superficie. Nella fase di estrazione dei rivestimenti il rabbocco di miscela potrà essere eseguito da testa foro anziché attraverso il tubo di iniezione, per mantenere il livello costante a p.c.; qualora si noti l'abbassamento del livello della miscela il rabbocco dovrà continuare nei giorni successivi. Terminata la cementazione il tubo inclinometrico sarà accuratamente lavato.

Per proteggere la testa tubo e garantire la durata nel tempo dell'installazione, è fondamentale realizzare un adeguato pozzetto di protezione che potrà essere carrabile o rilevato rispetto a piano campagna.

Per il tipo in elevazione, nella fase finale della cementazione, si dovrà provvedere all'installazione di un tubo di protezione in acciaio o PVC pesante intorno al tratto superiore del tubo inclinometrico. Il tratto di tubo inclinometrico che sporge dal terreno nella parte superiore non dovrà essere un manicotto, ma un tratto di tubo normale.

I pozzetti carrabili (Figura A.29) sono invece costituiti da un manufatto in cemento prefabbricato di tipo robusto con copertura in tombino di ghisa, avente dimensioni circa 40x40x40 cm e posto in opera a filo della pavimentazione esistente. All'interno del tombino carrabile viene collocato un pozzetto metallico, a sezione quadra o circolare. Il tubo inclinometrico deve emergere all'interno del tombino metallico, libero dal cemento, almeno per 10 cm e tra le pareti esterne del tubo inclinometrico e le pareti interne del capitello metallico deve esservi uno spazio minimo sufficiente a garantire l'eventuale inserimento della carrucola strozza-cavo (attrezzatura che sostiene il peso della sonda).



Figura A.29 - Pozzetto di protezione carrabile per testa di tubo inclinometrico. Fonte: archivio ARPAL

Per un migliore utilizzo delle informazioni raccolte tramite le misure inclinometriche, è consigliabile la georeferenziazione dei pozzetti, dei chiusini o dei capitelli di protezione. La quota assoluta dovrà avere precisione centimetrica, mentre è ritenuta sufficiente la precisione metrica per quanto riguarda la posizione in pianta.

Verifica dell'integrità della colonna inclinometrica

La verifica dell'integrità risulta necessaria per la corretta funzionalità della colonna inclinometrica. La verifica

deve avvenire entro i 7-10 giorni successivi alla posa attraverso il controllo della continuità e dell'allineamento degli spezzoni di tubo. Gli inclinometri non devono avere nessuna forma di anomalia interna conseguente o meno al montaggio (rivetti sporgenti, giunzioni a scalino ecc.) ed inoltre una delle guide dovrà essere orientata o in direzione Nord-Sud o secondo la direzione presunta di spostamento.

La strumentazione necessaria per la verifica dovrà comprendere una sonda testimone per il controllo dell'integrità della tubazione (Figura A.30): il controllo verrà eseguito calando nel foro la sonda testimone facendola scorrere lungo due guide del tubo fino a fondo foro, estraendola e quindi ripetendo l'operazione, dopo aver ruotato la sonda di 90°.

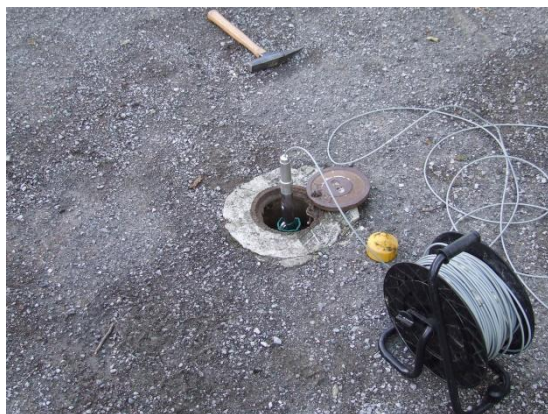


Figura A.30 - Sonda testimone per verifica delle condizioni strutturali della tubazione inclinometrica. Fonte: archivio ARPAL

Nell'ambito di questa fase di verifica si rileva l'opportunità di ricorrere all'uso della sonda televisiva al fine di verificare lo stato di idoneità della tubazione inclinometrica e più in generale la sonda televisiva può essere usata prima di eseguire qualsiasi lettura (Figura A.31).



Figura A.31 - Telecamera da foro per l'ispezione del tubo. Fonte: archivio ARPAL

La corretta installazione di inclinometrici nuovi (collaudo) viene verificata attraverso la lettura di zero, che deve fornire una deviazione globale dalla verticale non superiore a 1,5-2%. Il valore della deviazione dalla verticale può essere variabile lungo il foro, in funzione delle difficoltà di avanzamento del sondaggio.

A.4.2 Sistema inclinometrico manuale

Sonde inclinometriche

Le sonde inclinometriche sono essenzialmente costituite da un corpo cilindrico in acciaio munito di due carrelli contenente un sensore servo-accelerometrico biassiale (o MEMS) ad alte prestazioni (Figura A.32).

La sensibilità di lettura della sonda può essere superiore a 20.000 $\text{sen } \alpha$. La variazione in temperatura della sensibilità non deve normalmente superare lo 0,015% della lettura, per grado centigrado. La sensibilità all'asse trasverso non deve, invece, superare lo 0,015% del fondo scala, per grado sessagesimale (a seconda della casa costruttrice dello strumento, i parametri possono variare).

Il sensore servo-accelerometrico deve essere caratterizzato da una variazione in temperatura dello zero (*Output Temperature Sensitivity*), inferiore a 100 ppm/°C, ovvero 0,01% del fondo scala per °C (a seconda della casa costruttrice dello strumento, il

parametro può variare). Tale parametro è importante ai fini della precisione delle misure poiché si relaziona al valore di deriva termica "dello zero" che può essere compensato. Spesso le condizioni di temperatura ambientale sono tali che è necessaria, comunque, la stabilizzazione "termica" dello strumento, in foro, per alcuni minuti.

Le differenze nel tempo della sensibilità di lettura sono di piccola entità rispetto ai valori nominali; poiché, però, queste piccole variazioni (per la sensibilità percentuali non superiori al 1% e per l'assetto angolare pochi decimi di grado sessadecimale) possono comunque falsare i risultati delle elaborazioni, è necessario mantenere l'apparecchiatura di misura sempre perfettamente tarata.



Figura A.32 - Sonda servo-accelerometrica biassiale e cavo da 50 m: ogni sonda con il proprio cavo costituisce un sistema di misura unico non intercambiabile. Fonte: archivio ARPAL

Cavo

Il cavo deve essere di tipo non estensibile con armatura interna in acciaio o Kevlar e deve avere la guaina esterna antiabrasione.

Nel caso di cavi utilizzati anche per la trasmissione dei dati, questi devono essere provvisti alle estremità di

connettori stagni per il collegamento alla sonda ed alla centralina di lettura.

Il cavo elettrico di collegamento fornisce l'alimentazione alla sonda, trasmette i segnali rilevati, nonché garantisce il sostegno e permette la determinazione della profondità di lettura. A questo scopo esso deve essere dotato di tacche di riferimento vulcanizzate ogni 0,5 m (oppure ogni 610 mm per cavi di origine anglosassone), in accordo al passo tra le ruote della sonda.

La lunghezza del cavo non deve essere inferiore a 50 m. L'errore della metratura del cavo dovrà essere inferiore a 5 cm ogni 100 m e l'allungamento sotto carico di 20 kg inferiore allo 0,05%.

L'accuratezza delle misure inclinometriche dipende anche dalla precisione con cui, per ciascun passo di profondità e in tutte le letture (di zero e di esercizio), si posiziona la marcatura di profondità del cavo sul riferimento a bocca foro.

Più in generale poiché le letture inclinometriche sono riferite al piano campagna, i programmi di restituzione delle letture inclinometriche consentono di inserire il valore di "*depth offset*" del tubo, ovvero di altezza fuori terra della testa del tubo, che sarà costante per tutte le successive letture.

Data Logger

È lo strumento di acquisizione del dato inclinometrico con il quale vengono:

- alimentati i sensori della sonda;
- amplificati i segnali rilevati;
- registrati o visualizzati i valori di lettura.

Le centraline di misura di tipo automatico sono i modelli più diffusi e:

- permettono la visualizzazione delle letture sia in termini di spostamento locale che di seno dell'angolo di inclinazione;
- mostrano simultaneamente sul video (LCD) i valori angolari di deviazione dalla verticale dei due sensori A e B (nel caso di sonde biassiali) e la relativa profondità;

- sono dotati di batterie al Ni-Cd dall'autonomia elevata;
- hanno una utile retroilluminazione che ne consente l'utilizzo anche in condizioni di luce non ottimali;
- possono essere dotate di efficaci riscaldatori interni che permettono letture in condizioni di temperatura alquanto rigide (anche - 10 °C);
- hanno elevate capacità di memorizzazione (sino a 30.000 letture), con registrazione dei dati rilevati su memoria non volatile;
- visualizzano immediatamente i valori degli spostamenti, gli scarti tra le "letture coniugate" (*checksum*), con restituzione numerica completa accompagnata dai relativi grafici;
- permettono il collegamento a PC per il trasferimento dei dati registrati.

Sul display dei *data logger* sono visualizzate le inclinazioni espresse in seno dell'angolo, amplificate di un fattore denominato costante strumentale (k), definita dal costruttore.

A.4.3 Sonde inclinometriche fisse

Le sonde inclinometriche fisse da foro (Figura A.33) sono costituite da un carrello in acciaio inossidabile sul quale è montato un porta-sensore. Il carrello è munito di due coppie di rotelle opposte e basculanti, che ne consentono l'inserimento ed il mantenimento dell'orientazione nella tubazione inclinometrica. L'interasse tra le coppie di rotelle può essere tra 0.5 m e 3.0 m (a seconda della lunghezza dell'asta).

Grazie alle coppie di rotelle basculanti applicate sul corpo di ciascuno strumento, la catena viene calata nel tubo inclinometrico, portando i vari sensori della catena alle quote prestabilite. La colonna inclinometrica segue il terreno nei suoi movimenti, provocando una conseguente variazione di inclinazione nei singoli sensori che forniranno, in automatico, i dati che consentono di rilevare la deformazione della colonna stessa.



Figura A.33 - sonda inclinometrica fissa Fonte Ditta OTR

Le sonde del tipo a servoaccelerometro o a tecnologia MEMS rilevano il movimento che avviene lungo i piani di scivolamento dei versanti in movimento e sono installate in una o più unità all'interno di uno stesso tubo e lasciate in posizione fissa. Il collegamento tra i vari elementi di misura è assicurato da un cavetto in acciaio inox oppure da aste in acciaio inox e la loro distanza viene stabilita di volta in volta in fase di progetto e/o installazione. Tutta la colonna così costituita è sospesa alla sommità del tubo monitorato, per mezzo di una testa di sospensione.



Figura A.34 - Installazione di sonde inclinometriche fisse a profondità identificate dalle campagne di misura inclinometriche manuali. Fonte: archivio ARPAL

L'installazione ed il posizionamento di una sonda fissa da foro (Figura A.34) necessita normalmente di una

campagna di misure inclinometriche manuali precedenti all'installazione. Il sensore deve essere posizionato nel tratto di tubo inclinometrico in movimento e in funzione della potenza della fascia di deformazione e/o del numero di livelli deformativi; si potranno inserire più sonde necessarie a coprire tutta la profondità in esame.

Come già sottolineato in precedenza risulta fondamentale la conoscenza del punto esatto ove si vuole inserire la sonda fissa per evitare di avere risultati fuorvianti (che possono derivare da un errato posizionamento della sonda nell'effettivo punto di movimento e comunque mai al di sopra della fascia di deformazione, tantomeno al di sotto nel tratto di basamento stabile), ed inoltre durante l'installazione si deve programmare con accuratezza la frequenza delle misure registrate in modo tale da non trovarsi a gestire un'eccessiva mole di dati rispetto alle reali necessità (piano di monitoraggio).

Da considerare anche l'opportunità di sfilare la sonda nel caso in cui si dovessero presentare dati non convincenti ed eseguire una lettura manuale dell'intera colonna inclinometrica: in questo modo si scoprirebbe un eventuale problema di natura strumentale o di corretto posizionamento della sonda fissa.

A.4.4 Colonne multiparametriche

Come già detto al Capitolo 4 le colonne multiparametriche permettono il monitoraggio automatico e continuo della deformazione del terreno in profondità e la misura di altri parametri fisici.

L'avvento di questo tipo di strumentazioni è stato principalmente reso possibile dalla crescente miniaturizzazione dei sensori nel campo dell'elettronica, cui si è accompagnata la diminuzione dei costi, unitamente alla riduzione dei consumi energetici da parte dei sensori.

Dal punto di vista delle caratteristiche tecniche, le colonne multiparametriche registrano essenzialmente spostamenti "planimetrici", avendo al loro interno sensori inclinometrici biassiali. La scelta del modello dipende anche dalla velocità attesa della frana, in quanto per frane veloci si può anche optare per sensori

con una accuratezza minore, ma dal costo decisamente più contenuto. Nel caso di frane lente, dove si prevede di eseguire un monitoraggio a medio – lungo termine, è conveniente spostarsi su sensoristica di alta qualità, grande robustezza e componentistica ridondata; il costo sarà maggiore, ma la durata nel tempo sarà garantita e, inoltre, qualora il monitoraggio rivesta caratteristiche conoscitive, la colonna potrà essere riutilizzata eventualmente in altri siti.

Una tipica colonna mutiparametrica per un monitoraggio con le caratteristiche di cui sopra contiene, solitamente, i seguenti sensori:

- sensore inclinometrico biassiale con campo di misura in funzione dei movimenti attesi ma preferibilmente mai inferiore a $\pm 20^\circ$;
- ripetibilità della lettura in funzione degli spostamenti attesi ma possibilmente non superiore a $\pm 0,02^\circ$;
- sensore piezometrico da scegliersi in funzione della profondità d'installazione e della massima colonna d'acqua attesa; preferibilmente con capacità di misura di colonna d'acqua non inferiore a 20 metri;
- bussola digitale con accuratezza non inferiore a $\pm 3^\circ$;
- sensore accelerometrico triassiale tipicamente di $\pm 2g$;
- sensore di temperatura con range compreso almeno fra -10° e $+ 50^\circ\text{C}$, risoluzione almeno di $0,2^\circ\text{C}$.

Le caratteristiche sopra indicate costituiscono valori di riferimento e non sono prescrittive in senso lato, si basano su modelli principalmente reperibili sul mercato italiano ed europeo e tengono conto di capitoli adottati in procedure ad evidenza pubblica. Data l'estrema limitatezza del mercato delle colonne multiparametriche e vista la tecnologia innovativa, non è dato al momento di sapere se vi siano strumenti con altre caratteristiche.

La lunghezza della colonna può variare da pochi metri fino a 250 metri e oltre, a secondo delle applicazioni più spinte.

Installazione

L'installazione delle colonne multiparametriche può avvenire in differenti modalità in funzione della tipologia di colonna utilizzata e della logistica dell'area di monitoraggio. Per colonne con peso contenuto si potrà operare manualmente; se la logistica è favorevole ma il peso della colonna non permette l'installazione esclusivamente manuale potrà essere utilizzato un *reeler* (vedi Figura A.35 e Figura 31 riportata al Paragrafo 4.2.2). Qualora si debba operare in zone non raggiungibili con mezzi motorizzati la colonna verrà inserita in foro, dopo averla completamente srotolata, mediante elicottero (vedi Figura A.36). In quest'ultimo caso sarà particolarmente importante curare gli aspetti legati alla sicurezza degli operatori.

Uno dei problemi che possono interessare l'inclinometria classica è la misurazione dell'abbassamento lungo l'asse della colonna (componente z). Questo effetto deriva dal fatto che una colonna classica registra spostamenti planimetrici, mentre il movimento è tridimensionale e possiede anche un'importante componente assiale z (che spesso risulta di pari entità o superiore rispetto allo spostamento planimetrico). Per risolvere tale problema, esistono modelli particolari di colonna multiparametriche, che possiedono al loro interno anche un modulo estensimetrico per la misura dello spostamento lungo l'asse z. Tale sensore va a compensare l'effetto che subisce una colonna in base al carico assiale (carico di Eulero, o di punta), che negli elementi snelli produce una deviazione rispetto alla verticalità; nel caso delle colonne inclinometriche, soprattutto se di notevole lunghezza, si possono ottenere deviazioni "a spirale" con moduli che registrano movimenti in "contropendenza" rispetto alla normale direzione di spostamento del versante, rendendo pertanto difficoltosa l'interpretazione dei dati. Nel caso si opti per l'adozione di tale soluzione, è buona norma prevedere anche un particolare tipo di tubo da inserire

nel sondaggio, che abbia la possibilità di seguire le deformazioni verticali.



Figura A.35 – Installazione colonna multiparametrica. Fonte: archivio ARPA Piemonte

Nel momento in cui occorra effettuare un monitoraggio conoscitivo, può essere utile poter disporre di una colonna multiparametrica da installare per un periodo ridotto di tempo e poi provvedere alla sua estrazione e al suo riutilizzo in altre situazioni.



Figura A.36 - Installazione di colonna inclinometrica mediante utilizzo dell'elicottero. Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

A.4.5 Cavo TDR ed ecometro in foro

I cavi TDR possono essere installati:

- all'esterno di un tubo inclinometrico o piezometrico durante la fase di posa delle tubazioni;
- all'interno di un tubo inclinometrico dismesso;
- direttamente nel terreno, in seguito a trivellazione e cementazione del cavo calato nel perforo.

In ogni caso, è opportuno che il cavo presenti una lunghezza leggermente superiore (3 metri o più) rispetto alla profondità del foro in modo tale da permettere all'operatore di eseguire la misura in modo più agevole

e compensare eventuali cedimenti. L'estremità inferiore deve essere messa in corto circuito mettendo in contatto il conduttore interno con la treccia metallica esterna. Dopo questa operazione, e prima della sua installazione in foro, è bene verificare elettricamente il cavo.

Nel caso il cavo sia inserito esternamente a un tubo inclinometrico, questi sarà fissato e calato progressivamente insieme agli spezzoni preassemblati. Il cavo generalmente è reso solidale alla tubazione con fascette o nastro lungo la guida 1 e rivettato a fondo foro; nel caso fosse installato all'esterno di un tubo piezometrico, fondamentale sarà mantenere la linearità del cavo, evitando la "spiralatura" intorno alla colonna piezometrica.

In alcuni casi, i cavi sono installati all'interno di tubazioni inclinometriche già compromesse dal movimento semplicemente calando l'estremità già posta in corto circuito almeno fino al di sotto della superficie di rottura (è importante che, in questo caso, le deformazioni consentano ancora il passaggio del cavo). Il cavo dovrà poi essere cementato all'interno dell'inclinometro. La parte eccedente di cavo viene arrotolata in superficie ed utilizzata per la connessione con la centralina di acquisizione delle misure.

Il cavo TDR presenta una guaina a protezione di una treccia solitamente costituita da rame dall'impedenza di 50 ohm (Ω), schermato da un foglio metallico per tutta la lunghezza del cavo. Il nucleo del cavo è composto da due materiali rigidi (dielettrico + conduttore interno in rame) come visibile in Figura A.37.

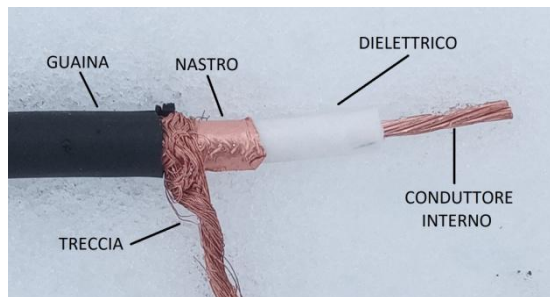


Figura A.37 - Sezione di un cavo TDR. Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

La misura manuale su cavi coassiali viene eseguita con un ecometro portatile costituito da una centralina di acquisizione alimentata da batterie e da altri accessori (cavi con morsetti, eventuale caricabatteria se lo strumento è dotato di una sua batteria interna, software per l'elaborazione dei dati – Figura A.38). La centralina di misura si presenta con un display per la visualizzazione dell'onda, ingresso per cavo coassiale ed un campo di misura per lunghezze chilometriche con una risoluzione minima di 0,1 m.



Figura A.38 - Ecometro per misure TDR in foro. Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Qualora fosse necessario, è possibile l'automatizzazione delle misure, collegando il cavo coassiale a un ecometro automatico. Alcuni modelli di ecometro prevedono la possibilità di installare un *multiplexer* intermedio in modo tale da collegare più cavi coassiali. In commercio sono presenti soluzioni *all-in-one* (centraline di acquisizione complete di ecometro, datalogger e impianto di comunicazione) oppure è possibile collegare l'ecometro a un datalogger per l'archiviazione delle misure. Il datalogger deve essere dotato di apposita porta di uscita (USB) o di cavo per lo scarico dei dati su *notebook*; per un monitoraggio con trasmissione dei dati in continuo dovrà inoltre essere previsto un impianto di comunicazione.

Il principio di funzionamento di un ecometro automatico è lo stesso di quello portatile per le misure manuali: viene infatti generato un breve impulso elettromagnetico applicato a un cavo coassiale; il segnale di ritorno viene

in seguito campionato e digitalizzato. La misura viene quindi memorizzata sul datalogger, che dovrà avere una memoria interna sufficientemente capiente. L'ecometro dovrà presentare un campo di misura per lunghezze chilometriche e una risoluzione minima di 0,1 m. Generalmente è sufficiente che lo strumento garantisca un intervallo di operatività fra $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A.4.6 Estensimetri multibase

Gli estensimetri in foro possono essere a una o più basi (generalmente non oltre 6). Le basi estensimetriche – formate da un filo o da aste in acciaio inox (indicato per ambienti umidi o sotto falda) o invar (maggiore stabilità in presenza di gradienti di temperatura come ad esempio in prossimità della superficie) o altro materiale come, ad esempio, fibra di vetro, vetroresina dal diametro di qualche mm (generalmente 7 mm) – sono collegate in profondità a dei tondini in acciaio ad aderenza migliorata. Una guaina di protezione anti attrito, solidale ad un'estremità all'ancoraggio profondo e all'altra alla piastra di testa, favorisce lo scorrimento delle aste in foro. A bocca foro è installata la piastra di testa con i terminali delle aste dove viene effettuata la misura e i tubetti utilizzati per la cementazione del foro. Un tappo è messo a protezione di ogni singola base, mentre un coperchio metallico – generalmente fissato con bulloni – è posto invece a protezione dell'intera bocca foro.

Come anticipato al Capitolo 4, le misure possono essere effettuate manualmente ma anche mediante strumentazione automatica.

Per l'installazione di quest'ultima, occorre far riferimento alle indicazioni fornite dai diversi produttori e comunque deve essere eseguita da tecnici specializzati. Generalmente, i trasduttori di spostamento automatici devono avere un campo di misura adeguato ai movimenti attesi; generalmente i *range* di misura per i sensori a corda vibrante sono compresi tra 2,5 mm fino a 150 mm con una precisione totale inferiore allo 0,5% del fondo scala e una risoluzione di 0,01 mm. I sensori di tipo potenziometrico possono arrivare a misurare fino a 200 mm di spostamento, con una precisione totale

inferiore allo 0,3% F.S. e un'analoga risoluzione (0,01 mm). Anche per questa tipologia di strumentazione, il *range* della temperatura di esercizio è compreso fra $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Il comparatore centesimale meccanico per misure manuali deve invece essere completo di prolunga e di certificato di taratura. Campo di misura pari a 30 mm, risoluzione 0,01 mm, precisione: 0,015 mm.

Installazione

Gli estensimetri possono essere installati in fori aventi qualsiasi inclinazione. Al momento dell'installazione delle aste, il foro non deve essere rivestito: in presenza di materiali sciolti o fratturati è necessario quindi una cementazione completa preliminare delle pareti del foro e la sua successiva alesatura. Per estensimetri monobase, il diametro ottimale del foro non deve essere inferiore ai 58 mm; per estensimetri multibase, il diametro minimo deve essere 101 mm.

Di seguito si procede alla descrizione delle operazioni necessarie all'installazione degli estensimetri così come indicato da ANISIG (Associazione Nazionale Imprese Specializzate in Indagini Geognostiche):

- 1) srotolare la guaina delle basi o in caso di strumento preassemblato l'intero strumento;
- 2) inserire lo strumento in foro dalla parte dell'ancoraggio più profondo (o lontano) dalla testa fino a portare a boccaforo il secondo ancoraggio (se l'estensimetro è monobase, l'inserimento procederà senza interruzioni fino a che la piastra di testa sporgerà a boccaforo per 50 cm circa);
- 3) si prosegue con l'inserimento delle basi, ponendo ad intervalli i tubetti di iniezione fissando il tutto con del nastro adesivo, fino a quando non si lascerà sporgere a boccaforo l'intero fascio delle basi o se preassemblato la testa e l'eventuale tubo di imbocco. Al termine di questa operazione, se il foro è verso l'alto bisognerà ancorare la testa al terreno in modo che lo strumento si autosostenga durante le operazioni di cementazione; al contrario per fori suborizzontali o diretti verso il basso, si completa l'inserimento della testa a contatto col terreno;

- 4) infine, la piastra di testa sarà resa solidale al terreno con del cemento a presa rapida, spingendo la piastra fino a battuta;
- 5) si procederà quindi con la cementazione delle basi estensimetriche, preparando normalmente una miscela di acqua e cemento (50 kg di cemento ogni 100 litri di acqua), a cui va aggiunta della bentonite (5 kg ogni 100 litri di acqua) all'aumentare della matrice terrosa del materiale o della diminuzione della consistenza. La miscela sarà iniettata in foro con collegandosi ai tubetti di iniezione con dei tubi flessibili. Quando il cemento avrà fatto presa, e prima di procedere con l'installazione degli strumenti di misura, si eliminerà la parte dei tubetti in eccedenza, tagliandoli alla base della piastra di riscontro;
- 6) si conclude con l'installazione degli strumenti di misura: di tipo meccanico (comparatori centesimali removibili) o elettrico (trasduttori di spostamento fissi). Le misure meccaniche sono eseguite appoggiando il comparatore ai raccordi della piastra di testa; i trasduttori elettrici sono invece fissati sui raccordi di ogni base.

In fase di esecuzione della prima misura con un comparatore centesimale o di montaggio dei trasduttori di spostamento, si dovrà provvedere alla regolazione della distanza del terminale di tutte le basi estensimetriche con lo scopo di ottenere una misura iniziale di riferimento prestabilita (es. metà corsa del comparatore o trasduttore). L'installazione degli estensimetri si completa con l'applicazione di una testa di protezione che, nel caso di strumentazione automatica, presenterà un foro per il passaggio dei cavi.

Al termine di ogni installazione dovrà essere fornita scheda di installazione dello strumento (marca/modello, serial number, data installazione, coordinate geografiche, lunghezza della base, immagine fotografica strumento in posto) e certificato di taratura.

A.4.7 Assestimetri

Gli assestimetri sono utilizzati per il monitoraggio delle variazioni di distanza tra due o più punti lungo l'asse

verticale comune (cedimenti). Tale tipologia di strumentazione è utilizzata anche per la misura di cedimenti in rilevati artificiali o fabbricati (assestimetri a piastra o livellometri idraulici, non oggetto di descrizione nelle presenti linee guida). L'installazione degli assestimetri, nell'ambito del monitoraggio dei movimenti franosi, prevede la realizzazione di una perforazione verticale dedicata, dal diametro compreso tra 130 e 150 mm.

Fermo restando che i cedimenti possono anche essere misurati da estensimetri multibase verticali (Paragrafo A.4.6), di seguito si descrivono gli assestimetri indicati per il monitoraggio di versanti in frana che prevedono comunque la realizzazione di fori dedicati:

- una prima tipologia di assestimetri (Figura A.39) prevede l'installazione di una serie di anelli magnetizzati ad alette sporgenti, ancorati a diverse profondità fissati attorno a un tubo corrugato esterno flessibile, solitamente in PVC, al cui interno è alloggiato una seconda tubazione dove sarà effettuata la misura. Le misure sono eseguite manualmente con sonda magnetica (per le modalità di esecuzione si faccia riferimento al relativo paragrafo nel Capitolo 4);



Figura A.39 - Assestimetro magnetico. Fonte: foto Sisgeo S.r.l.

- una seconda tipologia prevede sempre la posa di anelli magnetici fissati intorno a un inclinometro realizzato con tubi telescopici in grado di seguire anche la componente verticale del movimento del terreno: associando le misure inclinometriche si ottengono quindi gli spostamenti nelle 3 dimensioni. Gli anelli sono generalmente installati

ogni metro oppure in corrispondenza di livelli soggetti a cedimenti. Le misure possono essere eseguite manualmente con sonde estensimetriche incrementali (per le modalità di esecuzione si faccia riferimento al relativo capitolo 4) o in modo automatico, installando sonde estenso-inclinometriche che misurano lo spostamento nelle 3 dimensioni (X, Y e Z) oppure sonde inclinometriche ed estensimetriche a profondità diverse. La tubazione inclinometrica dovrà essere in ABS (acrilonitrile butadiene stirene) o altro materiale non metallico al fine di evitare interferenze con il campo magnetico generato dall'anello;

- infine, una terza tipologia di assestometro è realizzata alternando tratti con tubi inclinometrici a sezione più grande e più piccola. Gli spezzoni di minor diametro, inseriti in quelli a maggior diametro, devono poter scorrere all'interno di questi ultimi, seguendo così i movimenti del terreno. Il limite di questa tipologia di installazione è l'assenza di sistemi di ancoraggio: il cedimento si trasmette solo dall'attrito generato lungo la parete della tubazione; non è escluso quindi che sia misurata solo una parte della componente totale del movimento. Le misure sono eseguite manualmente mediante una sonda con alette sporgenti rientranti (per le modalità di esecuzione si faccia riferimento al relativo capitolo 4).

Di seguito si descrivono sinteticamente le diverse tipologie di strumentazione utilizzata e le loro caratteristiche:

- sonda assestimetica manuale magnetica: lo strumento è costituito da un puntale e un cavo centimetrato avvolto su rullo. Quando il puntale dello strumento intercetta l'anello superficiale, il campo magnetico chiude il circuito e viene rilevata la profondità rispetto al punto fisso posizionato in testa al foro (quest'ultima dovrà essere possibilmente controllata periodicamente con rilievo topografico). Caratteristiche tecniche: lunghezza cavo maggiore di 50 m, accuratezza 10 mm o migliore, tacche di misura con serigrafia protetta. Alimentazione a batteria, segnalatore acustico e visivo;
- sonda incrementale manuale con trasduttore di posizione: l'estensimetro incrementale sfrutta il principio della magnetostirazione per rilevare la distanza tra 2 anelli successivi. Essendo un sistema incrementale, gli spostamenti totali sono ottenuti attraverso la somma di vari incrementi, ciascuno dei quali rappresenta una variazione di distanza di due successivi punti di riferimento rispetto alla misura iniziale – o di zero. Lo strumento è costituito da un corpo cilindrico in acciaio inox con carrelli dotati di ruote di scorrimento da inserire nelle gole della colonna inclinometrica. La sonda monta, a distanza nota (50 o 100 cm), due sensori magnetici in grado di determinare la posizione di punti di riferimento (anelli magnetici). Il sensore posto più in basso nella sonda misura la distanza tra il sensore stesso e l'anello magnetico di riferimento (anello in basso). Il sensore posto più in alto nella sonda misura la distanza tra il sensore stesso e l'anello magnetico di misura (anello in alto). Lo strumento misura lo spostamento relativo tra due anelli consecutivi $D = B - A$. Se due anelli consecutivi si avvicinano tra loro, la distanza D decresce e viceversa. Caratteristiche tecniche: cavo con tacche ogni metro, datalogger (se necessario) alimentato a batteria (autonomia di almeno 5 ore di lavoro), cavo con uscita USB per scarico dati, carrucola di posizionamento e aste di spinta, software per l'elaborazione dei dati, carrelli sonda rompibili a strappo, distanza tra sensori 1000 mm, campo di misura di 40 mm o maggiore, risoluzione della misura 0,01 mm, ripetibilità minore di 0,01 mm, temperatura di esercizio sonda/datalogger/cavo $-20^{\circ}/+50^{\circ}\text{C}$;
- sonda incrementale fissa: principio di funzionamento uguale alle sonde incrementali manuali. Caratteristiche tecniche: cavo di alimentazione inestensibile, cavo di sospensione (se il riferimento è la testa foro) o ancoraggio a fondo foro, testa di protezione. Campo di misura di

40 mm o maggiore, risoluzione della misura 0,01 mm, ripetibilità minore di 0,01 mm, temperatura di esercizio sonda/datalogger/cavo -20°/+50°C;

- sonda estenso-inclinometrica (fissa): cavo di alimentazione inestensibile, cavo di sospensione, testa di protezione. Caratteristiche trasduttore di posizione per la misura dei cedimenti: campo di misura di 40 mm o maggiore, ripetibilità minore di 0,01 mm. Caratteristiche sensore inclinometrico: sensore biassiale, campo di misura di $\pm 15^\circ$ o maggiore, risoluzione 0,01°. Temperatura di esercizio: -20°/+50°C.

Installazione

Le misure assestometriche sono eseguite in fori dedicati dotati di anelli o piastre magnetiche.

La prima tipologia è costituita da una coppia di tubi coassiali inseriti in una verticale: un tubo guida interno entro al quale sarà inserita la sonda manuale di misura, e un corrugato flessibile esterno – solitamente in PVC – per assorbire gli attriti del terreno. Gli spezzoni dei tubi da installare a fondo foro sono collegati a una “puntazza” metallica di appoggio; seguirà quindi il montaggio completo degli altri spezzoni di doppio tubo fino alla superficie. Per le procedure operative si faccia riferimento ad ANISIG (http://www.anisig.it/index.php?p=specifiche_tecniche).

Al termine di ogni installazione sarà fornita monografia dell'installazione.

Le colonne assestometriche incrementali sono costituite da tubi inclinometrici in ABS o altro materiale, comunque, non metallico ai quali sono fissati anelli o piastre magnetiche. ANISIG raccomanda di porre molta attenzione durante le fasi di installazione di queste colonne, poiché da queste dipende la possibilità di interpretare correttamente i dati numerici desunti dalle letture, sempre che queste siano rese possibili dalla adeguata installazione degli anelli di riferimento che solitamente sono posizionati con un passo di 1000 mm ± 1 mm.

Come per l'installazione di tubazioni inclinometriche, durante la posa dovrà essere evitato di causare

ammaccature e di indurre torsioni alla tubazione che potrebbero generare fastidiosi effetti di spirallatura. Al termine della posa degli spezzoni, dovrà essere eseguita una corretta cementazione con miscela adeguata alle caratteristiche dei terreni circostanti per tutta la lunghezza del foro.

Per le procedure operative si faccia riferimento ad ANISIG per l'installazione di tubazioni estenso-inclinometrici (vedi link precedente).

Al termine di ogni installazione sarà fornita monografia dell'installazione con riportate coordinate geografiche, profondità del tubo, profondità degli anelli di riferimento, diametro interno ed esterno della tubazione, caratteristiche degli anelli di riferimento (materiale, dimensioni, ecc.), composizione del materiale di riempimento, lunghezza dello spezzone iniziale e/o finale, lunghezza degli spezzoni intermedi, foto dell'area. Qualora fosse prevista l'installazione di strumentazione automatica fissa, la scheda di installazione riporterà la marca/modello dello strumento, il *serial number*, la data di installazione, la tipologia dello strumento, la profondità di posa, le caratteristiche proprie dello strumento (lunghezza, tipologia sensori, campo di misura, ecc.) e il certificato di taratura.

A.4.8 Tubi piezometrici

I piezometri sono costituiti da spezzoni di tubo in PVC rigido, di diametro variabile, fessurati e rivestiti di geotessile non tessuto. I tratti fessurati e quelli ciechi saranno confermati dal progettista a seguito dell'effettiva stratigrafia riscontrata. Sulla base degli obiettivi di monitoraggio prefissati, si deve prevedere la configurazione che riguarda la profondità, l'estensione del tratto filtrante e soprattutto il diametro del tubo che va progettato in base all'eventualità di inserimento di sonde automatiche in foro.

Di seguito alcuni punti da tenere in considerazione (Figura A.40):

- il diametro minimo dei tubi piezometrici non dovrà essere inferiore a 2" (50 mm) per consentire l'agevole effettuazione delle misure e nel caso di prelievi con l'utilizzo di campionatori o sonde

multiparametriche almeno 3" (75mm);

- una volta eseguita la pulizia di fondo foro, si inserisce la colonna di tubi piezometrici fino a fondo foro; quindi, si procede all'immissione nell'intercapedine colonna-tubazione di materiale granulare opportunamente prescelto (sabbia o sabbia-ghiaietto siliceo, φ max = 0,5 cm) in modo da realizzare un filtro poroso attorno al tratto di colonna fenestrato. Tale operazione va eseguita ritirando la tubazione provvisoria a mano a mano che si procede con l'immissione dall'alto del materiale filtrante, curando di controllare la quota di questo con idonei sistemi di misura (cordelle metriche, ecc.). Il bordo inferiore della tubazione dovrà sempre trovarsi al di sotto della quota raggiunta dal materiale di riempimento;
- la giunzione dei tubi di assemblaggio del piezometro deve essere realizzata evitando di forzare l'avvitamento dei manicotti filettati e di torcere le estremità dei tubi, per garantire il passaggio degli strumenti di campionamento e di lettura dei livelli piezometrici;
- i tubi devono essere posti in opera entro un foro sempre interamente rivestito con la tubazione di rivestimento provvisoria;
- la tubazione fino ad una profondità tale da consentire la successiva posa in opera del pozzetto di protezione, dovrà essere riempito a partire dal basso con miscela cemento-bentonite-acqua;
- il tubo piezometrico sarà chiuso inferiormente mediante fondello cieco a tenuta;
- i tubi piezometrici saranno chiusi con tappi a vite a tenuta;
- sul coperchio del chiusino dovrà essere apposta una targhetta riportante la quota assoluta di bocca pozzo espressa in metri s.l.m. con precisione centimetrica e il numero identificativo del tubo piezometrico;
- saranno realizzate idonee protezioni di superficie subito dopo la posa in opera degli stessi, consistenti in un tubo coassiale in metallo (chiusino) ammorsato per circa 1 m nel terreno e dotato, ove richiesto, di chiusura a lucchetto; i tubi piezometrici ubicati in zone non interessate dal passaggio di automezzi, e ove consentito dalle condizioni logistiche, dovranno fuoriuscire di circa 0,5 m dal p.c.;
- in caso di aree che richiedono la terminazione "a raso", dovrà essere realizzato un pozzetto carrabile che potrà essere prefabbricato in calcestruzzo di dimensioni minime 40x40x40 cm, fornito di drenaggio sul fondo per evitare che le acque ruscellanti di superficie possano riempire il pozzetto (Figura A.41);
- ad esecuzione ultimata, si procederà con lo spurgo e il collaudo del piezometro con la determinazione della prima lettura significativa a seguito dell'esecuzione di una serie di almeno tre letture, la prima delle quali deve avvenire a non meno di 2 ore dalla realizzazione del piezometro e le successive a distanza di 24 ore l'una dall'altra.

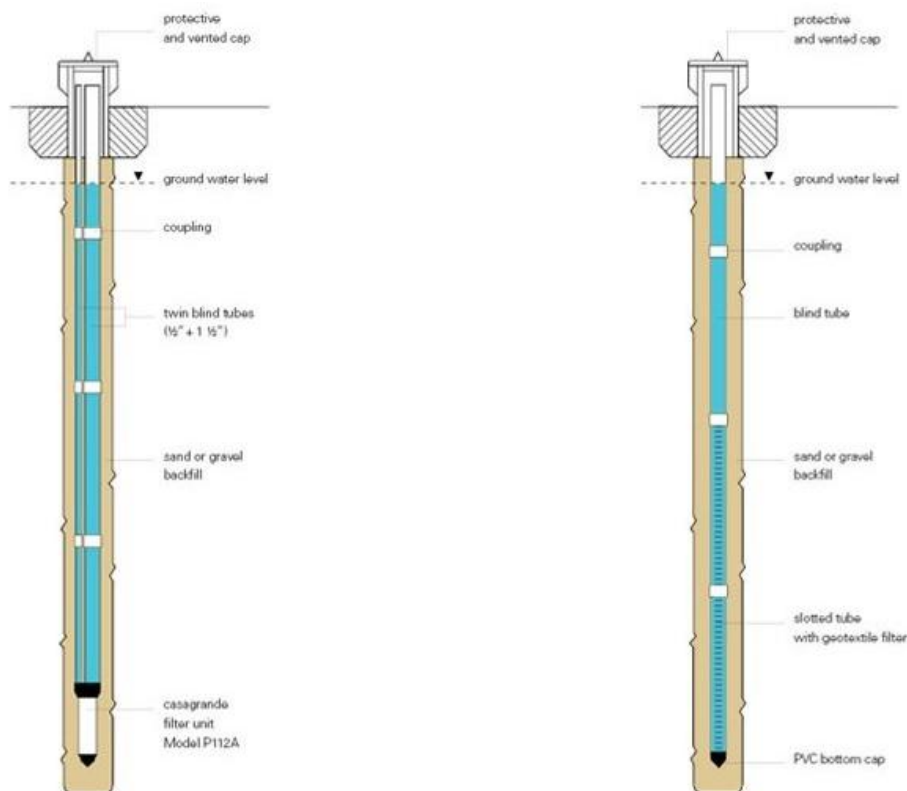


Figura A.40 - Piezometro tipo Casagrande e piezometro aperto. Fonte: manuali SISGEO



Figura A.41 - Pozzetto di protezione carrabile per testa di tubo piezometrico. Fonte: archivio ARPAL

Come per i pozzetti inclinometrici, un elemento essenziale per l'utilizzo delle informazioni che verranno raccolte tramite le misure eseguite sul piezometro è la georeferenziazione dei pozzetti o chiusini o capitelli di protezione riposti a protezione dei tubi piezometrici.

A.4.9 Freatimetro

I freatimetri, o sonde per misure di livello, sono gli strumenti di lettura dei piezometri a tubo aperto e tipo Casagrande a doppio tubo. In tali strumenti l'acqua di falda fluisce attraverso un filtro e risale entro i tubi sino alla quota di equilibrio idraulico pari al livello

piezometrico. Le sonde misurano la quota di tale livello rispetto alla testa dei tubi in superficie (Figura A.42).

Il freatimetro si compone di un cavo elettrico non estensibile marcato con un incremento graduale in cm, montato su un rullo porta-cavo in materiale plastico, munito di maniglia per il trasporto, una manopola per l'avvolgimento del cavo ed una vite di bloccaggio del tamburo; su un lato trovano l'alloggiamento una pila di alimentazione ed un circuito elettronico con suoneria e un led luminoso. Il sensore (puntale) posto all'estremità del cavo, funziona come un interruttore che attiva un allarme sonoro e luminoso quando viene a contatto con acqua; è costituito da un cilindretto isolante in PVC rigido, a protezione di una punta in acciaio inossidabile collegata ad uno dei due conduttori, e un cilindretto in acciaio inossidabile collegato all'altro conduttore.

La misura della profondità della falda si esegue calando la sonda nel piezometro fino a che la segnalazione acustica e luminosa si attiva. Le tacche (centimtrate) sono stampate con una serigrafia protetta che ne rende impossibile la cancellazione e che garantisce una maggiore robustezza del sensore e del cavo del freatimetro.

La sonda elettrica è uno strumento affidabile e non necessita di molta manutenzione se non la sostituzione delle batterie quando scariche; per avere una misura in metri s.l.m. sarà necessario avere le coordinate topografiche della testa del foro in modo da poter ricavare il dato cercato.

Sono strumenti di semplice utilizzo e di immediato riscontro numerico e questo, oltre alla elevata ripetibilità, li rende fra i più utilizzati strumenti nelle misure di falda sia per lavori di breve che di lunga durata. Il limite principale consiste nella bassa frequenza delle misure con l'ovvia impossibilità di rapportarle con dati pluviometrici e misure inclinometriche.



Figura A.42 - Sonda freatimetrica manuale per il rilievo della soggiacenza della falda. Fonte: archivio ARPAL

A.4.10 Sensori freatimetrici fissi nei piezometri

I sensori di rilevamento automatico della falda si sono evoluti nel tempo in vere e proprie sonde multiparametriche costituendo una gamma di strumenti estremamente variegata.

Alla normale misura del livello della colonna d'acqua, può essere aggiunta quella della temperatura tramite l'integrazione di un sensore miniaturizzato nel corpo metallico del piezometro oppure l'inserimento di altri sensori potenzialmente interessanti per lo studio che si vuole intraprendere come il potenziale Redox (Eh), l'ossigeno disciolto, ecc.

Il misuratore di livello di tipo piezometrico è caratterizzato da:

- vasta gamma di campi di misura;
- semplicità di installazione;
- precisione ed affidabilità;
- elevata risoluzione, ripetibilità e sensibilità;
- lettura diretta del dato;
- adattabilità alle diverse esigenze di installazione;
- leggibile con strumenti di misura standard per uscite 4-20 mA (sensori piezoresistivi), corda vibrante, ecc.;
- basso costo;

- lunga vita in normali condizioni di lavoro;
- possibilità di trasmettere i dati in remoto.

La misura del livello avviene mediante la determinazione del carico idrostatico, ovvero del battente di acqua, agente sulla membrana del sensore piezometrico.

La misura del sensore viene rilevata come differenza tra la pressione dovuta alla colonna d'acqua (peso) e la pressione atmosferica, e trasformata in un segnale elettrico in corrente.

Il segnale in uscita viene trasmesso via cavo ad una unità di lettura locale, manuale o automatica e da qui, se automatica, trasmesso a centri di controllo remoti.

Come per tutte le attività che coinvolgono l'installazione di sonde fisse, si ritiene necessario, prima dell'inserimento della sonda automatica nel piezometro, ottenere informazioni circa la soggiacenza della falda di versante e la sua escursione massima e minima. Infatti, trattandosi di misuratori di livello in contesti di versante, l'oscillazione tra un livello minimo e massimo può assumere valori importanti anche dell'ordine delle decine di metri con il rischio di perdere una notevole mole di dati qualora il trasduttore dovesse trovarsi ad una quota superiore al livello di falda per un dato periodo. Risulta fondamentale, quindi, prima dell'installazione, aver condotto una campagna di misure manuali con il freatimetro per individuare correttamente la posizione di installazione che per sicurezza si considera a qualche metro dal fondo del piezometro in funzione della lunghezza della stessa tubazione piezometrica. Può accadere che si inseriscano nella rete di monitoraggio piezometri installati a profondità non molto elevate con il rischio di non avere sufficiente battente d'acqua per il trasduttore, e pertanto in questi casi si deve avvicinare il più possibile la sonda al fondo del foro, senza superare i 50 cm.

Dopo l'inserimento della sonda in profondità si deve decidere la cadenza di registrazione dei dati. Si possono ottenere frequenze orarie o giornaliere, sempre in funzione dello scopo che ci si vuole

prefiggere: l'esatta progettazione della frequenza sarà definita dal progettista (Figura A.43).

Nel caso di scarico dati in situ bisogna avere l'accortezza di misurare sempre la falda con il freatimetro manuale prima di scaricare i dati e collegarsi con il pc: in questo modo si ha la sicurezza che i dati registrati siano corretti e non abbiano subito errori dovuti ad una staratura della sonda automatica.



Figura A.43 - Installazione nel piezometro di sonda freatimetrica automatica. Fonte: archivio ARPAL

A.4.11 Tensimetri

Il tensiometro nella sua versione tradizionale è costituito da un tubo di plastica trasparente del diametro di 2,5 cm, costituito da spezzoni di tubo filettati, avvitabili l'uno sull'altro fino ad una lunghezza di 1,5 m e più, da riempire con acqua distillata immediatamente dopo l'installazione; all'estremità inferiore è avvitata una capsula ceramica (Figura A.44).



Figura A.44 - Tensiometro a tubo, dotato di vacuometro e capsula ceramica

Oltre alla versione a tubo, appena descritta, esistono molte versioni di sensori per la misura della suzione, basati su vari principi di funzionamento, fra cui i sensori termici (FTC). Si tratta di trasduttori contenuti in una carcassa metallica dotata alla punta di una capsula ceramica per l'ingresso dell'acqua, da installare all'interno del terreno. Essi sono collegati mediante un cavo alla superficie del terreno dove è installato il data logger.

Il tensiometro a tubo può eseguire misure in un campo limitato di suzione (fino a 80 kPa). I trasduttori descritti (fra cui sono compresi i FTC *sensors*) possono invece avere un fondo scala variabile da 100 a 500 kPa, a seconda del modello e del principio di funzionamento e operare correttamente fino a temperature di 35°-40° con un'accuratezza variabile da 0,15 a 0,50 kPa.

Installazione

Affinché la misura di suzione sia affidabile, è necessario che la capsula ceramica sia a perfetto contatto col terreno indisturbato. Ciò premesso il tensiometro non può essere installato all'interno di un foro di sondaggio; piuttosto deve essere accuratamente posizionato in un foro eseguito ad hoc, manualmente, mediante un'asta metallica cava con bordo tagliente, dello stesso diametro del tubo tensiometrico.

Per favorire la penetrazione dell'asta cava conviene eseguire l'installazione in un periodo in cui il terreno è molto umido (oppure il sito deve essere bagnato preventivamente).

La tecnica di installazione limita la profondità raggiungibile a 1-2 m.

In genere il piano di monitoraggio prevede che siano installati vari tensiometri a profondità diverse, per ricostruire la propagazione del fronte umido nel terreno, a seguito di eventi di pioggia.

Benché l'installazione orizzontale non sia esclusa è largamente preferibile installare il tensiometro verticalmente.

In aree montane, dove la temperatura scende al di sotto di 0°C, il vacuometro del tensiometro a tubo viene in genere irrimediabilmente danneggiato dal gelo o dal ghiaccio. Per ovviare a questo problema si può rinunciare ad installare il vacuometro e sostituire il tappo superiore rigido che occlude il tubo con una membrana di silicone, attraversabile dall'ago ipodermico di una particolare centralina di misura (tensimetro), che di fatto è un trasduttore di pressione portatile, dotato di display (Figura A.45). È ovvio che in questo caso la misura è necessariamente manuale.

In zone remote, i tubi sono spesso preda di animali vaganti. In questi casi è necessario provvedere ad una opportuna protezione della parte di strumentazione che fuoriesce dal terreno, ad esempio coprendola con un tubo chiuso di pvc imbottito di lana vetro, rimovibile per le misure e la manutenzione.



Figura A.45 - Tensimetro ad ago

A.5 STRUMENTAZIONE METEO-PLUVIOMETRICA

In questa sezione verrà sinteticamente descritta la sensoristica che non restituisce un dato immediatamente interpretabile come movimento della frana quanto piuttosto dati, di natura meteoroclimatica, che in aggiunta e correlati a quelli di spostamento permettono di meglio interpretare il modello cinematico della frana. Ovviamente i dati meteo sono utili anche per “validare” immediatamente quelli di movimento provenienti dagli strumenti superficiali o profondi posti in frana. Considerata la natura della sensoristica in oggetto è possibile fare riferimento, relativamente ad informazioni più di dettaglio su modalità di installazione e caratteristiche, alle norme WMO (*World Meteorological Organization*) ed alle “Linee guida per il controllo di validità dei dati idro-meteorologici” (Linee Guida SNPA n. 2/2017).

A.5.1 Pluviometri

Il pluviometro è uno strumento finalizzato alla misura della quantità di precipitazione caduta su una superficie

di riferimento. Il modello più comune ed utilizzato (Figura A.46) è costituito da un cilindro e imbuto raccogliatore, con bocca di raccolta per la quantità di pioggia avente superficie di $0,1 \text{ m}^2$ (per cui ogni millimetro di pioggia raccolta corrisponde ad un volume di 1 litro al m^2), che convoglia la quantità d'acqua raccolta in una bascula posizionata alla base del cilindro (Figura A.47).

La misura della quantità di pioggia viene effettuata per mezzo di questa bascula a doppia vaschetta. Un magnete solidale al sistema oscillante produce la chiusura di un contatto generando un impulso che può essere trasformato in un segnale elettrico. Lo strumento deve essere dotato di bolla sferica e di viti elevatrici sul supporto per una corretta installazione.

Nel caso si debba installare un pluviometro in aree dove è cospicuo l'apporto di precipitazioni solide e si disponga di alimentazione elettrica adeguata è possibile utilizzare pluviometri riscaldati. Si tratta di sensori analoghi ai precedenti ma dotati di un sistema di riscaldamento, nel cilindro di raccolta, che permette di fondere la neve trasformandola in acqua immediatamente misurabile con la bascula del pluviometro.

La risoluzione dello strumento è ovviamente determinata dalle dimensioni della bascula che deve avere una capacità equivalente di norma di $0,1$ o $0,2 \text{ mm}$ di pioggia ($0,2 \text{ mm}$ nei modelli meno recenti), in riferimento all'altezza che avrebbe il volume di acqua corrispondente se rapportato ad una superficie piana estesa come la bocca del pluviometro.

La frequenza di acquisizione del dato (da 1 ogni minuto ad 1 all'ora) varia in funzione delle necessità che ci si prefigge e dalla necessità di misurare anche l'intensità di precipitazione (mm/h), oltre all'accumulo su periodi più o meno lunghi, dal giorno al mese o all'anno (mm).

Generalmente campionamenti e trasmissioni al minuto sono presi in considerazione solo per lo studio di fenomeni di colate rapide mentre per altre tipologie di frana è possibile utilizzare frequenze meno intense (10-30 minuti).

Per quanto riguarda la misura delle precipitazioni su base giornaliera, per accumuli superiori ai 5 mm

l'incertezza deve essere minore del 2%, anche se nella pratica operativa in campo valori del 5% sono ritenuti accettabili.

In relazione invece all'intensità di precipitazioni, l'incertezza richiesta è di 0,1 mm nel range tra 0,1 e 2 mm/h, del 5% per valori maggiori di 2 mm/h, del 2% per valori maggiori di 10 mm/h.

Fondamentale per il buon funzionamento sono periodiche calibrazioni, una costante manutenzione ed in particolare una pulizia del filtro posto al passaggio fra il cilindro e la bascula.



Figura A.46 - Esempio di Pluviometro. Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia



Figura A.47 – Bascula. Fonte: Barbi et alii, 2013

Installazione

Il posizionamento del pluviometro è fondamentale per raggiungere un buon risultato della misura. Nel caso del monitoraggio dei corpi franosi, deve essere ubicato in posizione significativa per lo studio della frana ben sapendo che sui versanti o in aree ad orografia complessa spostamenti anche di poche centinaia di metri determinano risultati spesso fortemente differenti.

Pertanto, la localizzazione di massima deve tenere conto della presumibile variabilità delle piogge dovuta alla topografia e all'esposizione rispetto alle correnti dominanti della zona in caso di eventi perturbati.

Una volta individuata l'area di interesse, il pluviometro deve essere installato in un punto sufficientemente distante da ostacoli (quali alberi manufatti, costruzioni ecc.) che possano ridurre o modificare la misura del quantitativo di precipitazione, soprattutto in occasione di precipitazioni trasversali. Dato che, oltre alla riduzione del volume di captazione introdotta dagli ostacoli, la sorgente maggiore di errore è il disturbo aerodinamico dovuto al vento, l'installazione ideale può essere di due tipi: in una radura circondata su tutti i lati da "ostacoli" (cioè oggetti di ampiezza angolare sul piano orizzontale maggiore di 10°) di altezza il più possibile uniforme, oppure su terreno privo di ostacoli ma dotato di schermo artificiale per il vento. Nel primo caso i requisiti relativi al corretto posizionamento sono espressi in termini di angoli verticali sottesi dagli ostacoli rispetto

alla bocca del pluviometro (possibilmente compresi tra 14 e 26°); in presenza, invece, di oggetti di altezza variabile, il criterio pratico da seguire è che la distanza da ciascun ostacolo deve essere almeno 2 volte l'altezza dell'ostacolo stesso (quindi, ad es., almeno 20 metri per un albero alto 10 metri). Il pendio non dovrebbe essere troppo ripido (pendenza inferiore a 19°): nel caso ciò non sia possibile per motivi legati al monitoraggio della specifica frana, è opportuno tenerne conto nella interpretazione ed elaborazione successiva dei dati. Più in generale, quando un requisito di posizionamento non viene soddisfatto, o lo è solo parzialmente, la misura è comunque utile previa valutazione dell'incertezza correlata (*Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation – WMO N.8*)

Un altro motivo per cui vanno evitate zone troppo ventose è perché le raffiche possono provocare vibrazioni alla strumentazione, determinando così una sopravvalutazione della misura di pioggia. Proprio a tal fine è sempre consigliabile utilizzare un palo di diametro adeguato con relativo plinto oppure procedere alla stabilizzazione del palo, che supporta il pluviometro, posizionando almeno tre tiranti ancorati a terra.

In ogni caso il palo che sostiene il pluviometro deve essere posizionato su una base stabile. In assenza di roccia affiorante o grandi blocchi cui ancorarsi è consigliabile realizzare un plinto in cemento dove viene affogata una dima con quattro prigionieri alla quale viene ancorata la base del palo che sostiene il pluviometro.

La bocca del pluviometro deve essere posizionata orizzontalmente al terreno, ad un'altezza che minimizzi la possibilità di immissione fortuita di liquidi o solidi. È consigliabile un valore di circa 1,5 metri dal suolo, oppure superiore, in base alla stima dell'altezza massima del manto nevoso prevista in inverno.

A.5.2 Termometri

Il termometro è un sensore tra i più comuni ed economici; esso è ovviamente finalizzato alla misurazione della temperatura dell'aria ed alla relativa escursione termica giornaliera sull'area della frana. Si

tratta per lo più di un termistore lineare o di una termoresistenza Pt 100 che, sfruttando i cambiamenti di conduttività del metallo, in funzione dell'aumento o della diminuzione della temperatura, è in grado di registrare anche i più piccoli cambiamenti di temperatura.

La misura viene effettuata ogni pochi secondi e poi i dati così raccolti vengono mediati per avere un'informazione di temperatura rappresentativa di 1 minuto, anche se per certe applicazioni l'intervallo di aggregazione per il dato "istantaneo" può arrivare fino a 10 minuti.

È importante per un buon funzionamento della misura che il sensore sia riparato dall'effetto diretto dell'irraggiamento solare da una apposita struttura ad alette (solitamente formata da schermi circolari sovrapposti) di colore bianco e che permetta la ventilazione interna (Figura A.48).



Figura A.48 - Esempio di termometro aria protetto all'interno di capannina antiradiante. Valdisotto (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Lo strumento dovrà avere un campo di misura piuttosto ampio (es. da -30° a $+60^{\circ}\text{C}$) e una risoluzione del decimo di grado.

Per quanto riguarda l'accuratezza, l'incertezza richiesta per lo strumento è di $0,1^{\circ}\text{C}$ tra -40 e $+40^{\circ}\text{C}$ (in campo: di $0,2^{\circ}\text{C}$); comunque, per l'applicazione in esame è importante che, in occasione di misure che si aggirano attorno allo 0°C , non vi siano errori superiori a $0,5^{\circ}\text{C}$.

Installazione

La localizzazione di massima deve tener conto degli effetti termici legati all'esposizione del versante e all'altitudine: la scelta della zona di misura rispetto alla frana potrebbe produrre informazioni rappresentative solo di una parte della superficie del corpo franoso. Pertanto, si può decidere di installare più termometri in diverse posizioni, oppure di stimare il valore della temperatura in altri punti di interesse, correggendo il valore ottenuto dall'unico termometro disponibile.

Per quanto riguarda invece il posizionamento di dettaglio, secondo gli standard WMO, un termometro deve essere posizionato a 1,5 - 2 metri dal suolo al di sopra di una superficie con erba non troppo alta (meno di 25 cm, idealmente meno di 10 cm).

È fondamentale l'altezza minima del posizionamento in quanto una eccessiva vicinanza al suolo (mai inferiore a 1,25 metri) potrebbe essere influenzata dal calore emesso o riflesso dalla terra come è parimenti importante che il sensore sia disposto al di sopra di una superficie dove, in un intorno di almeno 10 metri, non siano presenti materiali che tendono a riscaldarsi eccessivamente (es. asfalto, catrame). Analogamente non devono essere vicini oggetti che alterino il bilancio radiativo dello schermo (ad esempio mattoni, strutture di metallo, rocce); per lo stesso motivo il sensore non deve essere direttamente influenzato dalla vicina presenza di acqua (pozze, ruscelli, abbeveratoi, ecc.).

Lo strumento deve poter essere illuminato direttamente dal sole, senza ombre dovute ad oggetti quando l'altezza del medesimo è maggiore di 7° sull'orizzonte (non è da considerare invece l'ombreggiamento dovuto all'orografia, perché rappresentativo della temperatura

del sito); infine, non ci devono essere ostacoli che impediscano la libera circolazione dell'aria.

Generalmente il termometro viene installato, mediante un braccio di sostegno, al palo del pluviometro o a quello della stazione di trasmissione.

A.5.3 Nivometri

Il sensore nivometrico è finalizzato a misurare l'altezza al suolo del manto nevoso. Lo strumento è posto ad una altezza congrua rispetto allo spessore al suolo della neve attesa in quella specifica area; il sensore, dopo essere stato calibrato su questo livello (detto altezza di zero), è in grado di rilevare lo spessore di tutto ciò che si frappone all'interno del suo cono di misura (avente ampiezza 30°) calcolate per differenza con l'altezza di zero.

La misura si basa sul tempo che un impulso ultrasonico impiega a coprire la distanza esistente tra l'apparato di misura e la superficie del manto nevoso che riflette il segnale. Il tempo di percorrenza dell'impulso viene ovviamente compensato in base alla temperatura dell'aria.

Il sensore si caratterizza per una distanza minima e massima alla quale è in grado di effettuare con la precisione voluta la misura. Se l'altezza minima, generalmente qualche decina di cm, è trascurabile, più importante è l'altezza massima che dovrà essere scelta in funzione dell'altezza attesa del manto nevoso e quindi, in ultima analisi, in funzione dell'area in cui verrà collocato il sensore. Generalmente si tende ad acquistare nivometri con distanza massima sensore/superficie riflettente di almeno 4 metri.

Per l'attività che ci si prefigge con queste linee guida, precisione e risoluzione della misura possono anche non essere estremamente spinte (adeguate di alcuni mm) in quanto la misura è fortemente condizionata da condizioni ambientali (vento e temperatura su tutti) che possono far variare molto rapidamente lo spessore della neve.

L'accuratezza è consigliabile che sia inferiore all'1% del valore letto.

L'intervallo di operatività è funzione dell'area ma è ovviamente importante che sia garantito un adeguato margine alle basse temperature.

L'acquisizione della misura è istantanea e, per gli scopi che ci si prefigge, è sufficiente acquisire misure ogni 30 minuti od ogni ora.



Figura A.49 - Esempio di nivometro. Valdisotto (SO). Fonte: archivio CMG Arpa Lombardia

Installazione

Il nivometro viene ancorato al palo di sospensione mediante un braccio metallico sufficientemente lungo da evitare interferenze fra il palo ed il cono di misura (Figura A.49).

La superficie sottostante, bersaglio degli ultrasuoni, deve essere omogeneamente pianeggiante.

E' importante, vista l'azione di erosione o riporto sul manto nevoso svolta dal vento, che l'area prescelta per l'installazione del sensore sia significativa per la valutazione della copertura nevosa sull'area della frana o sul suo immediato intorno.

A.5.4 Anemometri

Gli strumenti di misura possono essere di due tipi: 1) il gonioanemometro tradizionale dotato di coppette rotanti e misuratore meccanico della direzione; 2) l'anemometro ultrasonico dotato di tre coppie di sensori ortogonali.

Il primo strumento si presta di più alle installazioni destinate a durare anni (cioè per scopi climatologici), ma ha il limite di misurare solo la componente orizzontale del vento e di essere poco adatto a misurare la turbolenza.

Il secondo strumento, invece, è in grado di fare misure tridimensionali di vento con risoluzioni temporali elevate. Si tratta, dunque, di uno strumento che si presta meglio a raccogliere delle misure all'interno dello strato limite superficiale, sia per rilevare le normali forzanti meccaniche laminari sia per stimare altre caratteristiche dello stato limite come la turbolenza meccanica, i flussi di calore o l'evaporazione.

Un'ulteriore problematica da considerare nella scelta dello strumento è che gli anemometri ultrasonici generalmente producono una quantità di dati superiore di alcuni ordini di grandezza rispetto ai gonioanemometri classici. Pertanto, l'eventuale scelta di questo strumento richiede una più attenta valutazione del software che dovrà gestire i dati e un corretto dimensionamento dello spazio di archiviazione qualora si intenda raccogliere le misure per periodi molto lunghi.

Installazione

Per l'installazione degli anemometri è utile avvicinarsi quanto possibile alle prescrizioni dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia che richiede che ogni ostacolo sia distante da un anemometro almeno 10 volte l'altezza dell'ostacolo stesso (ad esempio un albero alto 3 m deve stare ad almeno 30 m dall'anemometro). Come ulteriore suggerimento, si dovrebbero evitare le cime delle alture, perché in quelle situazioni la legge della conservazione del flusso produce un'accelerazione del vento che, quindi, rischia di essere sovrastimato rispetto alla situazione generale.

Attenzione, infine, dovrebbe essere posta al terreno su cui si installa l'anemometro stesso. Considerata, infatti, l'instabilità intrinseca di una frana, sono sicuramente preferibili punti d'installazione posti immediatamente fuori dall'area di frana, per evitare che il movimento del terreno inclini o danneggi l'anemometro.

L'improvvisa inclinazione di un anemometro dovuta a un cedimento del terreno è fonte di errori di misura particolarmente insidiosi, perché non sempre sono rilevabili dall'esame dei dati. Un anemometro inclinato ma non danneggiato, infatti, continua a registrare dei dati apparentemente corretti che si rivelano essere sbagliati solo quando si compie un sopralluogo all'anemometro.

A.6 STRUMENTAZIONE PER L'ACQUISIZIONE E TRASMISSIONE DATI

A.6.1 Data Logger

I datalogger costituiscono l'interfaccia che permette la trasformazione dei segnali elettrici che giungono dai diversi sensori di monitoraggio installati sul campo e gli apparati di trasmissione. I segnali elettrici provenienti dalla strumentazione sono digitalizzati, generalmente memorizzati localmente e successivamente inviati, tramite diversi protocolli di comunicazione (tipicamente GSM/GPRS/UMTS, WLAN, ponti radio, ecc.) con specifico protocollo, ai server (anche FTP per il deposito temporaneo dei file) presenti presso il centro di monitoraggio. Con opportune configurazioni, può anche essere conveniente utilizzare servizi inversi di chiamata diretta dagli apparati di comunicazione verso i modem installati in sito (RAS, tra le varie). Questa seconda modalità ha il vantaggio di ottimizzare il risparmio energetico, andando, ad esempio, a pianificare lo scarico dei dati nel momento in cui i pannelli fotovoltaici ricevono il massimo della radiazione solare.

Nel momento in cui occorre predisporre la fornitura di nuove centraline di acquisizione, bisogna tenere in considerazione il numero di canali (analogici e digitali) che dovranno essere utilizzati. Anche se la fornitura fa parte integrante di una determinata installazione, legata quindi ad una strumentazione specifica di un produttore

ben identificato, si suggerisce di prevedere, laddove fattibile, la possibilità di verificare caratteristiche di scalabilità del sistema, in modo da rendere l'installazione modulare e facilmente espandibile.

È altresì opportuno che i datalogger, soprattutto se facenti parte di una nuova fornitura specifica, debbano essere di un'unica tipologia, ovvero posseggano apparati interni di uguale fattura nel caso in cui siano brandizzati dal produttore del sensore. Nonostante sia preferibile separare fisicamente i sistemi di acquisizione da quelli di trasmissione, esistono sul mercato valide soluzioni *"all-in-one"*, che integrano anche un proprio sistema operativo, solitamente *user – friendly*. Nel caso in cui i sistemi di acquisizione e trasmissione siano separati, il datalogger dovrà possedere indicativamente le seguenti porte di comunicazione:

- RS-232;
- RS-485;
- Ethernet;
- USB;
- CS I/O.

L'elenco di porte di cui sopra può essere ridotto nel caso in cui non occorra prevedere una espandibilità futura dell'installazione.

La memoria del datalogger dovrà garantire una capacità di archiviazione dei dati non inferiore a trenta giorni a seconda della strumentazione collegata e dalla frequenza di acquisizione dei dati. Il datalogger dovrà prevedere l'espandibilità della memoria mediante l'utilizzo di schede esterne (preferibilmente microSD, per la facilità di reperimento sul mercato, in luogo delle SD), aventi dimensione di almeno 4 GB (preferibile 16 GB). Il datalogger dovrà assicurare il totale funzionamento e la memorizzazione dei dati in un *range* di temperature compreso tra almeno -25°C e $+50^{\circ}\text{C}$, variabile a seconda delle condizioni ambientali in cui dovrà operare. Se ad esempio si deve operare in zone di alta quota, sarà doveroso prevedere di estendere il *range* inferiore fino a ricomprendere le temperature minime che si prevede possano essere raggiunte.

In definitiva, i datalogger devono possedere le seguenti caratteristiche tecniche minime:

- connessione diretta ai sensori con uscita in resistenza, tensione, corrente, frequenza, digitale senza la necessità di modifiche o integrazioni hardware, ad esclusione di eventuali resistenze di controllo; queste dovranno assicurare una precisione migliore o uguale a 0,01% del valore nominale con coefficiente di temperatura >3 ppm/°C;
- il numero di bit di quantizzazione per canale uguale o superiore a 10;
- frequenza di campionamento programmabile dall'utente sia in locale che in remoto (il numero di campioni dipende principalmente dal tipo di strumentazione al quale è destinato. Nel caso di fornitura generica, prevedere la possibilità di programmazione di almeno 10 campioni al secondo);
- software per la configurazione da remoto e in campo del datalogger. Tale software dovrà prediligere Sistema Operativo Windows, ma, dietro motivata richiesta del gestore del sistema di monitoraggio, dovrà poter essere trasportato anche su altre piattaforme (MacOS e Linux);
- fornitura completa anche dei cavi di connessione ed alimentazione e quanto possa ritenersi utile per la configurazione del datalogger presso i laboratori di ogni centro di monitoraggio;
- comunicazioni con i principali protocolli di rete: TCP/IP, FTP, SMTP, POP3, HTTP;
- congruo numero di porte di comunicazione (seriali, Ethernet, ecc.) per il collegamento a dispositivi di comunicazione e/o controllo (PC, terminali, altro);
- presenza di LED che aiutino nella verifica della presenza dell'alimentazione elettrica e nella corretta presenza delle comunicazioni, oltre che per agevolare la diagnosi di eventuali malfunzionamenti; a questo proposito, il manuale di istruzioni dovrà descrivere in modo chiaro la tipologia di anomalia a seconda delle diverse

modalità di lampeggio dei LED (vedi Figura A.50 e Figura A.51);

- memoria ROM non volatile a bordo in grado di memorizzazione tutti i dati provenienti dalla sensoristica afferente per almeno 4 mesi naturali e consecutivi;
- se il sistema riguarda una installazione su un sito con particolari caratteristiche di early warning, una caratteristica BITE (*Built-In-Test-Equipment*) per l'autodiagnosi che individui e trasmetta al Centro di Controllo le informazioni relative a: anomalie di funzionamento del datalogger (software e/o hardware); anomalie di funzionamento di uno o più canali; problemi di alimentazione. È buona norma prevedere la presenza di una linea di reset generale attivabile da remoto;
- linee di ingresso/uscita adeguatamente protette contro sovratensioni, radiofrequenza e scariche elettrostatiche. Dovranno essere utilizzati connettori di tipo stagno;
- unità di acquisizione con orologio/datario indipendente sufficientemente stabile (*time drift* inferiore a 4 min/anno);
- unità di acquisizione con un consumo adeguato al sistema di alimentazione predisposto;
- temperatura operativa compresa tra almeno -25° e +55° C.



Figura A.50 - Esempio di datalogger con sistema operativo Windows CE, un congruo numero di canali, diverse porte di comunicazione e slot per espansione memoria con SD Card. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura A.51 - Esempio di datalogger con schermo LCD, con un numero di canali idonei per una installazione più semplice, dotato di diverse porte di comunicazione e slot per espansione memoria con SD Card. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

Installazione

L'installazione di un datalogger non prevede particolari difficoltà, essendo un apparato complementare ad altri. Si suggerisce in particolare di mantenere ordine nella cassetteria all'interno del quadro, organizzando canaline per il contenimento dei cavi. È buona norma identificare

ogni canale con una etichetta adesiva o plastica con un codice identificativo univoco. In accoppiamento al datalogger dovrà essere presente anche uno schema dei collegamenti dei vari sensori; tale schema sarà conservato in copia nell'archivio della sala monitoraggio e sarà presente, in almeno 2 copie, all'interno del quadro elettrico, protette all'interno di buste di plastica ed incollate, se possibile, alle pareti del quadro. Si veda Paragrafo A.6.4 relativamente ai box di protezione.

A.6.2 Sistemi di trasmissione e telecontrollo

Negli ultimi anni si è verificata una evoluzione degli apparati di trasmissione, i quali, grazie all'introduzione sempre più massiccia dei protocolli TCP/IP, riescono ad integrare anche funzionalità tipiche di una rete fisica, quali principalmente la possibilità di controllare da remoto la strumentazione, non solo per verificarne lo stato di vita (accesa/spenta), ma anche per poter effettuare delle configurazioni e aggiornamenti firmware da remoto.

A.6.2.1 Radio UHF

La tecnologia UHF possiede alcune caratteristiche peculiari, per le quali può risultare conveniente il suo utilizzo rispetto ad altre tecnologie proprietarie.

In particolare, può risultare opportuno utilizzare tale tecnologia nel caso in cui non sia disponibile alcuna copertura di rete cellulare, oppure nel caso in cui la strumentazione collegata possiede una criticità intrinseca tale per cui occorre disporre di una tecnologia di trasmissione dati indipendente da operatori terzi. Ad esempio, in luogo di utilizzare le reti cellulari legate ad operatori privati e commerciali, utilizzando la connettività mediante reti UHF si possono interfacciare sistemi radio tipici delle reti di Protezione Civile.

Un altro aspetto da tenere in conto è l'assenza di costi fissi mensili quali canoni o consumi di traffico dati dei gestori di telefonia. Tolto il costo iniziale di installazione e configurazione, non vi saranno altri costi da sostenere nel tempo.

D'altronde, però, la capacità di traffico dati è molto limitata, a pochi kB per ogni trasmissione, e questo

impone l'utilizzo di tale tecnologia a quegli strumenti che registrano pochi dati, oppure hanno stringhe di dati di dimensione contenuta. Parallelamente, è piuttosto complicato costruire una infrastruttura per il controllo da remoto.

Installazione

L'installazione è simile ad altri sistemi, in quanto si tratta di posizionare una antenna direzionata verso l'omologa ricevente. Infatti, la realizzazione di una rete radio dovrà tenere conto, a seconda della distanza della sala operativa, dell'installazione di eventuali ponti radio, la loro relativa alimentazione (fotovoltaico, rete di distribuzione, ecc.), oltre che l'eventuale installazione/formazione di ricoveri e le necessarie autorizzazioni.

A.6.2.2 Modem GSM/GPRS/Router

All'interno della presente categoria si trovano quegli apparecchi che hanno seguito l'evoluzione tecnologica della telefonia cellulare, a partire dalle prime comunicazioni "a chiamata", fino alle possibilità più recenti, che permettono una soluzione di trasmissione con flusso di dati in continuo (*streaming*).

Nella scelta degli apparati occorre tenere presente, come di consueto, le condizioni ambientali nelle quali gli stessi si troveranno ad operare, in particolare legate alle temperature rigide. Nel caso in cui l'accessibilità dei siti non sia agevole (ad esempio può essere necessario l'utilizzo dell'elicottero), sarà doveroso prediligere apparecchi di tipo industriale, dal costo superiore, ma che nel lungo periodo presentano meno problematiche di guasti o malfunzionamenti.

I modem GSM/GPRS sono gli apparati che permettono la trasmissione dei dati, registrati dal sensore o dai datalogger di cui al Paragrafo A.6.1, verso la sala di controllo. Usualmente i modem utilizzano SIM di operatori telefonici che, per le pubbliche amministrazioni, derivano da contratti CONSIP nazionali. La tecnologia GSM (definita di seconda generazione) e la sua evoluzione GPRS (a cavallo tra la seconda e la terza generazione, UMTS) rappresentano uno standard per le comunicazioni nei sistemi di

monitoraggio e, di fatto, hanno soppiantato le tecnologie basate su antenne UHF direzionali. Questo è dovuto principalmente al fatto che le reti cellulari, negli ultimi anni, hanno subito un forte incremento di copertura.

Al fine di controllare la qualità del segnale, generalmente è sufficiente recarsi sul posto con diversi apparati telefonici cellulari prestando attenzione al fatto che ogni apparato ha una diversa sensibilità alla rete, generalmente inferiore alle reali capacità ricettive dei modem.

L'antenna esterna da collegare al modem può essere di 2 tipi:

- antenna omnidirezionale;
- antenna direzionale.

Il primo caso è quello più comune, nel quale non si conosce l'ubicazione delle antenne e si ricerca il segnale proveniente da ogni direzione. In determinate situazioni, invece, quando si opera in siti di alta montagna con un basso campo cellulare, può essere utile indirizzare la ricerca del segnale in una unica direzione. Per fare tale operazione occorre avvalersi di specifici comandi in collegamento diretto con il modem (utilizzando *hyperterminal*, ad esempio) e seguendo l'andamento del segnale al variare della direzione dell'antenna.

I router UMTS sono apparati remoti che svolgono il compito di instradare tutto il traffico delle stazioni remote verso un concentratore (sempre un router) opportunamente configurato, che funziona con schede UMTS LTE 4G dei principali operatori commerciali.

La soluzione è realizzabile con apparati commerciali che al loro interno possono alloggiare anche due schede sim in modo da garantire la possibilità di utilizzare anche un altro operatore nel caso di assenza di segnale dell'operatore principale. I sistemi di monitoraggio remoti che trasmettono tramite router mandano i dati con un flusso continuo rimanendo sempre collegati. Inoltre, se gli apparati della stazione di monitoraggio sono dotati di indirizzo IP statico è possibile collegarsi da remoto sul sensore, rendendo possibili anche operazioni di manutenzione (riavvio dei sistemi, reset degli errori, ecc.) e la modifica di alcuni

parametri (ad esempio, frequenza di acquisizione) e verifica del corretto funzionamento. I router in genere sono configurabili via web e hanno un sistema per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni del router stesso. Inoltre, il sistema operativo del router permette una ampia flessibilità di configurazione. Molti apparati commerciali offrono anche interfacce RS232/DB9 e RS485 controllabili via software, porte (denominate *socket*) di input digitali e analogici che permettono anche di misurare i livelli di tensione (funzione particolarmente utile con sistemi di alimentazione a pannelli fotovoltaici), aprire e chiudere circuiti di alimentazione e un'interfaccia di comandi basici tramite SMS, qualora la linea dati non sia più raggiungibile.

La rete dei sensori di monitoraggio che si collegano tramite il router all'accentratore si realizza tramite un tunnel di tipo ipsec o ssl-vpn. Grazie a tali tunnel ad ogni stazione remota corrisponde un indirizzo IP di rete raggiungibile in ricezione-trasmissione. Entrambe le soluzioni garantiscono la sicurezza dei dati trasmessi.

Installazione

Tali apparati sono usualmente integrati all'interno del quadro elettrico che contiene anche i datalogger, i regolatori di carica ed i cablaggi. In determinati apparati (es. stazioni GNSS, stazioni totali, sensori sismici, accelerometrici, ecc.), in cui può essere necessario avere un monitoraggio in tempo reale, il modem di trasmissione è inglobato all'interno del datalogger e della scheda madre di controllo, rendendo questi prodotti simili a piccoli computer con proprio sistema operativo, più evoluto di un semplice *firmware*.

Nel caso di utilizzo di rete cellulare in aree di alta montagna, si dovrà verificare preliminarmente quale sia la migliore rete cellulare disponibile, eventualmente scegliendo l'operatore che non è in convenzione per la pubblica amministrazione, se necessario. Si può optare per una antenna di tipo direttivo, se è nota la posizione di un ripetitore di segnale cellulare, in modo da ottimizzare sia i consumi, sia soprattutto la stabilità del segnale.

A.6.2.3 Sistemi WSN (Wireless Sensor Network)

I sistemi WSN rappresentano allo stato attuale una valida alternativa rispetto alle soluzioni che prevedono l'utilizzo di rete cellulare. Questi sistemi venivano utilizzati principalmente nei siti di difficile accesso, in quanto, con una precisa e corretta configurazione, risultano estremamente affidabili. Tali apparati sono usualmente alimentati mediante batterie (che dovranno essere periodicamente sostituite) o celle solari. In particolare, il layout tipico prevede il collegamento punto – punto tra due antenne, una posizionata in prossimità della strumentazione, mentre l'altra in un sito posizionato usualmente nel versante di fronte a quello monitorato. Occorre propendere per una tipologia di apparato che abbia la possibilità di un controllo della raggiungibilità di ogni singolo punto, e abilitare sistemi di autocontrollo, quali ad esempio la verifica dello stato di comunicazione e autorisposta in caso di mancata comunicazione (sistemi di tipo *watchdog* - controllo - integrati).

Installazione

L'installazione non prevede particolari difficoltà, trattandosi di apparecchi di dimensione ridotta possono essere fissati su pareti o strutture antropiche, tronchi o su appositi pali in acciaio. Occorre porre grande attenzione nel direccionamento del segnale, in modo che lo stesso abbia il maggior guadagno possibile.

A.6.3 Sistemi di alimentazione elettrica

I sistemi di alimentazione elettrica rappresentano una delle maggiori criticità nel momento della progettazione di un sistema di monitoraggio. Mentre nel campo delle trasmissioni le innovazioni tecnologiche e l'aumento della copertura delle reti cellulari hanno portato indubbi vantaggi, soprattutto dal lato dell'affidabilità e nel contenimento dei consumi elettrici, così non si può dire quando si affronta la tematica dell'alimentazione elettrica delle strumentazioni. Senza una fonte energetica affidabile e continua, anche il miglior strumento sarà inutilizzabile.

Pertanto, tra i vari sottosistemi che costituiscono una rete, sicuramente la maggiore attenzione andrà posta nell'identificazione della miglior soluzione tecnica e tecnologica per poter disporre di sufficiente alimentazione. È altresì importante seguire l'evoluzione del mercato, ed eventualmente provare ad applicare metodologie di altri settori a quello del monitoraggio (ad esempio il settore nautico).

I principali e maggiormente utilizzati sistemi di alimentazione elettrica sono i seguenti:

- alimentazione da rete 230 V. Laddove è possibile, è evidente che è la soluzione migliore. Ci sono tuttavia alcune accortezze da seguire, dal momento che generalmente la strumentazione ha un campo di funzionamento a 12/24 V in corrente continua. È sempre opportuno affidarsi nella realizzazione dell'impianto a personale idoneo, che sia in grado di garantirne la funzionalità. È altresì consigliabile predisporre una serie di batterie tampone e l'installazione di un apparecchio autoricaricante al fine di ridurre gli interventi in sito e per evitare possibili interruzioni nell'erogazione dell'energia elettrica da parte del gestore. In particolari casi, quali ad esempio una derivazione dall'illuminazione pubblica, occorre verificare la disponibilità della rete h24, evitando perciò interruzioni programmate o in prefissate fasce orarie diurne. Un aspetto da non sottovalutare, inoltre, almeno negli ambienti montani, è dato dal fatto che cavi di alimentazione di rete troppo lunghi tendono ad attirare le scariche elettriche. Non sono rari i casi di apparecchiature di monitoraggio danneggiate in maniera irreversibile dai fulmini. Altri aspetti da considerare sono le tempistiche per l'ottenimento da parte della Società elettrica di eventuali autorizzazioni (si pensi, ad esempio, alla costruzione di una linea aerea in aree protette) e quelli di esecuzione dell'allaccio: a seconda del fornitore e dell'ubicazione, possono servire poche settimane (ad esempio, in prossimità di un centro abitato) oppure, nei casi più complessi (aree molto distanti dai centri abitati o in alta quota), possono essere necessari diversi mesi. Questi aspetti

esecutivi e di vulnerabilità, associati quindi alla scarsa disponibilità di alimentazione di rete che si riscontra in zone in frana, porta spesso a scegliere soluzioni di alimentazione ad "isola" come le seguenti.

- Pannelli fotovoltaici. Essi sono utilizzati per la ricarica di una o più batterie (il numero di queste e il dimensionamento dell'impianto fotovoltaico dovrebbero garantire il funzionamento della strumentazione per almeno 48-72 ore in condizioni di scarsa illuminazione - ad esempio, per avverse condizioni meteo - oppure per garantire la prosecuzione del monitoraggio nel caso di malfunzionamento dell'impianto di alimentazione fino all'intervento del manutentore). Questa è la principale soluzione adottata nella pressoché totalità dei casi, in quanto ha diversi vantaggi:
 - facilità di progettazione;
 - relativa facilità di realizzazione dei sostegni;
 - facilità di installazione;
 - facilità di manutenzione;
 - costo dei materiali relativamente contenuto;
 - scalabilità dei moduli fotovoltaici per aumentarne la potenza installata;
 - durata nel tempo.

Per contro, tuttavia, i pannelli fotovoltaici possono essere utilizzati con buoni risultati laddove vi è una buona insolazione, per la maggior parte dell'anno. Dal punto di vista tecnologico, occorrerà valutare quale tipologia di pannello è idoneo (monocristallino, policristallino), verificando con il fornitore/installatore se prediligere alto rendimento con luce diretta perpendicolare (monocristallino), oppure rendimento leggermente inferiore ma in grado di erogare corrente anche con luce diffusa o riflessa (policristallino); ad ogni modo, le differenze di funzionamento non sono così diverse. Anche in questo caso, occorre seguire l'evoluzione tecnologica e, se possibile, testare sistemi diversi. Esistono sul mercato, ad esempio, pannelli a doppia faccia, in grado di utilizzare sia la luce diretta, sia quelle riflessa dal terreno o dall'ambiente

circostante; si tratta di sistemi che possono essere testati, ad esempio, quando sul terreno è presente una copertura nevosa per diversi mesi all'anno. Dal punto di vista dell'installazione, nonostante sia energeticamente vantaggioso prediligere l'acquisto di pannelli con alte potenze (250 – 300 W), occorre considerare anche la realizzazione di telai di sostegno particolarmente importanti, per evitare l'“effetto vela” causato dal vento sulla maggiore superficie esposta. Nelle zone dove è usuale avere una notevole copertura nevosa, i pannelli devono essere posti ad una certa altezza da terra (> 2,5 m) e possedere una inclinazione maggiore (fino a 55° - 60° sulla verticale) per evitare l'accumulo di neve sul pannello. Al fine di verificare il corretto funzionamento dell'impianto, esistono in commercio dei regolatori di carica “smart” che consentono di monitorare la tensione verso la batteria e lo stato di carica di quest'ultima. L'installazione di questa tipologia di regolatori è fortemente consigliata in aree dal difficile accesso (alta quota, soprattutto nei mesi invernali, o non servite da strade o piste), in modo tale da pianificare in tempo eventuali interventi manutentivi (vedi Figura A.52 e Figura A.53).



Figura A.52 - Installazione di pannelli fotovoltaici in zona di alta montagna, in cui è presente un notevole carico di neve al suolo. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta



Figura A.53 - Tipico problema di zone di alta montagna, in cui i pannelli possono essere ricoperti di una coltre nevosa che ne impedisce il corretto funzionamento. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

- **Turbina eolica.** In particolari siti, dove è presente una costante disponibilità di correnti d'aria, può essere utilizzato il sistema eolico. In questo caso, la progettazione è di fondamentale importanza ed è consigliabile, se non sono disponibili dati derivanti da stazioni meteorologiche nelle immediate vicinanze, effettuare un periodo preliminare di test per un calcolo puntuale della capacità energetica disponibile sul sito. Il sistema eolico è un impianto di alimentazione tipicamente utilizzato come backup rispetto a quello costituito da pannelli fotovoltaici. Si suggerisce inoltre di rappresentare la necessità di eventuali autorizzazioni, soprattutto se si tratta di aree protette (es. parchi nazionali). Nel caso in cui si voglia adottarlo in zone di alta montagna, occorrerà considerare attentamente la tipologia di pala, elica o spirale, e verificare che non risenta di fattori climatici e ambientali, quali ad esempio l'umidità, le basse temperature e la possibilità concreta di formazione di ghiaccio tra gli apparati.
- **Celle a combustibile.** Si tratta di una tecnologia dalle basi teoriche molto semplici (una reazione chimica di ossidazione di un combustibile con formazione di vapore d'acqua e anidride carbonica: $CH_3OH + 3\frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$), ma che ha insiti alcuni problemi di installazione che devono trovare adeguata soluzione per poter essere

utilizzate. *In primis*, occorre verificare il range di accensione e funzionamento, parametri che spesso ne rendono difficoltoso l'utilizzo a quote elevate (generalmente sopra i 1500 m s.l.m.) oppure a temperature rigide (generalmente sotto i + 5 °C). Un altro aspetto da valutare attentamente è rappresentato dal trasporto e stoccaggio delle taniche di combustibile (idrogeno o più comunemente metanolo), che necessitano di autorizzazioni e abilitazioni specifiche. Tuttavia, se vengono superate alcune difficoltà organizzative, le celle a combustibile possono rappresentare una valida tecnologia in abbinamento all'alimentazione da pannello fotovoltaico (vedi Figura A.54).



Figura A.54 - Esempio di utilizzo di una cella a combustibile (metanolo) per alimentazione di backup in zone di alta montagna. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

- Gruppi elettrogeni con motore endotermico (con combustibile benzina o gasolio). Con tale tecnologia, relativamente semplice, il gruppo viene utilizzato per ricaricare le batterie singole o gruppi di batterie. Il gruppo deve poter disporre di un sistema automatico di accensione nel momento in cui le batterie necessitano di ricarica e deve poter essere interrogabile e controllabile da remoto anche per quanto riguarda la quantità del combustibile ancora presente nel serbatoio.

- Pacchi batteria isolati (vedi Figura A.55). In determinate situazioni, laddove si prevede di dover disporre di un quantitativo superiore di energia elettrica e non vi è nessun'altra soluzione di generazione in sito, si può optare per un pacco di batterie. Le caratteristiche elettriche devono essere dimensionate in base alla tipologia di strumentazione, così come il voltaggio (tipicamente 48 V), in quanto la strumentazione a valle deve disporre di un quadro elettrico in grado di commutare la tensione in ingresso con quella di cui necessita.



Figura A.55 - Installazione pacco batteria per superare la mancanza di insolazione in zone di alta montagna. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

- Gruppo elettrogeno ibrido motore endotermico – pannelli fotovoltaici (vedi Figura A.56). Per applicazioni molto specifiche, laddove si ravvisa l'insorgenza di potenziali criticità legate all'alimentazione può essere opportuno scegliere una soluzione omnicomprensiva ibrida, in cui alla classica configurazione fotovoltaica viene abbinato un gruppo elettrogeno. In questo caso è basilare avere un completo controllo da remoto, con modalità *web-based*. Per poter garantire una lunga durata senza necessità di eseguire il rifornimento

del carburante, dovrà essere completato con almeno 1 o 2 serbatoi di capienza ritenuta adeguata. L'intero sistema deve essere facilmente trasportabile, dotato quindi di ganci per il sollevamento sia tramite gru, sia tramite gancio baricentrico con elicottero. Dal punto di vista delle caratteristiche tecniche da richiedere, indicativamente sono le seguenti:

- interfacciabile e controllabile da remoto;
- serbatoio incorporato e serbatoi esterni da almeno 150 litri con indicatore di livello da interfacciare con centralina;
- differenziale di protezione di tipo autorischiante ad immunità rinforzata con protezioni con sensibilità pari a 300mA;
- golfari o anelli per il trasporto con elicottero;
- uscita a 220VAC/50Hz e 24VDC;
- altezza d'impiego su livello del mare per la quota necessario;
- carcassa adatta ad essere installata all'esterno in ambienti potenzialmente ostili e con basse temperature;
- batterie di avviamento ad alta capacità e adatte a basse temperature;
- carrellabile per trasporto e traino con veicolo o trasportabile su cassone e movimentabile con muletto;
- integrazione carica batterie con pannelli fotovoltaici;
- peso massimo consigliato per trasporto con elicottero: 600 kg (variabile a seconda della quota di installazione prevista. Questo parametro va puntualmente verificato con le società che forniscono lavoro con elicottero).



Figura A.56 - Installazione test di un modello di generatore ibrido appositamente costruito, ad alimentazione di un sistema radar interferometrico da terra. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

- Pico idroelettrico. Nonostante non siano note da letteratura particolari installazioni di sistemi di monitoraggio con alimentazione da picoidroelettrico, si tratta tuttavia di una tecnologia che in determinati contesti può essere investigata, soprattutto nel caso di installazione nelle vicinanze di torrenti (meglio se con una portata continua) o sorgenti o drenaggi perenni. Il picoidroelettrico prevede una potenza inferiore a 5 kW; va effettuato un preciso calcolo di portata ed energia producibile. Tale soluzione può essere un valido supporto di backup ai più classici sistemi fotovoltaici. Nel caso di derivazione da acque superficiali occorre verificare l'eventuale necessità di autorizzazione all'Autorità competente in materia.
- Sistemi diversi (veglia tecnologica). Infine, esistono delle soluzioni che non sono generalmente direttamente collegate ai sistemi di monitoraggio, ma che derivano da applicazioni diverse, dove non vi è la disponibilità di alimentazione elettrica da rete. Tipicamente, si tratta di sistemi "isolati", installati nell'ambito nautico – velistico, camperistico e di abitazioni o baite isolate. Ne sono ad esempio celle a combustibile che utilizzano acido malico, che tuttavia rimangono

applicazioni più nell'ambito di laboratori che reali utilizzi pratiche.

Installazione

Ogni sistema di alimentazione possiede proprie peculiarità legate all'installazione, che sono state brevemente descritte nei paragrafi dedicati. In molte applicazioni in esterna occorre predisporre alcune opere di edilizia molto semplice (platea in calcestruzzo, oppure piattaforma a tubi e giunti, tralicci, ecc.) sul quale andare a posizionare i diversi sistemi di alimentazione. La parte di alimentazione si interfaccia con la strumentazione e gli apparati di acquisizione e trasmissione, con i quali va integrata nella progettazione del sistema. Trattandosi di elementi che prevedono il collegamento con cavi elettrici, valgono le stesse regole già espresse nei capitoli precedenti, vale a dire proteggere i cavi con passacavi (eventualmente armati o in acciaio), isolare accuratamente gli spinotti per evitare l'ingresso di acqua o umidità, ancorare accuratamente gli elementi per impedirne il movimento sul terreno o a causa degli elementi atmosferici.

A.6.4 Cablaggi, supporti e accessori di installazione

I diversi apparati descritti nei paragrafi precedenti fanno parte integrata ed integrante di un sistema di monitoraggio, la cui durata nel tempo è agevolata da una accurata progettazione preliminare.



Figura A.57 - Esempio di installazione in un sito di alta montagna.

Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

Installazione

Idealmente, quindi, una installazione può essere suddivisa nelle seguenti parti (vedi Figura A.57 e Figura A.58):

- 1) sistema di alimentazione elettrica. Nel caso più consueto (pannelli fotovoltaici), occorrerà predisporre:
 - a) platea di dimensioni adatte ad ospitare gli apparati, in posizione tale da non porre gli operatori che effettueranno le manutenzioni in condizioni di esposizione al vuoto (in tal caso, prevedere una recinzione);
 - b) traliccio di sostegno di tipologia paragonabile a quelli per le antenne di telecomunicazione e telefonia. È buona norma mantenere uno standard dimensionale all'interno della propria rete. Si predilige tralicci dotati di zincatura per resistere alle intemperie, avendo cura che non vi siano sbavature della zincatura stessa o della saldatura (per evitare tagli ed abrasioni);
 - c) telaio di sostegno per i pannelli fotovoltaici. Generalmente le ditte produttrici dei pannelli non forniscono i telai, che quindi andranno costruiti ad hoc. Le soluzioni tecniche sono molteplici. Si scelgano materiali leggeri e

duraturi, quali ad esempio l'alluminio, e facilmente riconfigurabili in sito per venire incontro ad eventuali differenze dimensionali;

- d) i cavi elettrici devono avere determinate caratteristiche di robustezza meccanica, isolamento elettrico e proprietà chimico – fisiche atte a garantirne la durabilità nel tempo.
- 2) Sistema di acquisizione e trasmissione dati. Tale sistema spesso corrisponde ad un quadro in cui sono inseriti gli apparati descritti nei paragrafi precedenti. Il quadro dovrà garantire adeguata protezione dagli agenti atmosferici, dall'umidità e dall'ingresso della neve di fusione (laddove applicabile). Si utilizzi la norma CEI EN 60529/1997 per definire tale grado di protezione IP; il grado minimo richiesto è IP54.
 - 3) Strumentazione. In tal caso, ogni produttore presenta una sua diversa configurazione. È importante conoscere in fase preliminare ogni aspetto tecnico – dimensionale dell'alloggiamento dello strumento per la migliore pianificazione. Si consiglia di richiedere i disegni tecnici da inserire nel progetto (CAD) dell'installazione. In alcuni casi, per la delicatezza della strumentazione o per la necessità di installare più sistemi di monitoraggio, si può optare per la costruzione di una piccola casetta attrezzata adeguatamente per ospitare gli apparecchi.



Figura A.58 - Esempio di costruzione in legno per alloggiamento di diverse strumentazioni. Fonte: archivio Attività geologiche – Regione Autonoma Valle d'Aosta

B. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

I seguenti riferimenti bibliografici riguardano la parte generale delle Linee Guida (Capitoli 1-8) e l'Appendice A - Strumentazione: specifiche tecniche e installazione.

AGI - Associazione Geotecnica Italiana (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.

AGI - Associazione Geotecnica Italiana (1994) Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio.

AGI - ISPRA (2021) Linee guida per la progettazione degli interventi di mitigazione del rischio da frana.

ANISIG - Associazione Nazionale Imprese Specializzate in indagini geognostiche (2009) Modalità tecnologiche per l'esecuzione di indagini geognostiche e l'installazione e la gestione di impianti di monitoraggio.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2013) ASTM D6230-13 Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinerometers.

ASTM - American Society for Testing and Materials (2012) ASTM D7299-12 Standard Practice for Verifying Performance of a Vertical Inclinerometer Probe.

Atzeni C., Basso M., Canuti P., Casagli N., Leva D., Luzi G., Moretti S., Pieraccini M., Sieber A.J., Tarchi D. (2001) Ground-based SAR interferometry for landslide monitoring and control. Proceedings of 15th Int. Conf. Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. ATG9 Field Workshop on Landslides and Natural/Cultural Heritages. Trabzon, Turkey, 23-24 August, 2001, pp. 195-209.

Barberio S. *et alii* (2017) Linee guida per il controllo di validità dei dati idro-meteorologici, SNPA, Linee guida 02/2017.

Barbi A., Cagnati A., Cola G., Checchetto F., Chiaudani A., Crepaz A., Delillo I., Mariani L., Marigo G., Meneghin P., Parsi S. G., Rech F., Renon B., Robert-Luciani T. (2013) Atlante climatico del Veneto. Precipitazioni - Basi informative per l'analisi delle correlazioni tra cambiamenti climatici e dinamiche forestali nel Veneto. Regione del Veneto, Mestre.

Barla M., Antolini F. (2016) An integrated methodology for landslides' early warning systems. *Landslides* 13(2), 215-228.

Bianchini S., Cigna F., Righini G., Proietti C., Casagli N. (2012) Landslide hotspot mapping by means of persistent scatterer interferometry. *Environ. Earth Sci.*, 67(4), 1155-1172.

Bianchini S., Pratesi F., Nolesini T., Casagli N. (2015) Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide-affected area: the Volterra (Italy) case study. *Remote Sens.*, 7(4), 4678-4701.

Bianchini S., Raspini F., Solari L., Del Soldato M., Ciampalini A., Rosi A., Casagli N. (2018) From Picture to Movie: Twenty Years of Ground Deformation Recording Over Tuscany Region (Italy) With Satellite InSAR. *Frontiers in Earth Science*, 6, 177.

Bianchini S., Solari L., Casagli N. (2017) A gis-based procedure for landslide intensity evaluation and specific risk analysis supported by persistent scatterers interferometry (PSI). *Remote Sens.*, 9(11), 1093.

Bottero D., Poggi F. (2000) Manuale tecnico - Il controllo degli spostamenti orizzontali in profondità mediante tubi inclinometrici e sonda removibile. Regione Liguria.

Braca G., Bussetini M., Lastoria B., Mariani S. (2013) Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici, ISPRA,

Manuali e linee guida 84/2013, ISBN 978-88-448-0584-5.

Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G. (2010) Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides*, 7(3), 291-301.

Casagli N., Tofani V., Morelli S., Frodella W., Ciampalini A., Raspini F., Intrieri E. (2017) Remote sensing techniques in landslide mapping and monitoring. Keynote lecture in: Workshop on World Landslide Forum 2017, May 29, pp.1-19, Springer, Cham.

Chae B.G., Park H.J., Catani F., Simoni A., Berti M. (2017) Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. *Geosci. J.* 2017, 21, 1033-1070.

Ciampalini A., Raspini F., Lagomarsino D., Catani F., Casagli N. (2016) Landslide susceptibility map refinement using PSInSAR data. *Remote Sens of Environ.*, 184, 302-315.

Cigna F., Bianchini S., Casagli N. (2013) How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. *Landslides*, 10 (3), 267–283.

Coviello V., Arattano M., Comiti F., Macconi P., Marchi L. (2019) Seismic characterization of debris flows: Insights into energy radiation and implications for warning. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, 6, 1440-1463, <https://doi.org/10.1029/2018JF004683>.

Coviello V., Arattano M., Turconi L. (2015) Detecting torrential processes from a distance with a seismic monitoring network. *Natural Hazards*, 78, 2055–2080 <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1819-2>.

Cruden D.M., Varnes D.J. (1996) Landslide types and processes. In: Turner A.K., Schuster R.L. (Eds), *Landslides: Investigation and Mitigation: Sp. Rep. 247*, Transportation Research Board, National research Council, National Academy Press, Washington, DC.

Dei Cas L. (2014) Guidelines for designing, management and maintenance of the geologic

monitoring systems. *Rend. Online Soc. Geol. It.*, Vol. 30 (2014), pp. 16-18, doi: 10.3301/ROL.2014.04.

Dick G.J., Eberhardt E., Cabrejo-Liévano A.G., Stead D., Rose N.D. (2015) Development of an early-warning time-of-failure analysis methodology for open-pit mine slopes utilizing ground-based slope stability radar monitoring data. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (4), pp. 515-529.

Di Maio C., Vassallo R., Vallario M., Calcaterra S., Gambino P. (2013) Surface and deep displacements evaluated by GPS and inclinometers in a clayey slope. In: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (eds) *Landslide Science and Practice, Proceedings of the 2nd World Landslide Forum*, Rome, Italy, 3–9 October 2011. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; Volume 2, pp. 265–271.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001) Permanent Scatterers in SAR interferometry. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.*, 39 (1), 8–20.

Giordan D., Wrzesniak A., Allasia P. (2019) The importance of a dedicated monitoring solution and communication strategy for an effective management of complex active landslides in urbanized areas. *Sustainability*, 11(4), 946.

Herrera G., Gutiérrez F., García-Davalillo J.C., Guerrero J., Galve J.P., Fernández-Morodo J.A., Cooksley G. (2013) Multisensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena valley case study (central Spanish Pyrenees). *Remote Sensing of Environment*, 128, 31-43.

Higuchi K., Fujisawa K., Asai K., Pasuto A., Marcato G. (2007) New landslide monitoring technique using optical fiber sensor in Japan. In *Proceedings of 2nd International Workshop on Optoelectronic Sensor-Based Monitoring in Geo-engineering*, Nanjing, China, 73–76 (2007).

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1978) *Suggested Methods for Monitoring Rock Movements Using Borehole Extensometers*.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1977) Suggested Methods for Monitoring Rock Movements Using Inclinometers and Tiltmeters. Part 1 SM for Monitoring Rock Movements Using a Probe Inclinomater; Part 2 SM for Monitoring Rock Movements Using Fixed-in-Place Inclinometers; Part 3 SM for Monitoring Rock Movements Using Tiltmeters.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1980) Suggested Methods for Pressure Monitoring Using Hydraulic Cells.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (1984) Suggested Methods for Surface Monitoring of Movements Across Discontinuities.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (2014) Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS).

Lu P., Casagli N., Catani F., Tofani V. (2012) Persistent Scatterers Interferometry Hotspot and Cluster Analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides. *Int. J. Remote Sens.*, 33, 466–489.

Malet J.P., Maquaire O., Calais E. (2002) The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology* 43:33–54.

Mannucci G., Notarpietro A. (eds) (2005) *Linee Guida per il controllo dei fenomeni franosi - Vol.1*, IREALP, 124 pp.

Mannucci G., Notarpietro A. (eds) (2005) *Linee Guida per il controllo dei fenomeni franosi - Vol.2*, IREALP, 79 pp.

Mateos R.M., Azañón J.M., Roldán F.J., Notti D., Pérez-Peña V., Galve J.P., Pérez-García J.L., Colomo C.M., Gómez-López J.M., Montserrat O., Devantéry N. (2017) The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, 14(2), 743-754.

Meisina C., Zucca F., Notti D., Colombo A., Cucchi A., Savio G., Giannico C., Bianchi M. (2008) Geological interpretation of PSInSAR data at regional scale. *Sensors*, 8(11), 7469-7492.

Mikkelsen PE (2003) Advances in inclinometer data analysis. In: F Myrvoll (ed.) *Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 555-567.

Ministero del lavoro e delle politiche sociali, Ministero della salute - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (2003) *Linea guida per l'esecuzione di lavori temporanei in quota con l'impiego di sistemi di accesso e posizionamento mediante funi*.

Monserrat O., Crosetto M., Luzi G. (2014) A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, pp. 40-48.

Notti D., García-Davalillo J.C., Mora O., Cooksley G., Sánchez M., Arnaud A., Crosetto M. (2011) Analysis with C- and Xband satellite SAR data of the Portalet landslide area. *Landslides*, 8, 195-206.

Oliveira S.C., Zêzere J.L., Catalão J., Nico G. (2015) The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, 12(4), 703-719.

Peduto D., Ferlisi S., Nicodemo G., Reale D., Pisciotta G., Gullà G. (2017) Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales. *Landslides*, 14(6), 1993-2007.

Piacentini D., Devoto S., Mantovani M., Pasuto A., Prampolini M., Soldati M. (2015) Landslide susceptibility modeling assisted by Persistent Scatterers Interferometry (PSI): an example from the northwestern coast of Malta. *Nat. Hazards*, 78(1), 681-697.

Raspini F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Soldato M., Solari L., Novali F., Del Conte S., Rucci A., Ferretti A., Casagli, N. (2018) Continuous, semi-automatic

monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Sci. Rep.*, 8(1), 1-11.

Ridley A.M., Burland J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique*, 43, no. 2, pp. 321-324.

Russo M., Fornaciari C., Di Loreto E., Liperi L., De Blasio A., Iritano G., Pirozzi A. (2010) Metodologie di misura e specifiche tecniche per la raccolta e l'elaborazione dei dati idrometeorologici, ISPRA, Manuali e linee guida 60/2010.

Sansò F., Biagi L., Caldera S., Pertusini L. (2018) Sistemi di monitoraggio GNSS di strutture, infrastrutture e territorio: uno Standard. *GEOmedia* 4, 2018.

Sättele M., Bründl M., Straub D. (2015) Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 192–202, doi:10.1016/j.ress.2015.05.003, 2015.

Solari L., Del Soldato M., Montalti R., Bianchini S., Raspini F., Thuegaz P., Bertolo D., Tofani V., Casagli N. (2019) A Sentinel-1 based hot-spot analysis: landslide mapping in north-western Italy. *Int. J. Remote S.*, 40(20), 7898-7921.

Tarantino A., Mongiovì L. (2003) Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction. *Geotechnique*, 53, no. 1, pp. 137-141.

Tarchi D., Casagli N., Moretti S., Leva D., Sieber A.J. (2003) Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps. *Journal of Geophysical Research*, vol. 108(8), pp. 10-14.

Theule J.I., Crema S., Marchi L., Cavalli M., Comiti F. (2018) Exploiting LSPV to assess debris-flow velocities in the field. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1-13, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018>.

Tofani V., Raspini F., Catani F., Casagli N. (2013) Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for

landslide characterization and monitoring. *Remote Sens.*, 5, 1045–1065.

Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018) Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Rapporto 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018.

Ulusay R., Hudson J.A. (eds) (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006 (Blue book), ISBN: 978-975-93675-4-1.

Ulusay R. (ed) (2015) The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014 (Orange Book), Springer, ISBN 978-3-319-07713-0.

UNAVCO (2010) Campaign GPS Handbook, January 2010.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2007) Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo UNI EN 1997-2:2007.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2010) UNI EN 13798:2010 Idrometria - Specifiche di un pozzetto pluviometrico di riferimento.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2014) UNI CEI CEN/TR 16469:2014 Idrometria - Misurazione dell'intensità di precipitazione (precipitazione liquida): requisiti, metodi di taratura e misurazioni in campo.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2015) UNI EN ISO 18674-1:2015 Parte 1: Regole generali.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2016) UNI EN ISO 18674-2:2016 Parte 2: Misurazione degli spostamenti lungo la linea: Estensimetri.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2019) UNI EN ISO 18674-5:2019 Parte 5: Misure di variazione di tensione tramite celle di pressione totale.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2020) UNI EN ISO 18674-3:2020 Parte 3: Misurazione degli spostamenti lungo la linea: Inclinatori.

UNI – Ente Italiano di Normazione (2020) UNI EN 17277:2020 Idrometria - Requisiti di misurazione e

classificazione degli strumenti pluviometrici per la misura dell'intensità di precipitazione.

Urciuoli G., Pirone M., Comegna L., Picarelli L. (2016). Long-term investigation on the pore pressure regime in saturated and unsaturated sloping soils. *Engineering Geology*, vol. 212, pp. 98-119.

WMO - World Meteorological Organization (2018) *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, WMO-No. 8, ISBN 978-92-63-10008-5.

WMO - World Meteorological Organization (2008) *Guide to Hydrological Practices - vol. I: Hydrology - From Measurement to Hydrological Information*, Sixth edition 2008, WMO 168, ISBN 978-92-63-10168-6.

Yoshida K., Takeshi T., Iwasawa M. (2002) The research on the application to the landslide using optical fiber sensors. In *Proceedings of International Congress INTERPRAEVENT 2002 in the Pacific Rim - MATSUMOTO/JAPAN*, 589-594 (2002).

Zhao C., Ya K.G., Qin Z., Zhong L., Bin L. (2018) Landslide identification and monitoring along the Jinsha River catchment (Wudongde reservoir area), China, using the InSAR method. *Remote Sens.* 10, 7, 993.

C. CASI DI STUDIO

Nell'Appendice C sono descritti dodici casi di studio di frane monitorate (Figura C.1, Tabella C.1), distribuite sul territorio nazionale e esemplificative di differenti tipologie di movimento e velocità del fenomeno franoso, materiali (roccia/detrito/terra) e litologie coinvolte, cause innescanti, sistemi di monitoraggio e strumentazione utilizzata, elementi esposti a rischio (es. centri urbani, infrastrutture di comunicazione primarie, beni culturali).

Nelle schede vengono brevemente descritte le caratteristiche del sito, il sistema di monitoraggio e i dati acquisiti. Con riferimento a ciascun caso di studio, vengono inoltre discussi alcuni dei seguenti aspetti:

- approccio utilizzato per la progettazione e realizzazione della rete di monitoraggio;
- punti di forza, elementi innovativi o criticità del sistema di monitoraggio e/o della strumentazione;
- integrazione e/o confronto dei dati nel caso di applicazione di più tecniche di monitoraggio;
- definizione di modelli a fini previsionali del fenomeno e correlazione con i dati acquisiti;
- utilizzo dei dati del monitoraggio per l'allertamento e la salvaguardia della popolazione o per la progettazione di interventi di consolidamento della frana;
- modalità di comunicazione e diffusione dei dati del monitoraggio.

I primi due casi di studio riguardano frane ubicate in Regione Valle d'Aosta. La frana di La Saxe, classificabile come frana complessa, impostata su una DGPV che occupa l'intero versante Nord Ovest della dorsale del M. de la Saxe, è divisa in almeno tre domini cinematici a comportamento, volumi ed attività diversi. La dinamica della frana è controllata da accelerazioni primaverili legate soprattutto alla fusione nivale. Il collasso totale del corpo di frana potrebbe causare la distruzione di due villaggi di alta valenza turistica, impianti funiviari, dell'autostrada A5 - traforo del Monte

Bianco. Il sistema è operativo in continuo (7/24/365) e utilizzato per l'allertamento e l'attivazione dei piani di emergenza. La disseminazione dei dati agli utenti esperti (tecnici, decisori ecc.) e alla popolazione avviene via web, tramite un portale dedicato e tramite bollettini di aggiornamento periodico.

La frana di Bosmatto è una frana complessa con meccanismo roto-traslazionale che coinvolge anche il bedrock fino ad una profondità di alcune decine di metri e un volume stimato dell'ordine dei $2,5-3,5 \cdot 10^6$ m³. Il sistema di monitoraggio è stato realizzato a partire dall'autunno 2001 e ha registrato una velocità di spostamento lineare, con tassi di spostamento che variano tra 6 mm e 1,5 cm/anno. La disponibilità, dal marzo 2018, di dati satellitari Sentinel-1 è stato un valido supporto per l'analisi del complesso *pattern* deformativo, con un'evoluzione sostanzialmente indipendente dal regime delle precipitazioni.

Seguono due casi di studio di frane monitorate in Provincia Autonoma di Bolzano. La frana di Corvara è un ampio fenomeno di stile complesso (profondo scorrimento rotazionale in terra, a cinematica lenta, attivo) che coinvolge formazioni bacinali torbide e ialoclastiche (San Cassiano, Fernazza, La Valle). È oggetto di studio dal 1997 ad oggi mediante diverse campagne di indagine e di monitoraggio. L'utilizzo di più sistemi di monitoraggio ha permesso sia di acquisire diversi tipi di informazioni sul movimento (spostamenti orizzontali, verticali, puntuali, in continuo), sia di confrontare i vari sistemi di acquisizione e di conoscerne meglio i vantaggi ed i limiti.

La colata del Rio Gadrìa è ubicata in un bacino molto attivo in termini di frequenza degli eventi e di volume del sedimento trasportato, per la presenza di rocce e depositi quaternari diffusamente interessati da processi erosivi e di instabilità superficiale e per le forti pendenze dei versanti e dei canali. L'analisi dei dati acquisiti dal sistema di monitoraggio tra il 2011 e il 2019 ha mostrato che la maggior parte delle colate detritiche si è

articolata in più pulsazioni (*surge*) e ha consentito di determinare velocità media, durata, volumi trasportati, oltre alla soglia pluviometrica intensità-durata per l'insacco delle colate. Nel bacino del Gatria viene impiegato un algoritmo di rilevamento automatico delle colate detritiche basato sul segnale geofonico.

Il successivo caso di studio riguarda un'altra colata detritica a Cancia in comune di Borca di Cadore (BL). Il sito è storicamente noto per eventi di colata detritica di tipo dolomitico innescati da temporali intensi estivi. Il sistema di monitoraggio e allarme, collaudato nel 2014, monitora le precipitazioni intense in grado di innescare le colate e il transito del flusso detritico lungo il canale, con l'integrazione di strumenti con differenti caratteristiche di affidabilità e limiti di funzionamento. Dal 2017 il Sistema è gestito mediante un Tavolo Tecnico tra Regione, Provincia, ARPA Veneto e Comune.

Vengono quindi descritti due casi di studio in Italia centrale: la rupe di Orvieto, borgo ricco di arte e storia, e Ancona, esempio di convivenza di una città con una grande frana. Orvieto è costruita su un piastrone piroclastico delimitato da pareti subverticali alte fino a 60 m, in tufo litoide e pozzolana, che poggia su una base costituita da argille molto consistenti, con interposto uno strato di materiali fluvio-lacustri. Il monitoraggio ha consentito di chiarire l'evoluzione attesa dei movimenti nel pendio argilloso nei riguardi soprattutto delle infrastrutture mentre sulla rupe consente di tenere sotto controllo le parti marginali della città, sede sia di abitazioni residenziali che di edifici storici.

La frana di Ancona è prevalentemente una frana di scorrimento in un deposito argilloso di età Plio-Pleistocenica (Argille Azzurre), nel quale si intercalano siltiti e livelli di sabbie in strati generalmente sottili. Il sistema di monitoraggio è integrato: strumentazione geodetica di superficie di elevata precisione e impianti geotecnici che raggiungono profondità di 95 m. Il sistema di allertamento avviene con invio automatizzato della messaggistica. Dopo quasi 20 anni di funzionamento, il sistema ha garantito la salvaguardia della popolazione, dimostrando coerenza tra dati dei

sensori del monitoraggio di superficie e delle misure di monitoraggio geotecnico.

Seguono quindi quattro casi di studio in Italia meridionale con grandi frane a cinematismo lento in formazioni prevalentemente marnose/argillose che interessano infrastrutture di comunicazione.

La frana di Montaguto è un *earthflow* caratterizzato da un'evoluzione complessa che ha interessato unità marnose e flyschoidi e che, nel 2010, ha portato alla chiusura di due importanti arterie di comunicazione (SS90 e linea ferroviaria Napoli-Bari). Nella fase parossistica la velocità ha raggiunto quasi 3 m/giorno. L'uso integrato di rilievi LiDAR, stazioni totali robotizzate, GB-InSAR e di altra strumentazione di tipo tradizionale ha permesso di giungere ad una dettagliata conoscenza delle dinamiche della frana, supportando in maniera decisiva un articolato progetto di mitigazione.

La frana di Costa della Gaveta, pur essendo estremamente lenta, ha causato nel tempo rilevanti danni a strutture e infrastrutture (SS 407 Basentana, tratta ferroviaria Potenza-Metaponto). La successione litologica del versante su cui si sviluppa è formata da due principali complessi sovrapposti stratigraficamente: il complesso argilloso-marnoso delle Argille Varicolori e il complesso calcareo-marnoso della formazione della Corleto Perticara. Il monitoraggio di lungo termine, circa 15 anni, degli spostamenti profondi e superficiali, con sistemi inclinometrici e GPS fissi e mobili, ha fornito numerosi elementi di comprensione della cinematica della frana, definendo un campo di velocità esteso a tutto il volume in frana e un'evoluzione temporale lineare nel periodo di monitoraggio.

Il bacino franoso di Pisciole comprende scorrimenti, lenti, da mediamente profondi a profondi, che coinvolgono successioni argillose tettonizzate con inclusioni rocciose. La diagnosi fenomenologica del processo franoso, scaturita dall'analisi di molteplici dati (sito, laboratorio, fotointerpretazione multi-temporale, monitoraggi geotecnici e topografici), ha definito la natura clima-indotta del processo franoso, con presenza di quote piezometriche molto elevate anche in profondità, confermata anche dalla modellazione

numerica svolta (analisi idraulica bidimensionale di filtrazione + analisi di stabilità all'Equilibrio Limite LEM).

La frana di Serra di Buda è uno scorrimento di roccia, prevalentemente di tipo traslativo, con profondità massima di circa 60 m, che coinvolge rocce gneissiche dal profilo di alterazione complesso ed è controllata da faglie. La velocità varia da 0,4 a 25 mm/giorno e sono note 18 segnalazioni e registrazioni di attivazioni, determinando la chiusura nell'inverno 1998-1999 della Strada Statale 660 (Acri-CS). Le conoscenze acquisite mediante la rete di monitoraggio integrata (piezometri, capisaldi GPS, inclinometri, quadrilateri e prismi misurati con stazione totale) hanno permesso di definire il modello geologico e di evoluzione della frana e di individuare un modello geotecnico per simulare il comportamento tensio-deformativo del versante.

La frana di Scillato, infine, è una colata di terra che il 10 aprile 2015 ha causato il collasso di alcuni piloni del viadotto Imera 1 (autostrada Catania-Palermo - A19) con il conseguente cedimento di una carreggiata del viadotto stesso e fortissimi disagi sulla rete stradale della regione Sicilia. Il sistema di monitoraggio integrato ha consentito di acquisire informazioni fondamentali per la progettazione degli interventi di bonifica del versante e delle opere fondazionali del nuovo viadotto (monitoraggio conoscitivo), di presidiare scrupolosamente il versante durante la lunga cantierizzazione per garantire condizioni di sicurezza (monitoraggio di controllo) e consentirà, a medio-lungo termine, di verificare durante l'esercizio della nuova opera e del nuovo assetto del versante l'efficacia degli interventi messi in atto (monitoraggio a presidio dell'esercizio dell'opera).

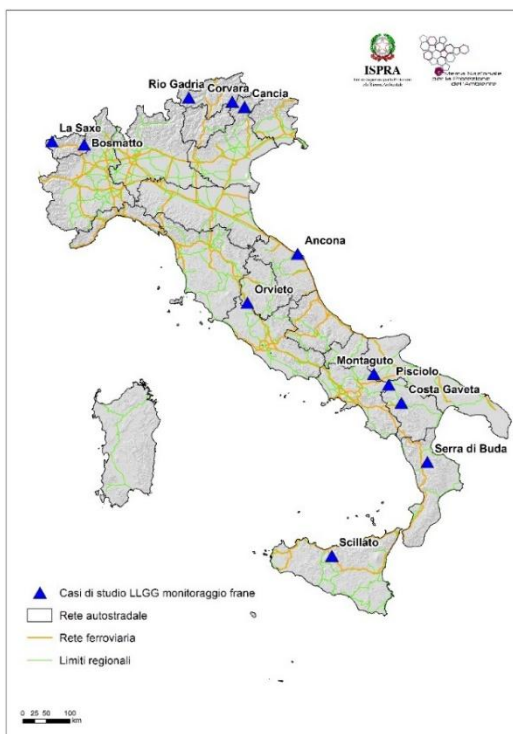


Figura C.1 – Casi di studio Linee Guida

Tabella C.1 - Elenco dei casi di studio

N.	UBICAZIONE	TIPOLOGIA DI MOVIMENTO	SISTEMA DI MONITORAGGIO
1	La Saxe (AO, Valle d'Aosta)	Frana complessa	Sistemi topografici, Stazione Totale Robotizzata, sistema Gb-InSAR, inclinometri e piezometri di tipo DMS, GNSS, sistema di detezione automatica di crolli tramite computer vision
2	Bosmatto (AO, Valle d'Aosta)	Frana complessa	Stazione meteorologica, rete GPS, rete di capisaldi topografici, estensimetri a filo, fotocamere automatiche, piezometro, sistema Gb-InSAR, sistema di monitoraggio radar satellitare mediante costellazione Sentinel 1
3	Corvara (Provincia Autonoma di Bolzano)	Scivolamento rotazionale	Monitoraggio geochimico delle acque superficiali e sotterranee, monitoraggio idraulico (afflussi meteorici e portata), strumentazione in foro (inclinometri, piezometri, TDR, trasduttori di pressione), GPS, monitoraggio interferometrico PS-InSAR basato su immagini ERS-1, ERS-2, Radarsat, CosmoSkyMed e J-ERS
4	Rio Gadria (Provincia Autonoma di Bolzano)	Colamento rapido	Rilievi topografici da terra (stazione topografica e TLS) e tramite fotogrammetria da aeromobile, pluviometri, sensori di livello radar, reti di geofoni, telecamere, sensori per la misura dell'umidità del terreno
5	Cancia (BL, Veneto)	Colamento rapido	Pluviometri, anemometri, termometri, sensori di livello radar e a ultrasuoni, geofoni, cavi a strappo, fotocamera, videocamera
6	Rupe di Orvieto (TR, Umbria)	Scivolamenti traslativi	Rilievi laser scanner, rete geodetica per misure con teodoliti/stazioni totali robotizzate e ricevitori GNSS, misure InSAR da satellite, estensimetri multibase, inclinometri, piezometri Casagrande e a tubo aperto, stazione meteo termo-pluviometrica
7	Ancona (AN, Marche)	Frana complessa	Monitoraggio di superficie (stazioni totali robotizzate, GPS, clinometri), monitoraggio geotecnico (DMS)
8	Montaguto (AV, Campania)	Colamento lento	Rilevi LiDAR, stazioni totali robotizzate, sistema GB-InSAR, stazione meteorologica, tubi inclinometrici, celle piezometriche a corda vibrante
9	Costa della Gaveta (PZ, Basilicata)	Colamento lento	Inclinometri con sonde mobili e sonde servoaccelerometriche, rete GPS permanente e periodica
10	Pisciolo - Melfi (PZ, Basilicata)	Scivolamenti rotazionali e traslativi	Inclinometri, celle piezometriche, GPS
11	Serra di Buda (CS, Calabria)	Scivolamento traslativo	Piezometri, capisaldi GPS, inclinometri, quadrilateri e prismi misurati con stazione totale
12	Scillato (PA, Sicilia)	Colamento lento	Pluviometri, inclinometri, piezometri, stazioni totali robotizzate, sistemi TInSAR

C.1 FRANA DI LA SAXE (AO, VALLE D'AOSTA)

C.1.1 Inquadramento del sito

La frana del Mont de La Saxe, nel Comune di Courmayeur, è classificabile come frana complessa, impostata su una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) che occupa l'intero versante Nord Ovest della dorsale del M. de la Saxe. Si estende tra una quota minima di 1400 m ed una massima di 1850 m s.l.m. L'area interessata dal fenomeno franoso, secondo le stime attuali, ha una superficie di 150.000 m² circa, con una larghezza massima di 350 m ed una lunghezza massima di 500 m. Il volume complessivo che può essere coinvolto nel collasso è di circa 8.000.000-8.500.000 m³.

Le principali litologie sono rappresentate da calcescisti filladici a solfuri, con livelli ricchi in grafite, scisti filladici ricchi in grafite e filladi (Perello *et alii*, 1999). La copertura quaternaria è composta da detriti di frana, detrito eluvio-colluviale e, al piede del versante, da depositi glaciali ed alluvionali.

La frana è divisa in almeno tre domini cinematici a comportamento, volumi ed attività diversi. La dinamica della frana è controllata da accelerazioni primaverili legate soprattutto alla fusione nivale. Storicamente, le maggiori riattivazioni critiche sono state registrate nella primavera 2013 e 2014, con un collasso complessivo di 450.000 m³ di materiale. Dal 2015 al 2019 con esecuzione dei drenaggi non ci sono state ulteriori fasi parossistiche. Le indagini geognostiche e geotecniche, e i dati di monitoraggio indicano che la superficie di svincolo principale del fenomeno è situata a profondità variabili tra i 60 ed i 90 m dal piano di campagna.

Le simulazioni di *runout* indicano la messa in posto di un accumulo di frana con spessori massimi di circa 40 m, e velocità massime di messa in posto di circa 48 m/s, con energie d'impatto conseguenti (Crosta *et alii*, 2014).

C.1.2 Sistema di monitoraggio

I primi monitoraggi discontinui sono stati svolti tra il 2002 e il 2009 con sistemi topografici. Nel 2009 è stato

attivato un sistema di monitoraggio continuo e ridondante composto da stazione totale, Gb-InSAR e GNSS. Attualmente, la frana è monitorata da una rete integrata costituita da stazione totale (RTS), Gb-InSAR, inclinometri e piezometri di tipo DMS (sonde multiparametriche) e ricevitori GNSS in continuo (Figura C.2) più un sistema di detezione automatica di crolli tramite *computer vision* (Geosurveyor). Le serie storiche dei dati di monitoraggio per quel che riguarda le reti GB-SAR, RTS e GNSS risalgono con continuità al 2009.

L'intervallo di acquisizione dei dati è orario o sub-orario in funzione dello stato di attività della frana e può raggiungere, sulla rete GB-InSAR, intervalli di circa 1 minuto. Il sistema è operativo 7/24/365. Tutti i dati sono assunti in continuo e trasmessi al centro regionale di monitoraggio frane (CRM) via Hiperlan, ridondata con backup satellitare, dove vengono interpretati. Il sistema DMS trasmette i dati via GPRS, assicurando un ulteriore livello di backup. Presso il CRM i dati vengono raccolti da appositi software di elaborazione (CESI-Eydenet, Indaco e Indacoweb) ed interpretati.

Il passaggio tra i vari livelli di allerta si basa su di un sistema di supporto alla decisione, che integra al suo interno le informazioni derivanti dai diversi sistemi di monitoraggio, sia relativamente agli spostamenti superficiali che a quelli in profondità (DMS), ai livelli di falda, e ai dati di fusione nivale attesa. La prima attivazione del processo decisionale è data dal superamento di soglie di velocità oraria sulle 24 ore, rilevata dalla rete "master", che è la rete RTS. Il CRM provvede poi a diramare le allerte al Comune e alla Protezione civile regionale per le attivazioni dei piani di emergenza.

L'insieme del sistema, gestito dalla Regione, è sottoposto ad auditing periodico dal *Geohazard Monitoring Group* (GMG) del CNR-IRPI. Tutte le accelerazioni e i superamenti di soglia sono automaticamente diramati agli operatori.

C.1.3 Risultati e discussione

Il corpo di frana è composto da diversi domini cinematici con velocità diverse. Il collasso totale del corpo di frana

potrebbe causare la distruzione di due villaggi di alta importanza turistica e impianti funiviari (ca. 1 miliardo di euro di valore immobiliare) nonché dell'autostrada A5 e del traforo del Monte Bianco, con una perdita giornaliera per l'economia italiana di circa 1,5-2 milioni di euro.

Nel 2013-2014, il collasso di uno dei domini cinematici (Figura C.3) ha portato all'evacuazione degli abitanti dei villaggi per circa 80 gg. complessivi.

Come accennato, le serie storiche di monitoraggio evidenziano accelerazioni legate alla fusione primaverile del manto nevoso e scarsa sensibilità alle precipitazioni. Il sistema di monitoraggio dell'andamento della superficie di falda in profondità conferma l'innalzamento della falda alla quota del piano principale di scorrimento e il conseguente incremento degli spostamenti.

La disponibilità di un sistema di monitoraggio integrato ha permesso di correlare gli spostamenti superficiali e in profondità con l'andamento stagionale della falda e i parametri meteorologici (temperature, pioggia, altezza neve, ecc.) (Figura C.5).

La presenza di una rete di monitoraggio sia superficiale che in profondità permette inoltre di valutare la potenza del settore effettivamente mobilitato e di definire i volumi soggetti a collasso, le rispettive aree d'invasione e, di conseguenza, i settori di fondovalle da evacuare. Ciò ha permesso, nel 2014, di limitare la chiusura della viabilità primaria solamente in casi di estrema attività della frana, limitando le perdite economiche legate alla chiusura del traffico internazionale.

La possibilità di visualizzare i parametri in sinottico ha permesso inoltre di fare correlazioni incrociate, in modo da indirizzare, controllare e verificare le attività di drenaggio che sono state intraprese dal 2012, al fine di rallentare l'evoluzione della frana. Inoltre, l'analisi dei dati ha permesso d'individuare precursori di evento utili ad irrobustire la procedura di monitoraggio in termini previsionali (innalzamento zero termico/fusione neve/afflusso acque nel corpo di frana, Bertolo *et alii*, 2017).

Le attività di drenaggio sub-orizzontale del corpo di

frana hanno permesso di drenare fino a 7000 m³/giorno di acqua, con il conseguente sensibile rallentamento dell'evoluzione del fenomeno, rilevata sempre attraverso la rete di monitoraggio (UNIMIB, 2019).

La disseminazione dei dati agli utenti esperti (tecnici, decisori ecc.) e alla popolazione avviene seguendo una strategia di comunicazione elaborata da CNR IRPI GMG e avviene via web, tramite un portale dedicato e tramite bollettini di aggiornamento periodici mensili e trimestrali pubblici nonché attraverso un'apposita monografia operativa (Giordan *et alii*, 2015; CNR-IRPI, 2020).

C.1.4 Riferimenti bibliografici

Perello P., Piana F., Martinotti G. (1999) Neo-Alpine structural features at the boundary between the Penninic and Helvetic domains (Prè S. Didier-Entrèves, Aosta Valley, Italy). *Eclogae Geol. Helv.*, 92, pp.347-359.

Crosta G.B., Di Prisco C., Frattini P., Frigerio G., Castellanza R., Agliardi F. (2014) Chasing a complete understanding of the triggering mechanisms of a large rapidly evolving rockslide. *Landslides*, 11(5):747-764.

Giordan D., Manconi A., Allasia P., Bertolo D. (2015) Brief Communication: On the rapid and efficient monitoring results dissemination in landslide emergency scenarios: the Mont de La Saxe case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(9), (2009-2017).

UNIMIB (2019) Aggiornamento degli scenari di evento per la frana del Mont de la Saxe (Comune di Courmayeur), a seguito dell'evoluzione recente del versante e delle opere di protezione realizzate. Documento Interno Regione Valle D'Aosta. Servizio geologico.

Bertolo D., Thuegaz P., Paganone M. (2017) The Mont de La Saxe Landslide (Valle d'Aosta-Italy) - Evolution a large alpine landslide controlled by different hydrogeological components. 4th Slope Tectonics Conference - Kyoto 14-18 Oct. 2017. Conference Paper.

CNR-IRPI (2020) Frana del Mont de La Saxe -

Monografia operativa. Documento Interno Regione
Valle D'Aosta. Servizio geologico.

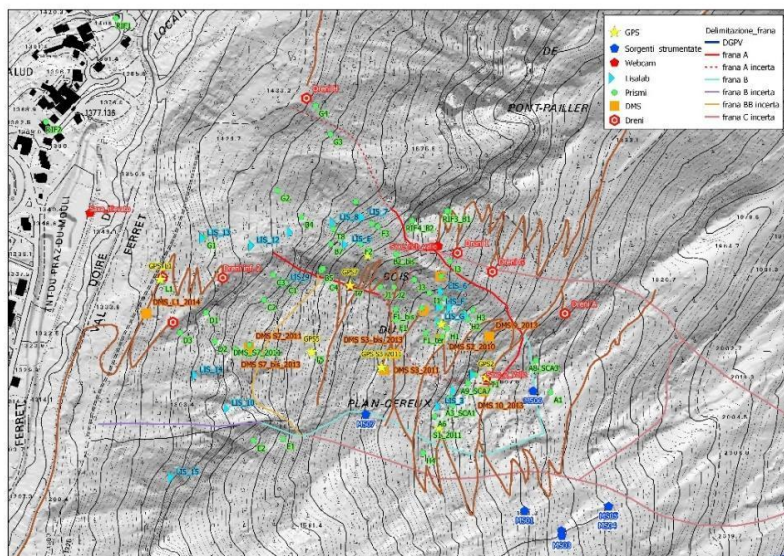


Figura C.2 - Cartografia della frana del Mont de La Saxe e ubicazione della strumentazione di monitoraggio installata (CNR-IRPI - 2020)



Figura C.3 - Ripresa aerea del versante interessato dalla Frana del Mont de La Saxe (2017) con indicazione dei principali abitati e delle infrastrutture a rischio (Fonte: Regione Aut. Valle d'Aosta - Archivio attività geologiche)

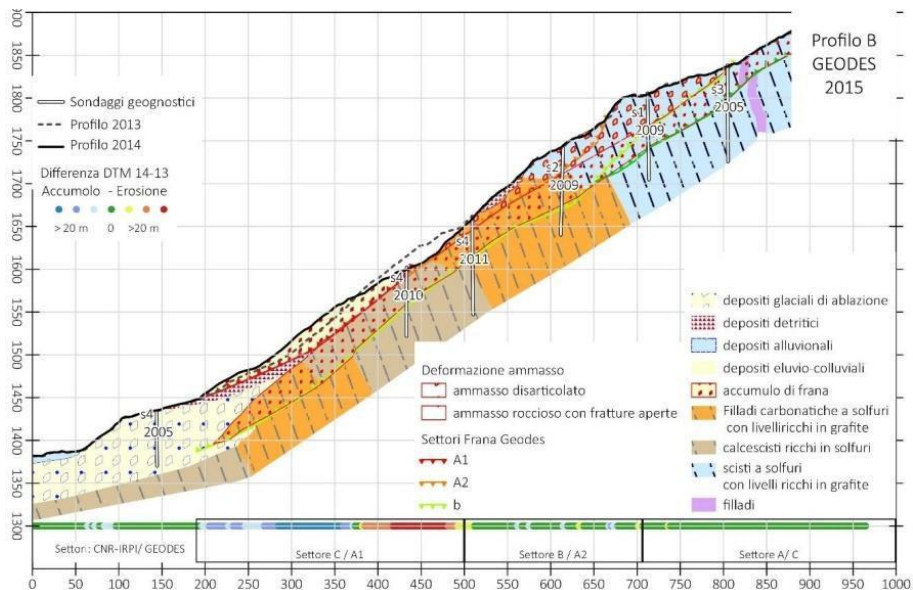


Figura C.4 - Sezione rappresentativa della frana con indicazione di alcuni dei sondaggi strumentati con sonde multiparametriche DMS. Le superfici di scorrimento A 1 e A 2 individuano i piani di scorrimento principali della frana. Sono anche individuati i profili prima e dopo l'attivazione del 2014 (Fonte: Geodes, 2015, mod. da CNR IRPI, 2020)

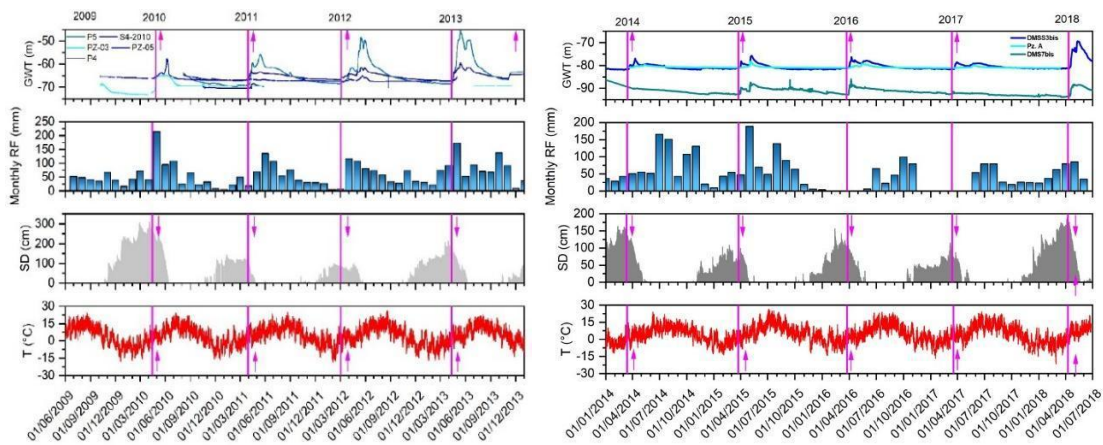


Figura C.5 - Diagramma delle serie storiche dei livelli piezometrici, delle precipitazioni mensili, della fusione nivale e delle temperature. Sono indicati con frecce e linee lilla gli istanti, di massima, in cui si osserva l'inizio dell'oscillazione piezometrica (UNIMIB 2019)

C.2 FRANA DI BOSMATTO (AO, VALLE D'AOSTA)

C.2.1 Inquadramento del sito

L'area studiata è situata sul versante sinistro nella parte alta della valle glaciale del Lys, in corrispondenza della frazione di Bosmatto, circa 2,5 km a sud dell'abitato di Gressoney Saint Jean. Il bacino del torrente Letze, affluente di sinistra del Lys, occupa una superficie di circa 1,5 km² e si sviluppa in direzione E-O, raccordando verso est Punta Rossa o Hore (che rappresenta la maggior elevazione raggiunta a quota 2750 m s.l.m.) e verso ovest la chiusura del bacino, situata a circa 1460 m s.l.m., in corrispondenza all'apice del conoide sviluppato nel fondovalle del torrente Lys. All'interno del bacino del torrente Letze, sono presenti due distinti movimenti franosi: la frana di Bosmatto, in sinistra idrografica e la frana di Stadelte in destra idrografica (GEODES, 2010).

La frana di Stadelte, attivatasi nel corso dell'estate 2002, è ubicata nel settore medio basso del bacino idrografico. L'attivazione di questo fenomeno sembra sia da ricondurre all'azione erosiva al piede ad opera del torrente Letze stesso. Viene ipotizzato il coinvolgimento del solo deposito superficiale e non del substrato roccioso, con una superficie di movimento posta all'interfaccia deposito-substrato roccioso. Lo spessore della massa in movimento viene indicato come variabile tra i 5 e i 20 m, con una riduzione degli spessori verso valle.

La frana di Bosmatto è una frana complessa, le cui caratteristiche non sono ancora totalmente comprese, ipotizzando un parziale coinvolgimento del substrato roccioso e un'evoluzione sostanzialmente indipendente dal regime delle precipitazioni (piovose e nevose). Il versante può essere suddiviso in due settori con diverso stato di attività: il settore meridionale, inattivo, è completamente vegetato e coperto da alberi ad alto fusto; il settore settentrionale, attivo, (quello qui inteso come la "frana del Bosmatto"), che si estende longitudinalmente per almeno 500 m e con una larghezza massima di circa 300 m, manca di vegetazione e appare come una massa altamente

caotica di grandi blocchi sconnessi e frammenti di substrato roccioso metamorfico all'interno di una matrice sabbioso-ghiaioso. Il volume stimato è dell'ordine dei 2,5-3,5*10⁶ m³. Le conoscenze sulla frana di Bosmatto si basano essenzialmente sui risultati degli studi effettuati a seguito dell'evento del 15 ottobre 2000, quando piogge intense e prolungate (330 mm nel periodo 11-16 ottobre) innescarono un *debris flow* di 150.000 m³ nella parte terminale della frana e la formazione di un'estesa nicchia di distacco perimetrale a circa 2100 m s.l.m.

Da un punto di vista geologico il bacino del Letze è interamente incluso nella zona Sesia-Lanzo, una delle due unità strutturali appartenenti al Sistema Austroalpino. All'interno della zona Sesia-Lanzo si riconoscono due elementi: un elemento superiore (Zona Dioritico-Kinzigitica), e uno inferiore (Complesso dei Micascisti Eclogitici di Punta Plaida). Il bacino del Letze risulta ubicato prevalentemente all'interno dei Micascisti di Punta Plaida, in prossimità del contatto con la Zona Dioritico-Kinzigitica.

C.2.2 Sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio della frana di Bosmatto è stato realizzato dalla Regione Valle d'Aosta a partire dall'autunno del 2001, con successive integrazioni. I dati sono acquisiti con frequenza variabile a seconda della rete di riferimento. Il sistema comprende attualmente (Figura C.6):

- una stazione meteorologica costituita da un pluviometro, un termometro, un barometro, un igrometro e un nivometro automatizzati con invio dei dati, acquisiti con cadenza oraria, al centro di acquisizione, sfruttando il ponte radio di Weissmatten (Comune di Gressoney-Saint-Jean) e la rete *ethernet* della Protezione Civile;
- una rete GPS ad acquisizione automatica, comprendente due stazioni poste nel corpo di frana principale, una a controllo della frana di "Stadelte" (settore di versante parzialmente coinvolto dall'evento alluvionale dell'ottobre 2000), e una di riferimento ubicata presso il ponte radio di Weissmatten, le cui posizioni piano-altimetriche

- vengono inviate al centro di acquisizione dati 4 volte al giorno;
- una rete di 7 capisaldi topografici distribuiti sul settore di versante interessato dalla frana, le cui posizioni vengono determinate annualmente con strumentazione GPS, consentendo la misura degli spostamenti superficiali nelle tre direzioni con elevata precisione;
 - 3 estensimetri a filo installati a cavallo delle fratture perimetrali principali del settore di Stadelte e 4 nel settore più attivo della frana di Bosmatto;
 - 3 fotocamere automatiche che consentono di scattare foto in maniera automatica e con cadenza predeterminata relativamente ad una inquadratura fissa per registrare l'evoluzione morfologica nel tempo. Le zone osservate sono la parte frontale da cui si è originata la colata detritica dell'ottobre 2000, il settore medio alto, l'intero settore di Stadelte;
 - un piezometro ad acquisizione oraria all'interno del foro di sondaggio realizzato nella parte terminale della frana, i cui dati vengono inviati mediante modem GSM direttamente al centro di acquisizione presso la Protezione Civile;
 - un sistema GBInSAR, installato in loc. Weissmatten, sulla sponda destra del Lys attivo dall'ottobre 2016 per circa 12 mesi con frequenza di acquisizione di 2 minuti;
 - un sistema di monitoraggio *radar* satellitare, attivo dal marzo 2018, per la misura delle deformazioni superficiali mediante la costellazione Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea, con frequenza di aggiornamento del dato ogni 12 giorni.

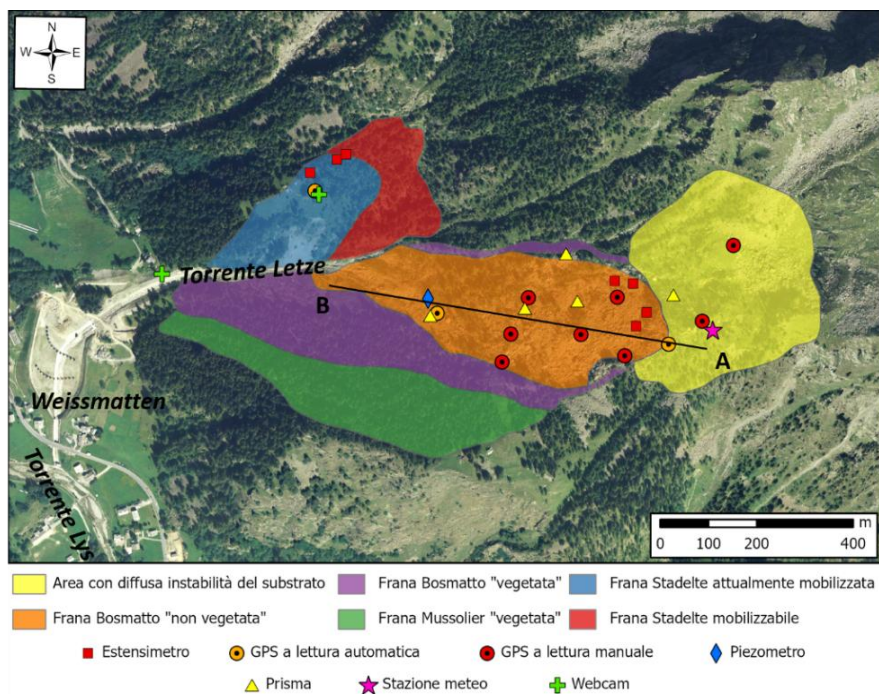


Figura C.6 - Mappa relativa all'ubicazione delle reti di monitoraggio installate sulla frana della Bosmatto; i poligoni di frana sono ridisegnati sulla base del lavoro redatto da GEODES (Maggio 2010). Basemap ortofoto satellitare. Modificata da Carlà *et alii*, 2018

C.2.3 Risultati e discussione

A partire dall'autunno del 2001 la rete di monitoraggio ha fornito informazioni importanti sugli spostamenti superficiali. In linea generale, sulla frana di Bosmatto gli strumenti di misura hanno registrato una velocità di spostamento lineare, con tassi di spostamento che variano tra i 6 mm e i 1,5 cm /anno, senza alcuna evidente correlazione con l'andamento delle precipitazioni piovose e nevose né su base stagionale né pluriennale. Nel caso della frana di Stadelte, invece, i dati evidenziano un forte andamento stagionale e l'evoluzione della frana è fortemente condizionata dalle precipitazioni piovose e nevose, con riattivazioni tardo primaverili.

Nonostante la presenza di una robusta rete di monitoraggio integrato, che ha visto nel corso degli anni numerosi ampliamenti con strumentazione a terra, il numero di punti di misura è ancora insufficiente per interpretare la cinematica del versante nel suo complesso, anche perché la natura caotica del materiale franato, composto da blocchi singoli con un alto grado di libertà, può portare alla registrazione da parte della strumentazione *in situ*, stazioni GPS *in primis*, di spostamenti che non riflettono la deformazione effettiva della frana. La disponibilità, a partire dal marzo 2018, di dati satellitari Sentinel-1 elaborati con tecnica multi-interferometrica SqueeSAR, ha rappresentato un valido supporto per l'analisi del

complesso *pattern* deformativo (Carlà *et alii*, 2018) della frana di Bosmatto.

La porzione sommitale della frana di Bosmatto (*i.e.*, quella non vegetata) risulta infatti aver una buona copertura di dati PS (Figura C.7). In particolare, sono presenti 50 punti misura in orbita discendente e 40 in orbita ascendente. Le restanti porzioni della frana di Bosmatto non sono coperte da dati interferometrici a causa della presenza di boschi. Come mostrato in Figura C.7, i dati in orbita ascendente e discendente evidenziano notevole differenza nelle velocità misurate, sia come modulo che come segno. Infatti, mentre i dati discendenti registrano velocità che raggiungono i -40 mm/anno, i punti PS in orbita ascendente mostrano velocità mediamente all'interno della soglia di stabilità ($\pm 2,5$ mm/anno), con valori massimi localmente fino a +6 mm/anno.

Si ricorda che i segni opposti delle velocità nelle due orbite sono coerenti con la presenza di movimento lungo il versante, in questo caso con direzione principale WNW. Inoltre, la differenza nei moduli è da correlare con la geometria (esposizione e pendenza) del versante rispetto alle modalità di acquisizione del satellite Sentinel-1 nelle due orbite. L'orbita discendente e l'orbita ascendente misurano rispettivamente circa il 90% e il 20% del movimento reale sull'intero corpo di frana.

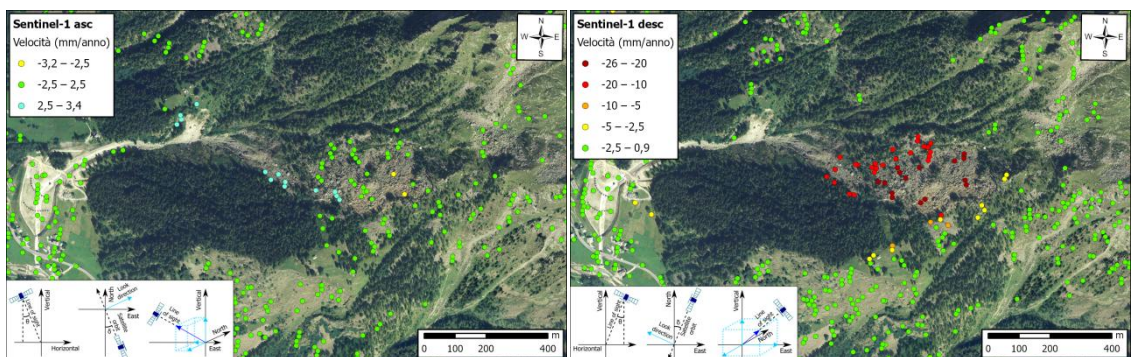


Figura C.7 - Dati Sentinel-1 (2014-2020) per frana di Bosmatto. A sinistra geometria ascendente, a destra geometria discendente. Nei riquadri sono riportate le serie temporali di spostamento dei punti di misura cerchiati in nero

L'analisi delle serie temporali di spostamento, il prodotto più avanzato dell'analisi interferometrica, conferma che il movimento della frana di Bosmatto è pressoché costante nel tempo, senza accelerazioni o decelerazioni di sorta.

Nell'interferometria satellitare la disponibilità di dati acquisiti nelle due diverse orbite offre l'opportunità di calcolare le componenti est-ovest e verticale del vettore reale di movimenti, attraverso un ricampionamento dei dati su griglia regolare (nel caso della frana di Bosmatto 80 x 80 m).

Ulteriori informazioni sul *pattern* deformativo della frana di Bosmatto si possono ottenere analizzando il rapporto tra la componente est-ovest e quella verticale, che aumenta da monte verso valle (Figura C.8), il che sta ad indicare come la componente orizzontale diventi via via predominante muovendosi dalla zona di corona verso il piede della frana. Questo aspetto è ben

rappresentato in Figura C.8, dove vengono riportati i vettori di movimento lungo la sezione di Figura C.6.

I vettori nell'area del coronamento principale immergono con un angolo molto alto per poi diventare, muovendosi verso il piede della frana, gradualmente sub-paralleli alla superficie del versante. Come prevedibile, a causa della scarsa capacità nella misura della componente orizzontale, i dati InSAR presentano moduli di deformazione minori e angoli di immersione maggiori rispetto ai rispettivi punti GPS.

Sulla base dell'analisi integrata dei dati di monitoraggio disponibili, si può dedurre che la frana del Bosmatto è una grande frana in roccia con una deformazione che coinvolge anche il *bedrock* fino ad una profondità di alcune decine di metri. La graduale rotazione degli angoli di immersione dei vettori di movimento indica come l'instabilità registrata sia coerente con meccanismo roto-traslazionale.

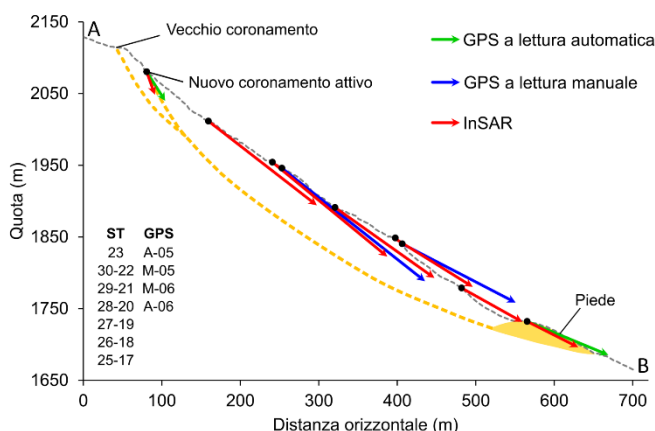


Figura C.8 - Sezione longitudinale della frana di Bosmatto, ricostruita tramite l'analisi dei vettori di movimento. La linea tratteggiata in arancione delinea il meccanismo roto-traslazionale della frana, mentre il poligono arancione indica la transizione tra il piede della frana e l'area sorgente dei *debris flows*. Da Carlà *et alii*, 2018

C.2.4 Riferimenti bibliografici

Carlà T., Tofani V., Lombardi L., Raspini F., Bianchini S., Bertolo D., Thuegaz P., Casagli N. (2019) Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. *Geomorphology*, 335, 62-75.

GEODES (2010) Studio del movimento franoso che interessa il bacino del Torrente Letze in località Bosmatto Comune di Gressoney Saint Jean. Relazione conclusiva.

C.3 FRANA DI CORVARA (PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO)

C.3.1 Inquadramento del sito

La frana di Corvara è oggetto di studio da parte della Provincia Autonoma di Bolzano dal 1997 ad oggi e si estende lungo i pendii che da Passo Campolongo portano verso l'abitato di Corvara in Badia; questo tipo di fenomeno è molto diffuso nell'area e coinvolge i pendii costituiti dai prodotti di disaggregazione dei sedimenti bacinali a carattere torbido (Formazione di La Valle, Formazione di San Cassiano) e le ialoclastiti della Formazione di Fernazza. L'assetto giaciturale degli strati di queste formazioni lungo il versante risulta reggipoggio/traverpoggio. Il movimento può essere definito essenzialmente come un ampio fenomeno di stile complesso, classificabile come un profondo scorrimento roto traslazionale attivo a cinematica lenta ed è costituito da scivolamenti e colate in terra. Dal punto di vista morfologico, la frana si compone di ben distinti settori di alimentazione, trasporto ed accumulo ed è suddivisibile in porzioni distinte in funzione della morfologia e del grado di attività. Le superfici di scivolamento sono multiple e le più profonde raggiungono i 30 m di profondità. L'asse maggiore della frana è lungo più di 3,3 km mentre la sezione di trasporto più larga misura all'incirca 300 m. Gran parte del movimento avviene per spostamenti traslativi alimentati da colate attive più superficiali, che giungono principalmente dai settori più alti. La distribuzione di attività è retrogressiva alla corona e ai fianchi delle aree di origine e si va allargando leggermente ai lati nella zona di accumulo. I movimenti dell'evento di frana sono iniziati già 7500 anni fa e continuano fino ad oggi.

La pericolosità del fenomeno è data dalla possibilità di ostruzione degli alvei dei torrenti Rutorto e Rio Chiesa e conseguente possibile innesco di colamenti rapidi in alveo e da un potenziale avanzamento del piede della frana verso l'abitato di Corvara.

C.3.2 Sistema di monitoraggio

La Provincia Autonoma di Bolzano ha finanziato negli anni lo studio di questo fenomeno all'Università di Modena e al CNR-IRPI di Padova e ha collaborato nelle indagini nel corso degli anni. Dal 2010 Eurac Research con il progetto *Lawina* finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana è entrata a far parte del gruppo di lavoro.

Tra il 1998 e il 2003 è stata condotta una importante campagna di indagine consistente in rilevamento geologico, geomorfologico, geomeccanico, sondaggi, indagini geofisiche, indagini sismiche a riflessione e rifrazione e prove di laboratorio. In questo periodo sono state eseguite le datazioni dei vari corpi che costituiscono il movimento profondo fino a 120 m.

Nello stesso periodo è iniziata la campagna di monitoraggio che ha compreso un monitoraggio geochimico delle acque superficiali e sotterranee, un monitoraggio idraulico (afflussi meteorici e portata del Rutorto e del Rio Chiesa), un monitoraggio con strumentazione in foro di sondaggio: 7 tubi inclinometrici (alluminio, diam. 93 mm); 3 cavi TDR di grande diametro (diam. 1 +5/8 inch.); 8 trasduttori di pressione inseriti in tubi inclinometrici; 1 trasduttore di pressione inserito in piezometro di grande diametro sito al coronamento di frana, un monitoraggio interferometrico tramite l'analisi di immagini ERS 1, ERS 2, Radarsat, Cosmo SkyMed banda X e J-ERS Banda L.

L'uso dei tubi inclinometrici, dei cavi TDR, dei tubi piezometrici e dei trasduttori di pressione è stato finalizzato alla ricostruzione della profondità delle superfici di scorrimento nel corpo di frana, a definire il tasso di deformazione nel tempo e al monitoraggio delle fluttuazioni della falda all'interno del corpo di frana stesso.

La campagna di monitoraggio con punti fissi (GPS) è stata invece continuativa dal 2001 ad oggi. Essa è stata eseguita inizialmente con metodo RTK (*Real Time Kinematics*) utilizzando un rover fatto stazionare su una rete di 52 capisaldi e due ricevitori doppia frequenza con funzione di stazioni master ed in seguito con l'ausilio di stazioni GPS fisse.

Dal 2010 sono state associate al monitoraggio GPS tecniche di rilevamento interferometrico PS-InSAR basate su dati radar in banda X ad alta risoluzione. L'estensione e le caratteristiche morfologiche e dinamiche della frana, hanno suggerito l'uso di integrare i PS con dei *corner reflectors* (CRs) sperimentando riflettori normalmente impiegati nel settore nautico, notevolmente più piccoli e leggeri di quelli utilizzati per la banda C. Con il progetto *Interreg Slomove* poi sono stati sviluppati nuovi riflettori ad angolo migliori ed adeguati per l'utilizzo in condizioni alpine e con satelliti Cosmo Sky-med, muniti inoltre di un braccio per l'installazione di un'antenna GPS a trasmissione continua.

Poiché l'analisi della componente orizzontale risulta determinante per comprendere correttamente la dinamica del movimento sono stati analizzati gli effetti di distorsione geometrica per angoli di incidenza superiori a quelli generalmente utilizzati con questo sensore (vedi Figura C.11).

C.3.3 Risultati e discussione

Il lungo periodo ed i vari sistemi di monitoraggio utilizzati hanno permesso di suddividere il movimento in tre zone a diversa velocità di evoluzione: una zona sorgente con velocità massima di 12 cm/anno, una zona di trasporto con velocità nettamente superiori e un piede quasi fermo. L'utilizzo di più sistemi di monitoraggio ha permesso sia di acquisire diversi tipi di informazioni sul movimento (spostamenti orizzontali, verticali, puntuali, in continuo), sia di confrontare i vari sistemi di acquisizione e di conoscerne meglio i vantaggi ed i limiti. In particolare, l'utilizzo del monitoraggio GPS per l'intera durata dell'indagine permette il confronto con e tra gli altri sistemi di monitoraggio: l'integrazione delle informazioni puntuali ottenute con sistemi di monitoraggio in foro e la validazione dei risultati ottenuti con tecniche interferometriche e di telerilevamento. I dati acquisiti hanno permesso di eseguire infine un bilancio di massa

su tre sezioni del versante coinvolto dal fenomeno gravitativo (vedi Figura C.12). Da questa rappresentazione è stato possibile stimare un volume complessivo del corpo di frana di oltre 33 milioni di m³, con una parte attiva di oltre 25 milioni di m³. I volumi che transitano nella zona di trasporto e nella parte alta dell'accumulo sono stati stimati nell'ordine di 2800 m³/anno. Il trasporto in sospensione complessivo di Rutorto e Rio Chiesa è stato stimato in 70.000 m³/anno. I maggiori volumi trasportati rispetto a quelli transitati sono giustificabili dall'erosione torrentizia nell'area sorgente.

C.3.4 Riferimenti bibliografici

- Panizza M., Bollettinari G., Bonomi T., Cavallin A., Corsini A., De Amicis M., *et alii* (1998) Valutazione della pericolosità da frana nell'area di Corvara in Badia (Dolomiti). In atti conv. "Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo", Accademia Nazionale dei Lincei (pp.55-56). Roma: Accademia Nazionale dei Lincei.
- Corsini A., Pasuto A., Soldati M., Zannoni A. (2005) Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment. *Geomorphology* 2005, 66, 149–165.
- Mulas M., Petitta M., Corsini A., Schneiderbauer S., Mair V., Iasio C. (2015) Long-term monitoring of a deep-seated, slow-moving landslide by mean of C-band and X-band advanced interferometric products: the Corvara in Badia case study (Dolomites, Italy). *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015, XL-7/W3, 827–829.
- Thiebes B., Tomelleri E., Mejia-Aguilar A., Rabanser M., Schögel R., Mulas M., Corsini A. (2016) Assessment of the 2006 to 2015 Corvara landslide evolution using a UAV-derived DSM and orthophoto. In *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*; CRC Press, 2016; pp. 1897–1902.



Figura C.9 - Schema del movimento e ubicazione dei punti di monitoraggio con strumentazione in foro

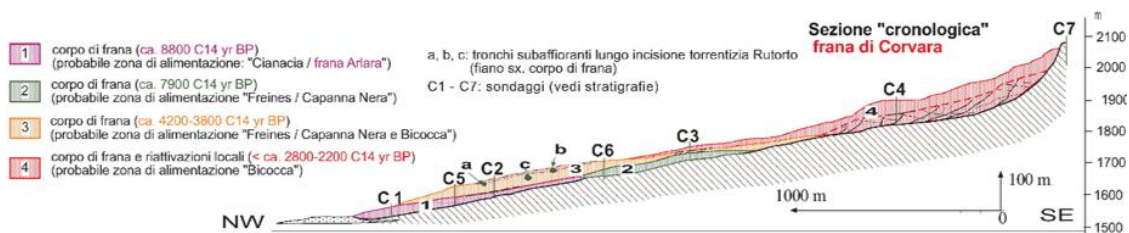


Figura C.10 - Sezione della frana basata su sondaggi, dati di monitoraggio e indagine geofisica, e sintesi di inclinometri. (1) superficie di taglio attiva, rivelato da inclinometri o TDR; (2) livello delle acque sotterranee, misurato da piezometri; (3) superficie taglio attiva; (4) Formazione di S. Cassiano, calcari, marme, argilliti; (5) Formazione di La Valle, siltiti/argilliti; (6) Formazione di La Valle, arenarie; (7) depositi alluvionali

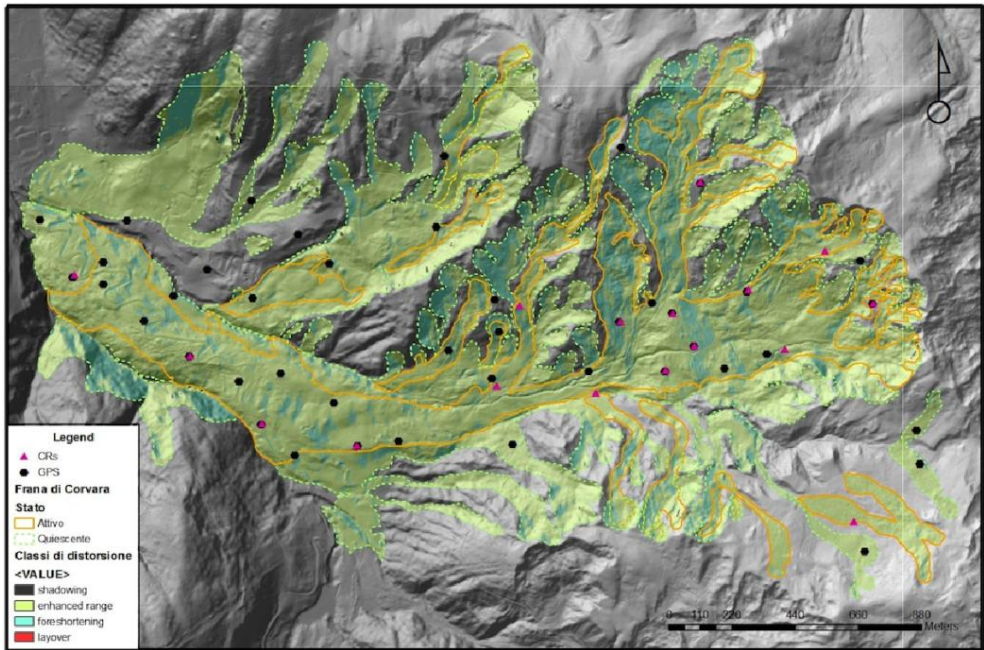


Figura C.11 - Rappresentazione delle distorsioni prospettive prodotte dal beam 14_H4 del CSK®, impiegato per l'acquisizione dei dati in banda X della frana di Corvara. Perimetrazioni delle aree attive e quiescenti e posizioni dei punti di monitoraggio GPS classico e dei punti GPS/CRs

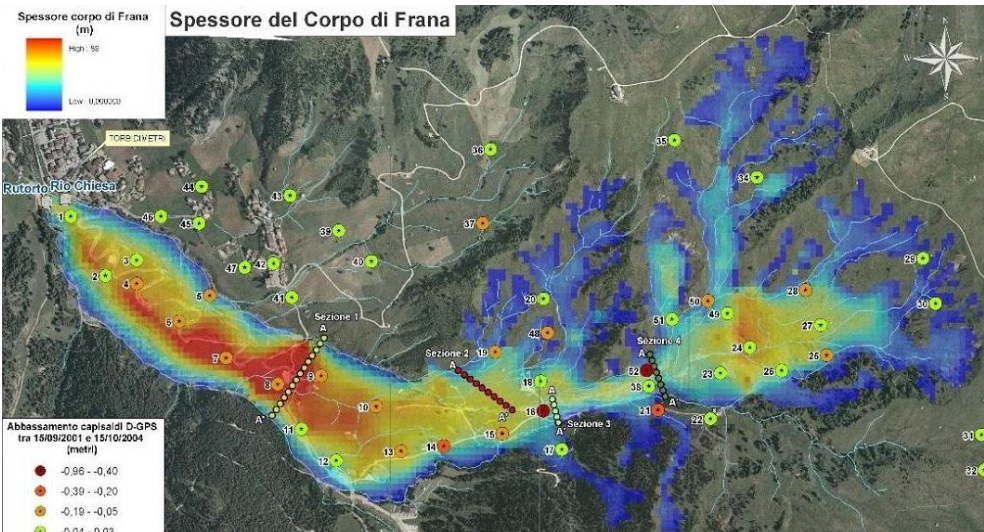


Figura C.12 - Schema del bilancio di massa

C.4 COLATA DETRITICA DEL RIO GADRIA (PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO)

C.4.1 Inquadramento del sito

Il bacino del Rio Gadria (Figura C.13) si trova sul versante sinistro della Val Venosta in Alto Adige; insieme al contiguo Rio Strimm ha edificato un grande conoide alluvionale (10 km²) (Brardinoni *et alii*, 2018).

Fra i due bacini, quello del Rio Gadria è sicuramente il più attivo in termini di frequenza degli eventi e di volume del sedimento trasportato. All'apice del conoide, dove si trova la confluenza del Rio Strimm, il bacino del Rio Gadria drena una superficie di 6,3 km² con quote comprese fra 1394 e 2945 m, ed una pendenza media del 79,1 %.

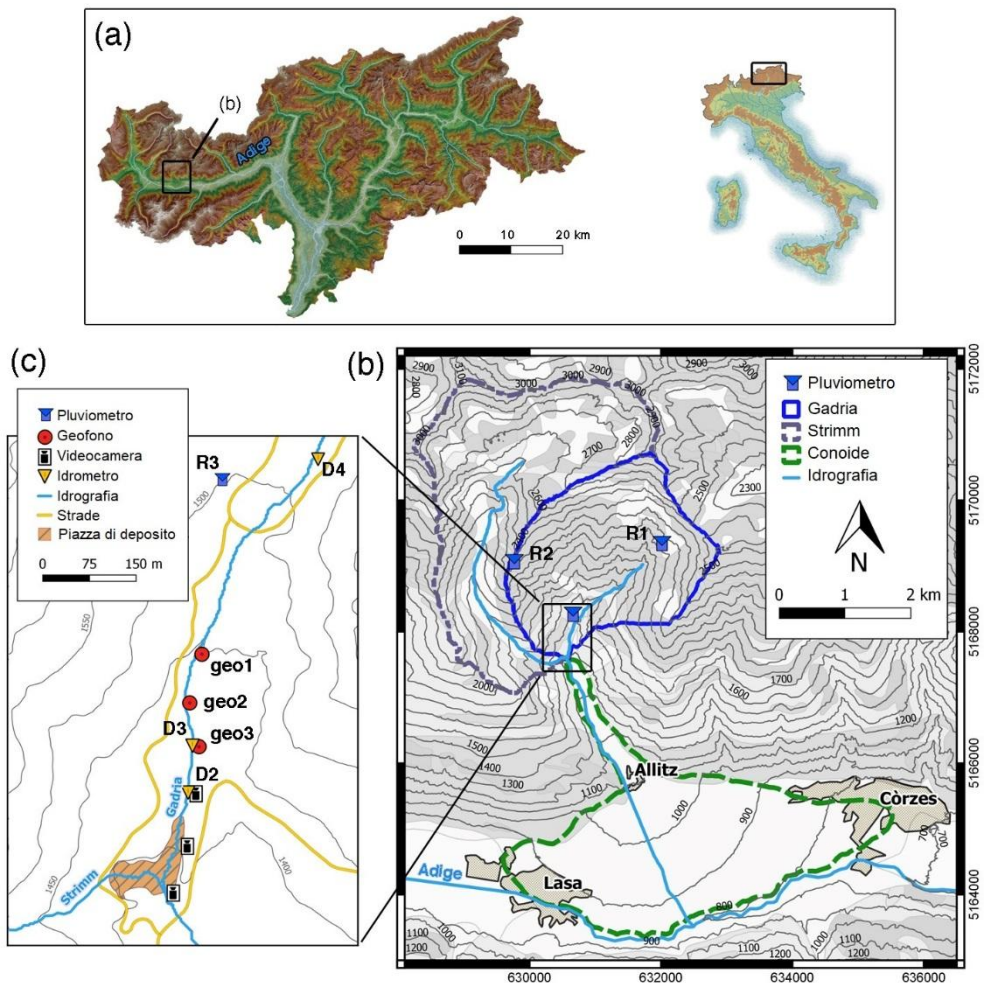


Figura C.13 - (a) Inquadramento geografico del Rio Gadria; (b) Corografia del bacino del Rio Gadria e del suo conoide alluvionale; (c) Strumentazione per il monitoraggio delle colate detritiche installata nella parte inferiore del bacino. Figura modificata da Coviello *et alii* (2021)

Le rocce presenti nel bacino del Gadria sono paragneiss e ortogneiss. L'abbondante sedimento prodotto dall'alterazione di queste rocce e gli spessi depositi quaternari, diffusamente interessati da processi erosivi e d'instabilità superficiale, unitamente alle forti pendenze dei versanti e dei canali nella parte superiore del bacino, determinano condizioni ottimali per il verificarsi di colate detritiche.

Il clima è quello proprio della parte interna della catena alpina, con inverni freddi ed estati fresche; le precipitazioni più abbondanti avvengono nei mesi estivi. Le precipitazioni medie annue, che nel fondovalle della Val Venosta sono decisamente modeste (480 mm in media a Lasa nel periodo 1989-2012) aumentano alquanto con la quota (662 mm in media fra il 1992 ed il 2012 ad un pluviografo posto a 1754 m).

I versanti del bacino, fino ad una quota di circa 2000 m, sono in gran parte coperti da foreste di conifere, in prevalenza abete rosso e larice. Alle quote più alte si trovano vegetazione erbacea e terreno nudo (detriti e rocce affioranti).

Per controllare le colate detritiche del Rio Gadria, che in passato hanno causato danni alle aree agricole ed agli abitati presenti sul conoide, sono stati realizzati interventi di sistemazione, consistenti in briglie di consolidamento, una piazza di deposito dotata di una briglia filtrante presso l'apice del conoide e un canale selciato nella parte terminale del corso d'acqua.

C.4.2 Sistema di monitoraggio

Gran parte della strumentazione installata dall'Agenzia per la Protezione Civile della Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige si trova nella parte inferiore del bacino, poco a monte dell'apice del conoide, dove è presente una piazza di deposito, dotata di una briglia filtrante, per la trattenuta del materiale trasportato dai torrenti Gadria e Strimm (Figura C.13). Nella parte superiore del bacino, in prossimità delle zone d'innesco delle colate detritiche, sono presenti altri due pluviografi, nonché altra strumentazione installata dalla Libera Università di Bolzano (sensori sismici) e dall'Università di Bologna (telecamere e sensori per la misura dell'umidità del terreno).

I pluviografi (Lambrecht mod. 15189), con meccanismo a bascula, hanno bocca da 200 cm² e risoluzione 0,2 mm; i dati sono registrati con frequenza di 1 minuto. Poiché il sistema è progettato per funzionare nei soli mesi estivi, nei quali avvengono le colate detritiche, i pluviografi non sono provvisti di sistemi di riscaldamento per la fusione della neve.

I sensori per la misura dei livelli sono radar VEGAPULS 68 installati verticalmente al centro del canale. L'angolo di apertura del sensore è pari ad 8°; l'intervallo di registrazione dei dati di livello è di 1 s.

Due reti di geofoni verticali (10-Hz, Geospace) sono installate lungo il canale principale con l'obiettivo di rilevare la propagazione delle colate detritiche. I geofoni si trovano sulla sponda sinistra e presentano vari modi di installazione (si veda la sezione A.3.2). Il segnale rilevato da ogni geofono è acquisito in prossimità del sensore stesso tramite dei convertitori Analogico-Digitale (AD) da 24-bit ad una frequenza di campionamento di 128 Hz. Ogni convertitore AD è collegato, via cavo, ad un datalogger che registra i dati. La prima rete è composta da 4 geofoni, due installati nel terreno e due nel corpo briglia, in corrispondenza delle due sezioni attrezzate con i sensori di livello. Questa prima rete geofonica è alimentata dalla rete elettrica a 220V ed un datalogger Campbell CR1000 registra il solo dato di ampiezza media dell'*envelope* del segnale su una finestra di un secondo. La seconda rete geofonica si trova nel tratto di canale immediatamente a monte ed è composta da tre geofoni installati su delle staffe metalliche rigide tassellate alle pareti di pozzetti in cemento. I dati sono registrati da un datalogger SIAP+MICROS DA9000, l'alimentazione è fornita tramite pannelli solari ed un sistema di comunicazione radio assicura il monitoraggio da remoto dello stato del sistema così come la ricezione di allarmi. In normali condizioni di deflusso liquido, questa rete registra un numero limitato di parametri al secondo (ampiezza dell'*envelope*, valore massimo e minimo del segnale grezzo, frequenza dominante, larghezza di banda); si rimanda a Coviello *et alii* (2019) per i dettagli.

Nella parte inferiore del bacino sono installate tre telecamere; una di queste, installata sulla sponda

sinistra, inquadra il tratto terminale del torrente a monte della piazza di deposito; le altre due inquadrano la piazza di deposito da posizioni differenti.

Tutta la strumentazione presente nella parte inferiore del bacino, con l'eccezione della stazione D4, del pluviografo e della seconda rete geofonica, è alimentata dalla rete elettrica ed è collegata via cavo al sistema di acquisizione dati alloggiato in una cabina posta in prossimità della stazione D2. La stazione D4, come pure il pluviografo ubicato nelle sue vicinanze e quelli presenti nella parte superiore del bacino, sono collegati via radio al sistema di acquisizione dei dati.

Il monitoraggio delle colate detritiche condotto con la strumentazione descritta sopra si integra con rilievi topografici del canale e della piazza di deposito condotti sia da terra – con stazione topografica e TLS – sia tramite fotogrammetria da aeromobile.

C.4.3 Risultati e discussione

Fra il 2011 ed il 2019 sono state registrate 12 colate detritiche, tutte avvenute nei mesi di giugno, luglio ed agosto. L'analisi delle nove colate detritiche avvenute fra il 2011 ed il 2017 (l'analisi degli eventi del 2018 e 2019 è in corso) mostra che la maggior parte delle colate detritiche si è articolata in più pulsazioni (*surge*). La velocità media fra le sezioni D3 e D2 (Figura C.13-c), determinata per le singole pulsazioni (25 dati), varia fra 1,0 e 5,7 ms⁻¹ (Coviello *et alii*, 2021), con un valore medio di 2,8 ms⁻¹. La durata delle colate detritiche è risultata compresa approssimativamente fra 15 e 50 minuti; i volumi trasportati variano fra 220 e 12.600 m³.

L'analisi delle piogge innescanti ha portato ad individuare una linea critica per l'accadimento di colate detritiche nel bacino del Gatria nello scatterogramma intensità-durata (Figura C.14).

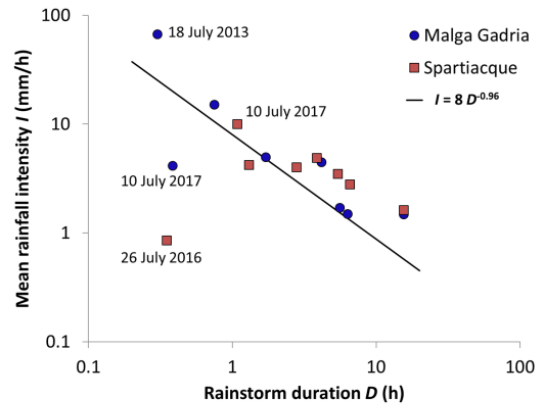


Figura C.14 - Grafico intensità-durata per le piogge associate all'innescamento di colate detritiche nel bacino del Rio Gatria. Spicca l'elevata intensità della pioggia responsabile dell'innescamento della colata detritica del 18 luglio 2013. Il solo dato disponibile per l'evento del 26 luglio 2016 si colloca ben al di sotto della linea critica individuata. La forte variabilità spaziale delle precipitazioni è testimoniata dai valori nettamente differenti osservati in occasione dell'evento del 10 luglio 2017. Figura modificata da Marchi *et alii* (2019)

La Figura C.15 fornisce un esempio dei dati registrati dalla stazione di monitoraggio installata nella parte inferiore del bacino (colata detritica del 15 luglio 2014).

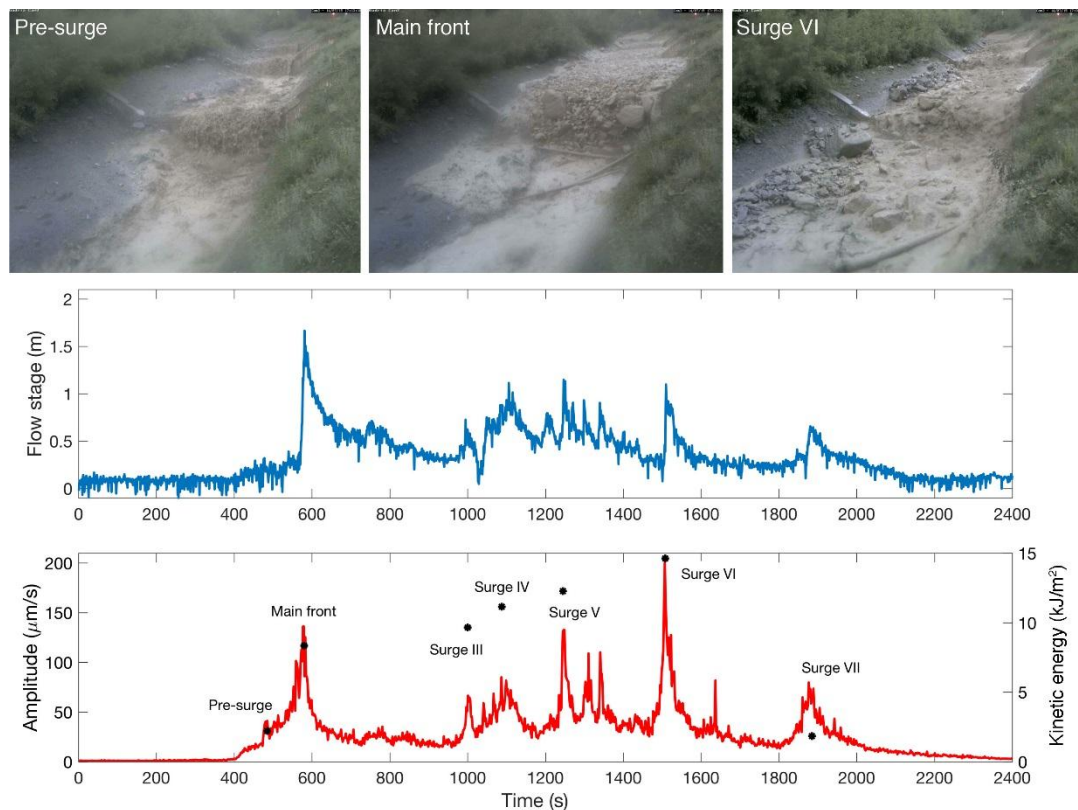


Figura C.15 - Esempio di dati registrati alla stazione di monitoraggio del Rio Gatria. Dall'alto al basso: immagini estratte dalle registrazioni video per tre diverse fasi dell'evento, idrogramma registrato da uno dei sensori di livello (radar) e andamento dell'ampiezza del segnale derivato dalle registrazioni dei geofoni. I punti neri nel grafico inferiore rappresentano l'energia cinetica per unità d'area calcolata dai dati sismici. Figura modificata da Coviello *et alii* (2019)

Tecniche di *large-scale particle image velocimetry* sono state applicate alle registrazioni video per determinare la velocità superficiale delle colate detritiche al loro ingresso nella piazza di deposito. I valori ottenuti sono coerenti con le misure delle velocità medie rilevate a monte fra le sezioni D3 e D2 (Figura C.13). L'analisi ha permesso di studiare in dettaglio le variazioni di velocità che si osservano fra le varie pulsazioni di un evento ed anche all'interno di una stessa pulsazione (Theule *et alii*, 2018).

Al Gatria è impiegato un algoritmo di rilevamento automatico delle colate detritiche basato sul segnale

geofonico (Coviello *et alii*, 2019). L'algoritmo calcola in tempo reale il rapporto STA/LTA (*short time average / long time average*) del segnale registrato da tre geofoni installati lungo in canale principale (Figura C.13-c), riconosce le colate detritiche e filtra altre sorgenti naturali o antropiche. Un allarme si attiva quando una soglia di STA/LTA è superata su almeno due sensori, progressivamente da monte verso valle. Coviello *et alii* (2019) hanno inoltre dimostrato che l'ampiezza massima del segnale sismico è proporzionale all'energia cinetica delle singole pulsazioni, e che la maggior parte dell'energia sismica totale dell'evento avviene durante il passaggio dei fronti di tali pulsazioni.

Nello specifico, è stato possibile determinare una relazione lineare tra l'ampiezza del segnale sismico e l'energia cinetica per unità di area prodotta da una colata detritica, in quanto l'energia sismica risulta proporzionale al quadrato dell'ampiezza sismica (A^2 , in $\text{mm}^2 \text{s}^{-2}$).

C.4.4 Riferimenti bibliografici

Brardinoni F., Picotti V., Maraio S., Bruno P.P., Cucato M., Morelli C., Mair V. (2018) Postglacial evolution of a formerly glaciated valley: Reconstructing sediment supply, fan building, and confluence effects at the millennial time scale. *Bulletin of the Geological Society of America*, 130 (9-10), 1457-1473, DOI: 10.1130/B31924.1.

Comiti F., Marchi L., Macconi P., Arattano M., Bertoldi G., Borga M., Brardinoni F., Cavalli M., D'Agostino V., Penna D., Theule J. (2014) A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin. *Natural Hazards*, 73(3), 1175-1198, DOI: 10.1007/s11069-014-1088-5.

Coviello V., Arattano M., Comiti F., Macconi P., Marchi L. (2019) Seismic characterization of debris flows: Insights into energy radiation and implications for warning. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, 6, 1440-1463, <https://doi.org/10.1029/2018JF004683>.

Coviello V., Theule J.I., Crema S., Arattano M., Comiti F., Cavalli M., Lucia A., Macconi P., Marchi L. (2021) Combining instrumental monitoring and high-resolution topography for estimating sediment yield in a debris-flow catchment. *Environmental and Engineering Geoscience*, 27(1), 95-111.

Marchi L., Coviello V., Comiti F., Crema S., Cavalli M., Macconi P. (2019) Rainfall threshold for debris-flow occurrence in the Gadria catchment, eastern Italian Alps. *Geophysical Research Abstracts*, 21, EGU2019-7188.

Theule J.I., Crema S., Marchi L., Cavalli M., Comiti F. (2018) Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1-13, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018>.

C.5 COLATA DETRITICA DI CANCIA (BL, VENETO)

C.5.1 Inquadramento del sito

Il bacino da colata detritica di Cancia è ubicato sul versante sinistro della valle del torrente Boite (bacino del fiume Piave) a monte dell'abitato di Cancia (950 m s.l.m.) e della S.S. 51 d'Alemagna, in comune di Borca di Cadore (BL) (Figura C.16 e Figura C.17). Il bacino di formazione e propagazione delle colate detritiche, chiuso in corrispondenza delle due piazze di deposito terminali, ha una superficie complessiva di 2,07 km² e si sviluppa da quota 1003 m s.l.m. fino ai 3264 m s.l.m. del monte Antelao. Il canalone si biforca, intorno a quota 1345 m s.l.m. poco a valle della piazza di deposito "alta", formando due sottobacini: Salvella (0,73 km²) nel quale vi sono le aree sorgenti di sedimento e Bus del Diau (0,96 km²) che fornisce apporti prevalentemente idrici alle colate detritiche provenienti dal sottobacino Salvella.

Le colate detritiche avvengono generalmente in estate e nel primo autunno e sembrano essere sempre originate dalla transizione progressiva di frane superficiali in colata a causa di un rapido apporto idrico causato da temporali intensi e di breve durata.

Nella colata detritica di Cancia possono essere distinti 4 elementi morfologici principali: 1) il bacino in roccia (superficie di 0,21 km² e pendenza media di circa 30°) costituito da pareti dolomitiche, intensamente fratturate, che producono il materiale detritico che si accumula nell'area sorgente e che contribuisce effettivamente all'apporto idrico nella zona di innesco; 2) l'area sorgente di detrito e di innesco dei fenomeni (pendenze 30°-35°, quote 1900-2200 m s.l.m.); 3) il canale di flusso percorso dalla colata (pendenza media 20°, quote 1003-1900 m s.l.m.), lungo il quale possono avvenire processi di erosione e di accumulo e che termina in corrispondenza di un doppio sbarramento a gabbionate, che costituiscono due vasche di deposito realizzate a seguito dell'evento del 1996; tali piazze di deposito non sono in alcun modo collegate al torrente Boite; 4) la zona di deposito della colata che si espande

sul conoide alluvionale ed ha una superficie pari a 0,60 km² (pendenze 5°-10°, quote 880-1130 m s.l.m.). Il conoide è ampio e intensamente urbanizzato per la presenza di un esteso villaggio turistico costruito alla fine degli anni '50 dall'ENI (più di 250 unità abitative) e dall'abitato di Cancia. Prima della costruzione del villaggio, le zone a ridosso del canale, a valle della quota 1130 m s.l.m., erano spesso invase dagli eventi di colata. L'evoluzione urbanistica del conoide e gli interventi lungo il canalone hanno concentrato e velocizzato il flusso peggiorando le condizioni di rischio dell'abitato di Cancia, avvicinando l'area di deposito alle abitazioni.

Il canale di Cancia è storicamente ben noto per la formazione di colate detritiche in occasione di intensi eventi di pioggia estivi (Tabella C.2).

C.5.2 Sistema di monitoraggio

Progettazione e installazione

A seguito dell'evento del 2009 (Tabella C.2) che ha danneggiato le opere provvisorie e provocato due vittime, la Giunta Regionale del Veneto ha disposto la realizzazione di un sistema di monitoraggio e allarme di supporto alle operazioni di protezione civile, affidando la progettazione all'ARPA Veneto. Il progetto definitivo è stato consegnato a metà del 2010 e nel 2011 la competenza su Cancia (opere di difesa e realizzazione del Sistema) è passata alla Provincia di Belluno. Nel 2013 l'ente provinciale, attuale proprietario del Sistema, ha affidato mediante appalto integrato la progettazione esecutiva, la fornitura, l'installazione, la messa in funzione e la manutenzione del Sistema che è stato collaudato in data 20/08/2014.

Descrizione sintetica del Sistema

A seguito di alcuni eventi di colata e della realizzazione delle opere di difesa, tutt'ora in corso, il Sistema ha subito delle modifiche rispetto al progetto iniziale.

Il Sistema monitora due fasi: le precipitazioni intense in grado di innescare le colate e il transito del flusso detritico lungo il canalone. Tale monitoraggio è affidato

a 5 stazioni lungo il bacino principale equipaggiate con diversi sensori (Figura C.16 e Tabella C.3).

La scelta del tipo e della numerosità dei sensori è stata dettata dalla necessità di abbinare differenti tecniche di monitoraggio al criterio di ridondanza del singolo sensore.

Il Sistema è inoltre costituito da dispositivi per l'allertamento dislocati a Cancia e nel villaggio turistico: 10 semafori, 2 sirene ad alta potenza, 40 sirene a bassa potenza, 6 pannelli informativi. La centrale di controllo e di archiviazione dei dati è collocata presso il municipio di Borca di Cadore; in essa si trovano il software per il dispaccio massivo della messaggistica, per la gestione di soglie e logiche di funzionamento e le pulsantiere per la generazione manuale del segnale d'allarme.

Le Stazioni 1-2-3-4, non essendo allacciate alla corrente elettrica, sono dotate di celle solari da 50 e 140 W e batterie tampone. La comunicazione tra la singola stazione e la centrale di controllo è ridondata e avviene via radio UHF e GPRS. Per la parte di allertamento in conoide la comunicazione avviene via radio LPD. Tutti i dati vengono inviati al Centro Funzionale Decentrato (CFD) di Marghera (VE) via ADSL.

La frequenza di acquisizione dei dati è pari a 5 minuti; in caso di superamento di una soglia pluviometrica l'acquisizione del dato può passare automaticamente al minuto e quindi incrementare la frequenza di verifica del superamento di una soglia reimpostata o di una logica di allarme.

Gestione del Sistema e dell'allerta di Protezione Civile

Nel periodo 2014-2016 la gestione del Sistema è rimasta in capo alla Provincia di Belluno, con la redazione di due report post evento (2015) da parte di ARPAV. La complessità del fenomeno e la pluralità dei soggetti istituzionali coinvolti ha reso necessario disciplinare, mediante un Accordo sottoscritto il 23/06/2017, i rapporti tra la Provincia, l'ARPAV, la Regione e il Comune con la costituzione di uno specifico Tavolo Tecnico (DGRV n. 446 del 06/04/2017). ARPAV cura la gestione tecnica del

Sistema, effettua un doppio controllo quotidiano dal CFD, valida e pubblica i dati meteo (precipitazione, temperatura, vento), redige i report post evento e quelli annuali sull'andamento della stagione di monitoraggio; la Provincia cura la manutenzione ordinaria e straordinaria; la Regione coordina il Tavolo Tecnico e supporta il Sindaco nell'attività di protezione civile; il Comune ha la responsabilità della diffusione e della gestione del sistema di allarme e cura, già dal 2009, l'aggiornamento della procedura comunale specifica di protezione civile.

ARPAV ha stabilito, a partire dal 2017, le soglie pluviometriche (preallarme) e di livello (allarme) provvisorie, con l'invio di SMS automatici da parte del Sistema al Sindaco. Fino ad ora il segnale di allarme è stato gestito in modalità manuale sulla base delle informazioni provenienti dal Sistema e del monitoraggio in loco. Sono in corso di definizione, attraverso una collaborazione tecnico-scientifica tra ARPAV, CNR-IRPI, Università di Padova e di Bolzano, le soglie e le logiche definitive, al fine di automatizzare l'allarme entro il 2021. Il periodo di funzionamento stagionale del Sistema è compreso generalmente tra fine maggio e fine novembre.

C.5.3 Risultati e discussione

I dati pluviometrici sono risultati affidabili per la definizione di soglie di preallarme; l'attuale configurazione spaziale dei pluviometri è in grado di caratterizzare l'ampia variabilità degli eventi pluviometrici innescenti colate (Figura C.18).

I sensori di livello a ultrasuoni sono inaffidabili a causa delle ampie variazioni del dato dovute all'influenza del vento e alle irregolarità del fondo del canalone. La tecnologia radar risulta nettamente più affidabile anche se è influenzata anch'essa dalle irregolarità del fondo; finora, nelle logiche di allarme, si è optato per la concomitanza del superamento di una soglia di livello su almeno 2 sensori radar, con ottimi risultati.

I cavi a strappo, impiegati sempre in coppia nelle logiche di allarme, sono risultati i migliori e più affidabili sensori: facili e veloci da reinstallare dopo l'evento e assenza di casi di falso allarme; i cavi hanno però il

difetto di non catturare eventi ripetuti e quindi la ridondanza con altri sensori va sempre garantita.

I dati dei geofoni triassiali (Figura C.18), a causa della ridotta frequenza di acquisizione (10 s) e della sola possibilità di impostare soglie di ampiezza del segnale sismico senza algoritmi di processamento del dato, sono di difficile impiego per l'allarme; per il momento i sensori sismici saranno utilizzati solo nell'immediato post evento come informazione di supporto alle operazioni di protezione civile e di cantiere.

L'automatizzazione del segnale di allarme, processo attualmente in corso, necessita obbligatoriamente di un ente tecnico che controlli i dati in modalità H24, aggiorni in tempi rapidi logiche e soglie e sia dotato di personale tecnico formato che gestisca stabilmente il Sistema; vista la rapidità del fenomeno, i dati devono pervenire alla centrale di controllo in tempi celeri (2'-3') e non si devono verificare concomitanti assenze del dato. Il Tavolo Tecnico è stato finora un valido strumento gestionale e decisionale al fine di supportare il Sindaco nella gestione manuale del segnale d'allarme.

Nell'ottica della generazione automatica di messaggi e segnali di allarme, è auspicabile attuare costanti azioni di comunicazione nei confronti della popolazione (residenti e turisti) e organizzare periodiche esercitazioni al fine di mantenere viva la percezione del rischio.

C.5.4 Riferimenti bibliografici

Panizza M., Piacente S., Silvano S., Siorpaes C., Toffoletto F., Bozzo G.P. (1998) La frana di Borca di Cadore (Belluno) del 7 agosto 1996. Mem. Soc. Geol. It. 53 (1998) 465-478.

Deganutti A.M., Genevois R., Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R. (2010) Relazione tecnica di indirizzo per la progettazione e realizzazione del sistema di monitoraggio ed allarme in località Cancia (Borca di Cadore, BL). Relazione tecnica del CNR-IRPI di Padova, 2010, 34.

Gregoretti C., Bernard M., Boreggio M. (2019) Studio preliminare agli interventi da eseguire a Rovina di Cancia per la difesa dal rischio di colata detritica.

Elaborato: E03 – Analisi preliminare sui processi di deposito ed erosione a Cancia. Relazione tecnica della Provincia di Belluno, 2019, 24.

Barbini, M., Bernard, M., Boreggio, M., Ciuffi, P. (2021) Stime approssimate dei volumi di sedimento mobilizzati dagli eventi di colata avvenuti a Rovina di Cancia nel 2020. Comunicazione verbale.

Tabella C.2 - Eventi storici di colata detritica avvenuti a Cancia: volume totale mobilitato e danni. Fonte: fino al 07/08/1996: Panizza *et alii* (1998) e Deganutti *et alii* (2010); 1999: Deganutti *et alii* (2010); dal 18/07/2009 al 29/10/2018: Gregoretti *et alii* (2019); 2020: Barbini *et alii* (2021); (*) stime non definitive

Data	Volume (m ³)	Danni
27/07/1868	> 100.000	13 edifici sepolti e molti altri distrutti; 13 vittime
27/05/1957	25.000	danni a strade e coltivi
05/11/1966	25.000	danni a Cancia, interruzione della S.S. 51, temporanea ostruzione del Boite
19/07/1987	15.000	danni ad un edificio e alla sede stradale
02/07/1994	30.000	20 edifici danneggiati, danni alla sede stradale
07/08/1996	40-50.000	danni a diversi edifici e alla sede stradale
16/08/1999	6-7.000	
20/09/1999	50.000	
18/07/2009	53.000	danni a diversi edifici e sede stradale, 2 vittime
26/07/2013		
19/08/2013	13.640	
23/07/2015	27.260	
04/08/2015	21.150	
01/08/2018	3.890	
29/10/2018	11.660	
01/07/2020	4.630*	
11/08/2020	n.d.	
29/08/2020	4.100*	

Tabella C.3 - Stazioni che compongono il Sistema di Cancia, quota di ubicazione e sensori installati; (*) la Stazione 4 è attualmente dismessa per consentire la realizzazione di una briglia frangicolata

Stazione	Quota (m s.l.m.)	Sensori
1	2267	2 pluviometri - 1 anemometro - 1 termometro
2	1690	1 pluviometro - 1 anemometro - 1 termometro - 2 sensori di livello ad ultrasuoni - 2 geofoni
3	1525	2 cavi a strappo - 2 geofoni - 1 fotocamera
4*	1280	2 cavi a strappo - 1 sensore di livello radar - 1 geofono
5	1080	4 sensori di livello radar - 2 cavi a strappo - 1 videocamera



Figura C.16 - Frana di Cancia: inquadramento del dissesto e ubicazione delle stazioni del sistema di monitoraggio e allarme. Fonte: ARPA Veneto



Figura C.17 - Frana di Cancia: a) la zona d'innescò nei pressi di Stazione 2; b) il canalone a valle di Stazione 3; c) l'abitato di Cancia immediatamente dopo l'evento del 18.07.2009. Fonte: ARPA Veneto (a-b) e Regione Veneto (c)

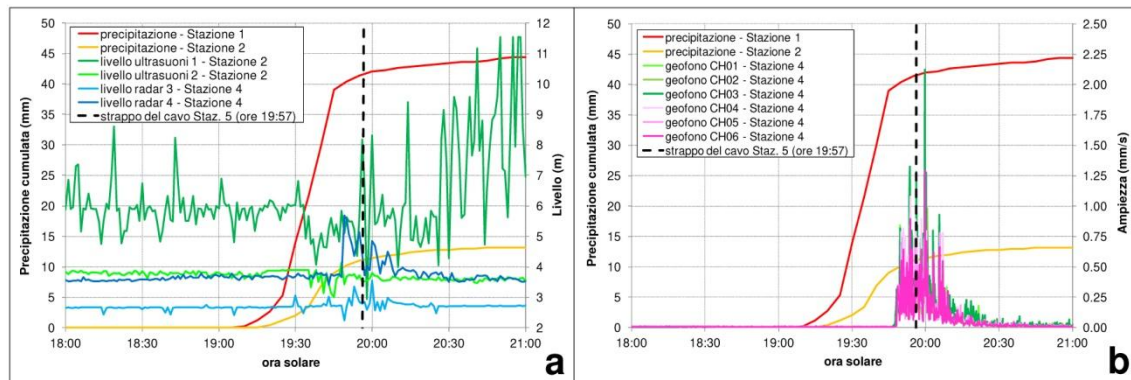


Figura C.18 - Evento 04.08.2015: precipitazione cumulata di Staz. 1 (44,6 mm) e 2 (13,6 mm) confrontata con a) dati di livello (gli ultrasuoni di Staz. 2 oscillano mentre il dato radar di Staz. 4 è stabile e identifica la colata); b) geofoni di Staz. 4 che mostrano il segnale tipico di colata. Fonte: ARPA Veneto

C.6 LE FRANE DI ORVIETO (TR, UMBRIA)

C.6.1 Inquadramento del sito

Orvieto è costruita su un piastrone piroclastico delimitato da pareti sub-verticali alte sino a 60 m, costituito da tufo litoide e pozzolana. Il piastrone poggia su una base grossomodo tronco-conica (pendenza compresa tra 11° e 16°) costituita da argille molto consistenti, ricoperte dalle loro coltri di frana (Figura C.19). Tra la formazione piroclastica e quella argillosa è interposto uno strato di materiali fluvio-lacustri che ospita una falda sospesa.

La formazione argillosa, molto consistente in profondità (sino a 1 MPa di resistenza non drenata, S_u , a 40 m di profondità) presenta un significativo ammorbidimento nella fascia sommitale immediatamente sottostante le coltri di frana ($S_u < 250$ kPa). Queste ultime sono costituite da materiale argilloso-limoso rimaneggiato con spessori che variano da 1-2 metri a oltre 10 m all'interno degli antichi corpi di frana disseminati sulle pendici del colle. La formazione piroclastica è caratterizzata da resistenza assai variabile passando dalla facies litoide (valori medi di resistenza a compressione uniassiale, σ_c , e a trazione, σ_t , pari rispettivamente a 2-7 MPa e 0,4-0,8 MPa) a quella pozzolanacea ($\sigma_c = 1-1,5$ MPa e $\sigma_t = 0,07-0,15$ MPa) e presenta uno stato di fratturazione più intenso ai margini della piastra.

Il monitoraggio riguarda sia i movimenti franosi che si sviluppano nella formazione argillosa di base e nelle relative coltri, sia le deformazioni che interessano i margini del piastrone piroclastico. I due fenomeni sono strettamente collegati.

Nella parte ammorbidita della formazione argillosa si sviluppano movimenti traslativi estremamente lenti (velocità media $\underline{v} = 1-6$ mm/anno) lungo superfici che variano dai 15 ai 35 m di profondità. Nelle coltri si hanno movimenti più superficiali (al massimo 10 m di profondità) ma relativamente più veloci ($\underline{v} = 8-20$ mm/anno), generalmente traslativi; a volte si ha una componente rotazionale laddove le coltri sono più spesse. I due tipi di movimenti sono spesso sovrapposti, ma i movimenti più profondi nel substrato

argilloso sono più vasti, estendendosi a volte dalla base della rupe sino al piede (circa 500 m di lunghezza).

C.6.2 Sistema di monitoraggio

Il monitoraggio ad Orvieto si deve a due iniziative con finalità differenti. La prima nasce negli anni '80 e '90 durante i lavori di consolidamento della rupe e delle pendici quando la Regione Umbria, al fine di realizzare un costante monitoraggio dei luoghi oggetto di intervento ed il controllo del comportamento delle opere eseguite, istituisce "l'Osservatorio per il controllo e la manutenzione permanente della Rupe di Orvieto e del Colle di Todi", realizzando un complesso Sistema di Monitoraggio e sviluppando un Sistema Informativo dedicato (Soccodato *et alii*, 2011).

La seconda ricade in una ricerca scientifica di lunga durata avviata nella Facoltà di Ingegneria dell'Università Sapienza di Roma nei primissimi anni '80 dal Centro di Studio per la Geologia Tecnica del CNR (oggi IGAG) e dai dipartimenti DISG e DITS (oggi DICEA). La ricerca nasce nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR e prosegue fino ad oggi nell'ambito del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche e poi con fondi propri delle due istituzioni.

L'Osservatorio Rupe

L'Osservatorio opera ancora oggi come strumento di prevenzione dei rischi, di manutenzione programmata degli interventi effettuati, come centro di controllo e di documentazione, studio e ricerca sulle varie problematiche affrontate nel corso dei lavori di consolidamento; verifica l'efficacia nel tempo degli interventi ed esercita una continua azione di manutenzione delle opere realizzate ed un tempestivo intervento di prevenzione.

Rete strumentale

Il sistema di monitoraggio è stato progettato, oltre che per il controllo dei fenomeni di instabilità, per il controllo nel tempo del comportamento delle opere di consolidamento. La rete di monitoraggio si articola in sei zone campione opportunamente scelte per acquisire

gli elementi necessari ad una definizione globale, oltre che locale, delle condizioni di stabilità della Rupe e delle pendici. Il progetto ha previsto l'integrazione di misure manuali periodiche ed automatiche in continuo. Nel corso degli anni il Sistema è stato implementato seguendo il progresso tecnologico, e Orvieto è divenuta un laboratorio naturale per la sperimentazione di nuove tecniche e tecnologie sia nell'ambito delle indagini che del monitoraggio.

Per il controllo dei movimenti in superficie è stata realizzata una rete geodetica, integrando misure topografiche terrestri e satellitari con una rete di punti di controllo sia sulle pendici (per misure con teodoliti/stazioni totali robotizzate e ricevitori GNSS) che sulle pareti tufacee (misure ottiche). Il Sistema è stato poi integrato con rilievi Laser Scanner 3d (anche con termocamera) ai fini sia del controllo di deformazioni e distacchi, sia dello studio geostrutturale e geomeccanico delle pareti tufacee. Negli ultimi decenni il monitoraggio geodetico è stato integrato con misure InSAR da satellite (l'area comunale è inserita nel Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del MATTM) e da terra (Figura C.19).

Per il monitoraggio delle deformazioni della Rupe sono stati installati estensimetri multibase spinti fino a 60 metri nell'ammasso roccioso, al piede ed al ciglio delle pareti tufacee e sulla sommità del piastrone piroclastico.

Per il controllo dei movimenti del pendio in argilla in profondità sono stati installati degli inclinometri, anche questi fino a profondità di 60 metri. Per il controllo delle variazioni delle pressioni interstiziali, in prossimità degli inclinometri sono stati installati dei piezometri Casagrande e a tubo aperto. Completa il Sistema di monitoraggio una stazione meteo termo-pluviometrica.

La rete di monitoraggio geotecnico è attrezzata per gran parte con strumentazione per l'acquisizione in automatico ed in continuo dei dati (inclinometri, piezometri ed estensimetri). Lungo le pendici ed il ciglio della rupe sono dislocate 14 Unità di Acquisizione Dati Locali, connesse negli anni '80 via cavo e successivamente con trasmissione wireless digitale a un Centro di Elaborazione Dati remoto, installato presso la sede comunale dell'Osservatorio Rupe. Per oltre

trenta anni il sistema di monitoraggio ha acquisito oltre 15 milioni di misure in continuo su più di 400 postazioni strumentate, archiviate, elaborate ed analizzate mediante il Sistema Informativo SIOR (Soccodato 2019a).

S.I.O.R.

La piattaforma software SIOR (Sistema Informativo dell'Osservatorio Rupe), in logica WebGIS personalizzata, raccoglie tutti i dati e le informazioni disponibili connesse agli interventi di consolidamento della rupe e delle pendici del colle di Orvieto e fornisce strumenti di gestione e analisi per la pianificazione e il controllo delle attività di manutenzione e la conduzione del monitoraggio strumentale. Il Sistema supporta funzionalità e procedure di monitoraggio ed allertamento (*Early Warning*) anche completamente automatiche.

Sottosistemi di Monitoraggio

Durante i lavori di consolidamento sono stati realizzati anche diversi sottosistemi di monitoraggio per la verifica delle ipotesi progettuali e il controllo del comportamento delle opere in situazioni locali. Durante la costruzione del percorso meccanizzato dal nuovo Parcheggio Campo della Fiera al Centro Storico, ad esempio, è stato installato un sistema di monitoraggio comprendente estensimetri multibase, celle di carico, *strain gauges* e mire topografiche per il controllo delle gallerie e degli eventuali cedimenti degli edifici soprastanti indotti dai lavori (Barla e Soccodato 2000).

Orvieto Ipogea

Sull'estesa rete di cavità e cunicoli sotterranei scavati nel piastrone piroclastico (ne sono state censite oltre un migliaio) sono state realizzate campagne di indagini con tecniche geofisiche e georadar, integrate da indagini geostrutturali e rilievi geomatici. Inoltre, nell'ultimo decennio è stato realizzato uno studio di oltre sette anni, che ha riguardato un esteso tratto della Rupe, comprendente anche la Rocca dell'Albornoz e la Grotta delle Macine. Principali obiettivi dello studio sono stati il controllo di deformazioni e spostamenti della parete

tufacea e delle cavità ipogee e lo sviluppo di metodologie e tecniche per il monitoraggio strutturale integrate con l'utilizzo delle nuove tecnologie TLS (Soccodato *et alii*, 2019b).

Il pendio strumentato CNR-Sapienza

L'obiettivo del monitoraggio è stato dapprima quello di definire le caratteristiche geometriche, la cinematica e i materiali in cui si sviluppano i movimenti nel pendio in argilla. Successivamente sono state ricavate le relazioni con le precipitazioni (Tommasi *et alii*, 2006, 2013a) e infine valutati gli effetti dei cambiamenti climatici sulla base degli scenari che scaturiscono dall'analisi degli stessi dati di monitoraggio (Rianna *et alii*, 2014). A tale scopo è stato scelto il pendio nord, sede della più grande frana documentata in epoca storica (frana di Porta Cassia del 1900), che causò lo spostamento di un lungo tratto della ferrovia Roma-Firenze.

Su un'area di circa 16 ha sono state realizzate 7 postazioni di misura inclinometriche e piezometriche (Figura C.20). Tutte le postazioni sono state strumentate con un tubo inclinometrico letto manualmente, vista la modesta velocità dei movimenti, con sonda rimovibile. Inizialmente sono stati installati piezometri Casagrande, per tutte le postazioni, nei tre materiali (se presenti) che costituiscono il pendio: detrito di frana, substrato argilloso molto consistente e sua fascia sommitale ammorbidita. I piezometri, dapprima letti manualmente, sono stati successivamente attrezzati con trasduttori elettrici di pressione miniaturizzati. Infine, su due postazioni sono state installate, secondo gli stessi criteri, celle piezometriche a corda vibrante.

Sul pendio nord si è potuta realizzare una integrazione della strumentazione che ha consentito di precisare meglio l'effettiva estensione areale e in profondità del movimento profondo più vasto che interessa il pendio argilloso.

C.6.3 Risultati e discussione

Nella Figura C.21 è riportato un profilo longitudinale con le superfici di scorrimento e le deformate dei movimenti e la stratigrafia geotecnica del versante. Nella Figura

C.22 e Figura C.23 sono invece riportate le serie temporali degli spostamenti lungo la superficie di scorrimento e delle pressioni interstiziali, rispettivamente per un movimento nelle coltri di frana (γ in Figura C.21) e uno nel substrato argilloso (α in Figura C.21), unitamente alle serie delle piogge giornaliere cumulate su più periodi. Per il movimento profondo sono riportati i dati dei piezometri Casagrande, mentre per i movimenti superficiali sono riportate sia le misure nei piezometri Casagrande che nelle celle di pressione.

Le misure piezometriche indicano chiaramente che nella coltre di frana e nell'argilla ammorbidita la risposta delle pressioni interstiziali agli apporti delle acque di infiltrazione è rapida ed evidente: i livelli piezometrici oscillano tra 2 e 4 metri in funzione dello spessore e della permeabilità del materiale e il ritardo nella risposta dei piezometri alle precipitazioni è poco superiore ai 30 gg (Figura C.22). I due materiali sono interessati da un unico regime di filtrazione. Nell'argilla consistente in profondità, invece, solo dopo lunghi periodi piovosi l'incremento di carico idraulico riesce a produrre significativi aumenti di pressioni interstiziali, come attestato dalla correlazione tra livelli piezometrici e piogge cumulate su lungo periodo (Figura C.23).

I risultati indicano anche che i piezometri Casagrande colgono le variazioni di pressione interstiziale, piuttosto lente rispetto al tempo di risposta delle celle. Nelle coltri superficiali invece le celle piezometriche consentono di individuare meglio le soglie di riattivazione. Lo stesso si può dire per gli inclinometri, la cui automazione con sonde fisse (e quindi maggior frequenza di lettura) può definire con più precisione il legame tra pressioni interstiziali e spostamenti nelle coltri di frana. In quest'ultimo caso i sensori fissi raddoppiano la vita dello strumento, il cui punto critico è il passaggio delle sonde.

Il monitoraggio ha chiarito le modalità di evoluzione ed innesco dei movimenti in argilla e ha fornito anche dati preziosi a livello nazionale e internazionale per la valutazione degli effetti dei cambiamenti climatici (Rianna *et alii*, 2014).

Considerazioni sul sistema di monitoraggio

Nel complesso il monitoraggio, oltre ai risultati scientifici conseguiti, ha consentito di chiarire l'evoluzione attesa dei movimenti nel pendio argilloso nei riguardi soprattutto delle infrastrutture mentre sulla rupe consente di tenere sotto controllo le parti marginali della città, sede sia di abitazioni residenziali che di edifici storici.

Sono stati presentati dei modelli “completi” di individuazione delle soglie di piovosità (Tommasi *et alii*, 2013a) che richiedono ulteriori indagini specifiche sulle variabili del processo di infiltrazione.

C.6.4 Riferimenti bibliografici

Barla G., Soccodato C. (2000) Pedestrian access to Orvietothrough ancient tunnels, in Proceedings of the International Conference GeoBen on Geological and geotechnical influences in the preservation of historical and cultural heritage, National Research Council, GNDCI, Torino 2000, pp. 19-40.

Rianna G., Zollo A., Tommasi P., Paciucci M., Comegna L., Mercogliano P. (2014) Evaluation of the Effects of Climate Changes on Landslide Activity of Orvieto Clayey Slope, *Procedia Earth and Planetary Science*, 9, 54-63.

Soccodato F.M., Tortoioli L., Mazzi A.M. (2011) The Orvieto Hill Observatory, *Proceedings of the Second World Landslide Forum*, Berlin 2011, pp. 547-560.

Soccodato C., Soccodato F.M., (2019a) Orvieto e Todi. Città in divenire, Alta Scuola, Regional Government of Umbria, Perugia, 373-460.

Soccodato F.M., Martini E., Celano A., Curuni M., Albano V. (2019b) Prevenzione del rischio idrogeologico per la salvaguardia del patrimonio culturale. Un caso di monitoraggio geomatico ad Orvieto. *Atti del Convegno Internazionale “Monitoraggio e manutenzione nelle aree archeologiche”*, Parco del Colosseo, 171-177.

Tommasi P., Pellegrini P., Boldini D., Ribacchi R. (2006) Influence of rainfall regime on hydraulic conditions and movement rates in the overconsolidated clayey slope of the Orvieto hill (Central Italy). *Canadian Geotechnical Journal*, 43(1), 70-86.

Tommasi P., Sciotti M., Rotonda T., Verrucci L., Boldini D. (2013a) The role of geotechnical conditions in the foundation, expansion and preservation of the ancient town of Orvieto (Italy). *Geotechnics and Heritage: Case Histories*, Bilotta E., Flora A., Lirer S. Viggiani C. (eds).CRC Press - Taylor & Francis Group, London, 49-73, ISBN 9781138000544.

Tommasi, P., Boldini, D., Caldarini, G. Coli, N. (2013b) Influence of infiltration on the periodic re-activation of slow movements in an overconsolidated clay slope. *Canadian Geotechnical Journal*. 50(1), 54-67.



Figura C.19 - Veduta del lato SE della rupe di Orvieto e del pendio argilloso sottostante. In primo piano un radar per misure interferometriche da terra (Fonte: foto Filippo Soccodato)

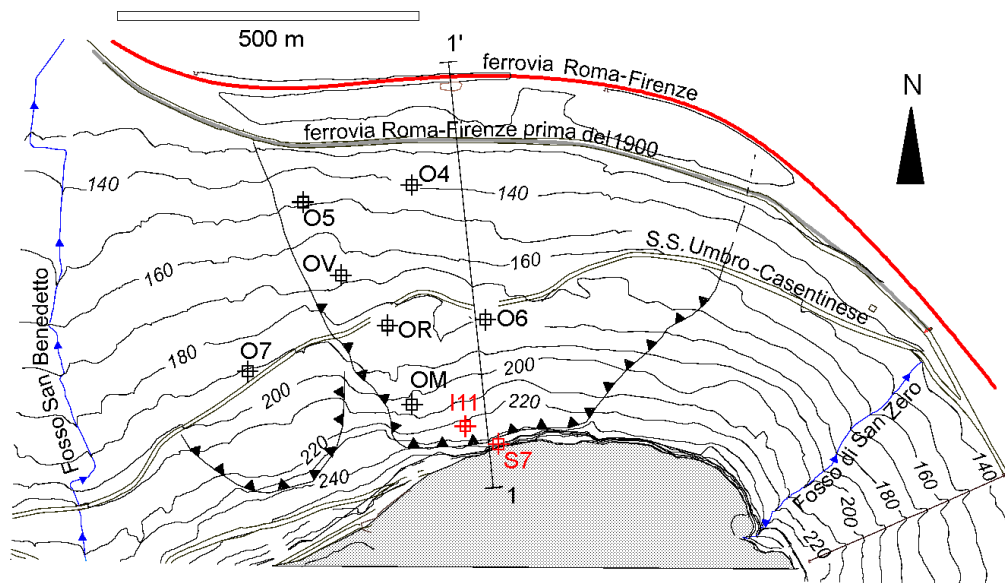


Figura C.20 - Planimetria del versante nord di Orvieto con riportate le postazioni di misura (O e I) e un sondaggio geognostico sulla rupe (S). Le indagini in rosso sono le più significative per la sezione di Figura C.21 tra le varie realizzate dalla Regione Umbria. Nella planimetria sono anche segnati due cigli di frana: quello della frana di Porta Cassia del 1900 (al centro) e quello di una frana con evidenti segni morfologici e segnalata in movimento dalla strumentazione (a sinistra)

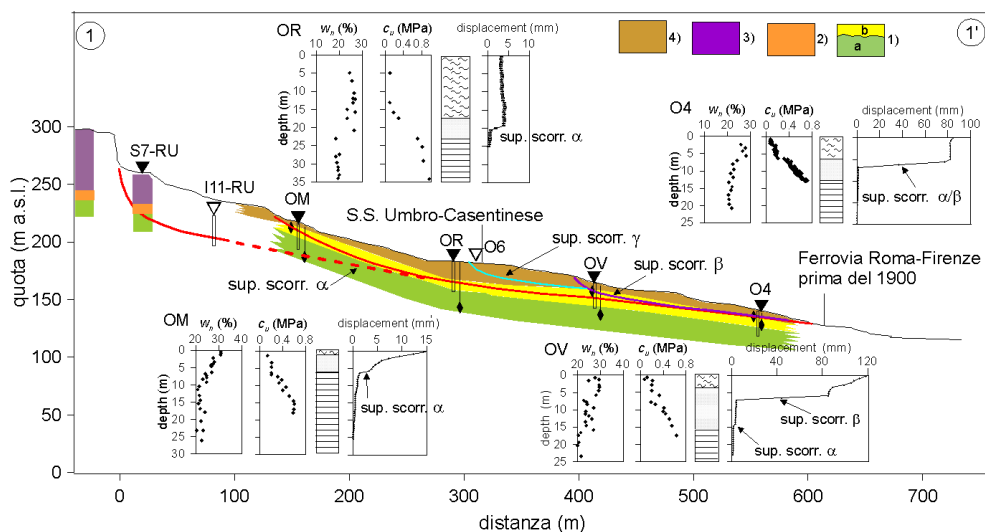


Figura C.21 - Profilo del pendio nord con strumentazione, superfici di scorrimento, log di umidità e resistenza non drenata: 1) substrato argilloso (a) e sua fascia ammorbidita (b); 2) sedimenti fluvio-lacustri; 3) formazione piroclastica; 4) detrito di frana. Con simboli vuoti i sondaggi proiettati

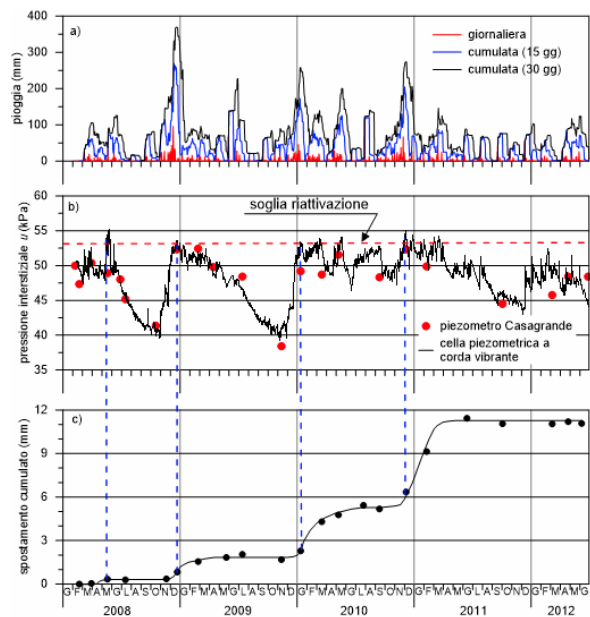


Figura C.22 - Serie storiche degli spostamenti sulla superficie di scorrimento del movimento “ γ ” nel detrito di frana, delle pressioni interstiziali e delle piogge cumulate (Fonte: Tommasi *et alii*, 2013a, modificato)

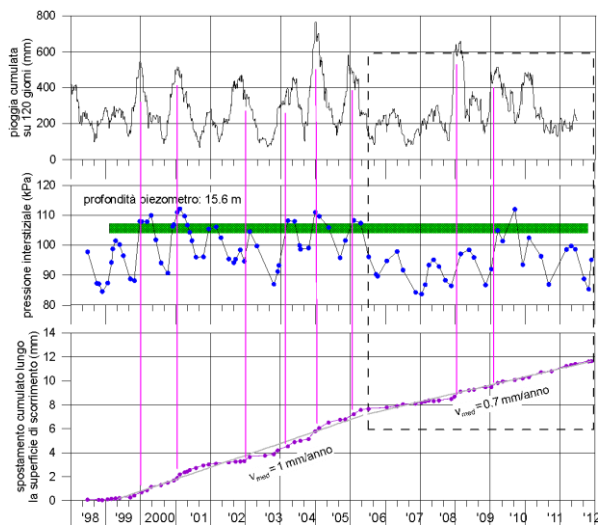


Figura C.23 - Serie storiche degli spostamenti sulla superficie di scorrimento del movimento “ α ” nella parte ammorbidita dell’argilla di base, delle pressioni interstiziali e delle piogge cumulate. La fascia verde nel diagramma delle pressioni rappresenta la soglia di innesco dei movimenti (Fonte: Rianna *et alii*, 2014, modificato)

C.7 FRANA DI ANCONA (AN, MARCHE)

C.7.1 Inquadramento del sito

La grande frana di Ancona si è attivata il 13 dicembre 1982 alle ore 22:45 sul versante settentrionale del Montagnolo da quota attorno ai 178 m fino al mare. Il volume del movimento di massa è stato di circa 180 milioni di m³, mentre la superficie interessata aveva una estensione di 220 ha, pari all'11% della superficie urbana totale del comune di Ancona (Cardellini e Osimani 2008) (Figura C.24). Le conseguenze sono riassumibili in: 3661 le persone evacuate (1071 famiglie), 280 gli edifici distrutti, furono irrimediabilmente danneggiate la facoltà di medicina, l'Ospedale Oncologico, l'Ospedale Geriatrico e la Casa di riposo Tambroni, rimasero bloccate la linea ferroviaria Milano – Lecce e la strada statale Flaminia, fortunatamente nessuna persona morì o fu ferita al verificarsi dell'evento. Il fenomeno ha testimonianze storiche assai significative che riferiscono di una marcata instabilità che ha caratterizzato l'area nei secoli precedenti. Diversi studi (Coltorti *et alii* 1985, 1986; Crescenti *et alii* 1983; Curzi e Stefanon 1986; Dramis *et alii* 2002) datano l'inizio dei movimenti sul pendio del Montagnolo a 5000-6000 anni fa, prima della trasgressione del Flandriano, quando il sollevamento regionale portò i sedimenti di avamposto alla loro elevazione odierna. Sicuramente la più antica evidenza documentale è rappresentata dalla relazione di Bracci del 1773 dove l'autore riferisce che tutta la zona che va da Torrette fino alla "Osteria della Palombella", presenta "slamature e corrosioni". Assai significativa è la nota di De Bosis (1859), che descrive un evento franoso accaduto nel novembre del 1858 nell'area in esame. Più di recente, limitatamente alla frana Barducci, sono da ricordare i lavori di Manfredini (1951), di Ceretti (1974), di Esu (1976), di Colosimo (1978) con cenni anche sul versante di Palombella, di Fangi (1980) che riferisce sui movimenti superficiali del periodo novembre 1977 - marzo 1978. Dal punto di vista geologico (Figura C.25) siamo in presenza di una successione plio-pleistocenica caratterizzata da argille marnose grigio-bluastre stratificate del Pliocene inferiore e medio, con intercalazioni siltose e sabbiose,

sopra cui giace, in trasgressione, il Pleistocene costituito da argille siltose e marnose grigio-azzurre, stratificate, nella parte superiore con livelli arenacei e sabbiosi e lenti di panchina organogena. Per quanto riguarda la tettonica, la zona è interessata da un sistema di faglie normali a vergenza E-W che tagliano la collina del Montagnolo abbassando i sedimenti verso il mare, con uno spostamento massimo compreso tra 50 e 150-200 m nel Pliocene medio-basso; a questo si associa un secondo sistema di faglie trasversali con orientamento NNE–SSW anti-appenninico (Crescenti *et alii* 1983), originato durante l'ultima fase tettonica (pleistocene fino ad oggi), a queste sono ascrivibili le due faglie del Borghetto e del Fornetto-Posatora che dislocano la sinclinale di Tavarnelle (Cotecchia 2006). Queste strutture sono probabilmente ancora attive come dimostra l'analisi della distribuzione degli epicentri dei terremoti del 1972-1974 che mostrano un allineamento approssimativamente lungo queste strutture tettoniche (Crescenti *et alii* 1977).

Gli studi effettuati nell'area interessata dal movimento franoso hanno evidenziato condizioni idrogeologiche sfavorevoli per quanto concerne la stabilità del versante a causa della presenza di terreni coesivi stratificati e fratturati, contenenti frequenti intercalazioni sabbiose e/o limose di spessore generalmente contenuto (da qualche cm a qualche dm) che possono trasmettere in profondità, attraverso fratture verticali, pressioni idrostatiche di entità anche considerevoli. Il sistema delle acque sotterranee nell'area è influenzato dalla complessità del sistema strutturale che comprende trincee naturali, fratture, o discontinuità, il tutto generato sia dalla geometria della frana che dai movimenti tettonici caratteristici dell'area. Sulla base delle letture dei piezometri installati nell'area della frana il Cotecchia (2006) ha suggerito la presenza di un regime di infiltrazione diffusa nella maggior parte del pendio, dovuto probabilmente all'alto grado di fessurazione delle argille e la presenza di intercalazioni sabbiose, oltre che alla presenza di acque sotterranee profonde strutturate in livelli indipendenti. Morfologicamente la frana di Ancona può rientrare tra quei fenomeni non di rado presenti nelle successioni plio-pleistoceniche dell'avanfossa adriatica, rappresentati da movimenti di

massa profondi nei quali si riscontrano superfici di rottura che si sviluppano fin sotto il livello del mare andando a sollevare tratti di fondale marino per una distanza talora notevole dalla linea di costa. Nel caso specifico già prima dell'evento del 1982, il versante tra Ancona e Torrette presentava tipiche forme prodotte da movimenti gravitativi tra le quali spiccavano grandi scarpate e contropendenze che si allineano alla loro base a costituire trincee parallelamente alla direzione del versante. Attualmente il coronamento di frana è individuabile ad una quota di 178 m e sono attive delle zone di scorrimento sovrapposte caratterizzate da una profondità stimabile in un massimo di 100-120 m (profondità stimabile in 75 m nell'evento del 1982).

Dagli esiti delle ricerche in situ e dai dati degli esami di laboratorio effettuati negli ultimi 25 anni, si può evincere che la Grande Frana della città di Ancona è una frana profonda ascrivibile a quelle complesse e composite (secondo Cruden & Varnes 1996) che ha visto la sua riattivazione dopo un lungo periodo di precipitazioni. Ad aggravare la situazione si è sicuramente aggiunto il fatto che a seguito di un lungo periodo di terremoti registrati 10 anni prima (1972), il cui sciami sismico era durato circa 6 mesi, nuove fratture si erano aperte. A partire dal 2000 tutte le analisi geologiche e geotecniche dei meccanismi di frana sono state finalizzate alla redazione di un progetto volto al consolidamento dell'area, ma si realizzò che questo non era attuabile sia per le ingenti somme da stanziare che per il forte impatto ambientale che tali opere avrebbero generato. Da qui la decisione dell'Amministrazione comunale di doversi rapportare al fenomeno franoso con un atteggiamento di possibile "convivenza leggera", ovvero mirando non ad un'eliminazione del rischio ma ad una riduzione dello stesso. Nel 2002 la Regione Marche ha promulgato una legge specifica per dare all'Amministrazione di Ancona la responsabilità di creare un sistema di allarme rapido e un piano di emergenza per le persone che vivono ancora oggi nell'area della frana.

C.7.2 Sistema di monitoraggio

Attualmente l'architettura del sistema di monitoraggio si

articola in un sistema di monitoraggio automatico di precisione di superficie ed in un sistema di monitoraggio geotecnico in continuo.

Monitoraggio di superficie

- 8 Stazioni Totali;
- 34 Geodetic GPS;
- 33 clinometri biassiali.

Monitoraggio geotecnico

- 5 catene multiparametriche DMS.

Il monitoraggio di superficie è articolato in tre livelli. Il primo e il secondo livello sono costituiti da 9 postazioni (Figura C.26) aventi la seguente sensoristica:

- Sensore GPS GRX1200 a Doppia Frequenza;
- Stazione Robotica TCA2003;
- Inclino metro biassiale NIVEL210.

Le cabine sono attrezzate anche con un sistema di comunicazione hiperlan, telecamere di videosorveglianza e un sistema di antifurto. 3 cabine costituiscono la rete di riferimento dell'intero sistema e sono posizionate al di fuori del perimetro della frana in aree considerate stabili (Università, Marina Dorica e Collodi); 6 cabine sono poste all'interno del perimetro di frana (Parco, Grotte, Golfo, Carmine, Palombella e Cimitero). La "Main station Grotte" (Figura C.27) è dotata altresì di stazione meteo con pluviometro, sensore di pressione atmosferica e temperatura.

Il terzo livello ha la seguente strumentazione installata sulle abitazioni private, in contemporanea o alternativamente:

- sensore GPS GX1210 a Singola Frequenza;
- prismi da monitoraggio;
- inclinometro biassiale NIVEL210.

Le misure ottenute dalle postazioni di monitoraggio, installate sulle abitazioni pubbliche e private, consentono di ottenere informazioni capillari sul comportamento della frana. Tali informazioni sono indispensabili per l'attivazione del piano di protezione civile e funzionali al rilascio dell'agibilità delle abitazioni stesse. Tutto il sistema comunica con la sala di

controllo tramite un sistema di trasmissione dati realizzato con una dorsale di comunicazione hiperlan – wireless di tipo industriale con connessione continua ed in tempo reale dalle postazioni principali di misura al centro di controllo. E' presente anche un sistema di allertamento della popolazione posto su 24 abitazioni private in adiacenza alla strumentazione degli inclinometri biassiali, costituito da sirene domestiche, attivabile tramite APP che permette il controllo remoto delle unità di attivazione delle stesse sirene.

Il monitoraggio geotecnico è in tempo reale ed è realizzato con colonne multiparametriche DMS® Early Warning System. Nell'area sono presenti cinque colonne DMS costituite da una sequenza di moduli rigidi strumentati, connessi da giunti flessibili ad elevata resistenza che ne consentono anche estrazione e reimpiego. I giunti flessibili resistono a forti sollecitazioni orizzontali e verticali del terreno conferendo un'adattabilità alle deformazioni in profondità.

Le colonne DMS® possono misurare in continuo:

- spostamenti x, y e z lungo il suo intero sviluppo;
- livello piezometrico di 1 o più falde separate idraulicamente;
- temperatura (log termico-variazione termica);
- vibrazioni lungo il suo intero sviluppo.

Le cinque colonne DMS sono denominate rispettivamente: ANC001-086, ANC002-096, ANC003-096 (installate nel febbraio 2009), ANC004-042, (installata il 23/04/2018) e ANC005-035 (installata il 15/03/2018) (Figura C.28). Le colonne ANC001, ANC002, ANC003 e ANC004 consentono di monitorare gli spostamenti orizzontali e le variazioni piezometriche e di temperatura rispettivamente nei seguenti intervalli di profondità 0-86 m p.c., 10-96 m p.c., 9-95 m p.c. e 0-42 m p.c. La colonna ANC005 consente di monitorare gli spostamenti orizzontali e verticali, le pressioni interstiziali (negli intervalli 12-13 m, 18-19 m, 26-27 m e 34-35 m p.c.), le accelerazioni e le variazioni di temperatura nell'intervallo di profondità 0-35 m p.c.

Mediante piattaforma web è possibile visualizzare anche su smartphone i dati delle singole colonne.

Il Centro di Controllo - Early warning system è ubicato presso gli Uffici del Comune di Ancona in connessione "continua" con i sensori in campo. Qui sono allocati:

- 11 server;
- 3 gruppi di continuità UPS;
- 1 sistema NAS per eseguire il backup.

È stato predisposto un sistema di "Avviso mancanza corrente elettrica" per la sala server tramite SMS al tecnico reperibile. Nel centro di controllo sono installati i software di gestione automatica del sistema, elaborazione e visualizzazione dei dati provenienti da tutti i sensori installati, questi archiviano i dati grezzi, li elaborano ed eseguono un confronto con le soglie stabilite. Le colonne DMS trasmettono dati in continuo h24 via GSM/GPRS al centro di monitoraggio per la gestione automatica degli stessi tramite la DMS software suite, e via FTP ai consulenti che li validano.

Il monitoraggio di superficie si avvale della rete hiperlan per la trasmissione dei dati al centro di controllo. Gli inclinometri biassiali NIVEL acquisiscono dati con intervalli di 5 minuti. Per le stazioni robotizzate TCA2003 la cadenza di acquisizione è stata impostata a 2 ore. Il confronto con i valori di soglia avviene a cicli cadenzati di 1 ora per Nivel e stazioni totali. I GPS effettuano un tracciamento in continuo. Il confronto con i valori di soglia avviene ogni 12 ore.

In automatico via SMS viene allertato il tecnico reperibile relativamente ai superamenti di soglia per consentire, se necessario, di procedere con l'allertamento. Quest'ultimo avviene, come da procedura, tramite l'attivazione delle sirene da parte del Dirigente della Direzione Lavori Pubblici del Comune di Ancona.

C.7.3 Risultati e discussione

Schematizzando ci troviamo di fronte ad una frana intraformazionale profonda, complessa, attiva e sviluppata sul versante "Montagnolo" fino a mare per un'estensione di 3,4 Km² (Figura C.29). Essa è composta, in alcune aree, da 4 corpi gravitativi sovrapposti e disarticolati da superfici di scorrimento spesso indistinte che si approfondiscono sino a circa

110-120 m dal p.c. Attualmente si registrano alcune aree con maggiore attività identificabile con spostamenti di 1-2 cm annui:

- l'intera via Flaminia e la ferrovia site al piede della frana che risultano le più potenzialmente a rischio deformazione;
- l'area sita verso l'abitato di Torrette tra via delle Grotte e la strada Flaminia;
- l'area a valle della chiesetta di Posatora fino alla zona dell'ex Birra Dreher e l'ex stabilimento di Angelini (da via delle Grotte alla zona Palombella);
- l'area lungo il versante che dal Montagnolo scende verso via Bompiano interessando via del Carmine (entrambe traverse di via delle Grotte);
- l'area da via delle Grotte (dalla rotatoria iniziale sino al cimitero di Posatora) sino a via Flaminia;
- l'area della Palombella in particolare la zona a monte di via Berti (zona sud della Palombella).

L'Autorità di Bacino della Regione Marche ha inserito nel PAI due nuove aree adiacenti alla frana di Ancona con pericolosità P3 e rischio R4 denominate Torrette e Palombella, con implicazioni di carattere amministrativo e di gestione del territorio in quanto queste aree sono intensamente urbanizzate. Comunque, tutta la frana risulta complessivamente attiva e potrebbe “muovere” verso nord con dinamiche complesse e diverse anche dall'ultima registrata nel 1982. È un fenomeno da non sottovalutare perché gli spostamenti associati alla riattivazione della “frana di Ancona”, a seguito di un innesco dovuto a piogge, sismi e/o attività tettoniche orogenetiche endogene, potrebbero essere metrici.

Il ragguardevole periodo di funzionamento delle colonne DMS, che si avvicina ormai alle 100.000 ore, ha reso necessari interventi di revisione delle colonne al fine di evitare malfunzionamenti ed interruzioni di servizio dovuti all'eccessivo invecchiamento dell'elettronica e delle tenute delle guarnizioni e dei giunti flessibili in gomma armata. Il rilascio della versione web per la visualizzazione dei dati del monitoraggio geotecnico consentirà di ridurre significativamente l'esigenza della presenza fisica in sala monitoraggio, bypassando tutte

le problematiche relative alla connessione e all'alimentazione della sala (risultata a volte instabile proprio nei momenti di maggior criticità). Per quello che riguarda il monitoraggio di superficie, purtroppo si è osservato che attualmente i sensori di misura installati, così come i componenti ad essi accessori, iniziano a presentare uno stato di naturale deterioramento. Resta comunque valido il sistema di monitoraggio integrato attualmente in uso, poiché dopo quasi 20 anni risulta ancora in grado di garantire la salvaguardia della popolazione; infatti in diverse situazioni in cui è stata evidenziata una situazione di “attività” dai sensori del monitoraggio di superficie, si sono riscontrati dati coerenti con le misure di monitoraggio geotecnico.

A distanza di 40 anni dall'innesco e di 20 anni dalla scelta di intervento non strutturale, le opzioni di monitoraggio rispetto a quelle di intervento risultano ancora valide, prima di tutto perché il monitoraggio consente misure in continuo non effettuabili con nessuna campagna di misurazione classica. L'enorme mole di dati ottenuta dal monitoraggio consente inoltre di verificare le scelte e le opzioni adottate sul sistema frana e proporre interventi mirati e utili alla stabilizzazione della stessa.

Il sistema di monitoraggio ha consentito di evidenziare gli spostamenti che si sono verificati quando il livello di falda ha raggiunto determinati valori critici (individuati nel protocollo operativo allegato alle Procedure di attivazione del Piano di emergenza per l'evacuazione delle popolazioni abitanti in area “frana di Posatora”), come in occasione dell'evento nevoso nel febbraio 2018, quando a 20 m di profondità dal p.c. si è raggiunta una velocità di 4,8 mm/giorno per due giornate consecutive, movimento poi arrestatosi.

Essendo una frana multipla, vi sono ancora alcune incertezze sulla individuazione di un unico piede di frana dovuto alla presenza delle diverse superfici di scivolamento; le singole porzioni della frana, infatti, posso sovrapporsi e interagire, portando a concludere che gli interventi da promuovere siano prevalentemente di dissipazione delle pressioni interstiziali. (Casagli et alii, 2012). Il fatto che il versante della frana sia interessato da superfici multiple comporta la necessità

di prestare una maggiore attenzione ad eventuali opere di carico/scarico, in quanto lo scarico effettuato in una certa posizione può risultare favorevole alla stabilità per una determinata superficie di scivolamento e sfavorevole per un'altra. È consigliato di evitare qualsiasi alterazione dello stato tensionale del versante (Casagli et alii, 2012) in assenza di modellazioni specifiche e sempre comunque sotto il controllo del sistema di monitoraggio.

Infine per gli interventi previsti nell'area da parte dei soggetti gestori delle infrastrutture di comunicazione, è necessario che l'installazione di nuovi strumenti di monitoraggio sulle reti (es. Progetto R.F.I. di rettifica e velocizzazione del tracciato ferroviario Bologna-Lecce nella zona del Lungomare Nord di Ancona) siano integrati con l'attuale sistema di monitoraggio della frana di Ancona e che l'interazione delle opere con la frana sia valutata attraverso i dati del monitoraggio (andamento delle pressioni interstiziali e cedimenti; es. Progetto ANAS S.p.A. di collegamento tra SS 16 Adriatica e Porto di Ancona).

C.7.4 Riferimenti bibliografici

- Bracci V. (1773). Relazione alla visita fatta per ordine della "Congregazione del R. Governo" nei mesi di aprile e maggio 1773 a un tratto di strada Flaminia. Archivio di Stato, Sez. IV, Ancona.
- Cardellini S., Osimani P. (2008) Living with Landslide: the Ancona Case History and Early Warning System. Proc. First World Landslide Forum, Tokyo, 473-476.
- Cardellini S., Osimani P. (2013) The Ancona early warning centre, instrumentation and continuous monitoring of the landslides. In: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (eds) Landslide Science and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Casagli N., Tofani V., Agostini A., Nolesini T., Tanteri L., Rosi A., Gigli G. (2012) Supporto tecnico-scientifico per l'interpretazione delle indagini geognostiche e per le nuove verifiche di stabilità della grande frana di Ancona. Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Scienze della Terra.
- Ceretti E. (1974). La frana "Barducci" (Ancona) . Giorn. di Geologia , S. 2, V. 39 (2) , Bologna.
- Colosimo P. (1978). Comportamento di argille plio-pleistoceniche in alcuni versanti instabili dell'anconetano. Mem. Soc. Geol. It ., v. 19, Roma.
- Coltorti M., Dramis F., Gentili B., Pambianchi G., Crescenti U., Sorriso-Valvo M. (1985) The December 1982 Ancona landslide: A case of deep-seated gravitational slope deformation evolving at unsteady rate. Zeitschrift für Geomorphologie, 29, 335–345.
- Coltorti M., Dramis F., Gentili B., Pambianchi G., Sorriso-Valvo, M. (1986) Aspetti geomorfologici della frana di Ancona. Studi Geologici Camerti, Numero Speciale, 29–40.
- Cotecchia V. (2006) Experience drawn from the great Ancona landslide of 1982. The second Hans Cloos Lecture. Bull Eng Geol Environ 65:1–41. DOI:10.1007/s10064-005-0024-z.
- Crescenti U., Nanni R., Rampoldi R., Stucchi M. (1977) Ancona: considerazioni sismo-tettoniche. Boll. Geo. Teor. Appl., 73-74, Udine.
- Crescenti U., Ciancetti G.F., et al. (1983) La grande frana di Ancona del 1982. Collana 'Problemi del territorio', Spoleto, 4–7 maggio 1983. Ancona Municipality and Ancona University.
- Curzi P.V., Stefanon A. (1986) Indagini a mare. Studi Geologici Camerti, Numero Speciale, 135–144.
- De Bosis F. (1859) Il Montagnolo: studi ed osservazioni. Enciclopedia Contemp., disp.7, s.2, G.A. Gabrielli Ed., Fano.
- Dramis F., Farabollini P., Gentili B., Pambianchi G. (2002) Neotectonics and large-scale gravitational phenomena in the Umbria–Marche Apennines, Italy. In: Sismically Induced Ground Ruptures and Large Scale Mass Movements. Field Excursion and Meeting 21–27 September 2001. APAT, Atti, 4/2002, Rome, 17–30.
- Esu F. (1976). Problemi di stabilità dei pendii in argille sovra-consolidate italiane: VII Ciclo di Conferenze del Politecnico di Torino.
- Fangi G. (1980). Rilievi di precisione dei movimenti in terreno franoso. Presenza tecnica. a. 8 (I), Parma.

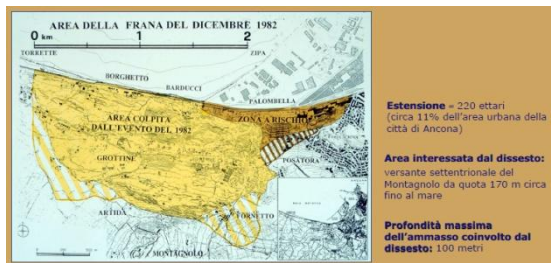


Figura C.24 - Cartografia della grande frana di Ancona

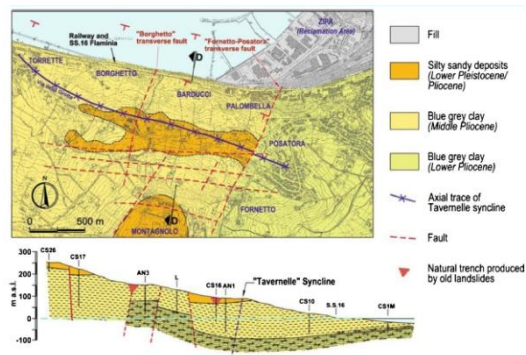


Figura C.25 - Schema geologico e sezione trasversale della grande frana di Ancona (Fonte: da Cotecchia 2006)

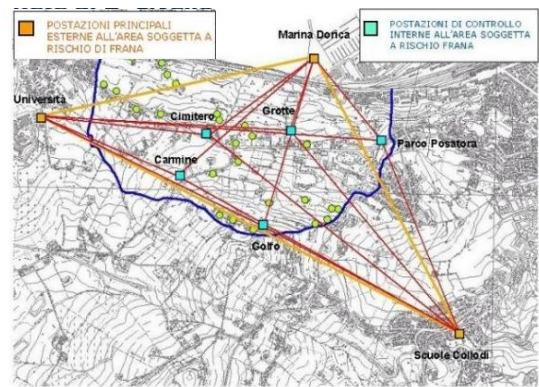


Figura C.26 - Rete di 1° livello e 2° livello



Figura C.27 – Main station Grotte



Figura C.28 – Posizione Colonne DMS



Figura C.29 – Inquadramento zona (Fonte: da Casagli 2012)

C.8 FRANA DI MONTAGUTO (AV, CAMPANIA)

C.8.1 Inquadramento del sito

La frana di Montaguto (AV) è una colata di terra che si sviluppa lungo il versante in sinistra idrografica del Torrente Cervaro, nell'Appennino Dauno e possiede caratteri di notevole persistenza e ricorrenza nel tempo. La fase più critica della frana ha inizio nel 2006, quando per la prima volta raggiunge il fondovalle ed interrompe la strada statale SS90. Nel marzo 2010, a seguito delle forti piogge occorse nei giorni precedenti, una nuova pulsazione della colata causa l'interruzione della linea ferroviaria nazionale che collega Napoli a Foggia (Giordan *et alii*, 2013). Il traffico lungo le due arterie è stato interrotto per circa tre mesi causando gravi problemi ai residenti, all'economia locale e al sistema ferroviario nazionale (Figura C.30). La frana ha una lunghezza totale di 3,1 km, una larghezza massima di 420 m, una superficie di 660.000 m², un volume stimato di circa 4 milioni di m³. Essa può essere suddivisa in tre aree principali: (i) una zona di alimentazione, sopra i 700 m di altitudine, (ii) una zona di trasporto, tra i 530 e 700 m, e (iii) un'area di accumulo (piede), al di sotto dei 530 m di quota (Giordan *et alii*, 2013). Le Unità stratigrafiche affioranti nel tratto di versante interessato dal fenomeno franoso sono principalmente tre: il Flysch di Faeto, le Marne argillose del Toppo Capuana e l'Unità di Altavilla, alle quali si aggiungono i depositi quaternari alluvionali del T. Cervaro. La morfologia e l'idrografia si presentano alquanto articolate e con un forte controllo strutturale (Guerriero *et alii*, 2014).

C.8.2 Sistema di monitoraggio

A seguito dei danni causati dalla riattivazione della frana, il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile ha predisposto una serie di interventi volti alla messa in sicurezza in somma urgenza dell'area e al ripristino delle infrastrutture varie. Ha inoltre incaricato il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (DST-UNIFI) e il CNR-IRPI di condurre le attività di studio ed analisi finalizzate alla progettazione di interventi di mitigazione del rischio e di programmare

un sistema di monitoraggio integrato per misurare gli spostamenti della frana e gli effetti delle opere di mitigazione sugli stessi.

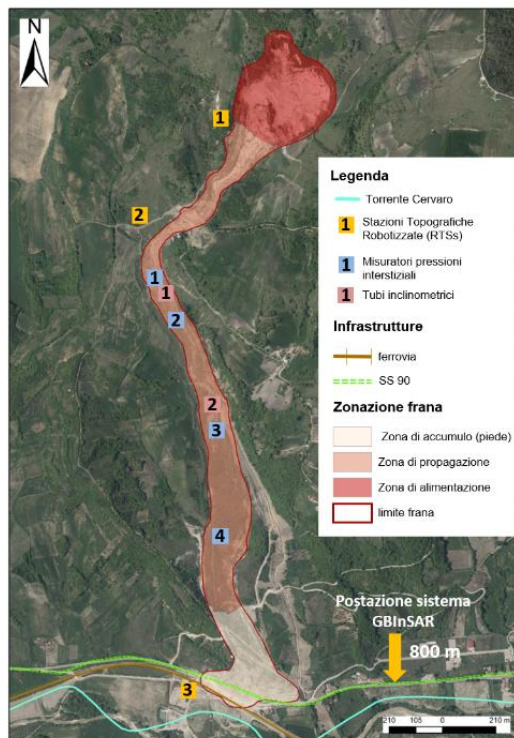


Figura C.30 - Immagine della frana con ubicazione dei diversi sistemi di monitoraggio e indicazione delle principali caratteristiche morfologiche, (modificata da Ferrigno *et alii*, 2017)

Il sistema di monitoraggio è stato progressivamente implementato ed adeguato alle diverse fasi del fenomeno franoso e alle attività poste in essere per la sua mitigazione. In questo modo, ha permesso sia di seguire le fasi emergenziali iniziali sia di valutare l'efficienza delle opere di stabilizzazione nel breve e medio periodo, nonché le condizioni di pericolosità residua conseguenti. Nella fase emergenziale iniziale sono stati installati un sistema radar interferometrico basato a terra (GB-InSAR) e tre stazioni totali robotizzate (RTS). Inizialmente, il monitoraggio è stato garantito da personale in loco, mentre a partire dal

luglio 2010 è stato impostato da remoto con una emissione giornaliera dei bollettini di monitoraggio. Successivamente, la rete di monitoraggio è stata ampliata con una stazione meteorologica, due tubi inclinometrici, ed una serie di celle piezometriche a corda vibrante. Tale strumentazione ha permesso un approfondimento d'indagine del settore centrale della frana. Malgrado le opere realizzate, il settore centrale della frana ha continuato a mostrare movimenti evidenti, ancorché inferiori rispetto alla fase emergenziale. Il caso della frana di Montaguto si contraddistingue per un'oculata gestione del sistema di monitoraggio che ha saputo adattarsi alle diverse condizioni operative ed è stato impiegato nelle diverse fasi di gestione dell'emergenza e del post-emergenza.

Il sistema GB-InSAR

Il sistema GB-InSAR è stato installato sul versante stabile opposto rispetto a quello in frana (Figura C.31). Il monitoraggio in tempo reale è avvenuto con la produzione di mappe di deformazione che permettono la stima della velocità di spostamento dei vari settori osservati relativi alla porzione terminale della frana (Ferrigno *et alii*, 2017), velocità che durante il primo mese di monitoraggio hanno registrato valori medi di circa 1 m/giorno. I settori E ed F sono stati individuati in momenti successivi, il primo in corrispondenza del "gomito" della frana a novembre 2010, l'altro in corrispondenza dell'area di coronamento nel dicembre 2013; le velocità di spostamento di queste aree hanno subito molte oscillazioni dovute al continuo evolversi della frana e dei lavori di mitigazione, con picchi giornalieri rispettivamente di 11 mm/giorno e 18 mm/giorno. Per quanto concerne il settore E, tali picchi sono riconducibili a diverse fasi di lavoro in quell'area, per il settore F invece, le cause delle maggiori deformazioni riscontrate sono imputabili ad eccezionali eventi meteorologici che hanno rimobilizzato una serie di fratture preesistenti.

I risultati del monitoraggio sono stati anche impiegati nell'applicazione del metodo osservazionale per la progettazione e il monitoraggio delle opere realizzate; tale approccio si è articolato in tre fasi principali:

- fase di emergenza, quando l'obiettivo principale era la rimozione dell'accumulo di frana dalla strada SS90 e dalla ferrovia, a supporto della direzione lavori;
- realizzazione di lavori di stabilizzazione (durata tre anni) a supporto della progettazione degli interventi;
- periodo *post-operam*, verifica della risposta della frana alle opere completate in termini di deformazione.

Le Stazioni Totali Robotizzate (RTSs)

Le tre RTS, che forniscono misurazioni topografiche tridimensionali ad alta precisione, sono state installate sul terreno stabile lungo il lato occidentale della frana (Figura C.30) e sono tuttora operative. La prima stazione (RTS-1) è stata installata sul lato ovest dell'area di alimentazione della frana ad un'altitudine di 750 m per monitorare una parte della frana non coperta dal sistema GB-InSAR. In questo settore sono stati installati 19 *benchmark* (prismi ottici) principalmente nell'area della corona di frana, con un *reference point* situato sui terreni stabili al di fuori della frana. In corrispondenza alla postazione di monitoraggio RTS-1 è stata installata nel 2010 una stazione meteorologica.

La seconda stazione di monitoraggio (RTS-2) è stata installata il 9 giugno 2010, ad un'altitudine di 670 m, e misura 15 prismi ottici all'interno della zona di propagazione.

La terza stazione (RTS-3), installata il 30 aprile 2010 ad un'altitudine di 410 m, monitora 18 *benchmarks* all'interno del corpo di frana e due prismi in aree stabili. La possibilità di avere dati di spostamento in tre dimensioni ha consentito di compensare una limitazione del GBInSAR. Le tre RTS hanno permesso di monitorare l'intera area in frana e di caratterizzare l'andamento dei singoli domini cinematici. Le misure sono state ripetute con un intervallo di tempo compreso tra 1 a 5 ore.

È stata inoltre condotta un'analisi combinata di sei modelli digitali del terreno dal 2005 al 2011, che ha permesso di investigare le variazioni della superficie

topografica della frana e di ottenere una stima dei volumi mobilitati nel periodo indagato (Giordan *et alii*, 2013).

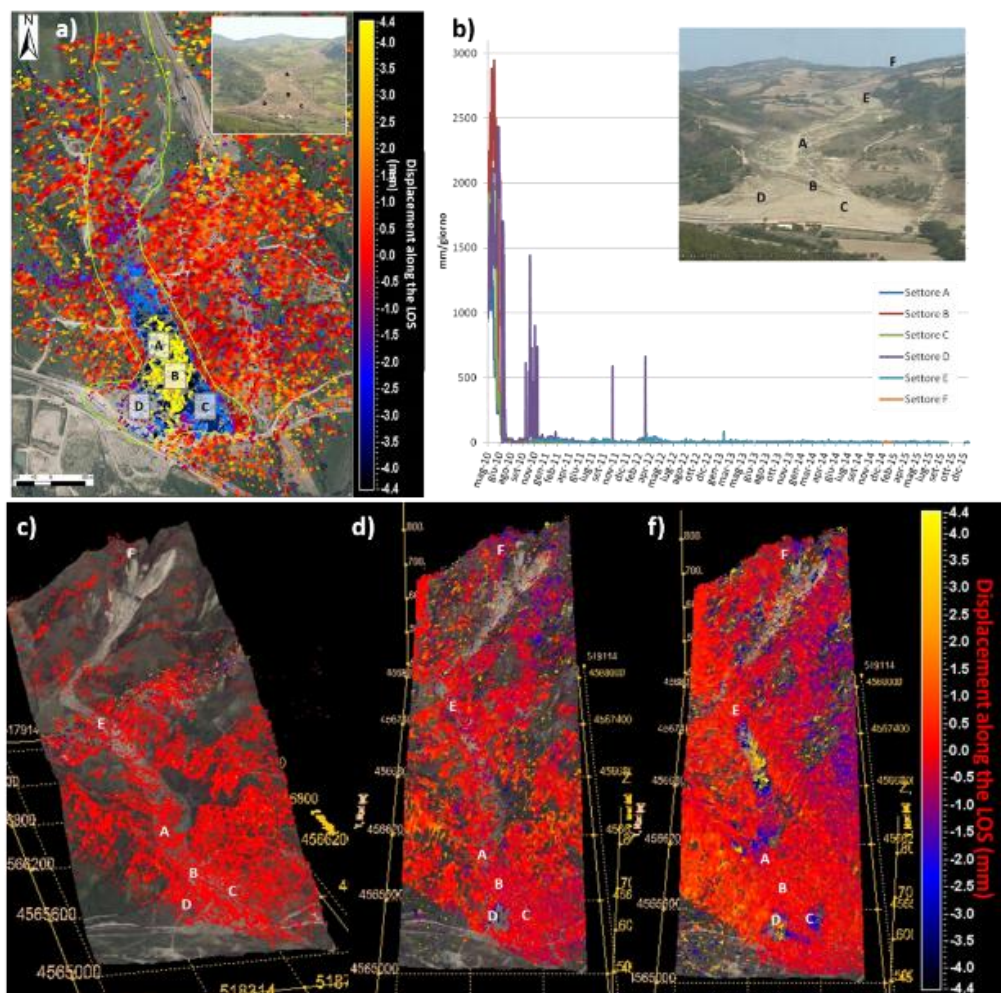


Figura C.31 - a) Interferogramma processato con un intervallo di tempo di 4 minuti del 1° maggio 2010. Valori negativi indicano movimento verso lo strumento; b) Velocità di spostamento registrate fino al 2014 per i diversi settori selezionati, angolo in alto a destra: immagine ottica della frana acquisita dal punto di installazione di GB-InSAR; c - d - f) Interferogrammi SAR che mostrano segnali di spostamento tipici nei settori instabili con diversi intervalli di tempo. c) l'intervallo temporale di 4 min (agosto 2010) non consente più il rilevamento dello spostamento occorso. Quello a 4 h invece (d) è ancora in grado di mostrare lo spostamento del piede della frana; f) l'interferogramma a 24 ore riferito al 26 dicembre del 2010 mostra segnali di instabilità del settore E (modificata da Ferrigno *et alii*, 2017)

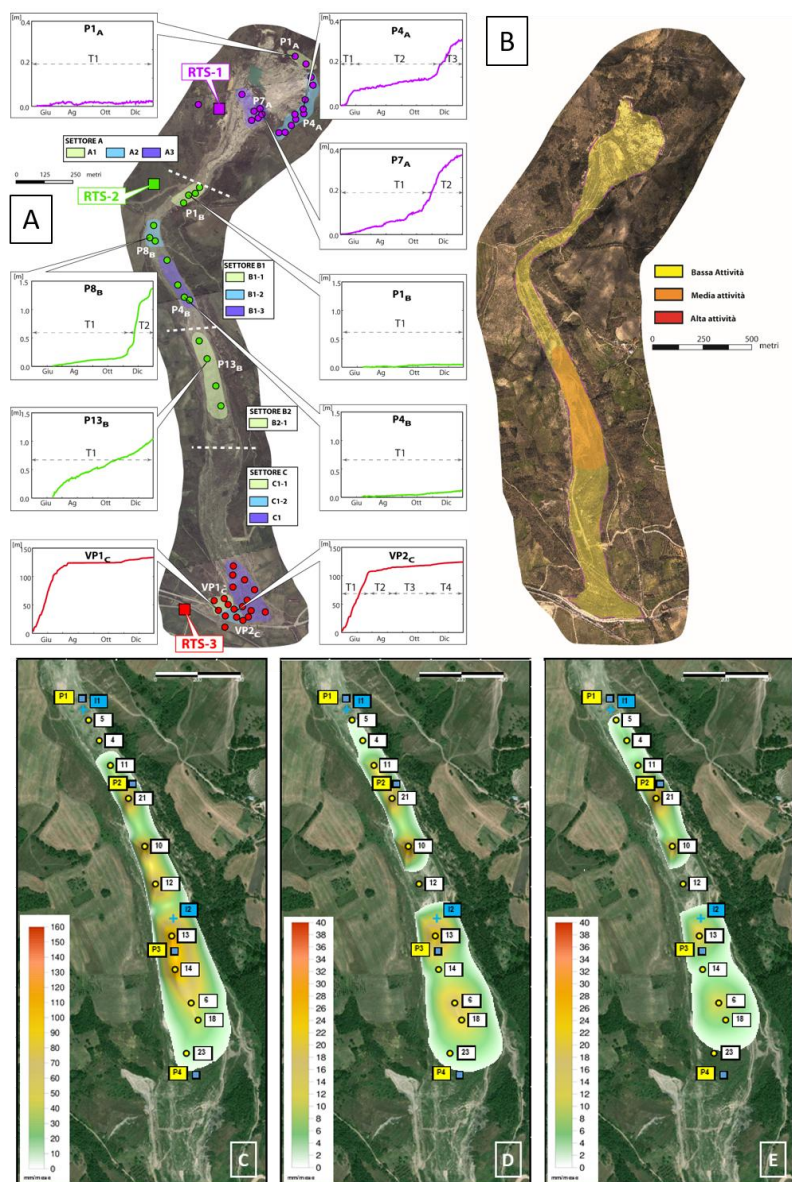


Figura C.32 - Evoluzione della frana di Montaguto in base ai dati della stazione totale robotizzata: A) dati di monitoraggio del 2010, con evidenza della forte attività del piede della frana. B) Valutazione dello stato di attività sulla base dei dati nel periodo 2011 - 2014, il settore E diventa la porzione di frana caratterizzata da un livello di attività più elevato su cui si concentrano le attività di monitoraggio con l'installazione di trasduttori di pressione interstiziale e tubi inclinometrici. C) Velocità medie di movimento nel settore E nel periodo gennaio 2012 - giugno 2013, D) nel periodo agosto 2013 - giugno 2014, E) nel periodo luglio 2014 - aprile 2015 (figura modificata da Giordan *et alii*, 2013, Lollino *et alii* 2017, Lollino *et alii* 2020)

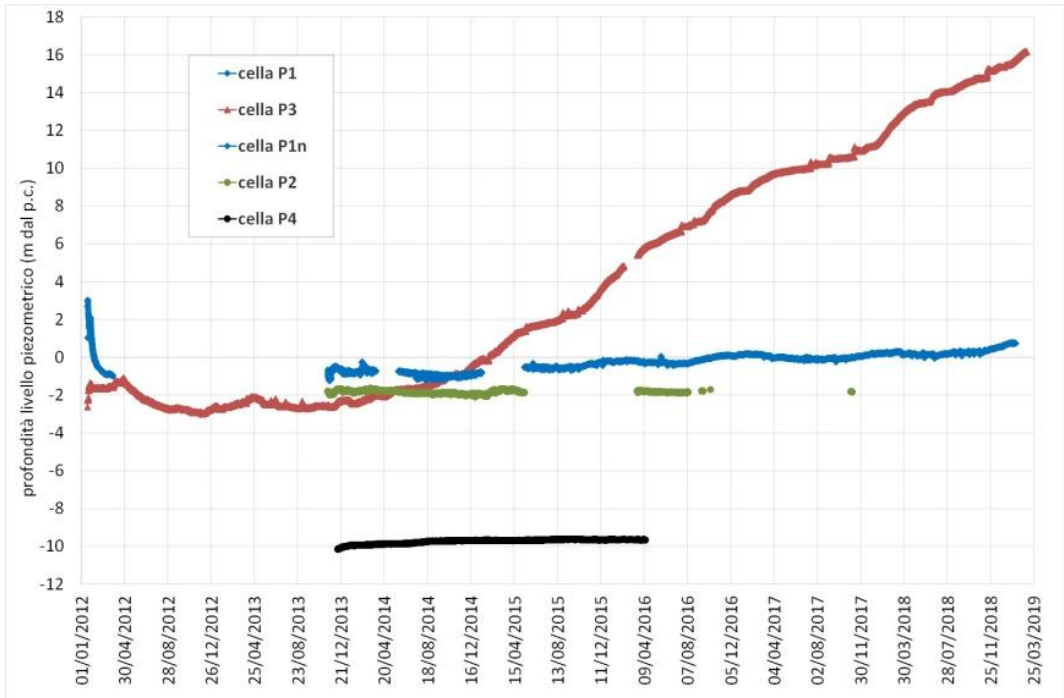


Figura C.33 - Livello piezometrico misurato nel periodo 2012 - 2019 rispetto al piano campagna dai diversi trasduttori di pressione installati nel settore centrale e più attivo della frana. Il piezometro 3 evidenzia un progressivo e costante incremento delle pressioni interstiziali che raggiungono livelli estremamente elevati e potrebbero contribuire a future riattivazioni localizzate del corpo frana

Il monitoraggio piezometrico ed inclinometrico

Quattro celle piezometriche a corda vibrante con acquisizione in continuo sono state installate nel 2012 (*post-operam*) lungo il canale centrale della frana, dal gomito fino alla porzione inferiore della zona di propagazione, consentendo così di controllare l'andamento della piezometria all'interno del corpo di frana, nel settore che ha mantenuto un livello di attività più elevato rispetto a quelli limitrofi (Figura C.33).

Due tubi inclinometrici a misura manuale sono stati installati rispettivamente nel settore superiore ed in quello medio-basso dello stesso settore centrale del canale di frana al fine di valutare lo spessore della frana e verificare le velocità di spostamento in profondità (Lollini *et alii*, 2017, 2020).

C.8.3 Risultati e discussione

Dall'analisi dei dati di monitoraggio è emerso che il piede della frana è il settore che ha registrato la massima velocità, per poi stabilizzarsi gradualmente a seguito dei lavori di sistemazione eseguiti in più fasi, a partire dall'inizio della fase di emergenza. La velocità massima registrata dal sistema GB-InSAR è stata di 2,9 m/giorno, il 1° maggio 2010 (Figura C.31-a).

Per comprendere la cinematica della frana in corrispondenza dei settori più critici e fornire informazioni utili da un punto di vista operativo, sono stati identificati quattro settori in corrispondenza del piede (A, B, C e D) e due aree (settori E ed F), rispettivamente ubicate in prossimità del cosiddetto "gomito" della frana e sulla corona di frana (Figura C.31-f). Nei primi giorni di monitoraggio, la frana si

muoveva con una velocità tale che gli interferogrammi dovevano essere calcolati sulla base di un intervallo di tempo molto breve (circa 4 minuti) (Figura C.31-a).

Quando, in virtù dei primi interventi di mitigazione, la velocità della frana ha iniziato a diminuire (Figura C.31-c), lo spostamento è stato calcolato utilizzando immagini radar mediate su intervalli temporali più lunghi (4 e 24 ore), con lo scopo di ottenere valori meno rumorosi e più affidabili (Figura C.31-d/f). L'interpretazione dei dati e la disponibilità di una lunga serie temporale (2010–2019) come quella delle RTSs, non comune per le colate di terra, forniscono un quadro chiaro per studiare l'evoluzione cinematica della frana. Sebbene l'efficacia degli interventi di drenaggio sia stata testimoniata dalla riduzione generale dei fenomeni di riattivazione, il settore E rimane l'ultimo settore attivo della frana, il quale comunque mostra tassi di movimento inferiori di un ordine di grandezza rispetto a quelli misurati durante la fase critica, con una velocità media approssimativamente pari a 40-50 cm/anno che tende a ridursi negli ultimi anni (Lollino *et alii*, 2017).

Il monitoraggio piezometrico ha permesso di individuare l'esistenza di processi transitori di sviluppo di sovrappressioni interstiziali e successiva consolidazione innescati da fenomeni locali di compressione non drenata dei sedimenti fini esercitati dai settori franosi più attivi nei confronti di settori immediatamente a valle più lenti. Nei primi anni del monitoraggio (2012-2014), si è osservato un trend piezometrico lungo il canale pressoché stazionario, caratterizzato da escursioni piezometriche stagionali. A partire dal 2014, un lento incremento della pressione interstiziale è stato registrato nel settore E per effetto della sua compressione sul settore più a valle, pressoché stabile e caratterizzato da livelli piezometrici ben al di sotto del piano campagna (Lollino *et alii*, 2020).

I dati inclinometrici hanno invece consentito di ricostruire lo spessore della frana nel settore E, mediamente dell'ordine di 7-8 m. L'integrazione dei dati ha permesso di ricondurre l'instabilità di determinati settori alla combinazione di fattori di tipo geometrico, piezometrico e geotecnico (scadenti proprietà meccaniche dei terreni). I risultati emersi dalle diverse

attività di monitoraggio mostrano una sostanziale congruenza in termini di valori di spostamento registrati. Inoltre, il sistema di monitoraggio integrato ha garantito, oltre che una copertura dati continua, anche la possibilità di analizzare il fenomeno sfruttando i vantaggi di tecniche diverse e di minimizzarne i limiti.

I dati analizzati mostrano come i settori instabili siano caratterizzati da deformazioni persistenti nel tempo e spazialmente disomogenei, con tassi di spostamento ed accelerazioni diversificate nello spazio e nel tempo (Figura C.31-b). I risultati mostrano una generale tendenza alla stabilizzazione, sebbene un'attenzione specifica sia dovuta alle aree dove si registrano aumenti significativi dei livelli piezometrici indotti dai processi di carico non drenato anzidetti (Lollino *et alii*, 2020).

C.8.4 Riferimenti bibliografici

Ferrigno F., Gigli G., Fanti R., Intrieri E., Casagli N. (2017) GB-InSAR monitoring and observational method for landslide emergency management: the Montaguto earthflow (AV, Italy). *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 17(6).

Giordan D., Allasia P., Manconi A., Baldo M., Santangelo M., Cardinali M., Corazza A., Albanese V., Lollino G., Guzzetti F. (2013) Morphological and kinematic evolution of a large earthflow: The Montaguto landslide, southern Italy, *Geomorphology*, 187, 61-79.

Guerriero L., Coe J.A., Revellino P., Grelle G., Pinto F., Guadagno F.M. (2014) Influence of slip-surface geometry on earth-flow deformation, Montaguto earth flow, southern Italy. *Geomorphology*, 219, 285-305.

Lollino P., Giordan D., Allasia P. (2017) Assessment of the behavior of an active earth-slide by means of calibration between numerical analysis and field monitoring. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(2), 421-435.

Lollino P., Giordan D., Allasia P., Fazio N.L., Perrotti M., Cafaro F. (2020) Assessment of post-failure evolution of a large earthflow through field monitoring and numerical modelling. *Landslides*, 17(9), 2013-2026.

C.9 FRANA DI COSTA DELLA GAVETA (PZ, BASILICATA)

C.9.1 Inquadramento del sito

La frana di Costa della Gaveta si sviluppa sull'omonimo versante, in sinistra idrografica del fiume Basento, a est della città di Potenza, in Basilicata. Pur essendo estremamente lenta, essa causa nel tempo rilevanti danni a strutture e infrastrutture (SS 407 Basentana, tratta ferroviaria Potenza-Metaponto). La frana rientra tra i fenomeni naturali di ampie dimensioni delle aree dell'Appennino centro-meridionale in cui sono presenti formazioni geologiche strutturalmente complesse (Di Nocera *et alii*, 1996; Picarelli *et alii*, 2002). La successione litologica del versante su cui si sviluppa la frana è formata da due principali complessi sovrapposti stratigraficamente (Figura C.34): il complesso argilloso-marnoso (AV) da riferire alla formazione delle Argille Varicolori e il complesso calcareo-marnoso (CP) da riferire alla formazione della Corleto Perticara. La successione litologica inferiore (AV), generalmente mascherata dalle coperture detritico-colluviali o da terreni di frana, è costituita da alternanze di argille scagliettate, e subordinatamente di calcari marnosi, diaspri, calcareniti e calcilutiti torbiditiche silicizzate in sottilissimi strati. Lo spessore visibile è dell'ordine di 200 m. Il complesso litologico di calcari marnosi e marne (CP) è formato da alternanze di varie decine di metri di strati di calcari marnosi, calcareniti massive, marne calcaree limose, argilliti e argille marnose. Lo spessore del complesso litologico CP è nell'ordine di 100 m. Le formazioni ovunque presentano un alto grado di fratturazione dovuto agli effetti della tettonica compressiva e surrettiva. La frana è ubicata in corrispondenza della sovrapposizione del sistema di faglie NW-SE/NE-SW, di età pliocenica, sul sistema di faglie NNE-SSW e E-W prodotto dalla tettonica compressiva miocenica. L'ampio bacino di frana, evoluto nel tempo, si sviluppa fra le quote di circa 931 m e 630 m s.l.m.m., con un'estensione di circa 60 ettari. La Figura C.34 riporta i limiti del sistema franoso e il principale corpo di frana: una colata lunga circa 1250 m, larga da 100 a 600 m, con un volume di circa 3×10^6 m³.

L'inclinazione media del piano campagna nel canale è di circa 9°-10°; la profondità massima della superficie di scorrimento indicata dalle misure inclinometriche è di circa 40 m (Figura C.34 e Figura C.35). La frana presenta i caratteri geometrici e cinematici di una colata in fase di movimento estremamente lento, concentrato in una sottile banda di taglio (Urciuoli *et alii*, 2016). È mobilitata la resistenza residua, con angolo di attrito medio $\varphi'_r = 9^\circ$ -10°. Negli ultimi 15 anni di monitoraggio, le velocità di scorrimento medie annue sono risultate costanti nel tempo ma variabili lungo l'asse della frana, da qualche cm/anno in testa a pochi mm/anno nell'accumulo (Di Maio *et alii*, 2010; 2013; 2017; Vassallo *et alii*, 2020). Le variazioni stagionali di velocità sono correlate alle pressioni dell'acqua interstiziale che risultano molto influenzate dal regime meteorico nella banda di taglio, mentre altrove sono praticamente costanti. Di fatto, la conducibilità idraulica aumenta di vari ordini di grandezza passando dalla formazione in posto al corpo di frana alla banda di scorrimento, connessa con l'atmosfera in ampie zone (De Rosa *et alii*, 2019; Di Maio *et alii*, 2020). Le prime indagini sulla frana di Costa della Gaveta si sono svolte nell'ambito di convenzioni tra l'Università della Basilicata e la Regione Basilicata. Ulteriori studi sono stati svolti nell'ambito di Progetti di Ricerca PRIN (MIUR), di convenzioni con ISPRA (interventi realizzati con la Legge 3 agosto 1998 n.267 - Legge Sarno) e con RFI (Rete Ferroviaria Italiana). Sono stati terebrati fori di sondaggio e sono state installate strumentazioni per la valutazione di spostamenti superficiali e profondi, pressioni dell'acqua interstiziale, pressioni totali, deformazioni di elementi strutturali. Qui vengono mostrati sinteticamente i risultati delle misure inclinometriche e GPS.

C.9.2 Monitoraggio con sistemi inclinometrici e GPS

Le misure inclinometriche sono iniziate nel 2005. I tubi sono stati installati fino a 50 m di profondità sia lungo l'asse longitudinale della frana che lungo alcune sezioni trasversali (Figura C.35). Le misure sono state eseguite inizialmente con sonde mobili e successivamente, dopo aver individuato le superfici di scorrimento, con sonde

fisse alle profondità di concentrazione delle deformazioni. Sono state utilizzate sonde servo-accelerometriche con una precisione di 1 mm/20 m. Le letture sono state generalmente eseguite con passo di 0,5 m, a volte di 0,1 m. In alcune postazioni, è stato possibile realizzare nuovi fori per integrare quelli andati fuori uso per eccesso di deformazione.

Nel 2006 è stata installata, a cura dell'Area di Geofisica di ISPRA, una rete complessiva di 14 capisaldi per misure GPS periodiche. Capisaldi a centramento forzato sono stati installati su manufatti in cemento armato e, mediante appositi adattatori, sulla testa dei tubi inclinometrici (Figura A.14). Le misure sono eseguite con frequenza annuale in modalità statica, con strumentazione geodetica, e i dati sono elaborati con il software scientifico Bernese 5.2 rispetto alle stazioni permanenti appartenenti alla rete EUREF. Nel 2007, sulla base dei risultati ottenuti dalle misure inclinometriche, e per meglio comprendere il cinematisma della frana, il sistema è stato integrato con un segmento di rete GNSS in continuo composto di 6 stazioni. La stazione di riferimento (Master) è stata installata sulla sommità della collina, in un'area stabile, ed è dotata di un'antenna *Choke Ring*; la sua posizione rispetto alle stazioni di riferimento EUREF viene periodicamente verificata. Le stazioni sono alimentate tramite pannelli fotovoltaici. I dati sono acquisiti in continuo a intervalli di 30 s e sessioni di 24 h, trasmessi via router 4G/LTE alla sede ISPRA di Roma, e archiviati in formato grezzo. Viene effettuato il controllo di qualità dei dati, che sono successivamente trasformati in formato RINEX, e condotta giornalmente una pre-elaborazione in automatico rispetto alla stazione Master considerata fissa. Dalla sua installazione, il sistema ha funzionato con continuità.

C.9.3 Risultati e discussione

I profili inclinometrici (Figura C.35) mostrano che le deformazioni dei tubi si sono concentrate, nel periodo di monitoraggio, in una sottile banda di spessore stimato nell'ordine di 0,5 m. L'ubicazione delle verticali indagate e le elaborazioni geomorfologiche e geometriche (Di Maio *et alii*, 2010; 2013) hanno consentito di ipotizzare

l'andamento della superficie di scorrimento nelle sezioni longitudinali e trasversali. Inoltre, i profili inclinometrici mostrano che le velocità di spostamento diminuiscono da monte verso valle, mentre aumentano la profondità della superficie di scorrimento e l'area delle sezioni trasversali. Nelle sezioni trasversali, le velocità di spostamento sono risultate poco variabili. Di Maio *et alii* (2010; 2013) hanno mostrato che la portata di terreno può essere considerata costante nel canale. La Figura C.36 riporta l'andamento nel tempo degli spostamenti inclinometrici profondi e superficiali (evidenziando la fascia di variazione) e gli spostamenti valutati con il sistema GPS. Il confronto mostra una notevole coerenza fra i due tipi di dati, con gli spostamenti GPS leggermente maggiori, come era da attendersi (Calcaterra *et alii*, 2012). Pertanto, i dati GPS hanno consentito non solo di estendere le serie temporali di spostamento nelle aree in cui gli inclinometri sono andati fuori uso, ma anche di monitorare le aree in cui non sono installati altri tipi di strumenti. I risultati del monitoraggio permettono di tracciare il campo dei vettori velocità di spostamento dell'intero corpo di frana per tutto il periodo di monitoraggio. La Figura C.37 mostra la sostanziale uniformità delle velocità nelle sezioni trasversali e la sua riduzione da monte verso valle. Tale riduzione, come si è detto, è stata interpretata come l'effetto di un movimento a portata costante nel canale a sezione crescente verso valle. La Figura C.37 riporta anche le velocità medie annue del periodo di osservazione lungo l'asse della frana. I punti sperimentali rappresentano le velocità determinate mediante le misure inclinometriche. Data la continuità del movimento, la curva interpolante permette di stimare le velocità medie annue anche nelle sezioni non strumentate. Nell'ipotesi ragionevole che il fenomeno proceda in condizioni simili a quelle attuali, e in assenza di fenomeni estremi, è quindi possibile prevedere gli spostamenti nell'intera area in frana e i conseguenti danni.

In conclusione, il monitoraggio di circa 15 anni degli spostamenti profondi e superficiali, con sistemi inclinometrici e GPS fissi e mobili, ha fornito numerosi elementi di comprensione della cinematica della frana. In particolare, è stato possibile definire il campo di

velocità esteso a tutto il volume in frana, e verificare che l'evoluzione temporale degli spostamenti in questo lungo periodo è stata lineare. È possibile quindi, in assenza di eventi eccezionali, prevedere l'evoluzione futura degli spostamenti anche basandosi su pochi punti di monitoraggio e, in particolare, basandosi sulla rete GPS che continuerà a funzionare, stabilendo la necessaria continuità con il passato. Oltre che con il monitoraggio, la riduzione del rischio associato alla frana di Costa della Gaveta viene perseguita anche dal punto di vista dei possibili interventi di riduzione delle velocità. A tale scopo sono in corso studi paralleli su interventi di carattere chemo-idro-meccanico (Di Maio *et alii*, 2015; 2017; 2020).

C.9.4 Riferimenti bibliografici

- Calcaterra S., Di Maio C., Gambino P., Vallario M., Vassallo R. (2012) Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: a case study in Southern Apennines, Italy. *Nat. Haz.* 2012, 61, 257–266.
- De Rosa J., Pontolillo D.M., Caputo V., Di Maio C., Scaringi G. (2019) Evaluation of hydraulic conductivity in the slip zone of an earthflow in clay shales. *Proc. XVII Europ. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng.*, 546–552.
- Di Nocera S., Fenelli G.B., Pellegrino A., Ramondini M. (1996) Geological and Geotechnical problems in slopes involved in large old landslides. *Proc. VII Int. Symposium on Landslides, Trondheim*, 1–6.
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M., Pascale S., Sdao F. (2010) Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italia Southern Apennines. *Eng. Geol.* 2010, 116, 311–322.
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M. (2013) Plastic and viscous displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation. *Eng. Geol.* 2013, 162, 53–66.
- Di Maio C., Scaringi G., Vassallo R. (2015) Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: Influence of pore fluid composition. *Landslides* 2015, 12, 657–667.
- Di Maio C., Vassallo R., Scaringi G., De Rosa J., Pontolillo D.M., Grimaldi G.M. (2017) Monitoring and analysis of an earthflow in tectonized clay shales and study of a remedial intervention by KCl wells. *Riv. Ital. Geotec.* 2017, 51, 48–63.
- Di Maio C., De Rosa J., Vassallo R., Coviello R., Macchia G. (2020) Hydraulic conductivity and pore water pressures in a clayey earthflow: Experimental data. *Geosciences* 2020, 10, 102.
- Picarelli L., Olivares L., Di Maio C., Silvestri F., Di Nocera S., Urciuoli G. (2002) Structure, properties and mechanical behaviour of the highly plastic, intensely fissured Bisaccia clay shale. *Proc. Int. Workshop on Charact. and eng. prop. of nat. soils*, 2, 947–982.
- Urciuoli G., Comegna L., Di Maio C., Picarelli L. (2016) The Basento Valley: a natural laboratory to understand the mechanics of earthflows. *Riv. Ital. Geotec.* 2016, 50(1): 71-90.
- Vassallo R., Grimaldi G.M., Di Maio C., Di Nocera S. (2016) An earthflow in structurally complex formations of the Italian Southern Apennines: Geological structure and kinematics. *Proc. XII Int. Symp. on Landslides*, 2, 813–820.
- Vassallo R., Calcaterra S., D'Agostino N., De Rosa J., Di Maio C., Gambino P. (2020) Long-term displacement monitoring of slow earthflows by inclinometers and GPS, and wide area surveillance by COSMO-SkyMed data. *Geosciences*, 10, 171.

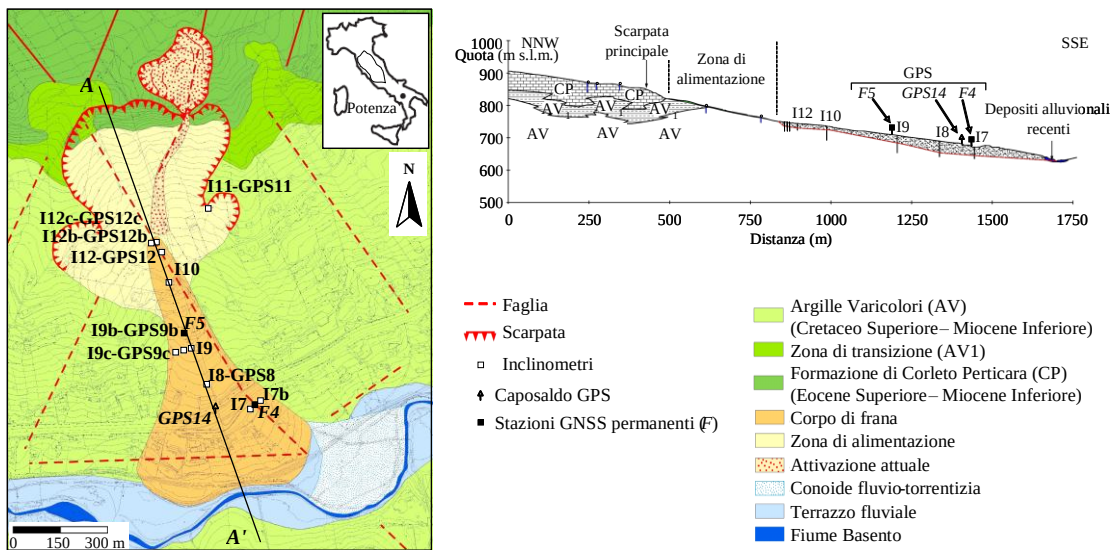


Figura C.34 - Mappa e sezione geologica AA' (Fonte: modificata da Vassallo *et alii*, 2016)

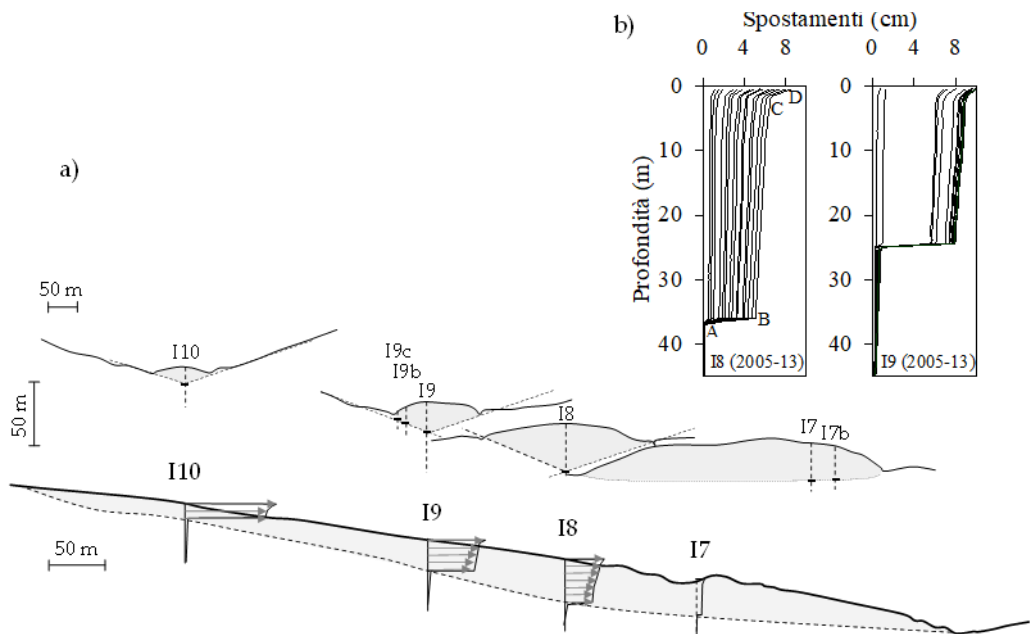


Figura C.35 - Sezioni longitudinali e trasversali con profili inclinometrici medi annui (a); profili inclinometrici I8 e I9 (b) (Fonte: Vassallo *et alii*, 2020)

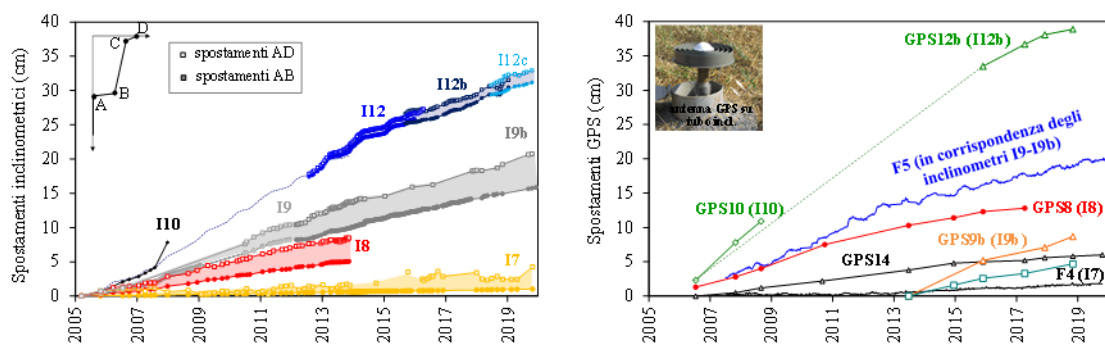


Figura C.36 - Spostamenti inclinometrici profondi e superficiali e spostamenti GPS in funzione del tempo (Fonte: Vassallo *et alii*, 2020)

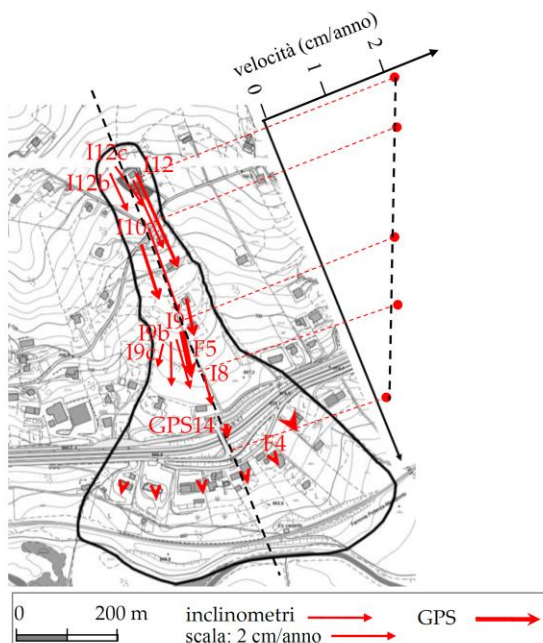


Figura C.37 - Campo di velocità di spostamento (Fonte: Vassallo *et alii*, 2020) e della velocità media annua lungo l'asse longitudinale della frana

C.10 FRANA DI PISCIOLO (PZ, BASILICATA)

Il versante Piscioło, nella Valle del Fiume Ofanto, ingloba un complesso bacino franoso, sede di processi che mettono a rischio alcune infrastrutture di notevole esposizione ubicate nella zona di piede del versante (Figura C.38). Al suo interno sono presenti frane rototraslative da mediamente profonde a profonde, a cinematica lenta, ed alcune frane superficiali, che complessivamente coinvolgono successioni argillose tettonizzate con strati rocciosi fratturati e discontinui. Ricerche basate su sperimentazione in sito, in laboratorio ed analisi numeriche, hanno dimostrato che l'attuale attività franosa nel bacino è largamente clima-indotta (Cotecchia *et alii*, 2014, 2015, 2019). Questo caso di studio, inoltre, può considerarsi esemplificativo di un meccanismo di frana molto diffuso nel fronte esterno dell'Appennino Meridionale.

C.10.1 Inquadramento del sito

Il versante in frana ricade nel territorio comunale di Melfi (Potenza), prossimo al confine regionale tra la Basilicata e la Campania. Esso è situato in un territorio prettamente collinare, di altitudine media circa 530 m sul livello medio del mare nel fronte esterno dell'Appennino Meridionale, ed è solcato dal Fosso Piscioło, che è un affluente a regime torrentizio del Fiume Ofanto (Figura C.38).

I terreni e le rocce che compongono il versante sono di origine sedimentaria, parte di formazioni torbiditiche con caratteri meso-strutturali effetto di disturbo di origine tettonica, come l'eterogeneità tessiturale e la fessurazione da mediamente a molto intensa. Le inclusioni rocciose fratturate, di dimensioni e forme variabili, sono disperse nella matrice argillosa fessurata e/o scagliosa. Questi caratteri meso-strutturali dei materiali costituenti il versante gli conferiscono un coefficiente di permeabilità in situ superiore rispetto a quello misurato in laboratorio, anche di più ordini di grandezza. La fessurazione dei materiali ne comporta, inoltre, una bassa resistenza meccanica, che si configura quale fattore predisponente la franosità per molti versanti appenninici, come quello in esame, i quali sono sede di antichi corpi di frana, di cui oggi si assiste

ad una loro riattivazione, spesso in fase tardo invernale, che si manifesta con spostamenti da lenti a molto lenti.

Il bacino franoso di Piscioło si estende longitudinalmente per circa 1,2 Km, dalla quota di 510 m s.l.m. alla quota di circa 250 m s.l.m., ed ha larghezza massima di circa 750 m, con una pendenza media di 12°. Al suo interno sono presenti diversi corpi di frana, più o meno attivi, tra cui quelli del settore a Sud del Fosso Piscioło, che definiscono l'area in frana denominata nel seguito come Frana Piscioło.

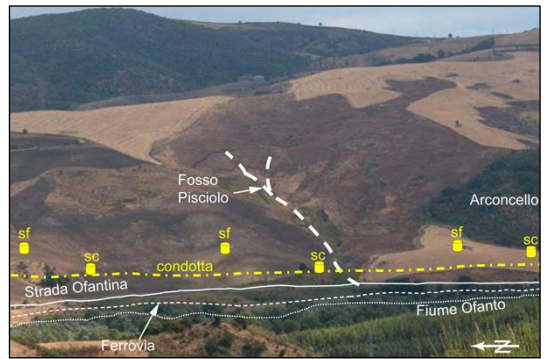


Figura C.38 - Foto panoramica del versante Piscioło (in giallo i pozzetti sede degli sfiati, sf, o degli scarichi, sc, della condotta interrata Ofanto; da Cotecchia *et alii*, 2014)

Al piede del bacino franoso si collocano tre infrastrutture d'importanza strategica (Figura C.38): la condotta Ofanto interrata di adduzione dell'Acquedotto Pugliese (piano di posa a 4 m da piano campagna), la strada statale 401 dir ("Ofantina") e la linea ferroviaria Rocchetta Sant'Antonio – Avellino. In particolare, la condotta Ofanto costituisce l'unico vettore dell'Acquedotto Pugliese alternativo al Canale Principale. L'attività del bacino franoso ha danneggiato ripetutamente queste infrastrutture causando la perdita della loro funzionalità, con particolare riferimento al tratto della condotta interagente con la Frana Piscioło (Cotecchia *et alii*, 2014).

L'assetto geologico-strutturale del versante in esame è stato fortemente condizionato dalla presenza di un'anticlinale ad andamento appenninico, che è stata anche dislocata da una faglia diretta, di direzione NE-SO, immergente verso Nord, lungo la quale si è

impostato il Fosso Pisciole (Figura C.39). Nel nucleo dell'anticlinale, attualmente emerso per erosione, affiora il Flysch Rosso (FYR), costituito da argille intensamente fessurate con inclusi calcarei fratturati. Ove non affiorante, il FYR soggiace alla Formazione di Paola Doce (FPD) che affiora estesamente sul versante (Figura C.39) ed è rappresentata da argille a luoghi limose, laminate e/o fessurate, che includono blocchi rocciosi fratturati variamente dispersi. La successione sedimentaria cretaceo-miocenica dei flysch FYR e FPD è sovrastata dalle arenarie mioceniche del Flysch Numidico (FYN), che ivi affiorano solo localmente, ad Ovest e ad Est, lungo i fianchi dell'anticlinale (Figura C.39).

La diagnosi fenomenologica del processo franoso di Pisciole è conseguita ad analisi sinergiche di dati frutto di rilievi, di indagini geognostiche, di prove geotecniche di laboratorio, di analisi geomorfologiche, di monitoraggi geotecnici e topografici. La diagnosi fenomenologica della franosità è stata inoltre verificata tramite modellazione numerica del meccanismo, i cui risultati hanno contribuito a delineare le cause predisponenti ed innescanti dell'attività attuale dei corpi di frana.

C.10.2 Sistema di monitoraggio

Nel 2009 è stata avviata la campagna geognostica per lo studio approfondito del versante in frana, progettata sulla base delle conoscenze acquisite da rilievi geologico-geomorfologici di superficie, dalla fotointerpretazione multi-temporale (foto aree 1955-2003, immagini Google Earth 2002-2014), e dall'analisi di documenti storici. La campagna geognostica è consistita in: trenta sondaggi, a carotaggio continuo o a distruzione (Figura C.39, Tabella C.4), tomografie elettriche, per la ricostruzione dell'assetto litostratigrafico del versante, prelievo di campioni indisturbati per la caratterizzazione geotecnica dei materiali, installazione di rivestimenti inclinometrici e di celle piezometriche, e rilievi GPS, per il monitoraggio degli spostamenti e dei carichi piezometrici nel tempo, rispettivamente effetti e fattori interni della franosità.

I sensori GPS sono stati installati sui pozzetti di scarico e sfiato della condotta (Figura C.38, Figura C.39),

permettendone il monitoraggio degli spostamenti nel tempo con la tecnica del GPS statico differenziale (DGPS – *Differential GPS*; con sensore fisso posizionato sul lato opposto della valle a Monteverde).

Tabella C.4 - Specifiche tecniche dei sondaggi terebrati nel versante Pisciole (l'ubicazione dei sondaggi è riportata in Figura C.39; C.C. = Cella di Casagrande; C.E. = Cella elettrica)

Sigla	Profondità sondaggio (m)	Tubazione inclinometrica (m)	Tipologia cella piezometrica - profondità installazione (m)
P1	20	-	C.C. - 13, C.C. - 20
P2	50	-	C.C. - 33, C.E. - 50
P3	80	-	C.C. - 53, C.E. - 80
P4	80	-	C.E. - 39, C.E. - 80
P5	60	-	C.C. - 40, C.C. - 60
P6	50	-	C.E. - 33, C.E. - 50
P7	50	-	C.E. - 15, C.C. - 36
P8	20	-	C.C. - 15
I1	20	20	-
I2	20	20	-
I3	40	40	-
I4	80	80	-
I5	80	80	-
I6	80	80	-
I7	60	60	-
I8	50	50	-
I9	40	40	-
I10	50	50	-
I11	60	60	-
I12	50	50	-
I13	30	30	-
I14	50	50	-
I15	20	20	-
I16	20	20	-
I17	50	50	-
I18	60	60	-
I19	80	80	-
I20	50	50	-
I21	20	20	-
I22	20	20	-

Il monitoraggio piezometrico è stato condotto al fine di caratterizzare il regime delle pressioni interstiziali nel versante nel tempo; in particolare, si è sin da subito riscontrata la presenza di quote piezometriche molto elevate anche in profondità, circostanza riconosciuta quale fattore predisponente la franosità del versante. Pertanto, si è voluto poi caratterizzarne il trend durante l'anno, per verificarne la genesi e valutare possibili strategie di intervento per la loro riduzione (es. interventi di drenaggio).

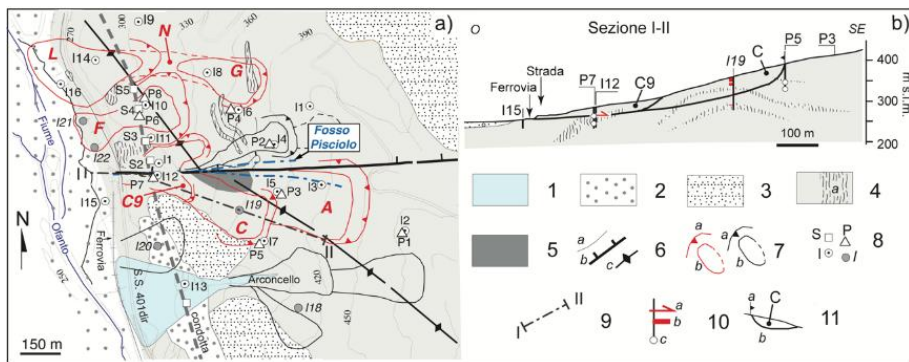


Figura C.39 - Carta geologica (a) e sezione del versante Pisciolò (da Cotecchia *et alii*, 2014 modificato): 1) deposito di conoide; 2) detrito di versante e deposito alluvionale; 3) FYN; 4) FPD con inclusioni rocciose fratturate (a); 5) FYR; 6) contatti stratigrafici (a), faglia (b) e asse di anticlinale (c); 7) frana attiva (rosso) e inattiva (nero; a-nicchia di distacco, b-corpo); 8) sondaggio attrezzato con piezometro (P) o con inclinometro (I - carotaggio a distruzione, I-carotaggio continuo), sensore GPS (S); 9) traccia della sezione; 10) zona di piegamento inclinometrico (a), terreno disturbato da frana (b) e cella piezometrica (c); 11) frana con sigla del corpo (a-intercetta sul pendio della nicchia di distacco, b-superficie di scorrimento)

In particolare, le verticali piezometriche sono state otto, ognuna sede di due celle piezometriche (tipo Casagrande e/o elettriche; Tabella C.4) di cui si è svolto un prolungato monitoraggio nel tempo. Le verticali attrezzate con tubazione inclinometrica sono state ventidue (Tabella C.4), lungo le quali sono stati monitorati gli spostamenti in profondità tramite frequenti rilievi svolti con la sonda inclinometrica biassiale mobile. Tali rilievi hanno permesso di individuare le porzioni della banda di taglio confinanti i corpi di frana più attivi presenti nel versante. L'attività di monitoraggio è durata fino a maggio del 2013, tranne per tre tubazioni inclinometriche (i.e. I3, I8 e I12 in Figura C.39) che hanno registrato piegamenti importanti tanto da renderli inutilizzabili già nel 2011. La campagna geognostica ed i monitoraggi sono stati finanziati dall'Acquedotto Pugliese s.p.a.

C.10.3 Risultati e discussione

La carta in Figura C.39-a deriva dall'analisi dei dati desunti dai rilievi geologico-geomorfologici (2007-2013), dalla fotointerpretazione, dalle indagini geognostiche (2009-2010) e dai monitoraggi inclinometrici (2009 - 2013).

L'analisi stereoscopica di foto aeree multi-temporali ha evidenziato come la franosità sul versante si sia evoluta dal 1955 ad oggi, con allargamento ed approfondimento dei corpi di frana, divenuti da mediamente profondi a profondi. In particolare, i corpi C9, C ed A (Figura C.39), che compongono la dianzi citata Frana Pisciolò, si sono formati per approfondimento di scorrimenti superficiali aventi piede nel Fosso Pisciolò, la cui efficienza, quale asta fluviale sul versante, è stata fortemente compromessa negli anni a causa dell'attività degli scorrimenti che ne hanno coinvolto le sponde. Al contempo, l'avanzamento dei corpi di frana L ed F ha coinvolto parte della strada Ofantina, raggiungendo il Fiume Ofanto per avanzamento dei piedi (Figura C.39).

I diversi corpi di frana, da superficiali a profondi, coinvolgono le argille della FPD e gli inclusi rocciosi, e solo in profondità le argille del FYR (Figura C.39). Come verificato con prove geotecniche in laboratorio (Cotecchia *et alii*, 2014), la fessurazione influenza fortemente la risposta idro-meccanica di queste argille (Vitone & Cotecchia, 2011). Infatti, tali argille (frazione argillosa=40-52%, limosa=35-36% e sabbiosa=11-21%), di elevato indice di plasticità (=33-45%) e di attività, hanno meso-tessitura che ne determina un maggiore coefficiente di permeabilità ($k_{sat}=10^{-9}$ m/s) e le

riduce i parametri di resistenza (media: $\phi'_p=20^\circ$; $c'_p=0$ kPa).

Le deformate inclinometriche hanno evidenziato l'esistenza di bande di taglio ben definite in profondità (e.g. corpi G ed L a Nord, C9 e C della Frana Pisciole, nella porzione Sud; Figura C.40). Le letture piezometriche hanno al contempo reso evidente quanto i carichi piezometrici nel versante siano molto alti, anche in profondità, e subiscano fluttuazioni stagionali. In Figura C.41 sono riportati gli andamenti delle quote piezometriche rispetto al piano campagna, misurate in celle piezometriche a diverse profondità lungo diverse verticali. Insieme all'andamento delle quote piezometriche, la Figura C.41 riporta anche quello della cumulata totale di pioggia a 180 giorni. Il grafico mostra una certa corrispondenza tra l'evolversi nel tempo delle quote piezometriche e della cumulata di pioggia.

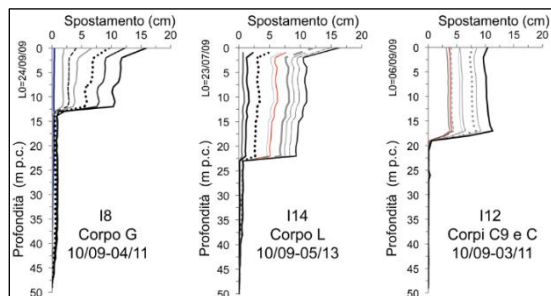


Figura C.40 - Spostamenti cumulati registrati per tre inclinometri; la lettura di zero è del 2009 ed è riportato l'intervallo del monitoraggio per ciascun inclinometro (Fonte: Cotecchia *et alii*, 2014, 2015 modificato)

Diagnosi fenomenologica del meccanismo franoso

La Figura C.42 riporta i dati di monitoraggio di alcune delle strumentazioni installate al piede del versante (I12, P7 e S2 in Figura C.39) nonché l'andamento della cumulata totale di pioggia a 180 giorni (stazione meteorologica di Melfi). Risulta evidente come, nella zona di piede del versante, le velocità della Frana Pisciole subiscano delle variazioni al variare dei carichi piezometrici in profondità, la cui fluttuazione risulta stagionale, analogamente alla variazione delle cumulate di pioggia a 180 giorni. Tali dati di monitoraggio, dunque

fanno avanzare l'ipotesi che i processi di infiltrazione nel pendio su scala stagionale risultino essere causa delle accelerazioni dei movimenti della Frana Pisciole e delle altre frane dell'intero bacino franoso (Cotecchia *et alii*, 2014). In particolare, l'infiltrazione delle piogge, al netto del ruscellamento e dell'evapo-traspirazione, produce, dall'autunno al tardo inverno, un aumento dei carichi piezometrici sino a grandi profondità, con la conseguente riduzione delle resistenze disponibili, cui consegue l'accelerazione dei movimenti. L'interpretazione del meccanismo di frana è stata validata mediante la modellazione dei processi di filtrazione transitoria nel pendio, connessi all'alimentazione del dominio di filtrazione nel contesto idrogeologico del versante ed all'interazione pendio-vegetazione-atmosfera. A tal fine è stata effettuata una estesa caratterizzazione idraulica delle argille fessurate, delle inclusioni rocciose fratturate presenti nel versante e quindi dell'ammasso alla scala di sito (Cotecchia *et alii*, 2014, Pedone, 2014; Vitone *et alii*, 2019).

Modellazione idraulica disaccoppiata dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Con lo stesso approccio di modellazione numerica descritto da Cotecchia *et alii* (2014, 2019), Tagarelli & Cotecchia (2019) hanno effettuato un calcolo bidimensionale della filtrazione transitoria indotta dal clima nel caso di studio, per il periodo dal 2008 al 2013. Riferendosi allo schema riportato da Elia *et alii* (2017), è stato effettuato un calcolo idraulico disaccoppiato (H), integrando l'equazione di Richards (1931), con il software Seep/W (GeoStudio™, 2012). I risultati dell'analisi idraulica di filtrazione sono stati poi adottati come input in analisi di stabilità all'Equilibrio Limite (LEM) dei due corpi interni alla Frana Pisciole più attivi: C9 e C. Le condizioni al contorno adottate, le proprietà idrauliche (in condizioni di totale e parziale saturazione, i.e. conducibilità satura, funzione di conducibilità parzialmente satura e curva di ritenzione), e i parametri di resistenza implementati nelle analisi LEM, sono discussi e riportati in Tagarelli & Cotecchia (2019). Le analisi LEM hanno mostrato la variazione durante gli anni (dal 2008 al 2013) del fattore di sicurezza dei diversi corpi di frana interni (i.e. C e C9) che il

monitoraggio ha messo in evidenza come più attivi. La Figura C.43 sintetizza i risultati ottenuti, e riporta il confronto tra i risultati della modellazione numerica (idraulica disaccoppiata, H, e di stabilità, LEM) ed i dati di monitoraggio. Si nota un ottimo accordo tra i carichi piezometrici monitorati dalle due celle piezometriche lungo la verticale P7 ed i carichi dalla modellazione numerica. Le oscillazioni piezometriche previste numericamente hanno andamento stagionale che non risente del singolo evento piovoso (Figura C.43), coerentemente alle oscillazioni monitorate. Inoltre, le oscillazioni piezometriche, sia monitorate che modellate, non variano considerevolmente con la profondità (da 15 a 36 metri) e mostrano una fluttuazione di 2-2,5 metri. È confermato il sincronismo tra le fluttuazioni piezometriche e l'andamento della cumulata a 180 giorni. Altro risultato importante e non

scontato dell'analisi numerica è quello della variabilità delle oscillazioni piezometriche tra i diversi anni, indotta dalla variabilità delle grandezze climatiche negli stessi diversi anni.

La Figura C.43 mostra anche l'andamento del fattore di sicurezza (Morgenstern & Price, LEM) dei corpi C e C9 (linea tratteggiata e continua), per cui i dati di monitoraggio (inclinometrici e GPS) indicano la ricorrente riattivazione in tardo inverno-inizio primavera. La modellazione eseguita conferma che tali riattivazioni sono connesse all'interazione pendio-vegetazione-atmosfera. Infatti, le frecce rosse indicano il raggiungimento del coefficiente di sicurezza unitario nel marzo 2009 e nel marzo 2011, allorquando sono stati registrati danni della condotta in sito.

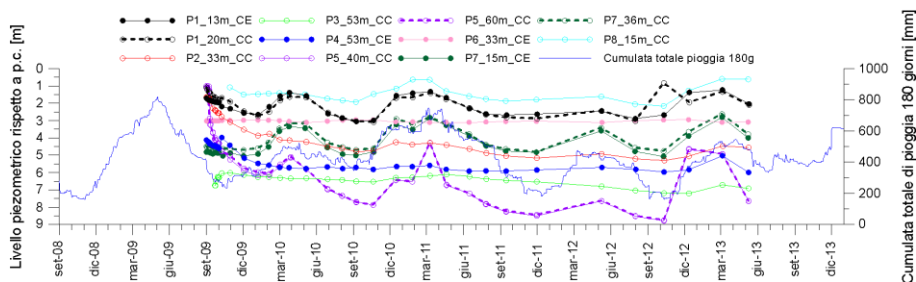


Figura C.41 - Piogge cumulate a 180 giorni (stazione pluviometrica di Melfi, linea blu) e livelli piezometrici rispetto al piano campagna registrati dalle celle piezometriche (CC, cella Casagrande, simbolo vuoto; CE, cella elettrica, simbolo pieno; le profondità delle celle sono in legenda; Fonte: modificato da Cotecchia *et alii* 2014)

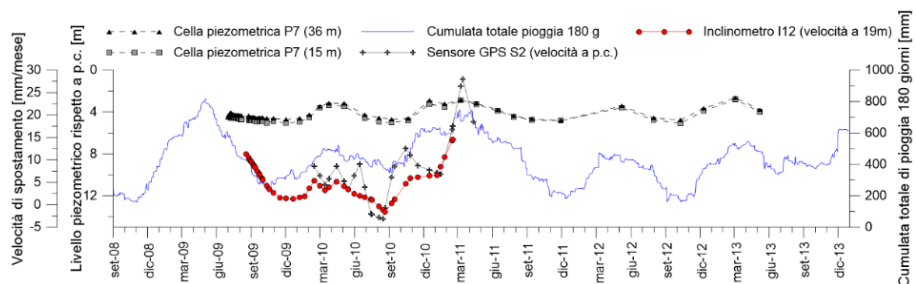


Figura C.42 - Velocità degli spostamenti misurati in profondità a 19 metri lungo la verticale inclinometrica I12 e in superficie, in corrispondenza del sensore GPS S2 (Figura C.39). Livelli piezometrici misurati dalle celle a 15 metri e a 36 metri sotto il piano campagna, lungo la verticale piezometrica P7 (Figura C.39), unitamente alla cumulata di pioggia a 180 giorni (Fonte: Cotecchia *et alii* 2014, modificato)

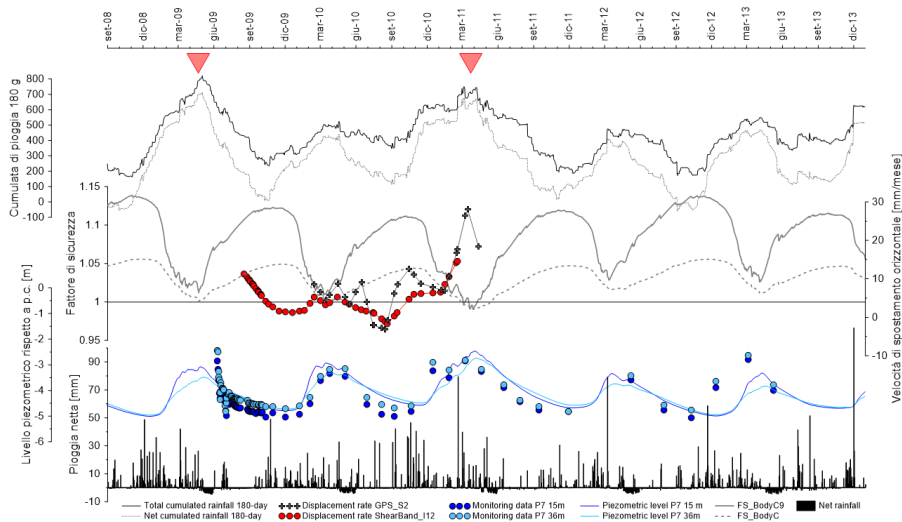


Figura C.43 - Carichi piezometrici registrati (piezometri lungo la verticale P7, Figura C.39) e modellati tramite modellazione numerica idraulica disaccoppiata, unitamente alla cumulata netta e totale a 180 giorni, e ad al fattore di sicurezza dei corpi C e C9 (Figura C.39; Tagarelli & Cotecchia, 2019)

In conclusione, i dati riportati in Figura C.43 mostrano che la modellazione H+LEM realizzata rappresenta oggi uno strumento capace di prevedere la risposta al clima dei corpi profondi presenti nel versante Pisciole.

C.10.4 Riferimenti bibliografici

Cotecchia F., Pedone G., Bottiglieri O., Santaloia F., Vitone C. (2014) Slope-atmosphere interaction in a tectonized clayey slope: a case study. *Italian Geotechnical Journal*, 1: 34–61.

Cotecchia F., Vitone C., Santaloia F., Pedone G., Bottiglieri O. (2015) Slope instability processes in intensely fissured clays: Case histories in the Southern Apennines. *Landslides*, 12, 877–893.

Cotecchia F., Tagarelli V., Pedone G., Ruggieri G., Guglielmi S., Santaloia F. (2019) Analysis of climate-driven processes in clayey slopes for early warning system design. *Geotechnical engineering*, 172, 6, pp. 465-480 (DOI: 10.1680/jgeen.18.00217).

Elia G., Cotecchia F., Pedone G., Vaunat J., Vardon P.J., Pereira C., Springman S.M., Rouainia M., van Esch J., Koda E. *et alii* (2017) Numerical modelling of

slope–vegetation–atmosphere interaction: An overview. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 2017, 50, 249–270.

Pedone G. (2014) Interpretation of Slow and Deep Landslides Triggered by Slope-Atmosphere Interaction in Slopes Formed of Fissured Clayey Turbidites. Ph.D. Thesis, Polytechnical University of Bari, Bari, Italy, 2014.

Tagarelli V., Cotecchia F. (2019) Deep Movements in Clayey Slopes Relating to Climate: Modeling for Early Warning System Design. *Research for Land Protection and Development. CNRIG 2019. Lect. Notes Civil Eng.* 2020, 40, pp. 205-214 doi:10.1007/978-3-030-21359-6_22.

Vitone C., Cotecchia F. (2011) The influence of intense fissuring on the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, 61, 12, pp. 1003-1018.

Vitone C., Guglielmi S., Pedone G., Cotecchia F. (2019) Effects of micro to meso-features on the permeability of fissured clays. *Géotechnique Letters*. 9. 10.1680/jgele.18.00237.

C.11 FRANA DI SERRA DI BUDA (CS, CALABRIA)

C.11.1 Inquadramento del sito

La frana di Serra di Buda è ubicata nei pressi di Acri (CS) ed interessa la Strada Statale N. 660 (SS 660), principale via d'accesso all'abitato (Figura C.44-a). Lo studio, avviato per l'emergenza che nell'inverno 1998-1999 ha determinato la chiusura della SS 660, è stato condotto dal CNR-IRPI di Cosenza, nell'ambito di collaborazioni scientifiche con la Regione Calabria (Gullà *et alii*, 2001, Sorriso-Valvo *et alii*, 2005), e la rete integrata di monitoraggio è stata progettata per la gestione dell'emergenza e la definizione del meccanismo di frana, Figura C.44-b (Gullà *et alii*, 2018a, b).

La frana (lunghezza 500 m, larghezza 370 m, profondità superficie scorrimento 60 m, area 13 ha, volume 6 Mm³) è uno scorrimento attivo di roccia, prevalentemente traslazionale (Borrelli e Gullà, 2017). La velocità ricade nelle classi da estremamente lenta a lenta con valori registrati da 0,4 a 25,0 mm/giorno (Gullà, 2014).

Le quote del pendio in frana variano tra 830 m s.l.m. (corona) e 550 m s.l.m. (piede) e l'inclinazione media è circa 23° (fino a circa 80° alla base pendio, in corrispondenza del torrente Calamo) (Figura C.44-a).

I fattori di predisposizione sono connessi sia alle caratteristiche litologiche del pendio (presenza di rocce gneissiche dal profilo di alterazione complesso) sia all'assetto tettonico. Faglie normali ad alto angolo guidano lo sviluppo dei fianchi e della corona della frana; piani di *thrust* con disposizione a franapoggio, a cui si associano zone di roccia completamente degradata (*damage zones*) ed a tratti argillificata (*fault gouge*) che si sviluppano nella roccia da debolmente alterata a fresca, guidano lo sviluppo delle superfici di scorrimento della frana profonda (Borrelli e Gullà, 2017).

Oltre all'attivazione del 1998-1999, varie fonti segnalano per la frana altri eventi nel 1708, 1811, 1833, 1840, 1872, 1897, 1908, 1914, 1937, 1945, 1981, 1984, 1985, 1996 (Gullà *et alii*, 2002a). Nel 2004-2005, 2008-

2010 e 2012-2013 il monitoraggio condotto ha registrato significative variazioni della velocità.

C.11.2 Sistema di monitoraggio

Per la gestione dell'emergenza, essendo chiara la complessità della di frana (Sorriso-Valvo *et alii*, 2005) e definite le risorse, la progettazione-realizzazione della rete integrata di monitoraggio ha seguito un approccio circolare (Figura C.44-b).

Nella prima fase l'obiettivo è stato l'accertamento della possibile riapertura della SS 660. Sono stati eseguiti rilievi geologico-geomorfologici, raccolti ed esaminati dati conoscitivi e acquisiti, tra l'altro, i dati di pioggia, dal 1922, nella stazione di Acri (<http://www.cfd.calabria.it/>) ubicata a circa un chilometro dalla frana.

Considerando il quadro conoscitivo definito sono stati materializzati 7 capisaldi GPS misurati manualmente dai primi di aprile 1999. Da novembre 1999 a giugno 2002 il punto P1 (Figura C.44-a) è stato misurato con modalità automatica (elaborazione *on site* e trasmissione in remoto) (Sorriso-Valvo *et alii*, 2005). A fine maggio 1999 sono stati completati due sondaggi geotecnici (S1-S2), Figura C.44-a, strumentati con piezometri misurati manualmente. Lungo le fratture che identificano corona e fianchi della frana sono stati localizzati sette quadrilateri misurati dai primi di giugno del 1999 (Figura C.44-a). A ottobre 1999 è stata infine realizzata una rete di 9 prismi misurati giornalmente con una stazione totale servoassistita (Gullà *et alii*, 2002b, Figura C.44-a).

La configurazione descritta ha consentito la riapertura in sicurezza della SS 660 (Gullà *et alii*, 2002a), Figura C.44-b. Il controllo e la conoscenza, per la transitabilità della SS 660, sono stati gli obiettivi della seconda fase di progettazione-realizzazione della rete di monitoraggio.

I risultati delle indagini, misure, ulteriori rilievi geologici-geomorfologici, ecc. sono stati utilizzati per progettare e realizzare nel 2000 altri sei sondaggi geotecnici (profondità da 30 a 101 m), strumentati con piezometri (tubi aperti e celle Casagrande) e tubi inclinometrici, nonché di stendimenti caratterizzati con sismica a

rifrazione (800 m), Figura C.44-a. Nel 2001, infine, un altro sondaggio (profondità di 150 m) è stato eseguito per precisare il profilo di alterazione e le posizioni delle superfici di scorrimento, Figura C.44-a.

La consistenza della rete integrata di monitoraggio, al 2002, comprende 6 verticali strumentate con 13 piezometri (3 celle Casagrande e 10 piezometri a Tubo Aperto) e 3 verticali inclinometriche, profondità 99 m (S3), 63 m (S5) e 150 m (S1A), Tabella C.5. La frequenza delle misure è stata modulata sulla base delle condizioni di movimento che si sono man mano registrate.

Nei sondaggi e sui campioni prelevati sono state condotte prove in sito (permeabilità, penetrometriche dinamiche e pressiometriche) e di laboratorio (identificazione, prove edometriche, taglio diretto e triassiali) (Gullà *et alii*, 2001, 2012).

La rete di monitoraggio non è stata dotata di una sala operativa. In alcuni periodi, tuttavia, è stata utilizzata per supportare la gestione del transito lungo la SS 660, con apposite comunicazioni inviate ai soggetti interessati.

L'attivazione registrata nell'inverno 2004-2005 ha indirizzato opportuni approfondimenti geologico-geomorfologici (Borrelli e Gullà, 2017).

C.11.3 Risultati e discussione

L'esame e l'interpretazione dei dati di monitoraggio hanno consentito di desumere indicazioni relative: alla delimitazione della frana (Figura C.44-d, e), alla profondità e forma delle superfici di scorrimento (Figura C.44-c), al tipo di movimento (scorrimento traslazionale riconducibile ad una modellazione piana) (Figura C.44-e), all'identificazione delle fasi cinematiche (Figura C.44-d) (supporto alla gestione delle emergenze, valori tipizzati delle velocità e condizioni di stabilità), Niceforo e Gullà (2005), Maiorano (2012), Gullà (2014) e Borrelli e Gullà (2017).

Il monitoraggio di lungo periodo ha registrato l'attivazione della frana di Serra di Buda e l'individuazione di chiare relazioni tra aumento della velocità di spostamento-livelli piezometrici-precipitazioni

(neve-pioggia o solo pioggia), Figura C.44-f. In particolare, è stato riscontrato un aumento della velocità fino a 25 mm/g con piogge cumulate su 120 giorni che si attestano o superano 800 mm (con o senza precipitazione nevosa) (Gullà, 2014).

Le conoscenze acquisite hanno permesso di definire il modello geologico e di evoluzione della frana (Borrelli e Gullà, 2017) e di individuare un modello geotecnico della stessa frana per simulare il comportamento tensio-deformativo del versante (Maiorano, 2012; Maiorano *et alii*, 2015; Gullà, 2014), Figura C.44-f. In particolare, l'individuazione degli elementi essenziali del modello geotecnico (geometria del pendio, superfici di scorrimento, pressioni interstiziali connesse a variazioni significative delle condizioni di stabilità, valori di riferimento dei parametri geotecnici dei geomateriali interessati, ecc.) e la conoscenza degli spostamenti per un periodo che comprende variazioni significative delle velocità di spostamento hanno reso possibile la calibrazione dei parametri geotecnici necessari per la modellazione visco-elasto-plastica della frana e, quindi, di simulare gli spostamenti in presenza di condizioni pluviometriche critiche per la stabilità del pendio (Maiorano, 2012).

I risultati conseguiti dimostrano la bontà dell'approccio utilizzato per la progettazione e realizzazione della rete integrata di monitoraggio di una frana profonda in rocce gneissiche, con profilo di alterazione/degradazione complesso, la cui evoluzione cinematica può portare ad una rottura per collasso del volume in frana, con importanti conseguenze per la SS 660. L'esame dei dati di monitoraggio e dei risultati delle indagini, delle prove geotecniche in sito e di laboratorio, unitamente ai risultati delle modellazioni condotte (Gullà *et alii*, 2002a; Maiorano, 2012; Maiorano *et alii*, 2015) forniscono, inoltre, indicazioni utili per precisare il meccanismo di frana, per migliorare progressivamente le capacità di previsione del modello geotecnico e, conseguentemente, per la gestione sostenibile del rischio nel medio-lungo termine. Prima la modellazione delle condizioni di stabilità con l'Equilibrio Limite e successivamente l'analisi visco-elasto-plastica del versante in frana, con la calibrazione degli elementi che

concorrono al modello geotecnico resa possibile dal monitoraggio, hanno infatti consentito di dare supporto alla gestione delle emergenze che si sono presentate dal 1999 in poi.

In definitiva, l'approccio circolare adottato ha consentito la progressiva definizione del modello geologico e di evoluzione della frana, la calibrazione/validazione degli elementi che concorrono al modello geotecnico, la modellazione delle condizioni di stabilità, la gestione (con sempre maggiore efficacia) delle emergenze (Gullà *et alii*, 2002a, 2014) e la definizione del meccanismo di frana (Gullà *et alii*, 2001; Gullà *et alii*, 2002a; Borrelli e Gullà, 2017; Maiorano, 2012), fornendo, in generale, i presupposti per la progettazione e realizzazione di interventi di mitigazione sostenibili in termini sociali ed economici per una frana complessa e di elevata pericolosità (Gullà, 2017).

C.11.4 Riferimenti bibliografici

- Borrelli L., Gullà G. (2017) Tectonic constraints on a deep-seated rock slide in weathered crystalline rocks. *Geomorphology* 290 (2017), 288-316.
- Gullà G. (2017) Filiera per l'adattamento, la mitigazione e la riduzione del rischio determinato da eventi di dissesto idrogeologico e interventi sostenibili. *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*; 134° (2016), Vol. XL, Parte II, pp. 99-124.
- Gullà G. (2014) Field monitoring in sample sites: hydrological response of slopes with reference to widespread landslide events. *Procedia Earth and Planetary Science* 9 (2014) 44-53.
- Gullà G., Aceto L., Antronico L., Borrelli L., Coscarelli R., Perri F. (2018a) A smart geotechnical model in emergency conditions: A case study of a medium deep landslide in Southern Italy. *Engineering Geology* 234 (2018) 14: 138-152.
- Gullà G., Aceto L., Borrelli L. (2012) Terreni di alterazione da rocce cristalline. *Rend. Online Sic. Geol. It.*, Vol. 21 (2012), pp. 548-550.
- Gullà G., Aceto L., Greco R., Niceforo D., Dodaro F. (2001) Definizione preliminare del Modello Geotecnico della Frana di Serra di Buda (Acri – Calabria). CNR-IRPI, Rapporto Interno n. 571.
- Gullà G., Antronico L., Terranova O., Aceto L., Niceforo D., Cilento M., Perna E. (2002a) Scenari di collasso per la frana di Serra di Buda (Acri-CS). *Atti del Convegno "Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico"*, Assisi, 11-12 dicembre 2002, pp. 194-203.
- Gullà G., Bonci L., Cesi C., Calcaterra S., Gambino P., Niceforo D. (2002b) Spostamenti superficiali di una frana in rocce alterate e degradate. *Atti del Convegno "Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico"*, Assisi, 11-12 dicembre 2002, pp.505-512.
- Gullà G., Calcaterra S., Gambino P., Borrelli L., Muto F. (2018b) Long-term measurements using an integrated monitoring network to identify homogeneous landslide sectors in a complex geo-environmental context (Lago, Calabria, Italy). *Landslides* (2018) 15: 1503-1521.
- Gullà G., Maiorano S.C., Borrelli L., Aceto L., Reali C., Niceforo D., (2014) Gestione ed accettabilità del rischio di frane profonde: il caso di Acri (CS). *Atti del XXV Convegno Nazionale di Geotecnica*, 579-585.
- Maiorano S.C. (2012) Analisi del comportamento tensio-deformativo di frane profonde e deformazioni gravitative profonde di versante. *Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica (XXV Ciclo)*, Università degli Studi "Mediterranea" di Reggio Calabria, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Meccanica e Materiale (2009-2012).
- Maiorano S.C., Borrelli L., Moraci N., Gullà G., (2015) Numerical modelling to calibrate the geotechnical model of a deep-seated landslide in weathered crystalline rocks: Acri (Calabria, Italy). *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2*, pp. 1271-1274.
- Niceforo D., Gullà G. (2005) Caratterizzazione cinematica di una frana in rocce alterate e degradate: la frana di Serra di Buda (Acri, Cosenza, Italia). CNR-IRPI, Rapporto Interno n. 640.
- Sorriso-Valvo M., Gabriele S., Gullà G., Antronico L., Tansi C., Greco R., Fantucci R. (2005) Studio geologico-geomorfologico-geotecnico e monitoraggio della frana di Serra di Buda (Acri). CNR-IRPI, Sezione di Cosenza, Regione Calabria-Assessorato LL.PP. e

Acque, Autorità di Bacino Regionale, Rubbettino
Industrie Grafiche ed Editoriali, pp. 60.

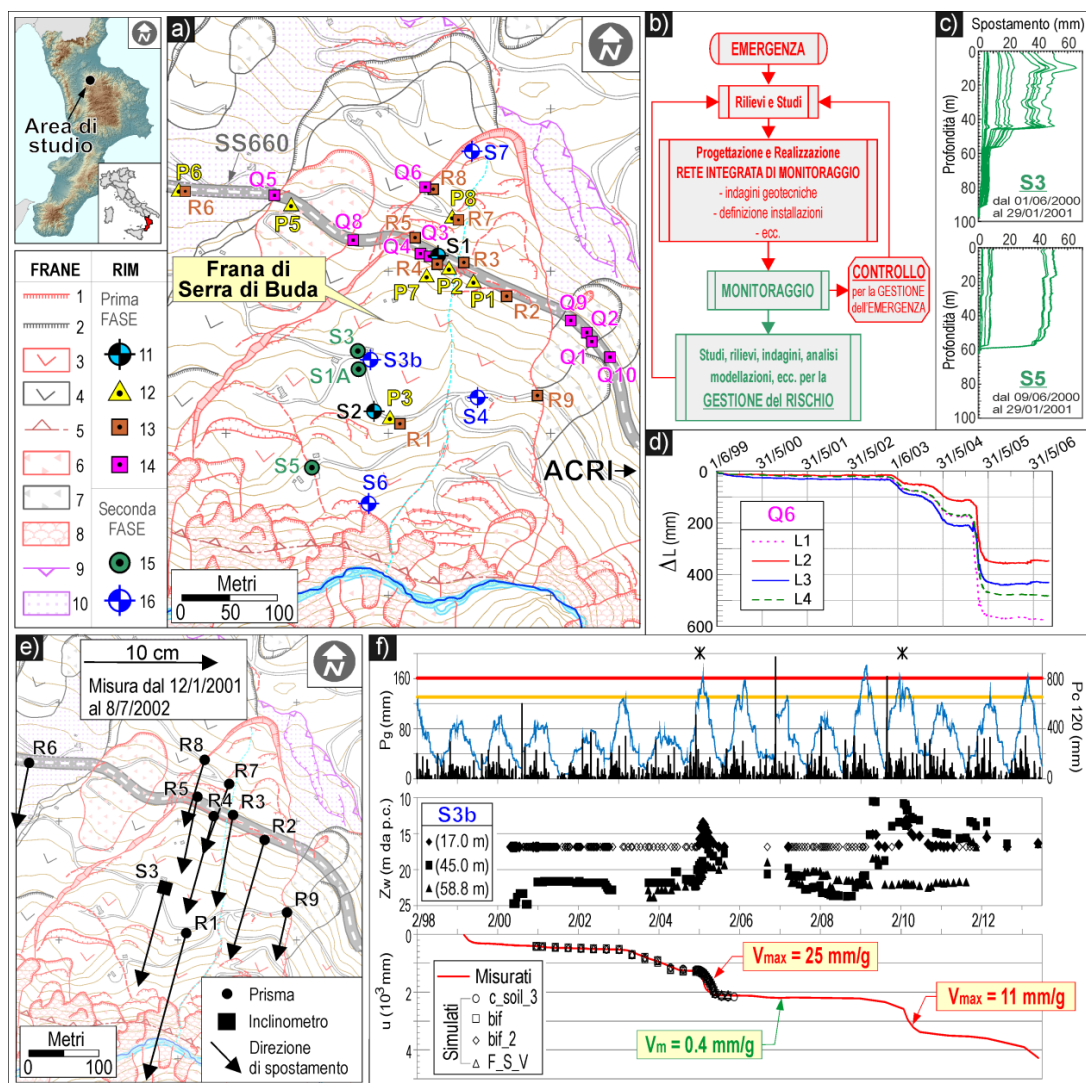


Figura C.44 - a) Frana di Serra di Buda e rete integrata di monitoraggio (RIM): scarpata 1) attiva e 2) quiescente; scorrimento di roccia 3) attivo e 4) quiescente; 5) piede superficie di rottura; scorrimento di detrito 6) attivo, 7) quiescente e 8) superficiale attivo; 9) scarpata di Sackung; 10) Sackung; 11) e 16) piezometri; 12) GPS; 13) prismi; 14) quadrilateri; 15) inclinometri. b) Schema di progettazione della rete di monitoraggio. c) Deformate inclinometriche. d) Misure su uno dei quadrilateri. e) Direzioni di movimento e spostamenti misurati con stazione totale e inclinometro. f) Piogge giornaliere e cumulate, livelli piezometrici rappresentativi, spostamenti misurati nel punto P1 e spostamenti simulati con il modello geotecnico (da Gullà *et alii*, 2002b; Sorriso-Valvo *et alii*, 2005; Maiorano, 2012; Gullà, 2014; Borrelli e Gullà, 2017, modificate)

Tabella C.5 - Installazioni che concorrono alla rete integrata di monitoraggio

MISURA	SEZIONE	INSTALLAZIONI	IDENTIFICAZIONE	PERIODI DI MISURA	NOTE	FASE
Spostamenti superficiali	GPS	7 capisaldi	P1-P2-P3 ^(a) -P5 ^(b) -P6-P7 ^(c) -P8	2/4/99-8/7/02+17/6/03-30/4/19+(a)-27/6/13+(b)-7/4/05+(c)-6/4/11	Basette	Prima
	Quadrilateri	11	Q1-...-Q5-Q9-Q7 ^(d) +Q8-Q13-Q14 ^(e)	(d)1/6/99-1/2/01+(e)28/9/04-7/3/05	Picchetti	Prima
	Stazione totale	9	R1- R2-...- R9	27/10/99-8/7/02	Prismi	Prima
Spostamenti profondi	Inclinometri	3	S3	26/5/00-29/1/01	98 m p.c.	Seconda
			S5	1/6/00-29/1/01	62 m p.c.	Seconda
			S1A	15/1/02-4/6/03	152 m p.c.	Seconda
Livelli piezometrici	Piezometri	6 verticali (13 piezometri)	S1	25/5/99-19/3/12	15.6-27.9 m p.c.	Prima
			S2	27/5/99-23/5/11	18.0-29.7 m p.c.	Prima
			S3b	30/5/00-27/6/13	17.0-45.0-58.8 m. p.c.	Seconda
			S4	30/5/00-31/1/08	8.1-29.2-38.4 m p.c.	Seconda
			S6	30/5/00-12/11/10	6.5-33.6 m p.c.	Seconda
			S7	30/5/00-17/10/08	16.2-33.3 m p.c.	Seconda

C.12 FRANA DI SCILLATO (PA, SICILIA)

C.12.1 Inquadramento del sito

L'ultima riattivazione di frana che ha coinvolto la parte bassa del versante in sinistra idrografica del Fiume Imera ubicato tra gli abitati di Caltavuturo e Scillato, è avvenuta il 10 aprile 2015. Essa ha causato il collasso di alcuni piloni del viadotto Imera 1 (autostrada Catania-Palermo - A19) ed il conseguente cedimento di una carreggiata del viadotto stesso (Figura C.45, Figura C.46). L'evento ha creato fortissimi disagi sulla rete stradale della regione Sicilia, determinando la prolungata chiusura dell'autostrada in direzione Catania ed il grave danneggiamento di una importante strada provinciale (SP24).

La lunghezza totale del corpo di frana del 10 aprile 2015 è di circa 700 m; la larghezza massima intorno a 250 m. L'area di distacco è situata tra quota 320 m e 380 m s.l.m. ed è caratterizzata da scarpate fino a circa 8 metri di altezza. La profondità della superficie di rottura, desunta dalla combinazione di dati di sondaggio e vincoli geometrici, è di circa 30 m.

La frana ha una spiccata componente rotazionale nell'area di distacco, evidenziata dalla presenza di zone concave nell'area di coronamento e di zone in contropendenza con ristagni d'acqua, mentre il movimento principale si è evoluto in colata di terra verso la zona di piede. Essa è stata classificata come frana composita (Cruden & Varnes 1996).

La formazione coinvolta dalla frana è il Flysch Numidico, membro di Portella Colla localmente costituito da peliti bruno-giallastre fittamente laminate e localmente con rare intercalazioni di arenarie quarzose e calcareniti. L'assetto geologico-strutturale a più ampia scala è ben più complesso in virtù della peculiare posizione del versante in relazione all'evoluzione tettonica dell'area; ben più complesso è anche il contesto geomorfologico nel quale questo recente movimento si colloca e che vede la frana del 2015 come la più recente mobilitazione di un

articolato e ben più ampio sistema di frane (Valiante *et alii*, 2020).

L'innescò della frana del 10 aprile 2015 è legato a precipitazioni intense, che hanno investito l'area nei giorni immediatamente precedenti, sovrapponendosi ad una stagione eccezionalmente piovosa per l'area. Da segnalare che nel 2005 la parte bassa del medesimo versante era stata coinvolta in un altro movimento di frana di più limitate dimensioni, a denotare lo stile spiccatamente retrogressivo di evoluzione del movimento.

L'analisi di immagini satellitari COSMO-SKYMED acquisite tra gennaio 2013 e marzo 2015 tramite tecniche A-DInSAR ha permesso di individuare delle deformazioni pre-collasso nella zona del coronamento della frana successivamente verificatesi, senza comunque consentire di individuare una fase accelerativa pre-collasso (Bozzano *et alii*, 2018).

C.12.2 Sistema di monitoraggio

Il piano di monitoraggio geomorfologico e geotecnico è stato concepito come sistema di monitoraggio integrato a servizio della ricostruzione del viadotto Imera. Le attività di monitoraggio sono state avviate da Anas (Direzione progettazione e realizzazione lavori e Coordinamento territoriale Sicilia) prima dell'inizio dei lavori di ricostruzione del viadotto, al fine di acquisire anche informazioni conoscitive sui fenomeni di instabilità di versante attivi nell'area di interesse, con l'ipotesi di lavoro di continuare anche successivamente al termine della realizzazione dell'opera.

Il sistema di monitoraggio comprende strumenti di misura sia automatici che manuali, e tecniche di monitoraggio da remoto e da contatto, consentendo il controllo dell'evoluzione deformativa del versante e delle strutture localizzate nell'area di interesse. Il piano di monitoraggio ha previsto l'installazione di quattro allineamenti di strumenti distribuiti su entrambi i lati del fiume Imera lungo la linea di massima pendenza dei versanti, comprendenti (Figura C.48):

Sistemi automatici

- N ° 1 pluviometro;
- N ° 10 inclinometri fissi;
- N ° 20 piezometri elettrici;
- N ° 3 stazioni totali robotizzate (con 33 mire ottiche localizzate in corrispondenza del viadotto);
- N ° 2 sistemi TInSAR (*Terrestrial Interferometric Synthetic Aperture Radar*, includenti 20 corner reflector), a presidio sia del versante in sinistra idrografica sia di quello in destra.

Sistemi manuali

- N ° 7 inclinometri;
- N ° 13 piezometri.

I sistemi automatici sono collegati e controllati da un'unità di acquisizione dati impostata per effettuare le misure con frequenza di campionamento costante ed in grado di gestire in automatico il trasferimento dati. I dati acquisiti sono validati mediante procedure standardizzate per la gestione di differenti scenari di emergenza e sono raccolti in una piattaforma online appositamente sviluppata per questo programma di monitoraggio, che consente la consultazione in tempo reale dei dati (visualizzazione, interrogazione, gestione dei dati, ecc.).

Specifiche procedure di allerta sono state definite sulla base di soglie di spostamento/velocità per i diversi sistemi di monitoraggio.

Nello specifico il sistema progettato consente:

- 1) il monitoraggio in continuo dei movimenti orizzontali profondi, consentendo l'individuazione di potenziali superfici di rottura;
- 2) il monitoraggio continuo degli spostamenti superficiali di terreno e strutture;
- 3) l'individuazione di processi di cedimento delle strutture;
- 4) la ricostruzione del modello idrogeologico del pendio ed il monitoraggio delle oscillazioni del livello di falda.

Attraverso l'attivazione di una Piattaforma Informatica, (piattaforma Maxwell su portale MissionOS, interfaccia web del data base) i soggetti autorizzati coinvolti nel processo realizzativo del ripristino del sito, hanno accesso in modo semplice ed intuitivo alle informazioni raccolte ed aggiornate in tempo reale. La piattaforma consente agli utenti di raccogliere, gestire ed interpretare i dati raccolti e di realizzare report di analisi.

C.12.3 Risultati e discussione

La grande mole di dati acquisiti da questo imponente sistema di monitoraggio integrato attivato dal 2015 e ad oggi ancora operativo, ha consentito alla Committenza ANAS SpA di acquisire informazioni fondamentali per la progettazione sia degli interventi di bonifica del versante sia delle opere fondazionali del nuovo viadotto (monitoraggio conoscitivo), di presidiare scrupolosamente il versante durante la lunga cantierizzazione per garantire condizioni di sicurezza (monitoraggio di controllo) e consentirà, a medio-lungo termine, di verificare durante l'esercizio della nuova opera e del nuovo assetto del versante l'efficacia degli interventi messi in atto (monitoraggio a presidio dell'esercizio dell'opera).

Ad esempio, il carattere marcatamente stagionale delle riattivazioni anche parziali dei movimenti all'interno del corpo di frana del 2015, in relazione alle oscillazioni dei livelli di falda in risposta ad eventi di precipitazione, è stato messo in luce attraverso l'integrazione del monitoraggio interferometrico terrestre che riesce a circoscrivere con elevata risoluzione spaziale l'area coinvolta da instabilità (Figura C.47-a, Figura C.47-b e Figura C.48), inclinometrico (Figura C.47-d) che invece consente puntualmente di desumere lo spessore della massa in movimento, pluviometrico (Figura C.48) che quantifica l'apporto meteorico e piezometrico che permette di valutare l'effetto delle piogge sull'innalzamento del livello di falda e il tempo di risposta della locale falda alle precipitazioni.

In merito alla gestione dei dati di monitoraggio Anas ha messo a punto un proprio protocollo di gestione

del sito attraverso l'individuazione di soglie di velocità di spostamento per l'attivazione dello stato di attenzione, di allerta e di allarme rilevate attraverso le diverse tecniche di misura di questa grandezza adottate nel sito e le conseguenti azioni da intraprendere (Figura C.49).

Questo contributo è dedicato alla memoria della collega Dott. Geol. Serena Majetta, scomparsa il 25 agosto 2020. È stata "Responsabile Coordinamento Progettazione, Indirizzo e Controllo" della "Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori" di Anas SpA.

Gli Autori hanno intessuto con lei una proficua e costruttiva collaborazione tecnico-scientifica sul tema del monitoraggio dei versanti, specificatamente del caso di studio, e con lei hanno condiviso l'impostazione di questo contributo.

Gli Autori ringraziano il Dott. Alessandro Brunetti e la Dott.ssa Serena Moretto della azienda Nhazca srl

per i dati e il supporto e l'azienda IMG srl per i dati forniti.

C.12.4 Riferimenti bibliografici

Cruden D.M., Varnes D.J. (1996) Landslide Types and Processes. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247, 36-75.

Moretto S., Bozzano F., Brunetti A., Della Seta M., Majetta S., Mazzanti P., Rocca A., Valiante (2018) The 2015 Scillato Landslide (Sicily, Italy): deformational behavior inferred from Satellite & Terrestrial SAR Interferometry. TC220 Conferences in Field Monitoring in Geomechanics - Field Measurements in Geomechanics 2018.

Valiante M., Bozzano F., Della Seta M., Guida D. (2020) A Hierarchical Model for the Rocca di Sciarà Northeastern Slope Instabilities (Sicily, Italy). In: De Maio M., Tiwari A. (eds.) Applied Geology. Springer, 131-144 Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43953-8_8.



Figura C.45 - Fotografia del viadotto lesionato dalla frana e, retrostante ad esso, una parte della frana del 2015 con retinatura in trasparenza di colore rosso

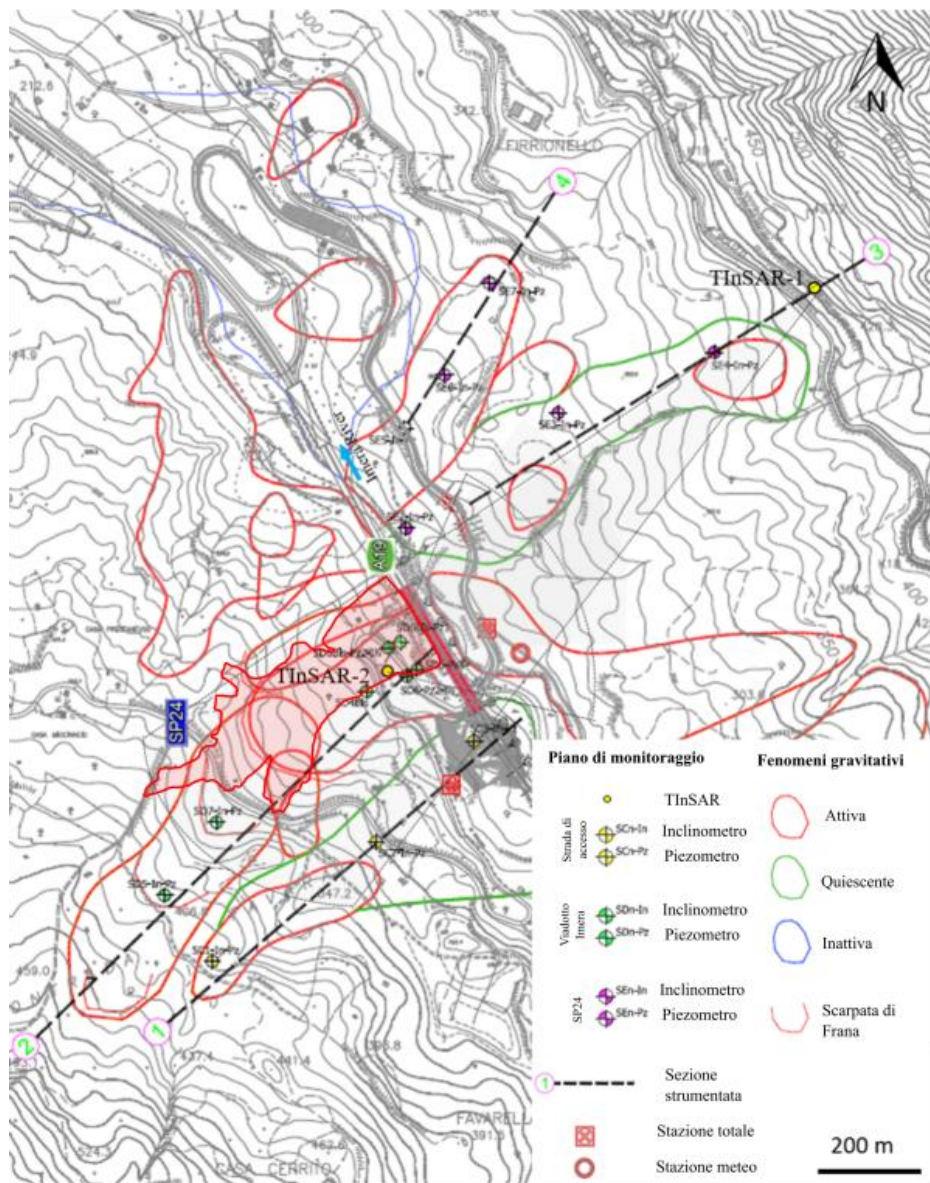


Figura C.46 – Ubicazione della strumentazione di monitoraggio installata per il controllo dei versanti e delle opere. L'area della frana del 2015 è segnalata dalla retinatura in trasparenza di colore rosso. È evidenziato con sovrasimbolo rosso il viadotto lesionato

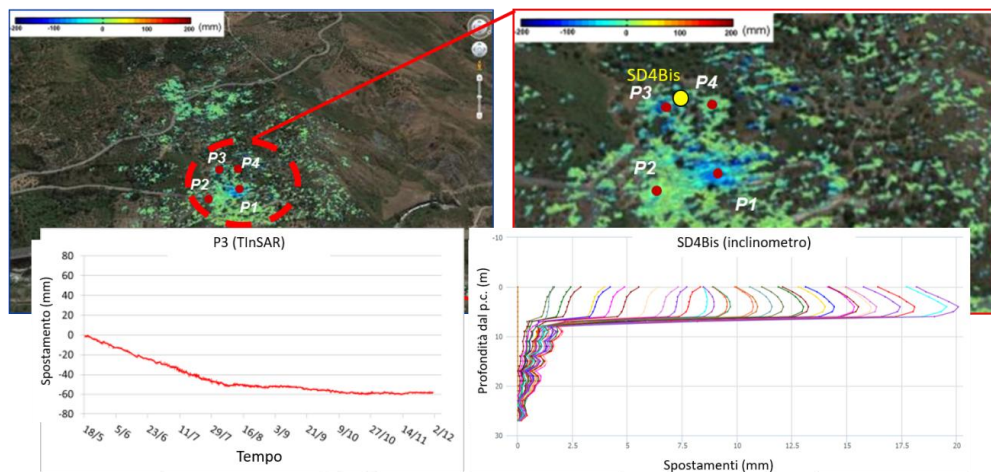


Figura C.47 - a): Mappa di spostamento derivante dal monitoraggio con interferometro terrestre (per la posizione dello strumento vedi T-Insar-1 in Figura C.46) del versante della frana del 2015 relativo all'intervallo di tempo 18 maggio – 1 dicembre 2016; b): dettaglio della mappa riferito all'area di circa 9000 m² in cui sono concentrati gli spostamenti; in basso a sinistra c): serie temporale del punto P3 (ubicazione nel riquadro b) ; in basso a destra d): dati inclinometrici riferiti alla verticale SD4bis (Ubicazione nel riquadro b)

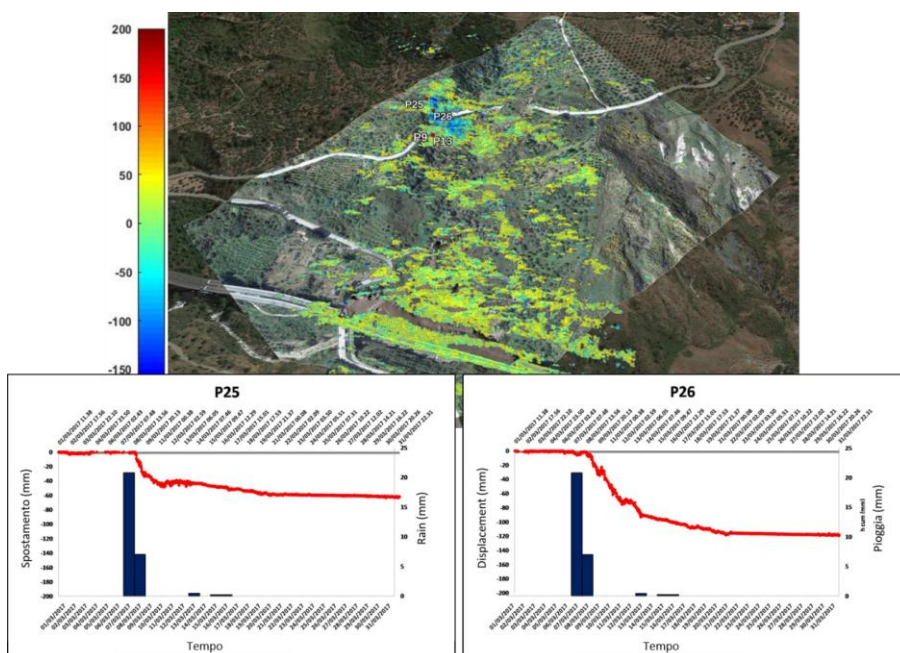


Figura C.48 - Mappa di spostamento derivante dal monitoraggio con interferometro terrestre (per la posizione dello strumento vedi T-Insar-1 in Figura C.46) del versante della frana del 2015 relativo all'intervallo di tempo 1 marzo – 31 marzo 2017 e serie temporali dei punti P25 e P26 con valori di precipitazione cumulata giornaliera

Soglia	Monitoraggio topografico	Monitoraggio interferometrico	Monitoraggio inclinometrico
Attenzione	2 mm/h	2 mm/h	5 mm/day
Allerta	5 mm/6h	8 mm/6h	5 mm/6h
Allarme	10 mm/6h	12 mm/6h	10 mm/6h

Soglia	Azione
Attenzione	Controllo, validazione, supervisione
Allerta	Sopralluoghi tecnici in-situ
Allarme	Attivazione del centro di emergenza, chiusura della circolazione, evacuazione

Figura C.49 - Protocollo Anas di gestione del sito

ALLEGATO

COSTI DI RIFERIMENTO PER LA PROGETTAZIONE E LA GESTIONE DELLE RETI DI MONITORAGGIO DELLE FRANE

Il presente Allegato contiene i costi di riferimento che si ritiene possano essere utili a coloro che debbano progettare o mantenere una rete di monitoraggio geotecnico per il controllo di fenomeni franosi.

I prezzi attualmente disponibili a livello nazionale o locale, predisposti da diversi Enti/Organi e dalle categorie di settore (Regioni, Città Metropolitane, Camere di Commercio, ANAS, ecc.) e il D.M. Giustizia del 17/06/2016, il cosiddetto “decreto parametri”, se da un lato costituiscono un riferimento obbligato per la quantificazione preventiva, la progettazione e la realizzazione delle opere pubbliche, soprattutto per quanto riguarda i lavori edili ed impiantistici propedeutici alla realizzazione delle reti di monitoraggio, dall'altro mostrano delle carenze in relazione a ciò che riguarda la fornitura in opera di strumentazione o servizi ed attività specifiche delle reti di monitoraggio geologico. A titolo di esempio nei suddetti prezziari non sono citati i costi delle singole parti delle stazioni di acquisizione, della maggior parte degli strumenti (es. colonne multiparametriche, distometri, ecometri, freatimetri, sonde inclinometriche) e di molti servizi (es. costi di una misura con radar da terra). Queste lacune, oltre ad essere legate alla specificità dei prodotti richiesti, sono dovute a una bassa domanda sul mercato di tali prodotti/servizi che rende quindi complicata la determinazione di un prezzo a cui far riferimento.

La mancanza di tali riferimenti “codificati” è particolarmente critica in quanto il DPR 207/2010 ed il codice dei contratti (D.Lgs. 50/2016) prevedono che i prezzi unitari di un computo metrico estimativo siano *“dedotti dai vigenti prezziari della stazione appaltante o, in mancanza della corrispondente voce negli stessi, dai listini ufficiali vigenti nell'area interessata”* o dai listini delle locali camere di commercio o ancora mediante

analisi prezzi.

Il presente Allegato potrà essere utilizzato dalle Agenzie ambientali quale riferimento, ancorché non vincolante, per la progettazione/gestione delle reti di monitoraggio, sia per ridurre i tempi necessari per l'analisi prezzi, sia per evitare differenze significative nei prezzi posti a base di gara, da differenti Agenzie del Sistema, in procedure che prevedano l'acquisto di medesimi strumenti o servizi.

L'Allegato è stato suddiviso in varie tabelle. La prima, dedicata a misure e servizi, è strutturata in cinque colonne così individuabili: codice alfanumerico (dove le prime lettere indicano la tipologia), descrizione voce, unità di misura, costo di riferimento e incidenza percentuale della mano d'opera. Le successive tabelle riguardano la strumentazione manuale ed automatica (idro-meteorologica, per colate detritiche, geotecnica, topografica), le stazioni di acquisizione ed i sistemi di trasmissione. Per queste tabelle le colonne sono le medesime della prima, fatto salvo la mancanza della colonna dedicata all'incidenza percentuale della mano d'opera.

Il riferimento ai costi per le misure e i servizi è stato costruito mediante specifica analisi dei prezzi, conformemente ai commi 2 e 4 dell'art. 32 del DPR 207/2010 e al comma 16 dell'art. 23 del D.Lgs. 50/2016, tenendo in considerazione una quota pari al 10% come utile di azienda e una quota del 15% come spese generali. Come già detto per tali voci è stata inoltre determinata l'incidenza (in percentuale) della manodopera (ove possibile).

Per la parte relativa alla strumentazione, sia manuale che automatica, i costi si devono intendere di sola fornitura. Dette quotazioni sono state ricavate o con una analisi di mercato, analizzando strumenti con le

medesime caratteristiche offerti da differenti fornitori, o facendo una valutazione ponderata fra i prezzi relativi a contratti stipulati (prezzi di acquisto) da differenti ARPA. I costi così come proposti sono stati condivisi con tutto il gruppo dei tecnici afferenti al Sistema SNPA e con Regione Valle d'Aosta.

1. MISURE E SERVIZI				
CODICE	DESCRIZIONE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO	% MAN.
M.01.a	Lettura inclinometrica eseguita da tecnico specializzato con sonda a carrello biassiale, sensibilità = 20.000 sen α o superiore, passo 50 cm, estesa a tutta la lunghezza del foro su 2 guide, compreso noleggio e installazione delle apparecchiature di misura. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	m	11,81 €	29,81%
M.01.b	Lettura inclinometrica eseguita da tecnico specializzato con sonda a carrello biassiale, sensibilità = 20.000 sen α o superiore, passo 50 cm, estesa a tutta la lunghezza del foro su 4 guide, compreso noleggio e installazione delle apparecchiature di misura, successiva elaborazione e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	m	13,73 €	38,54%
M.01.c	Approntamento misura inclinometrica (eventuale estrazione e reinstallazione al termine della lettura di sonde fisse, verifica con sonda testimone, ecc.), successiva elaborazione lettura e archiviazione dei dati su supporto magnetico	cad.	83,25 €	68,24%
M.02	Misura TDR eseguita da tecnico specializzato con ecometro, estesa a tutta la lunghezza del cavo, compreso noleggio e installazione delle apparecchiature di misura, successiva elaborazione e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico non riconosciuta se eseguita contestualmente alla misura inclinometrica, viceversa sarà computata a parte.	cad.	66,88 €	56,62%
M.03.a	Rilievo della falda acquifera in tubi opportunamente predisposti, eseguito a mezzo di freatometro e successiva elaborazione grafica dell'andamento del livello di falda (sia in profondità da piano campagna che in m s.l.m.) e archiviazione del dato. Trasferita del personale tecnico non riconosciuta se eseguita insieme ad altre misure, viceversa sarà computata a parte. Per ogni rilievo.	cad.	11,80 €	48,13%
M.03.b	Spurgo tubi piezometrici; inclusi: manodopera, nolo attrezzatura. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso). Per ogni postazione.	cad.	377,90 €	30,46%
M.04.a	Misure distometriche eseguite da n. 2 tecnici o rocciatori/guida alpina. L'importo include: utilizzo dei DPI necessari all'esecuzione delle misure (casco di protezione, imbragature, corde, ecc.), trasferta fino al punto di misura (escluso l'uso di elicottero). A giornata o frazione di giornata	giornata	842,24 €	75,75%

MISURE E SERVIZI (segue)				
CODICE	DESCRIZIONE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO	% MAN.
M.04.b	Elaborazione e archiviazione misure distometriche da parte di geologo o tecnico specializzato.	ora	71,86 €	73,50%
M.05.a	Misure topografiche, inclusa installazione temporanea e successiva rimozione di prismi ottici, successiva elaborazione misure e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	giornata	1.421,37 €	54,74%
M.05.b	Misure topografiche per rete topografica già installata (costituita da pilastrino di misura fisso in calcestruzzo o altro materiale, prismi ottici fissi), successiva elaborazione misure e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	giornata	1.020,35 €	51,66%
M.06	Misure GPS, inclusa successiva elaborazione e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	cad.	426,14 €	37,11%
M.07	Misure di estensimetri a barra multibase in foro, inclusa successiva elaborazione e archiviazione dei dati su supporto magnetico. Trasferita del personale tecnico non riconosciuta se eseguita insieme ad altre misure, viceversa sarà computata a parte. Per foro.	cad.	38,42 €	73,93%
M.08	Lecture assestometriche manuali, compreso il noleggio delle apparecchiature di misura, elaborazione, interpretazione e archiviazione dei dati. Trasferita del personale tecnico non riconosciuta se eseguita insieme ad altre misure, viceversa sarà computata a parte. A postazione.	cad.	55,38 €	68,38%
M.09	Indagine videoendoscopica con telecamera, restituzione su supporto digitale eseguita sia in discesa che in risalita, in fori di perforazione già eseguiti di diametro compreso tra 70 e 140 mm. Il filmato dovrà evidenziare la profondità dell'area investigata attraverso sovrapposizione elettronica delle quote raggiunte dalla sonda. Incluso approntamento attrezzatura, installazione per ogni verticale da indagare e tempo di trasferta da una postazione alla successiva. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso). A giornata o frazione di giornata.	g	1.030,03 €	44,71%
M.10	Scarico dati da parte di tecnico specializzato.	ora	60,00 €	100,00%

MISURE E SERVIZI (segue)				
CODICE	DESCRIZIONE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO	% MAN.
M.11	Misure con radar da terra ad apertura sintetica a cadenza periodica, inclusa successiva elaborazione e restituzione misure elaborate su supporto come richiesto dalla Stazione Appaltante. Esclusa posa binario, alimentazione da rete fissa o con generatore o equivalente e lavori accessori annessi. Trasferita del personale tecnico inclusa fino al punto raggiungibile con l'automezzo (fuoristrada escluso).	cad.	4.000,00-4.500,00 €	
M.12	Servizio radar da terra ad apertura sintetica in <i>near real time</i> . Il servizio include l'installazione e gestione operativa della strumentazione, compresa l'eventuale fornitura di schermate/coperture radar trasparenti, la fornitura e aggiornamento di software per l'analisi dei dati, visualizzazione dei dati via web su sito dedicato, reperibilità h24/7 giorni su 7 in caso di malfunzionamenti o guasti. Escluse le seguenti attività/forniture: realizzazione della fondazione e della struttura in elevazione; alimentazione elettrica (da compensare a parte se non fornita dalla Stazione Appaltante); messa a terra, eventuali oneri (affitto) per l'occupazione del sedime.	anno	50.000,00-60.000,00 €	
M.13	Servizio radar interferometrico da satellite. Il servizio include: elaborazioni interferometriche differenziali di scene SAR satellitari da piattaforma Sentinel sia in orbita ascendente che discendente, archiviazione dei dati e delle elaborazioni secondo i formati richiesti dalla Stazione Appaltante, visualizzazione dei dati su piattaforma webgis e con almeno 8-10 aggiornamenti annuali dei dati. Costi per superfici maggiori uguali a 10.000 Km ² .	Km ² /anno	4,00-8,00 €	
M.14	Servizio radar interferometrico da satellite. Il servizio include: attività per acquisizione immagini satellitari, elaborazioni interferometriche differenziali di scene SAR satellitari da piattaforma Cosmo-SkyMed sia in orbita ascendente che discendente, archiviazione dei dati e delle elaborazioni secondo i formati richiesti dalla Stazione Appaltante, visualizzazione dei dati su piattaforma webgis (possibilità di interrogazione dei punti singoli o distribuiti, realizzazione grafici anche di confronto fra più punti ecc.) con aggiornamento dei dati almeno semestrale, seminari di presentazione dei risultati. Grande impatto sul costo finale del servizio può essere costituito dall'areale complessivo sottoposto ad analisi, dalla contiguità o meno delle aree sottoposte ad analisi e dal periodo temporale (1 o più anni) dell'analisi. Si consiglia di valutare l'importo per areali di almeno 1.000 Km ² .	Km ² /anno	35,00-200,00 €	

MISURE E SERVIZI (segue)				
CODICE	DESCRIZIONE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO	% MAN.
M.15	Servizio rilevamento LIDAR aereo. Il servizio include: attività di rilevamento di una porzione di territorio mediante LiDAR aereo finalizzato ad acquisire un modello digitale della superficie. La nuvola di punti acquisita è successivamente trattata per ottenere prodotti derivati quali un modello digitale del terreno. Solitamente è prevista la fornitura di un'ortofoto. La densità del numero di punti al metro quadro e la risoluzione dell'ortofoto sono due elementi importanti che incidono sul costo finale dell'operazione. Grande impatto sul costo finale del servizio può essere costituito dai costi di trasferimento del velivolo; tale costo non può essere parametrizzato.	Km²	150,00-400,00 €	
M.16	Servizio rilevamento LIDAR terrestre. Il servizio include: attività di rilevamento di una porzione di territorio mediante LiDAR terrestre finalizzato ad acquisire un modello digitale della superficie. La nuvola di punti acquisita è successivamente trattata per ottenere prodotti derivati. La densità del numero di punti al metro quadro e la risoluzione dell'eventuale ortofoto sono due elementi importanti che incidono sul costo finale dell'operazione. I costi sono estremamente variabili in base alla logistica dell'area di rilievo ed alla complessità morfologica del settore da rilevare.	ha	1.000-3.000 €	
M.17	Nolo mensile di centralina digitale per acquisizione e trasmissione colonne inclinometriche multiparametriche di cui al codice SG.08. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	270,00 €	
M.18	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.09 lunghezza 50 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	2.250,00 €	
M.19	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.09 lunghezza 100 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	4.500,00 €	
M.20	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.09 lunghezza 150 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	6.750,00 €	
M.21	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.10 lunghezza 50 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	3.200,00 €	
M.22	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.10 lunghezza 100 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	6.400,00 €	
M.23	Nolo mensile di colonna inclinometrica multiparametrica di cui al codice SG.10 lunghezza 150 m. Spese di trasferta ed installazione escluse.	mese	9.600,00 €	

CODICE	2. STRUMENTAZIONE MANUALE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SM.01	Distometro con nastro metrico invar L=30 m e comparatore centesimale digitale solidale con l'unità di tensionamento dotato di batteria di alimentazione, sistema di ancoraggio filettato o a gancio e snodabile su due assi, telaio metallico per la calibrazione, custodia. Accuratezza della misura del comparatore: +/-0,01 mm.	cad.	2.800,00 – 3.500,00 €
SM.02	Caposaldo (perno/bullone) filettato in acciaio inox per aggancio distometro L=20 mm.	cad.	80,00 €
SM.03	Ecometro per misure TDR in fori di sondaggio. In funzione dell'utilizzo (portatile per misure manuali o collegato permanentemente ad una stazione con DL e sistema di trasmissione) può avere differenti caratteristiche quelle comuni sono: predisposizione ingresso per il cavo coassiale; impedenza 50 Ω +/- 1%; intervallo di operatività: almeno -10/+40°C; risoluzione minima non meno di 0,1 m. L'ecometro dovrà essere alimentato con batteria ricaricabile o alimentabile tramite batteria esterna. Dovrà inoltre essere fornito il cavo di collegamento ed il SW per lo scarico dei dati su PC, elaborazione e archiviazione dei dati misurati.	cad.	3.000,00 - 4.500,00 €
SM.04	Freatimetro alimentato a batteria dotato di testa aggiuntiva di appesantimento, rullo avvolgitore con inclusi i dispositivi per la rilevazione del contatto con l'acqua, cavo inestensibile piatto o circolare numerato ogni cm con serigrafia protetta		
SM.04.a	lunghezza cavo = 50 m	cad.	270,00 €
SM.04.b	lunghezza cavo = 100 m	cad.	360,00 €
SM.04.c	lunghezza cavo = 200 m	cad.	460,00 €
SM.05	Sonda inclinometrica manuale biassiale, passo 500 mm, sensori MEMS (sensibilità almeno 20.000 sen α), risoluzione almeno 0,011 mm/500 mm, ripetibilità 1,5 mm/30 m, fondo scala: 15° o superiore, completa di acquisitore, se necessario. Compatibile per fori dal diametro da 45 mm a 75 mm. Software per elaborazione, interpretazione e archiviazione delle letture escluso.	cad.	5.500,00 €
SM.05.a	Cavo per sonda inclinometrica MEMS, inestensibile, antitorsione, con tacche ogni 50 cm, su rullo avvolgicavo		
SM.05.b	lunghezza cavo = 50 m	cad.	1.840,00 €
SM.05.c	lunghezza cavo = 100 m	cad.	3.520,00 €
SM.05.d	lunghezza cavo = 200 m	cad.	6.860,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE MANUALE (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SM.06	Sonda inclinometrica manuale biassiale, passo 500 mm, sensori servoaccelerometrici (sensibilità almeno 25.000 senα), ripetibilità 0,005%, fondo scala: 20° o superiore, temperatura di funzionamento tra -20/+50°C, completa di acquisitore se necessario (capacità di memoria di almeno 30 misure su 4 guide per tubazioni profonde fino a un massimo di 250 metri, autonomia pari a almeno 8 ore di lavoro, temperatura di esercizio da -20/+50°C), custodia per il trasporto, eventuali cavi di collegamento e tutto quant'altro necessario per l'esecuzione delle letture a regola d'arte. Compatibile per fori dal diametro da 45 mm a 75 mm. Software per elaborazione, interpretazione e archiviazione delle letture escluso.	cad.	6.580,00 €
SM.06.a	Cavo per sonda inclinometrica servoaccelerometrica, inestensibile, antitorsione, con tacche ogni 50 cm, su rullo avvolgicavo		
SM.06.b	lunghezza cavo = 50 m	cad.	3.260,00 €
SM.06.c	lunghezza cavo = 100 m	cad.	5.880,00 €
SM.06.d	lunghezza cavo = 200 m	cad.	10.220,00 €
SM.07	SW per elaborazione, interpretazione e archiviazione delle misure inclinometriche.	cad.	840,00 €
SM.08	Sonda spiralometrica, passo 50 cm, dotata di bussola magnetica a 3 assi, campo di misura: 0-360°, completa di acquisitore. Temperatura di esercizio: -10/+50°C, incluso SW per elaborazione, interpretazione e archiviazione delle misure.	cad.	3.000,00 €
SM.08.a	Cavo per sonda spiralometrica inestensibile, antitorsione, con tacche ogni 50 cm, su rullo avvolgicavo		
SM.08.b	lunghezza cavo = 100 m	cad.	1.800,00 €
SM.08.c	lunghezza cavo = 200 m	cad.	3.900,00 €
SM.09	Sonda testimone, passo 500 mm, in inox o ottone.	cad.	600,00 €
SM.09.a	Cavo per sonda testimone, anima in acciaio e guaina estrena di protezione, su rullo avvolgicavo, dotato di idoneo aggancio terminale per la sonda testimone		
SM.09.b	lunghezza cavo = 50 m	cad.	200,00 €
SM.09.c	lunghezza cavo = 100 m	cad.	250,00 €
SM.09.d	lunghezza cavo = 200 m	cad.	550,00 €
SM.10	Comparatore centesimale con prolunga e certificato di taratura. Campo di misura: 30 mm, lettura: 0,01 mm, precisione: 0,015 mm.	cad.	110,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE MANUALE (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SM.11	Ricevitore doppia frequenza GPS per misure manuali, completo di antenna, controller (se necessario), tricuspidi, adattatore da tricuspidi con sgancio rapido, prolunga, batterie ricaricabili, caricabatterie, memoria interna e memoria removibile (SD o micro SD card) di almeno 4 GB, protezione IP67 o superiore. Comunicazione al controller via cavo/bluetooth o altro. Precisione rilievo statico: 3 mm + 5 ppm in orizzontale, 5 mm + 5 ppm in verticale, temperatura di esercizio: -20/+50°C.	cad.	9.400,00 €
SM.12	Licenza software per l'elaborazione dei dati GPS o topografici.	cad.	5.200,00 €

CODICE	3. STRUMENTAZIONE IDRO-METEOROLOGICA	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
IM.01	Termometro aria con capannina anti-radiante, campo di misura tra -30/+50°C o migliore, precisione: +/-0,2°C, risoluzione: 0,1°C, compreso braccio di sostegno e cavo di collegamento.	cad.	250,00 €
IM.02	Termoigrometro costituito da un sensore igrometrico (campo misura: 0/100% U.R., precisione +/- 1,5%, temperatura di esercizio: -20/+50°C) e un termometro aria schermato (campo di misura tra -30/+50°C o migliore, precisione: +/-0,2°C, risoluzione: 0,1°C).	cad.	1.330,00 €
IM.03	Pluviometro con bocca da 1000 cm ² , campo di misura 0-300 mm/h, temperatura di esercizio: +4/+60°, risoluzione: 0,2 mm di pioggia, compreso di braccio di sostegno e cavo di collegamento.	cad.	900,00 €
IM.03.a	Pluviometro con bocca da 1000 cm ² , campo di misura 0-1000 mm/h, temperatura di esercizio: +4/+60°, risoluzione: 0,1 mm di pioggia, precisione <3%, dotato di sistema HW/SW integrato per la correzione automatica dell'intensità di pioggia, sistemi di diagnostica automatici per la pulizia dell'imbuto. Compreso di braccio di sostegno e cavo di collegamento e certificato in classe A secondo norma UNI EN 17277:2020.	cad.	3.300,00 €
IM.03.b	Pluviometro riscaldato con bocca da 1000 cm ² , campo di misura 0-300 mm/h, temperatura di esercizio: 0/+60°, risoluzione: 0,2 mm di pioggia, compreso di braccio di sostegno e cavo di collegamento.	cad.	1.100,00 €
IM.03.c	Pluviometro con bocca da 1000 cm ² , campo di misura 0-1000 mm/h, temperatura di esercizio: -30/+60°, risoluzione: 0,1 mm di pioggia, precisione <3%, dotato di sistema HW/SW integrato per la correzione automatica dell'intensità di pioggia, sistemi di diagnostica automatici per la pulizia dell'imbuto, diagnostica per il corretto funzionamento apparati riscaldatori, sistema di riscaldatore intelligente per l'attivazione delle resistenze riscaldatrici solamente della parte interessata. Compreso di braccio di sostegno e cavo di collegamento e certificato in classe A secondo norma UNI EN 17277:2020.	cad.	4.210,00 €
IM.04	Nivometro/idrometro a ultrasuoni, campo di misura fino a 10 m, temperatura di esercizio: -40/+60°C, risoluzione 1 cm, precisione: 0,1%-0,2%.	cad.	1.300,00-2.600,00 €
IM.05	Idrometro pneumatico differenziale a bolle, precisione: +/- 0,1% F.S., campo di misura: 0-10 m, temperatura di esercizio: -20/+50°C.	cad.	2.600,00 €
IM.06	Barometro. Campo di misura: 500-1000 hPa o migliore, precisione: +/- 0,5 hPa, risoluzione: 0,1 hPa FS, temperatura di esercizio: -30/+70°C.	cad.	1.250,00 €
IM.07	Anemometro costituito da gonioanemometro a banderuola per la direzione del vento (campo di misura 0-360°C, precisione +/-2,8°, temperatura di esercizio 0/+50°C) e da tachoanemometro a mulinello con tre pale (campo di sicurezza 50 m/sec, risoluzione 0,10 m/sec, sensibilità minore di 0,1 m/sec, precisione +/-0,5 m/sec).	cad.	950,00 €

CODICE	4. STRUMENTAZIONE PER COLATE DETRITICHE	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
CD.01	Sensore di livello a ultrasuoni (ecometro). Grado di protezione: IP65 o superiore; temperatura di esercizio: -40/+70°C; range di misura da 0,5 a 15 m; accuratezza +/-0,01 m; risoluzione 1 cm.	cad.	1.200,00-2.400,00 €
CD.02	Sensore di livello radar (ecometro). Grado di protezione: IP65 o superiore; temperatura di esercizio: -40/+70°C; range di misura da 0,5 a 15 m; accuratezza +/-0,01 m; risoluzione 1 cm.	cad.	2.350,00-3.200,00 €
CD.03	Sistema di cavi a strappo. Grado di protezione scatola di alloggiamento dell'interruttore: IP65 o superiore; resistenza al carico di rottura del cavo in acciaio 220 kg o superiore; interruttore con contatto pulito NA/NC.	cad.	1.500,00-2.500,00 €
CD.04	Geofono monoassiale verticale da 4,5 Hz.	cad.	100,00 €
CD.05	Acquisitore geofono a 3 canali. Grado di protezione involucro: IP67 o superiore; temperatura di esercizio: -20/+70°C; n. 3 canali a 24 bit; accuratezza 1ms; scheda di memoria SDHC capacità di 32 GB (o superiore) con registrazione in continuo.	cad.	2.000,00 €
CD.06	Videocamera/fotocamera day&night full HD con registrazione video da installare su pali o tralicci a sbalzo. Lunghezza focale ridotta ≥5mm; risoluzione ≥720 p; frame rate ≥20 fps; integrazione con illuminazione ad infrarossi; eventuale integrazione con faro (luce visibile o luce infrarossa).	cad.	2.000,00-2.400,00 €
CD.07	Videocamera compatta da installare su pali o tralicci a sbalzo. Lunghezza focale ridotta ≥5mm; risoluzione ≥720 p; frame rate ≥20 fps.	cad.	750,00 €
CD.08	Supporto per strumentazione sopra alveo (sbracci, aste, cavi in acciaio).	kg	25,00 €

CODICE	5. STRUMENTAZIONE GEOTECNICA	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SG.01	Estensimetro a filo costituito da una scatola di protezione in alluminio contenente un potenziometro rotativo, tensionatore per il cavo in acciaio, staffa di ancoraggio con tassello per l'altra estremità del cavo. Segnale in uscita 4-20 mA, campo di misura 2000 mm, potenziometro rotativo da 240 mm, temperatura di esercizio: -20/+50°C, risoluzione: 0,1 mm, accuratezza: ± 1 mm; ripetibilità: $\pm 0,5$ mm, sistema di tensionamento.	cad.	1.100,00 €
SG.02	Estensimetro a filo, campo di misura 40', temperatura di esercizio: -20/+50°C, accuratezza: 0,10% F.S.; ripetibilità: $\pm 0,02$ % F.S., sistema di tensionamento e completo di supporto per l'installazione.	cad.	1.200,00 €
SG.03.a	Fessurimetro potenziometrico (elettrico) campo di misura fino a 50 mm, precisione <0,3% di F.S., temperatura di esercizio: -20/+60°C.	cad.	350,00-500,00 €
SG.03.b	Fessurimetro potenziometrico (elettrico) campo di misura fino a 100 mm, precisione totale <0,2% di F.S., temperatura di esercizio: -20/+60°C.	cad.	475,00-650,00 €
SG.03.c	Fessurimetro potenziometrico (elettrico) campo di misura fino a 150 mm, precisione totale <0,2% di F.S., temperatura di esercizio: -20/+60°C.	cad.	620,00-840,00 €
SG.04	Deformometro potenziometrico lineare con segnale in uscita 4-20 mA, da fissare con tasselli da un lato della frattura e/o una carrucola di rinvio con piastra di fissaggio a parete, cavo in invar o altro materiale con basso coefficiente di dilatazione (es. fibra di carbonio), ancoraggio terminale per il fissaggio del cavo e cavo elettrico per la trasmissione del segnale. Campo di misura fino a 25 mm, precisione totale <0,3% F.S., temperatura d'esercizio da -20 a +60°C.	cad.	840,00 €
SG.05	Tensiometro per installazione permanente, costituito da un tubo cavo di materiale sintetico trasparente con capsula ceramica sostituibile e vacuometro analogico, sostituibile con trasduttore digitale. Lunghezza variabile da 15 a 150 cm; possibilità di montaggio di un tubo per estenderne la lunghezza. Fondo scala: 85 kPa, temperatura minima di funzionamento non inferiore a -5°C.	cad.	100,00 €
SG.06	Sonda inclinometrica fissa con sensore servoaccelerometrico biassiale, campo di misura +/- 15°, risoluzione: 0,001°, temperatura di esercizio: -20/+50°C.	cad.	780,00 €
SG.07	Sonda inclinometrica fissa con sensore allo stato solido (MEMS) biassiale, campo di misura +/- 15°, risoluzione: 0,001°, temperatura di esercizio: -20/+50°C.	cad.	600,00-800,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE GEOTECNICA (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SG.08	Centralina digitale completa di SW per la gestione della colonna inclinometrica e l'acquisizione, e trasmissione, archiviazione dei dati. Completa di modem e antenna/e per la trasmissione dei dati via GSM, GPRS, 4G/LTE, Ethernet con predisposizione per ridondanza con altro media indicato dalla Stazione Appaltante. Memoria estesa, alimentazione in input 12-220 V; box IP65, convertitore DC-AC, protezione da sovratensione linea RS485. Temperatura operativa -10/+50°C. Spese di trasferta e installazione escluse.	cad.	6.000,00 €
SG.09	Colonna inclinometrica multiparametrica allacciata alla rete elettrica o altro impianto di alimentazione, lunghezza singolo modulo ≤ 1 m. Ogni modulo è attrezzato con sensore inclinometrico e muletto (range di misura $\pm 45^\circ$, ripetibilità $\pm 0,05^\circ$ - $\pm 0,02^\circ$), sensore di temperatura (range di misura: $-10^\circ/+50^\circ\text{C}$, risoluzione $0,1^\circ\text{C}$) e almeno un trasduttore di pressione (campo di misura fino a 50 m di colonna d'acqua o maggiore). Inclusi: moduli in acciaio inox con giunti a conservazione di azimuth dal tiro utile di almeno 20kN (in funzione dell'altezza della colonna), connessioni elettriche e di trasmissione dati, cavi di collegamento, coppia di centralizzatori da posizionare ogni metro di lunghezza, morsa di sospensione dal tiro utile di 6000 kg, connessione elettrica stagna e cavo di collegamento (L minima ≥ 3 m), pozzetto di protezione, limitatore e protezione dalle sovratensioni, dispositivo di spegnimento e riavviamento da remoto, antenna per trasmissione GSM/GPRS/3-4G, sistema UPS con carica batteria e batteria adeguata (almeno 120 Ah), montaggio colonna di monitoraggio, collegamento sensoristica a centralina di acquisizione e alimentazione, avviamento impianto monitoraggio, settaggio allarmi e test di comunicazione, fornitura SW. Esclusi: spese di trasferta e installazione in situ, impianto fotovoltaico e suoi accessori (regolatore di carica, batteria tampone, eventuale sistema di commutazione da rete a impianto fvt, ecc.), messa a terra, centralina di acquisizione.		
SG.09.a	lunghezza pari a 50 m	cad.	54.000,00 €
SG.09.b	lunghezza pari a 100 m, con bussola digitale (range di misura: $0-360^\circ$, accuratezza: $\pm 1^\circ$ azimuth)	cad.	105.500,00 €
SG.09.c	lunghezza pari a 150 m, con bussola digitale (range di misura: $0-360^\circ$, accuratezza: $\pm 1^\circ$ azimuth)	cad.	154.200,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE GEOTECNICA (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SG.10	Colonna inclinometrica multiparametrica allacciata alla rete elettrica o altro impianto di alimentazione, lunghezza singolo modulo ≤ 1 m. Ogni modulo è attrezzato con sensore inclinometrico e muletto (range di misura $\pm 45^\circ$, ripetibilità $\pm 0,01^\circ$), sensore di temperatura (range di misura: $-20^\circ/+100^\circ\text{C}$, risoluzione $0,1^\circ\text{C}$) e almeno un trasduttore di pressione (campo di misura fino a 50 m di colonna d'acqua o maggiore). Inclusi: moduli in acciaio inox con giunti a conservazione di azimut dal tiro utile di almeno 20kN (in funzione della lunghezza della colonna), connessioni elettriche e di trasmissione dati, cavi di collegamento, coppia di centralizzatori da posizionare ogni metro di lunghezza, morsa di sospensione dal tiro utile di 6000 kg, connessione elettrica stagna e cavo di collegamento (L minima ≥ 3 m), pozzetto di protezione, limitatore e protezione dalle sovratensioni, dispositivo di spegnimento e riavviamento da remoto, antenna per trasmissione GSM/GPRS/3-4G, sistema UPS con carica batteria e batteria adeguata (almeno 120 Ah), montaggio colonna di monitoraggio, collegamento sensoristica a centralina di acquisizione e alimentazione, avviamento impianto monitoraggio, settaggio allarmi e test di comunicazione, fornitura SW. Esclusi: spese di trasferta e installazione in situ, impianto fotovoltaico e suoi accessori (regolatore di carica, batteria tampone, eventuale sistema di commutazione da rete a impianto fvt, ecc.), messa a terra, centralina di acquisizione.		
SG.10.a	lunghezza pari a 50 m	cad.	75.000,00 €
SG.10.b	lunghezza pari a 100 m, con bussola digitale (range di misura: $0-360^\circ$, accuratezza: $\pm 1^\circ$ azimuth)	cad.	147.500,00 €
SG.10.c	lunghezza pari a 150 m, con bussola digitale (range di misura: $0-360^\circ$, accuratezza: $\pm 1^\circ$ azimuth)	cad.	217.200,00 €
SG.11	Centralina di acquisizione per sistema inclinometrico automatico (nodi inclinometrici + piezometrici + barometrici), completa di router e antenna per la trasmissione GPRS, batteria, armadio di contenimento IP66 o maggiore, scheda di memoria di almeno 8 GB, supporti per il sostegno, minuteria varia.	cad.	2.300,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE GEOTECNICA (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SG.12	Sistema inclinometrico automatico costituito da nodi multiparametrici dalla lunghezza di 50 cm, dotati di livella elettrolitica biassiale e MEMS 3D (accelerometro, magnetometro per la direzione dello spostamento e sensore di temperatura), almeno un nodo piezometrico e barometrico. Completo di cablaggi, tubo di protezione per l'intera lunghezza del foro e minuteria varia (redancia, golfari, bulloni, contrappesi, ecc.). Caratteristiche sensore MEMS: sensibilità 0,01 mm, accuratezza 0,02 mm/m.		
SG.12.a	lunghezza pari a 50 m	cad.	35.000,00 €
SG.12.b	lunghezza pari a 100 m	cad.	65.000,00 €
SG.12.c	lunghezza pari a 150 m	cad.	100.000,00 €
SG.13.a	Testa di sospensione per sonde in foro.	cad.	110,00 €
SG.13.b	Cavo in acciaio per sospensione sonde, dotato di idonei agganci ai capi per l'aggancio delle sonde e alla testa di sospensione.	ml	2,50 €
SG.13.c	Cavo segnale (anche multipolare) per sonde inclinometriche o estensoinclinometriche.	ml	3,40 €
SG.13.d	Coppia di connettori per cavo segnale multiplare.	cad.	74,00 €
SG.13.e	Connettore digitale, L=1m per sonda di testa e circuito stampato sigillato.	cad.	105,00 €
SG.13.f	Resistenza di terminazione per sensori digitali (connettore e resistenza). Per ogni foro con sonde inclinometriche fisse.	cad.	62,00 €
SG.14.a	Clinometro superficiale con sensore MEMS monoassiale. Campo di misura fino a 10°, sensibilità: 0,0013°, precisione totale < +/-0,05% FS/°C, temperatura d'esercizio: -20°/50°C.	cad.	320,00 €
SG.14.b	Clinometro superficiale con sensore MEMS biassiale. Campo di misura fino a 10°, sensibilità: 0,0013°, precisione totale < +/-0,05% FS/°C, temperatura d'esercizio: -20°/50°C.	cad.	510,00 €

CODICE	STRUMENTAZIONE GEOTECNICA (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
SG.15.a	Trasduttore di pressione per misura di livello della falda con trasmissione dati in continuo. Temperatura di esercizio: -10/50°C, precisione: 0,3% di F.S. Fino a 50 metri di colonna d'acqua misurata	cad.	300,00 €
SG.15.b	Cavo segnale per trasduttore di pressione dati in continuo, dotato di tubo di ventilazione per la compensazione barometrica.	ml	2,50 €
SG.15.c	Trasduttore di pressione, precisione: < +/- 0,03% di F.S., completo di batteria, datalogger per registrazione e scarico dei dati mediante notebook. Memoria in grado di archiviare fino a 6 mesi di dati con una frequenza di acquisizione di 30 minuti. Campo di misura: 0 - 50 metri di colonna d'acqua.	cad.	1.100,00 €
SG.15.d	Cavo segnale autoportante per trasduttore di pressione con tubo di ventilazione per la compensazione barometrica.	ml	4,00 €
SG.15.e	Cavo di collegamento a PC/notebook per scarico dati da trasduttore di pressione.	cad.	50,00 €

CODICE	6. STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
T.01	Stazione robotica automatica servoassistita di altissima precisione, con dispositivo di puntamento e inseguimento del prisma. Portata del sistema di puntamento automatico ATR (Automatic Target Recognition): minimo 1000 m (con prisma standard) su prisma di tipo passivo. Lettura angolare orizzontale e verticale 0,1"/ 0,1 mgon; precisione angolare orizzontale e verticale: 0,5" = 0,15 mgon. Portata distanziometro: minimo 2000 m con prisma standard, precisione misura distanza: minimo 1mm + 1ppm, certificato di calibrazione ISO. Zoom cannocchiale, ad ottica oculare, minimo 30X. Grado di resistenza a polvere e acqua: IP64, scheda di memoria da 8 GB o superiore, memoria interna per programmi applicativi. Compreso gruppo di continuità ed armadio di alloggiamento per l'elettronica, nonché protezioni per sovratensioni.	cad.	29.000,00-36.000,00 €
T.02.a	Stazione GPS completa di antenna a singola frequenza per trasmissione dati in near real time. Precisioni in rilievo statico: 5 mm + 1 ppm (orizzontale) - 10 mm + 1 ppm (verticale); temperatura operativa da -20°C a +50°C; protezione IP67 o superiore; 12 canali o superiore; chip a basso consumo energetico; memoria interna e alloggiamento per scheda di memoria inseribile SD; controllo completo e configurazione del ricevitore via web. Incluso ricevitore, cavo antenna L min=10 m, protezioni contro le fulminazioni, batteria tampone da almeno 150 Ah, palo di supporto (l'eventuale basamento sarà computato a parte) completo con minuteria varia per il fissaggio della strumentazione, "case" di alloggiamento in lamiera d'acciaio con grado di protezione IP65 o maggiore.	cad.	7.000,00-9.000,00 €
T.02.b	Stazione GPS completa di antenna a doppia frequenza per trasmissione dati in near real time. Precisioni in rilievo statico: 3 mm + 0,5 ppm (orizzontale) - 5 mm + 0,5 ppm (verticale); temperatura operativa da -20°C a +50°C; protezione IP67 o superiore; 12 canali o superiore; chip a basso consumo energetico; memoria interna e alloggiamento per scheda di memoria inseribile SD; controllo completo e configurazione del ricevitore via web. Incluso ricevitore, cavo antenna L min=10 m, protezioni contro le fulminazioni, batteria tampone da almeno 150 Ah, palo di supporto (l'eventuale basamento sarà computato a parte) completo con minuteria varia per il fissaggio della strumentazione, "case" di alloggiamento in lamiera d'acciaio con grado di protezione IP65 o maggiore.	cad.	16.000,00-20.000,00 €

CODICE	6. STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
T.03	Hardware e software per trasmissione dati topografici o GPS in near real time, composto da contenitore/i con grado di protezione IP65 o superiore, PC industriale di controllo del sistema in sito, processore con caratteristiche minime di 1,5 Ghz, HDD 120 Gb, range di esercizio -10/+50 °C, memoria RAM 1Gb, unità di alimentazione con batteria in tampone al piombo adeguata, sistema automatico di ricarica da rete, dispositivo di riarmo automatico, modem GPRS completo di cavo di alimentazione ed antenna esterna, e quant'altro necessario per il corretto funzionamento della strumentazione e trasmissione, archiviazione in locale dei dati secondo da richiesta della Stazione Appaltante.	cad.	4.200,00 €
T.04	Piastra di fissaggio in acciaio inox, spessore 10 mm, dotata di vite sommitale adatta per l'installazione di stazione totale automatica di alta precisione.	cad.	290,00 €
T.05	Perno in acciaio inox con testa filettata maschio dal passo richiesto dalla Stazione Appaltante o a baionetta per l'aggancio di antenna satellitare e/o asta porta prisma.	cad.	50,00 €
T.06.a	Mira ottica classica o a "becco di flauto", comprensiva di prisma ottico, supporto a baionetta o a L, completa di viteria, segnale di mira, prisma e quanto necessario per l'installazione.	cad.	300,00 €
T.06.b	Asta porta prisma in acciaio inox, altezza 50 cm, compatibile con aggancio a baionetta della montatura di mira e filettate dal passo richiesto dalla Stazione Appaltante a femmina per fissaggio su perni.	cad.	60,00 €
T.07	Droni – UAV. Sistema a pilotaggio remoto (ad ala fissa o multi-rotore) dotato di un pianificatore di volo per la progettazione ed esecuzione di voli automatizzati. Il sistema è equipaggiato con un apparato fotografico in grado di acquisire una foto sequenza dell'area rilevata e un sistema GNSS RTK.	cad.	10.000,00-25.000,00 €
T.08	Laser scanner terrestre statico. Strumento topografico in grado di rilevare nuvole di punti tridimensionali di porzioni di territorio. Portata minima 800 m. Campo di ripresa orizzontale 360°. Campo di ripresa verticale 60 – 100°. Velocità di scansione: 100.000 – 500.000 punti/s. Fotocamera metrica opzionale.	cad.	90.000,00-150.000,00 €

CODICE	7. STAZIONE DI ACQUISIZIONE, SISTEMI DI TRASMISSIONE E VARI ALTRI ACCESSORI	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
A.01	Armadio in vetroresina per apparecchiature elettroniche piccolo (cm 30x20x10), grado di protezione IP65 o superiore.	cad.	95,00 €
A.02.a	Nodo WMS (Wireless Sensor Network) per la trasmissione dati da sensore a stazione. Distanza massima di trasmissione ≥ 200 m per ogni singolo nodo. Ogni nodo dovrà essere in grado di acquisire segnali in tensione, corrente alimentati esternamente, o potenziometrici (es. estensimetri). La rete WMS dovrà presentare un'architettura P2P (peer-to-peer, ovvero senza gerarchie e reazioni gerarchiche tra i nodi della rete stessa ad eccezione del nodo gateway/coordinatore); dovrà essere inoltre possibile integrare la rete WMS con nodi con funzione di ripetitore per raggiungere maggiori distanze. Temperatura di esercizio compresa tra $-20/+50^{\circ}\text{C}$, possibilità di collegare fino a 3 sensori digitali, memoria interna per il salvataggio dei dati ≥ 4 MB, alimentazione a batteria (durata minima di 6 mesi sulla base delle necessità di programmazione delle Stazione Appaltante) o con celle solari.	cad.	520,00-1.000,00 €
A.02.b	Ricevitore/nodo gateway (coordinatore) per ricezione dati dai nodi WMS. Temperatura di esercizio compresa tra $-20/+50^{\circ}\text{C}$, possibilità di collegare 16 nodi WMS o superiore, memoria interna per il salvataggio dei dati ≥ 4 MB, cavi e altri accessori per il collegamento con datalogger. Alimentazione da datalogger/centralina di acquisizione.	cad.	480,00-1.000,00 €
A.03	Datalogger: predisposizione collegamento a modem per trasmissione dei dati, connessioni dirette ai sensori (precisione a $\geq 0,01\%$ del valore nominale con coefficiente di temperatura > 3 ppm/$^{\circ}\text{C}$), sistema operativo open source, adeguato numero di porte di comunicazione (RS-232, RS-485, Ethernet, USB, CS I/O), n. 32 canali di ingresso o superiore (numero di bit per quantizzazione per canale ≥ 10) anche mediante espansioni, capacità di archiviazione dei dati ≥ 30 giorni a seconda della frequenza di acquisizione richiesta, memoria espandibile con schede SD o microSD dalla capacità di 4GB o superiore, temperatura di esercizio da $-20/+50^{\circ}\text{C}$ o intervallo più ampio. Programmazione da parte dell'utente sia in locale che da remoto e comunque non inferiore a 10 campioni al secondo, comunicazione con i principali protocolli di rete (TCP/IP, FTP, SMTP, POP3, HTTP), sistema di autodiagnosi in grado di segnalare eventuali anomalie di funzionamento o di alimentazione, adeguate protezioni contro le sovratensioni/radiofrequenze/scariche elettrostatiche. La fornitura inoltre dovrà includere: SW e driver per lo scarico dei dati, cavo di collegamento a PC/notebook e quanto necessario per l'installazione (viteria, staffe di ancoraggio, ecc).	cad.	2.250,00-4.000,00 €

CODICE	STAZIONE DI ACQUISIZIONE, SISTEMI DI TRASMISSIONE E VARI ALTRI ACCESSORI (segue)	U.d.M.	IMPORTO DI RIFERIMENTO
A.04	Modem GSM/GPRS e/o 3G/4G per comunicazioni M2M, completo di alimentatore di rete, antenna, cavo seriale. Temperatura di esercizio da -20 a +50°C.	cad.	340-600,00 €
A.05	Palo in metallo per stazione di acquisizione e/o strumentazione fino a 3 metri fuori terra, diametro Φ = 60 mm o superiore.	cad.	190,00 €
A.05.a	Palo in metallo per stazione di acquisizione e/o strumentazione fino a 6 metri fuori terra, diametro Φ = 60 mm o superiore.	cad.	300,00 €
A.05.b	Palo ribaltabile per il sostegno di sensori meteo o idrometeo, con supporto in acciaio zincato per il fissaggio su plinto (da computare a parte) con asta in alluminio anodizzato, completo di aste per il sostegno dei sensori (dimensionate in funzione della tipologia di strumentazione). Il meccanismo di ribaltamento dovrà garantire una discesa controllata del palo durante la fase di discesa. Al termine del ribaltamento dovrà essere possibile bloccare il palo in modo da poter operare in sicurezza. L'estremità del palo e dei sostegni dovranno essere protette contro l'infiltrazione dell'acqua anche con appositi tappi removibili per facilitare eventuali ispezioni o operazioni di manutenzione. I cavi dovranno essere posati all'interno dei sostegni tubolari dei sensori e del palo stesso. Caratteristiche tecniche: - piedistallo: in acciaio zincato con foratura per il fissaggio su plinto, completo dei meccanismi di ribaltamento e bloccaggio di sicurezza; - asta principale: in alluminio anodizzato diametro 80 mm, lunghezza (altezza) minima 4 m; - aste per il sostegno dei sensori: in alluminio anodizzato diametro 80 mm, lunghezza dimensionata in funzione della tipologia di sensore prevista e della grandezza fisica da misurare; - raccordi e altri accessori (viteria, ecc.) e quant'altro necessario per una corretta installazione.	cad.	1.150,00 €
A.06	Multiplexer per espansione canali datalogger. Temperatura d'esercizio da -20 a + 55°C.	cad.	760,00 €
A.07	Regolatore di carica 30 A di tipo smart con autoconsumo ridotto per batterie tampone 12 o 24V. Temperatura di esercizio -30°/+60°C.	cad.	215,00-270,00 €
A.08	Scatole stagna di derivazione IP65 in alluminio per cablaggio sensori e alloggiamento delle protezioni.	cad.	25,00 €

