

e l'11 febbraio la parte centrale della frana mostrava una fase di attivazione parossistica che causava il danneggiamento delle principali infrastrutture (strade, rete idrica, gasdotti, linee elettriche) ed in parte anche dell'ADs (è stato necessario ubicare alcuni degli strumenti in altri siti).

Il 12 febbraio, dopo oltre 35 mm di pioggia accoppiati ad una modesta nevicata, venivano registrati spostamenti rapidi del corpo di frana: gravi danni venivano causati lungo la viabilità locale e la SP 31, mentre nuove fessure si aprivano nella porzione inferiore del corpo franoso, lun-



Figura 9 • Esempi di evidenze di dissesto riscontrate in campagna nel corso della fase di mobilitazione gravitativa del 2008/09. (a) Danni alla strada comunale nei pressi della chiesa di S. Rocco (09.03.2009). (b) Danni alla strada comunale nei pressi della chiesa di S. Rocco (17.03.2009). In primo piano, struttura di protezione dell'estensimetro. (c) Danni alla strada comunale nei pressi del cimitero (25.03.2009). In primo piano, struttura di protezione dell'estensimetro. (d) Danni alla strada provinciale (SP 31) nei pressi del fianco dx della frana (06.03.2009). In primo piano, deformazione e crollo del muro in pietra-me. (e) Scarpata principale sviluppata nel settore dx del fenomeno, a monte del cimitero (17.02.2009). (f) Estensimetro in corrispondenza della scarpata principale, nel settore assiale (e più elevato) del fenomeno (25.03.2009).

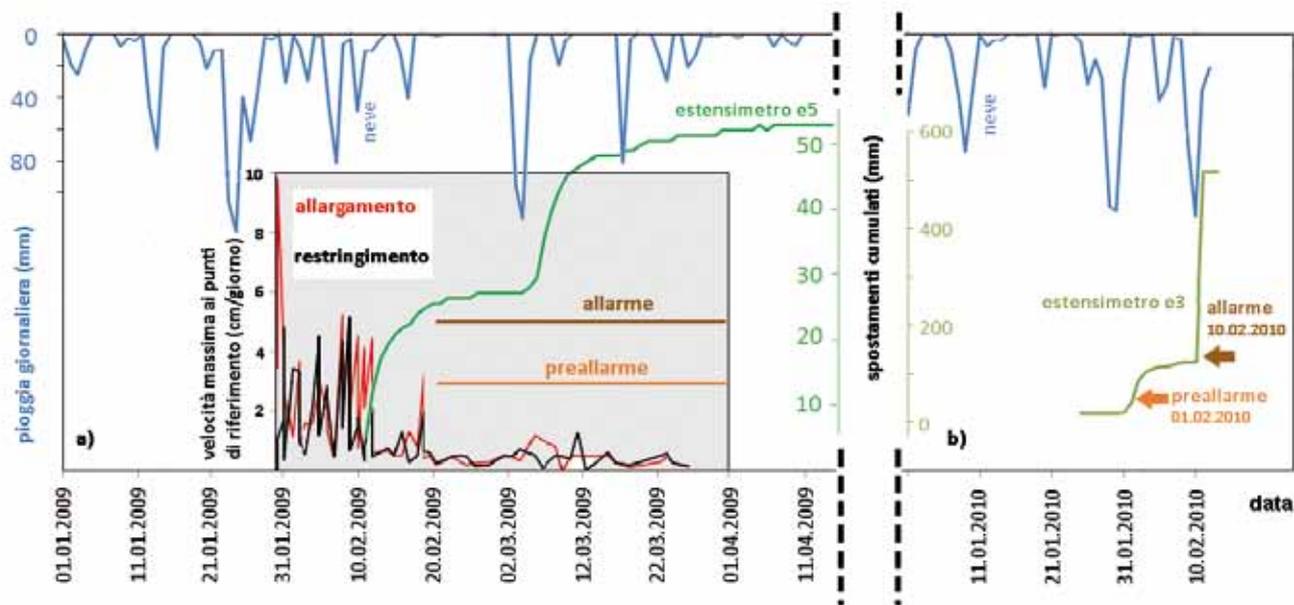


Figura 10 • Piogge e spostamenti superficiali registrati agli estensimetri ed ai capisaldi durante le fasi di mobilitazione del 2009 (a) e del 2010 (b). Legenda: in blu) piogge giornaliere; in nero/rosso) velocità massime giornaliere degli spostamenti ai capisaldi; in verde) spostamenti cumulati agli estensimetri e5 ed e3. Sono inoltre indicate le velocità critiche puntuali di carattere empirico, assunte pari a 3 e 5 cm/giorno, impiegate per la gestione dell'emergenza (da Iovine et al., 2009). L'occorrenza di condizioni di preallarme ed allarme è inoltre evidenziata graficamente.

go la strada per l'edificio "P". Nello stesso settore, il livello della falda raggiungeva la superficie del versante, e le sorgenti pre-esistenti mostravano significativi incrementi di portata.

L'estensione della zona colpita dall'attivazione franosa cresceva progressivamente nei giorni successivi: a partire dal 13 febbraio, fratture e scarpate si manifestavano anche nella zona boschiva, in corrispondenza sia delle scarpate già rilevate durante l'attivazione dell'inverno 2008/09 che nel settore più settentrionale, più prossimo all'abitato (in parte ascrivibili ad un fenomeno secondario). Dalla metà di febbraio, diffuse evidenze di attivazione gravitativa erano riscontrabili anche in altre zone del perimetro urbanizzato (es. lungo via Pedale) e del territorio comunale (es. nel cimitero; presso il ponte sul torrente Marri; lungo la SP 31 a Piano dei Rossi e Monte Bufalo; c.da Marinelli). Alla fine di marzo, malgrado una sostanziale diminuzione dell'attività gravitativa, le evidenze riscontrabili in campagna nel settore boscato a monte della viabilità comunale risultavano ancor più definite, specie a monte del cimitero e della vasca dell'acquedotto. In Figura 13 sono riportati alcuni esempi di evidenze di dissesto riscontrate in campagna nel corso della fase di mobilitazione gravitativa del 2009/10.

Anche in occasione di tale attivazione - malgrado le difficoltà legate al danneggiamento parziale del sistema, ed alla necessità di adeguare progressivamente l'ubicazione degli strumenti in funzione delle deformazioni osservate - il sistema di controllo ADs ha permesso di registrare spostamenti significativi (≥ 1 cm/mese) in corrispondenza di 2 o più estensimetri fino alla fine di maggio. L'attività è proseguita con minore velocità (pochi mm/mese) durante la tarda primavera e fino all'estate 2010, quando l'emergenza è stata considerata nuovamente conclusa. Rispetto all'attivazione precedente, gli effetti sulla rete

stradale e sulle infrastrutture sono risultati di gran lunga più gravi. Anche in questo caso, l'attivazione è iniziata nella parte medio-bassa del pendio (tra la strada comunale per il cimitero, e quella che conduce all'edificio "P"), dove le acque sotterranee hanno diffusamente intercettato la superficie. Nelle settimane successive all'innesco, l'attività si è estesa gradualmente sia verso i fianchi che nel settore boscato, con manifestazioni secondarie anche a monte del centro storico. In Figura 10b sono mostrate le precipitazioni cumulate e medie, insieme ai dati cinematici relativi all'attivazione del 2010.

Il sistema di sorveglianza sopra citato ha consentito di rilevare questa fase di attivazione sin dal suo inizio, consentendo all'Amministrazione comunale di intraprendere prontamente le azioni più opportune (come suggerito peraltro nelle procedure di mitigazione del rischio a suo tempo redatte).

4. ANALISI PARAMETRICA ALL'EQUILIBRIO LIMITE

È stata eseguita un'analisi a ritroso parametrica delle fasi di attivazione della frana in esame, mediante il metodo dell'equilibrio limite (LEM). Tale approccio, ampiamente diffuso nella pratica professionale e scientifica, assume che la massa delimitata dalla superficie basale di rottura sia in uno stato di "equilibrio limite" allorché la rottura a taglio del terreno viene raggiunta lungo la stessa superficie di scorrimento; in tali condizioni, il fattore di sicurezza è pari a 1. Pur nella limitazione che il comportamento del terreno viene schematizzato come rigido-perfettamente plastico, il LEM offre soluzioni accettabili in termini di fattore di sicurezza del versante in molti problemi pratici (si vedano, ad esempio, Duncan, 1992; Morgenstern, 1992; Fell et al., 2000). Per i casi caratterizzati da geometrie complesse, il calcolo del fattore di stabilità viene esegui-

to utilizzando metodi approssimati – come negli approcci semplificati di Janbu (1954) e di Bishop (1955) – oppure con metodi rigorosi che forniscono risultati più accurati – come in Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973). Il vantaggio principale del LEM sta nella semplicità di esecuzione ai fini pratici; i suoi limiti principali consistono generalmente: i) nella necessità di assegnare a priori la geometria della superficie di rottura, ii) nelle ipotesi riguardanti il comportamento del terreno ed il suo stato tensionale.

Nel presente studio, l'analisi è stata effettuata con il metodo di Morgenstern & Price (1965) per il calcolo del fattore di sicurezza. A tal riguardo, è stata preliminarmente effettuata un'analisi agli elementi finiti per definire il regime delle pressioni neutre nel versante, associato a condizioni stazionarie estive di flusso, da implementare successivamente nelle analisi LEM.

Lo schema stratigrafico adottato per il calcolo è stato assunto in base ai risultati di alcuni sondaggi geognostici, che ne hanno suggerito una triplice partizione. Nella Figura 11, seguendo la classificazione del grado di alte-

razione proposto da Cascini *et al.* (1994), lo strato giallo rappresenta la copertura detritica gneissica (classi VI e V), quello arancione rappresenta il substrato roccioso alterato (classi V-IV), e quello marrone rappresenta il substrato roccioso intatto (classi III, II e I). I sub-corpi di frana presi in esame nell'analisi LEM sono mostrati in Fig. 11. Essi sono stati idealmente definiti sulla base delle evidenze geomorfologiche riscontrate *in situ* (cfr. Fig. 8), delle informazioni stratigrafiche ricavate dai sondaggi, e dei dati inclinometrici (Fig. 14). Per quanto riguarda i sub-corpi di frana #1-3, l'unghia delle superfici di rottura basale è stata assunta presso il torrente Marri (a 370 m s.l.m.); per i sub-corpi #4-6, essa viene invece ipotizzata in corrispondenza della marcata rottura di pendenza del fianco orientale della Catena Costiera, poco a monte dell'edificio "P" (a 415 m s.l.m.).

La scarpata principale del sub-corpo di frana di lunghezza maggiore (#1) è stata osservata in campagna a 590 m s.l.m.; la geometria della superficie di rottura basale è vincolata dai risultati dei sondaggi e delle letture inclinometriche in S1 e S2, rispettivamente. La scarpata princi-

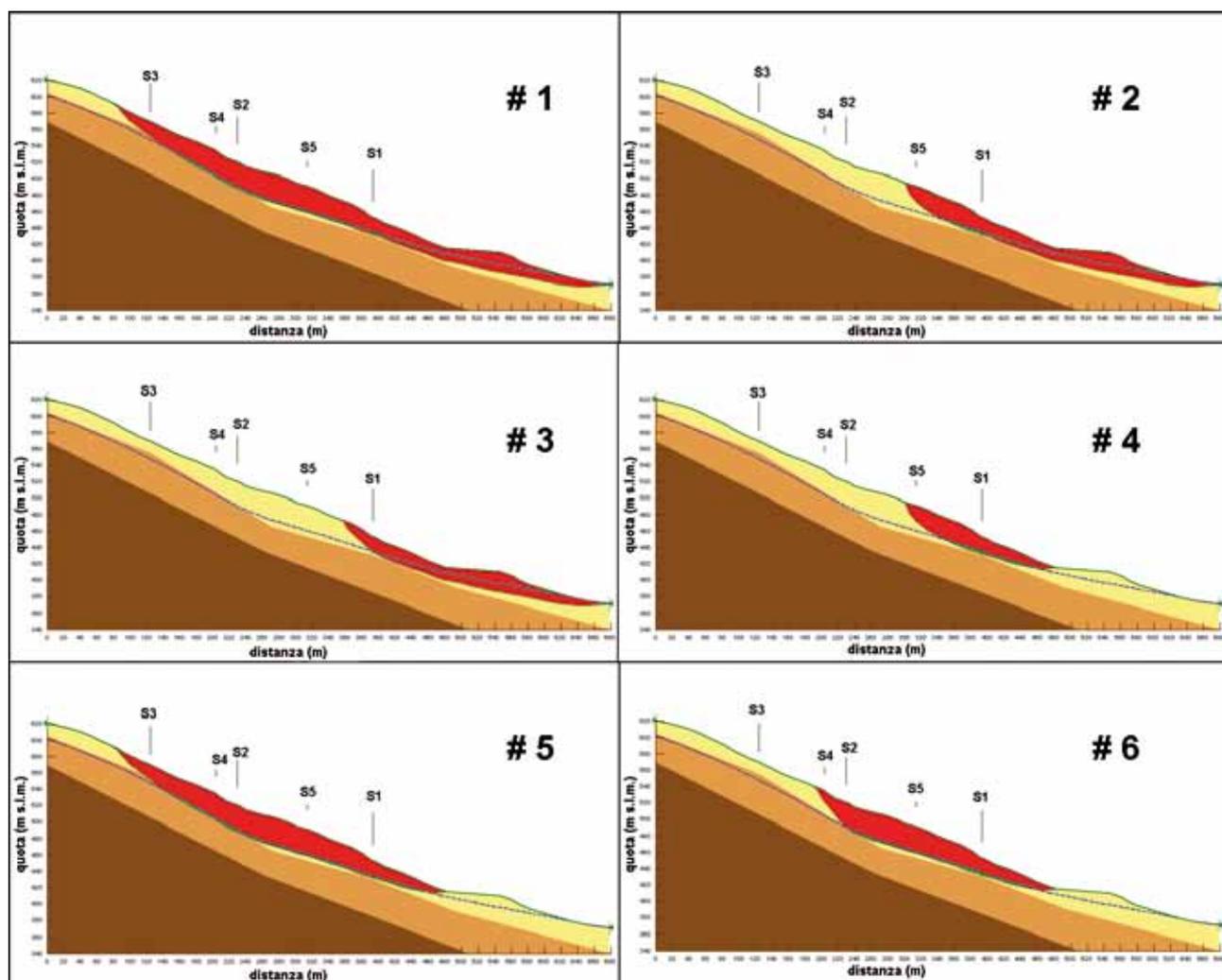


Figura 11 • Frana in località San Rocco: schema adottato nelle analisi di stabilità a ritroso all'equilibrio limite (cfr. testo per maggiori dettagli). Sono indicati i 3 "strati" considerati nella modellazione geologico-tecnica del versante, i 6 sub-corpi di frana, e le ubicazioni dei fori di sondaggio.

livello di allarme	criterio	procedure
normale	$F_i > 1.3$ o $v < 0.75$	Perlustrazione occasionale dell'area interessata; misure ai punti di riferimento, <i>inclinometri</i> , <i>piezometri</i> , <i>stazioni pluviometriche</i> .
pre-allerta	$1.2 < F_i \leq 1.3$ o $0.75 \leq v < 1.5$	Perlustrazione dell'area interessata (2-4 volte al mese); misure ai punti di riferimento; monitoraggio ADs, <i>inclinometri</i> , <i>piezometri</i> .
allerta	$1.1 < F_i \leq 1.2$ o $1.5 \leq v < 3.0$	Perlustrazione dell'area interessata (3-4 volte a settimana) per individuare evidenze anomale di evoluzione del fenomeno; misure giornaliere ai punti di riferimento, con trasmissione immediata dei dati; perlustrazione settimanale lungo i percorsi forestali e il sistema idrico; monitoraggio ADs, <i>inclinometri</i> , <i>piezometri</i> .
preallarme	$1.05 < F_i \leq 1.1$ o $3.0 \leq v < 5.0$	Perlustrazione giornaliera dell'area interessata per individuare evidenze anomale di evoluzione del fenomeno; misure una o due volte al giorno ai punti di riferimento, con trasmissione immediata dei dati; perlustrazione settimanale lungo i percorsi forestali e il sistema idrico (3-4 volte a settimana); monitoraggio ADs, <i>inclinometri</i> , <i>piezometri</i> . Preallarme degli abitanti; chiusura delle strade al traffico durante la notte e illuminazione di strade ed edifici interessati.
allarme	$F_i \leq 1.05$ o $5.0 \leq v$	Perlustrazione giornaliera dell'area interessata per individuare pericolose evidenze di evoluzione del fenomeno; monitoraggio ADs, <i>inclinometri</i> , <i>piezometri</i> . Allarme agli abitanti; evacuazione delle persone dagli edifici interessati; chiusura delle strade.

(*) se accessibile / funzionante

Tabella 2 • Procedure speditive per la mitigazione del rischio da frana in condizioni di emergenza attuate a SBU (da Iovine et al., 2009, mod.), con i miglioramenti ottenuti dall'analisi parametrica LEM (cfr. seconda colonna e Tab. 3). Le soglie di massima velocità puntuale (v) sono espresse in cm/giorno. In corsivo, gli strumenti non disponibili durante le primissime fasi dell'emergenza nell'inverno 2008/09. In bianco, i provvedimenti di mitigazione proposti all'Autorità di Protezione Civile.

pale del sub-corpo di frana #2 è ubicata nella porzione centrale del pendio (a 495 m s.l.m.); la superficie di rottura basale è vincolata dai risultati dei sondaggi e delle letture inclinometriche in S1 e S5, rispettivamente. La scarpata principale del sub-corpo di frana #3 è ubicata nella parte bassa del versante (a 473 m s.l.m.), con la superficie di rottura basale vincolata dai risultati del sondaggio S1. La parte più bassa delle superfici di scorrimento che delimitano i sub-corpi #1-3 è supposta coincidere, a partire da 430 m s.l.m. verso valle. Il sub-corpo di frana #4 corrisponde alla porzione di pendio maggiormente devastata dalle recenti attivazioni gravitative: la sua

scarpata principale coincide con quella della frana #2, e la superficie di rottura basale è vincolata dai risultati dei sondaggi e delle letture inclinometriche in S1 e S5, rispettivamente. Il sub-corpo di frana #5 differisce dal #1 per la posizione dell'unghia della superficie di rottura (e coincide grosso modo con la sua porzione medio-alta). Infine, il sub-corpo di frana #6 ha la scarpata principale a circa 540 m s.l.m., ed ha la superficie di rottura basale vincolata dai risultati dei sondaggi e delle letture inclinometriche in S1 e S4, rispettivamente. Le proprietà fisico-meccaniche dei materiali sono state desunte dall'esame della letteratura e di studi precedenti.

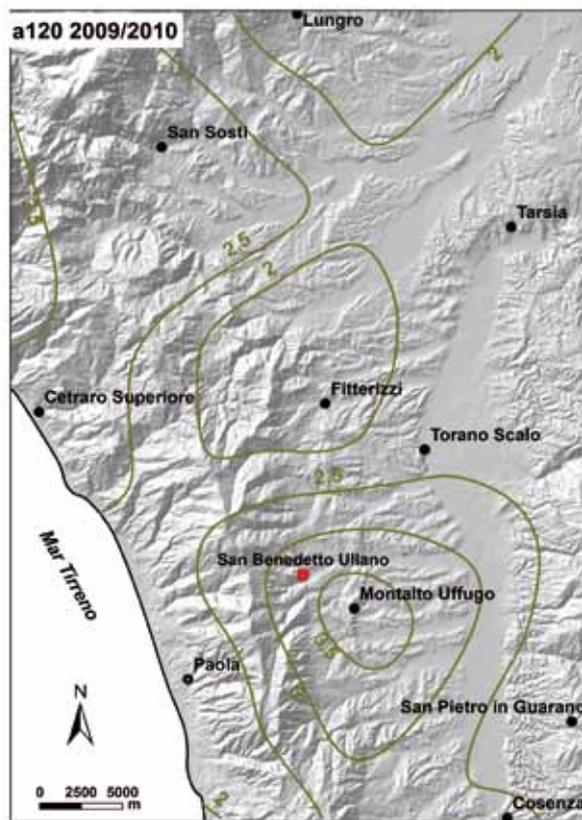
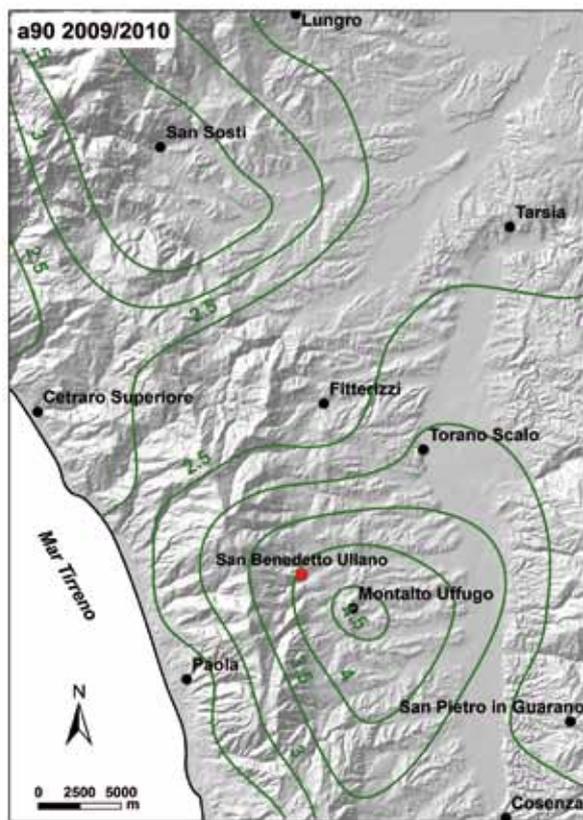
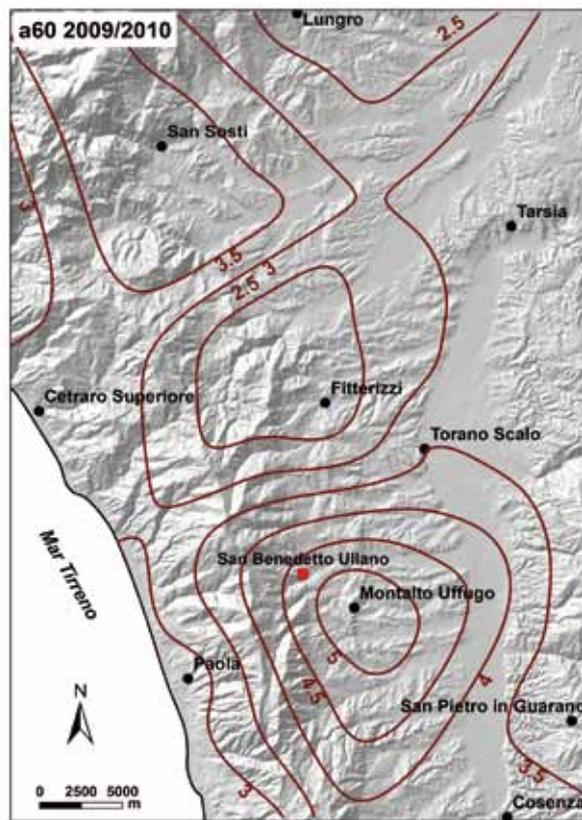
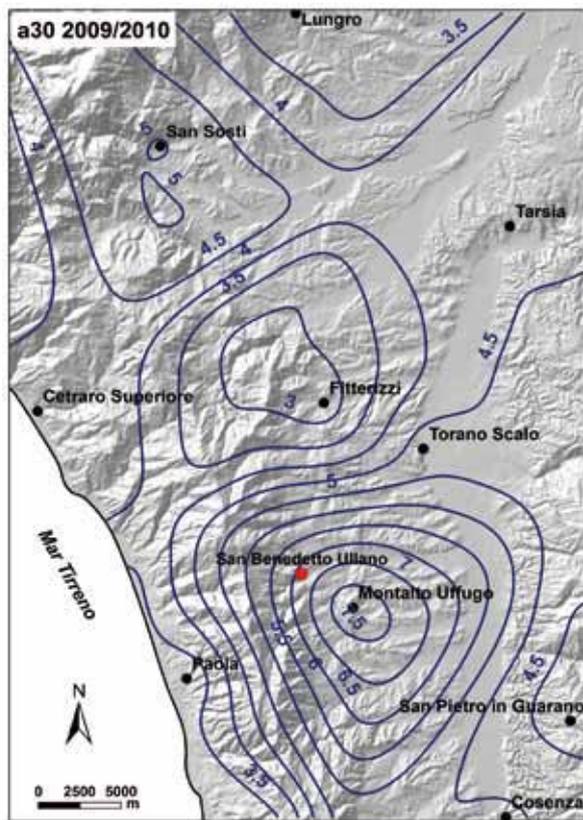


Figura 12 • Caratteristiche idrologiche della stagione piovosa 2009/2010 nel settore NW della Calabria. In blu: $a_{30}=P_{30}/(PMA/12)$; in rosso: $a_{60}=P_{60}/(PMA/6)$; in verde: $a_{90}=P_{90}/(PMA/4)$; in giallo: $a_{120}=P_{120}/(PMA/3)$. P_{30} : valore massimo di precipitazione cumulata su 30 giorni; P_{60} : valore massimo di precipitazione cumulata su 60 giorni; P_{90} : valore massimo di precipitazione cumulata su 90 giorni; P_{120} : valore massimo di precipitazione cumulata su 120 giorni; PMA: precipitazione media annua.



Figura 13 • Esempi di evidenze di dissesto riscontrate in campagna nel corso della fase di mobilitazione gravitativa del 2009/10. (a) Danni lungo la SP 31, in corrispondenza del fianco sx della frana (12.02.2010). (b) Danni al versante sottostante la SP 31. Sullo sfondo, l'edificio "P" (12.02.2010). (c) Danni alla viabilità comunale nei pressi della chiesa di S. Rocco (12.02.2010). (d) Evidenze di mobilitazione gravitativa "secondaria" nell'area boscata a monte del centro storico (15.02.2010). (e) Tratto di SP 31 distrutto dalla mobilitazione gravitativa (25.02.2010). (f) Tratto di SP 31 distrutto dalla mobilitazione gravitativa, in corrispondenza del fianco dx della frana (25.02.2010).

ti (rese disponibili dall'Amministrazione comunale), e dai risultati di recenti test identificativi e prove di taglio diretto su campioni prelevati dai sondaggi S3 e S4 a basse profondità, all'interno della copertura di derivazione gneissica (Nicola Chiarelli, com. pers., 2009). Il terreno risulta eterogeneo, in termini di granulometria e di proprietà fisiche: il peso di volume, γ , è compreso tra 15.0 e 20.1 kN/m³, con un valore medio di circa 16.8 kN/m³; il peso secco, γ_d , è circa 15.3 kN/m³; il contenuto medio d'acqua, w , è circa il 9%. Le distribuzioni granulometriche disponibili sono mostrate in Fig. 15: la copertura presenta una bassa frazione argillosa e limosa (meno del 24%), con sabbia tra il 31 e il 39%, e ghiaia tra il 37 e il 52%.

I risultati delle prove di taglio diretto, effettuate sulla parte più sottile dei campioni, sono rappresentati in termini di sforzo di taglio rispetto alla deformazione di taglio (Fig. 16a), e di spostamento normale rispetto alla deformazio-

ne di taglio (Fig. 16b). Il comportamento della copertura è generalmente duttile e contraente, come previsto anche per basse sollecitazioni di confinamento per terreni derivanti dalla destrutturazione di roccia alterata. Il campione S4-2 fa eccezione, presentando infatti un comportamento rammollente e dilatante a causa della maggiore frazione argillosa e limosa rispetto agli altri campioni analizzati. L'involuppo di rottura a taglio per il livello 1, secondo il criterio di Mohr-Coulomb, risulta essere caratterizzato da $c'_p = 0$ e $\varphi'_p = 36^\circ$ (Fig. 17). Poiché non era disponibile nessun test di laboratorio su campioni provenienti dal livello 2, per il substrato roccioso alterato è stato assunto un valore leggermente superiore all'angolo d'attrito di picco (livello 2; $\varphi'_p = 38^\circ$), considerata la minore percentuale di argilla e limo presente (Cascini & Gullà, 1993).

I parametri di taglio residuo sono stati valutati prenden-

do in considerazione i risultati delle prove di taglio diretto sul campione S4-2, per spostamenti di taglio di circa 10 mm: l'angolo di attrito residuo – che, per i suoli con bassa frazione argillosa, rappresenta la resistenza finale a taglio senza orientamento che può essere raggiunta per piccoli spostamenti (Lupini *et al.*, 1981) – è risultato pari a $\varphi'_r = 32^\circ$. Questo valore è coerente con i valori di resistenza residua osservata da Cascini & Gullà (1993) per i campioni di copertura di derivazione gneissica nelle vicinanze dell'area di studio.

Le mobilitazioni di frana avvenute durante l'inverno 2008/09 e 2009/10 possono essere interpretate – forse con la sola eccezione delle sue parti più profonde sviluppatesi nello strato 2 – come una riattivazione lungo superfici di scorrimento preesistenti. In base alle osservazioni di campagna ed ai risultati delle prospezioni, le fasi recenti di mobilitazione hanno infatti mostrato una forte tendenza ad ampliarsi, coinvolgendo progressivamente settori più ampi e profondi del pendio. Di conseguenza, nelle analisi LEM i valori di resistenza al taglio adottati per lo strato 1 sono stati quelli residui; al contrario, per lo strato 2 è stato scelto un angolo di attrito leggermente più piccolo del valore di picco, avendo assunto che la porzione della superficie di rottura all'interno di questo strato si sia attivata per la prima volta.

Riassumendo, nel "modello geotecnico del versante" utilizzato per l'analisi a ritroso, i parametri adottati per i due "strati" coinvolti nei processi di scorrimento sono:

$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $c' = 0$, $\varphi' = 32^\circ$, per lo strato 1; $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $c' = 0$, $\varphi' = 36^\circ$, per lo strato 2. Inoltre, per quanto riguarda i materiali situati al di sopra della falda freatica (cioè in condizioni parzialmente sature), i valori dell'angolo di attrito insaturi, φ'_b , sono stati assunti pari a $\varphi'/2$, in base al criterio di rottura valido per terreni parzialmente saturi (Fredlund *et al.*, 1978).

Allo scopo di definire il regime "stazionario" delle acque sotterranee, che si può ritenere rappresentativo delle condizioni estive della falda, è stata effettuata una analisi agli elementi finiti dell'infiltrazione in stato stazionario. Il valore medio delle misurazioni dei livelli idrici registrati nel piezometro S1 tra giugno e dicembre 2009 è stato considerato come riferimento per la validazione dei risultati numerici. I coefficienti saturi di permeabilità dei diversi strati sono stati selezionati in conformità con i valori proposti da Cascini *et al.* (2006) per terreni simili. In particolare, la conduttività idraulica satura, k_{sat} , per i tre livelli è stata assunta pari a: $5 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ per lo strato 1; $8 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$ per lo strato 2; $8 \times 10^{-7} \text{ (m/s)}$ per lo strato 3.

Per quanto riguarda i terreni parzialmente saturi, ubicati al di sopra della falda freatica, è stato assunto un coefficiente di permeabilità costante al variare della suzione per gli strati 2 e 3; per lo strato 1, è stata invece presa in considerazione la variabilità del coefficiente di permeabilità insaturo al variare della suzione. A tale proposito, la variabilità del contenuto volumetrico in acqua in funzione della suzione (cfr. curva caratteristica suolo-acqua) è

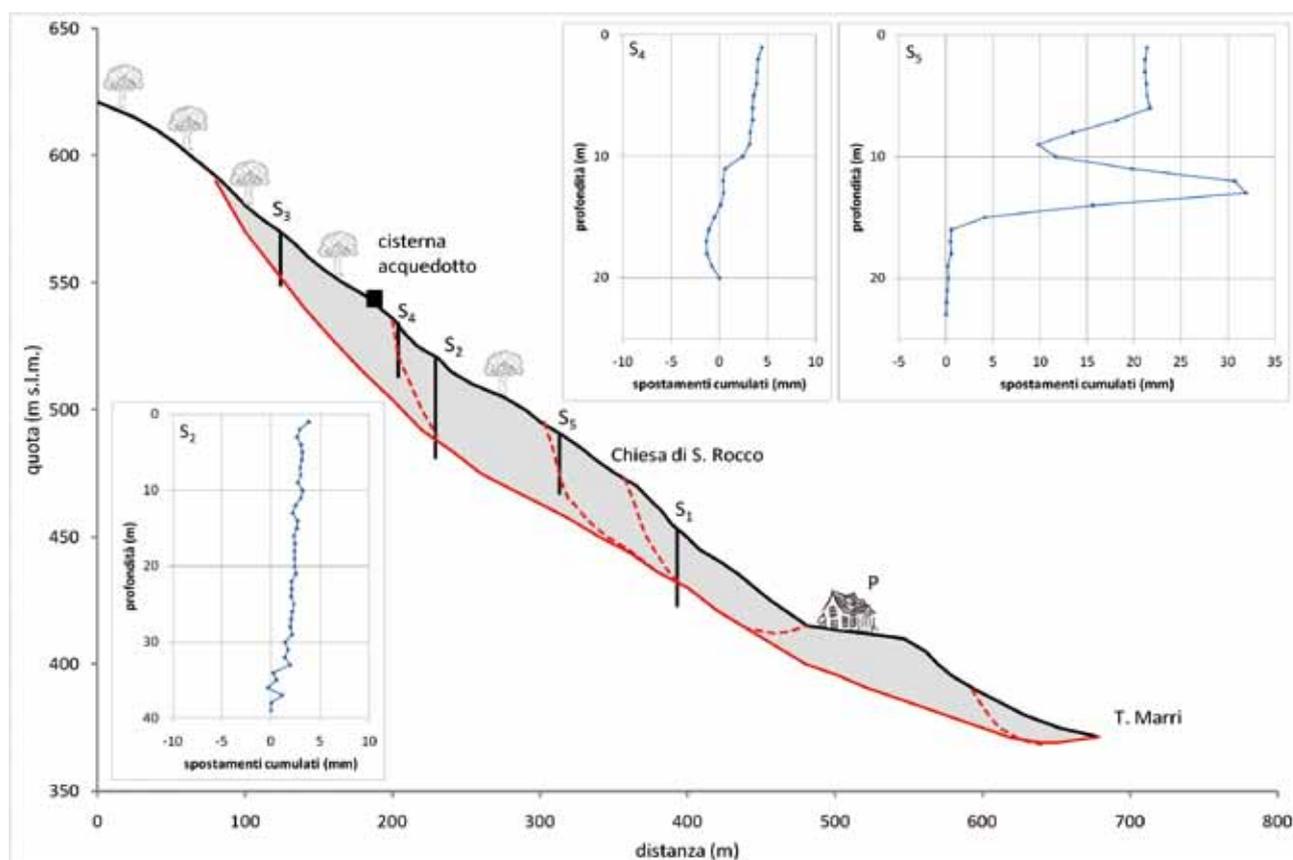


Figura 14 • Frana in località San Rocco: sezione schematica del pendio, con indicati i diversi sub-corpi di frana considerati nelle analisi di stabilità. Sono inoltre indicate la localizzazione e la profondità dei sondaggi, insieme alle principali superfici di rottura ed ai risultati delle misure inclinometriche (aggiornate a dicembre 2009) nei sondaggi S2, S4 ed S5.

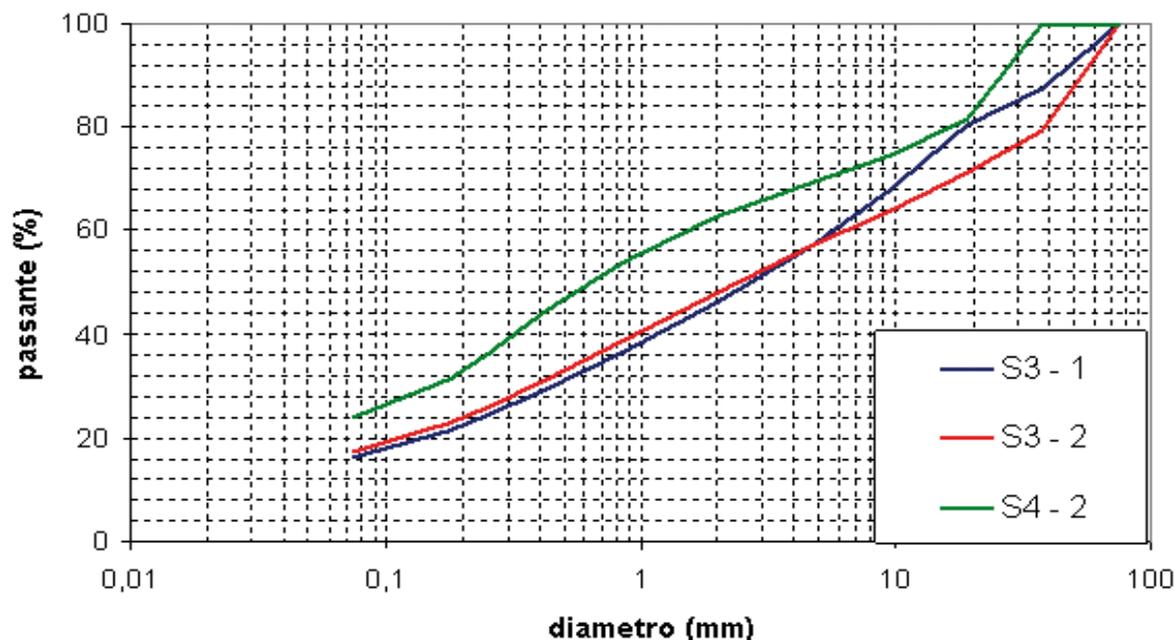


Figura 15 • Distribuzioni granulometriche dei campioni prelevati, a modesta profondità, nella copertura detritica di derivazione gneissica (strato 1).

stata stimata sulla base della curva granulometrica, secondo il metodo suggerito da Arya & Paris (1981); la legge di variazione della conducibilità idraulica insatura con la suzione è stata definita secondo Green & Corey (1971). Riguardo alle condizioni al contorno, è stato assegnato un confine impermeabile al fondo della maglia, mentre sono state fissate condizioni di drenaggio libero lungo il profilo del pendio. È stato assunto un carico totale costante lungo i limiti destro e sinistro del dominio di infiltrazione: il valore del carico idraulico è stato fissato pari alla quota del corso d'acqua (torrente Marri) sul limite di destra, mentre è stato imposto pari a 18 m sotto il piano campagna lungo il confine di sinistra, come suggerito dalle misure *in situ* disponibili.

5. RISULTATI

L'analisi di filtrazione idraulica ha indicato una geometria della falda freatica in buon accordo con le misure *in situ* osservate al piezometro S1, come mostrato in Fig. 18a: nella porzione mediana e superiore del versante, la superficie piezometrica è tra i 20 ed i 30 m di profondità; essa è meno profonda più a valle (10-15 m), ed interseca la superficie del terreno appena a monte del torrente. Come riferimento per l'analisi di stabilità parametrica, è stata presa in considerazione una sezione verticale lungo il pendio (in corrispondenza di S1) per quanto riguarda la profondità della falda: in detta sezione, in condizioni di flusso in regime stazionario, la profondità della falda risulta a circa 19 m.

A partire dalle condizioni di regime stazionario, è stato eseguito lo studio di sensitività LEM dei diversi sub-corpi di frana considerati (#1-6): sono state considerate diverse possibili geometrie della falda per indagare le condizioni di criticità idraulica che possono determinare l'attivazione della frana. La profondità della falda non è stata mi-

surata durante le fasi parossistiche di movimento, bensì soltanto durante le fasi di quiescenza (es. periodo estate-autunno 2009). Siccome le informazioni disponibili sulla variazione della falda nel tempo erano piuttosto limitate, i livelli idrici considerati nelle analisi parametriche sono stati incrementati parallelamente alla configurazione estiva, per come risulta dall'analisi di filtrazione idraulica (per la configurazione di massima risalita della falda, cfr. Fig. 18b).

I risultati delle analisi di sensitività, in termini di fattore di sicurezza (F_i con $i=1, \dots, 6$) dei 6 sub-corpi di frana per differenti livelli di falda, sono riassunti nella Tab. 3 e nella Fig. 19. Nel caso di regime stazionario della falda, l'analisi ha evidenziato condizioni abbastanza stabili ($F > 1.5$) per tutti i 6 sub-corpi di frana considerati. Il sub-corpo di frana #4 diventa instabile quando la falda raggiunge la profondità di circa 9 metri dal piano campagna (nb. nell'analisi parametrica, i valori di profondità della falda sono riferiti alla sezione S1); in tali condizioni, la falda approssima la superficie del versante subito a valle di S1. Dopo un ulteriore innalzamento della falda freatica, i sub-corpi #5 e #6 diventano instabili per profondità di 7 e 6 metri, rispettivamente. Per profondità ancora minori, diventano progressivamente instabili i sub-corpi di frana #1 e #2, seguiti dal #3. Tutti i sub-corpi di frana considerati risultano instabili quando la falda raggiunge i 4 metri di profondità in S1. I risultati sopra sintetizzati corrispondono a quanto osservato *in situ* durante le recenti fasi di mobilitazione gravitativa, cominciate nel gennaio 2009 e nel febbraio 2010. Infatti, chiari segni di riattivazione di un sub-corpo di frana riferibile al #4 sono stati effettivamente rilevati in campagna pochi giorni prima che nuove sorgenti fossero osservate in prossimità di S1 (Fig. 20). In quell'occasione, tracce di attivazione sono state riscontrate anche nei pressi del torrente, probabilmente a causa dell'attivazione di una frana secondaria. Secondo l'analisi parametri-

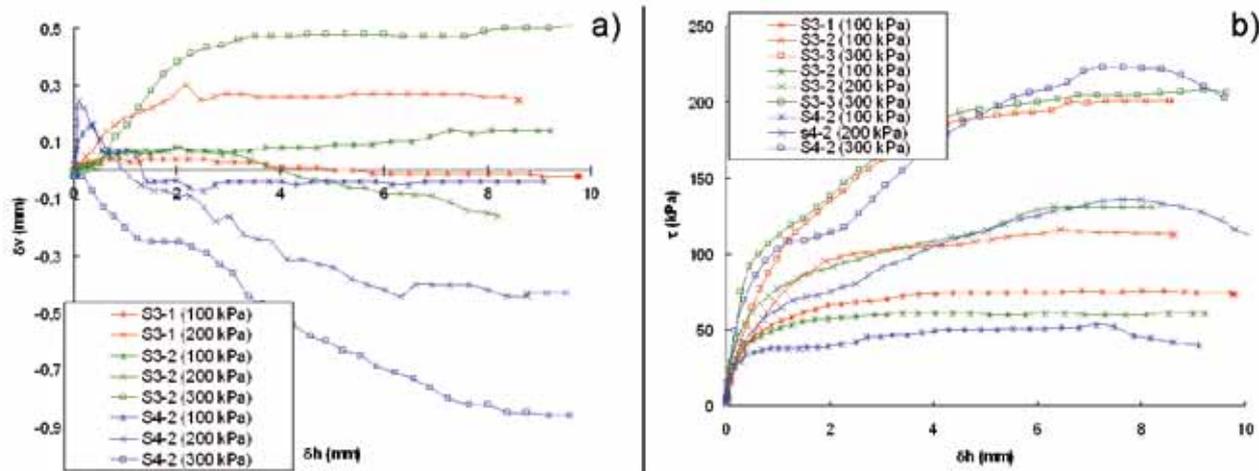


Figura 16 • Risultati delle prove di taglio diretto eseguite su campioni prelevati, a modesta profondità, nella copertura detritica di derivazione gneissica, espressi in termini di spostamento verticale rispetto alla deformazione di taglio (a), e di sforzo di taglio rispetto alla deformazione di taglio (b).

ca, il sub-corpo di frana #5 diventa instabile solo dopo un innalzamento della falda di circa 2 m nella porzione medio-alta del versante (Fig. 21); in tali condizioni idrauliche, i restanti sub-corpi di frana (#1-3 e #6) sono ancora stabili. Dopo un ulteriore innalzamento della falda di circa 1 m, il fattore di sicurezza del sub-corpo di frana #6 raggiunge anche esso l'unità (Fig. 22). Nella realtà, l'attivazione dei principali sub-corpi di frana (#5 e #6) – osservata, sia nel 2009 che nel 2010, dopo la mobilitazione del settore centrale del versante (#4) – si è verificata in condizioni idrauliche eccezionali, in conseguenza di 7 giorni di piogge straordinarie. Tali precipitazioni hanno presumibilmente causato un ulteriore aumento delle pressioni interstiziali anche nella porzione più elevata del versante, consentendo quindi l'attivazione del settore superiore della frana.

Sulla base dei risultati ottenuti con l'analisi parametrica agli elementi finiti, il sistema di sorveglianza è stato affinato, includendo - tra i criteri da utilizzare per la definizione dei diversi livelli di allarme - riferimenti ai valori del fattore di sicurezza (F_i) relativo ai 6 sub-corpi di frana considerati. In Tab. 2 sono riassunti i criteri aggiornati, le procedure suggerite (da far eseguire ai tecnici comunali e/o volontari), e i provvedimenti d'emergenza che possono essere adottati dall'Autorità di Protezione Civile. Si noti che il "criterio" originale, definito nelle prime fasi dell'emergenza 2008/09, era semplicemente riferito ai valori massimi di velocità puntuale osservati (Iovine *et al.*, 2009).

I criteri aggiornati si riferiscono dunque ad una combinazione di valori di F_i (e quindi, indirettamente, alle profondità della falda – cfr. Tab. 3) e di velocità puntuali massime. È opportuno sottolineare che, per un utilizzo corretto delle indicazioni contenute in Tab. 2, tra tutti i valori di F_i calcolati per i diversi sub-corpi di frana (#1-6) al variare delle condizioni al contorno, deve essere considerato quello minore. L'apparente incongruenza tra $F_i > 1$ e $v > 0$ è spiegata considerando che le velocità puntuali effettivamente osservate possono essere influenzate da movimenti di natura "locale", ovvero legate a porzioni secondarie/superficiali del versante: in tali casi, esse non

sono dunque rappresentative della dinamica dei sub-corpi di interesse.

Da un punto di vista meramente operativo, nel caso in cui un dato criterio viene soddisfatto, il sistema invia un messaggio di avviso, via GSM, al Sindaco (nonché al gruppo di consulenti), per consentire una adeguata e tempestiva conoscenza delle condizioni evolutive del fenomeno e – se il caso – l'attivazione di azioni opportune (es. il controllo di indicatori specifici). Sulla base dei risultati delle ispezioni in sito, e dell'elaborazione delle informazioni progressivamente acquisite (queste ultime costantemente verificabili attraverso un semplice accesso alla rete internet), il livello di allarme può essere quindi aggiornato.

6. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Come conseguenza dell'attivazione del 2010, la porzione centrale della frana in località San Rocco ha distrutto la viabilità provinciale (SP 31) e locale, causando anche la rottura delle principali infrastrutture che attraversano

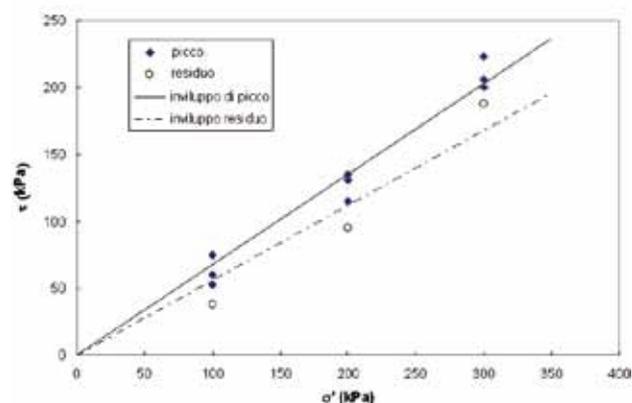


Figura 17 • Involuppi di rottura al taglio, di picco e residuo, per campioni prelevati, a modesta profondità, nella copertura detritica di derivazione gneissica.

Profondità della falda (m) alla sezione S1	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
19 (cond. stazionarie)	1.52	1.52	1.52	1.53	1.52	1.57
16	1.39	1.38	1.37	1.38	1.39	1.44
15	1.34	1.32	1.33	1.30	1.34	1.38
14	1.30	1.28	1.28	1.25	1.29	1.33
13	1.26	1.23	1.22	1.20	1.25	1.29
12	1.22	1.20	1.20	1.15	1.21	1.24
11	1.18	1.17	1.18	1.10	1.16	1.20
10	1.15	1.14	1.15	1.05	1.12	1.16
9	1.12	1.11	1.13	1.01	1.08	1.12
8	1.09	1.09	1.10	*	1.04	1.08
7	1.05	1.06	1.08	*	1.00	1.04
6	1.02	1.03	1.06	*	*	1.00
5	*	1.00	1.03	*	*	*
4	*	*	1.00	*	*	*

Tabella 3 • Fattori di stabilità (F_i) dei sub-corpi di frana considerati (#1-6), in funzione della profondità della falda in S1 (cfr. Fig. 19). I valori minimi di F_i sono riportati in grassetto (gli asterischi indicano i valori di $F_i < 1$). Il colori dello sfondo indicano i differenti livelli di allarme elencati in Tab. 2.

l'area instabile (acquedotto, gasdotto, linea elettrica). Nella primavera del 2010, l'Amministrazione comunale ha iniziato a realizzare opere di sistemazione per migliorare la stabilità del versante, mirando soprattutto a ridurre le possibilità che la frana si estenda ulteriormente verso l'abitato. Considerando l'articolazione del fenomeno, le caratteristiche geomorfologiche della zona e il tipo di materiali coinvolti, l'evoluzione della frana potrebbe essere caratterizzata da velocità progressivamente crescenti, fino ad una classe "moderata" (sensu Cruden & Varnes, 1996). Di conseguenza, il livello di rischio può essere ancora considerato "elevato" per il settore urbanizzato più direttamente minacciato dalla frana; esso è invece minore per la popolazione, che peraltro può trarre vantaggio dal preavviso fornito dal sistema di sorveglianza. Nel complesso, le analisi parametriche LEM hanno confermato la distribuzione retrogressiva dell'attività della frana in località San Rocco, come rilevato nelle recenti

mobilizzazioni innescate nel gennaio 2009 e nel febbraio 2010: quando la falda si approssima alla superficie del versante nel settore medio-basso, si osserva una prima fase di attivazione (sub-corpo #4); probabilmente a seguito di un'ulteriore risalita della falda e della diminuzione del sostegno al piede, tale prima attivazione viene seguita dalla mobilitazione di una porzione più profonda (sub-corpi #5 e #6), posta più a monte. In concomitanza con l'inizio delle mobilizzazioni della frana, sono stati osservati nuovi affioramenti della falda freatica nel settore medio-basso del versante, mentre le sorgenti preesistenti hanno mostrato un notevole incremento di portata. La fase di mobilitazione iniziale (essenzialmente circoscritta al settore compreso tra la viabilità comunale per il cimitero e la strada provinciale) è stata seguita da una graduale attivazione della porzione superiore del versante, e dall'estensione verso entrambi i fianchi: nell'area boscata posta a monte della viabilità

comunale, sono stati riconosciuti chiari segni di allargamento – ancora più accentuati durante l'attivazione del 2010 rispetto a quelli del 2009 – sia verso il centro storico che verso il cimitero.

Per gestire le emergenze citate, il Sindaco di SBU ha potuto utilizzare le informazioni raccolte attraverso un sistema "integrato" di sorveglianza, realizzato grazie alla pronta collaborazione offerta dal CNR-IRPI attraverso una specifica convenzione di consulenza scientifica. Il sistema di sorveglianza è fondato su osservazioni dirette in campagna, sopralluoghi periodici da parte di tecnici comunali e volontari, e misurazioni in tempo reale di parametri "significativi" (ovvero, direttamente correlati al fenomeno di interesse secondo leggi accettate in letteratura) mediante strumenti ad alta precisione. Gli strati informativi così acquisiti permettono all'Autorità di Protezione Civile di attivare le opportune procedure di verifica in sito ed,

eventualmente, adottare provvedimenti di mitigazione. Con riferimento alla realizzazione di sistemi di sorveglianza, sembra opportuno rimarcare l'importanza del giusto rapporto cui dovrebbero tendere i costi delle attività di consulenza scientifica rispetto a quelli finalizzati alla stabilizzazione dei versanti. In casi particolarmente complessi, quali ad es. quelli di frane articolate e di grandi dimensioni che inducono elevati rischi per la popolazione, l'attività di consulenza scientifica rappresenta un utile supporto ai tecnici incaricati della progettazione degli interventi (geologi, ingegneri geotecnici ed idraulici, ecc.) per una corretta pianificazione delle indagini geognostiche e per un'efficace progettazione delle opere di stabilizzazione. Da un punto di vista meramente economico, un'utile indicazione può essere ottenuta dal rapporto f (%) tra il valore del rischio "residuo" a valle dell'attività di mitigazione (R_{Rm} realizzata con il sistema di sorveglianza) e quello

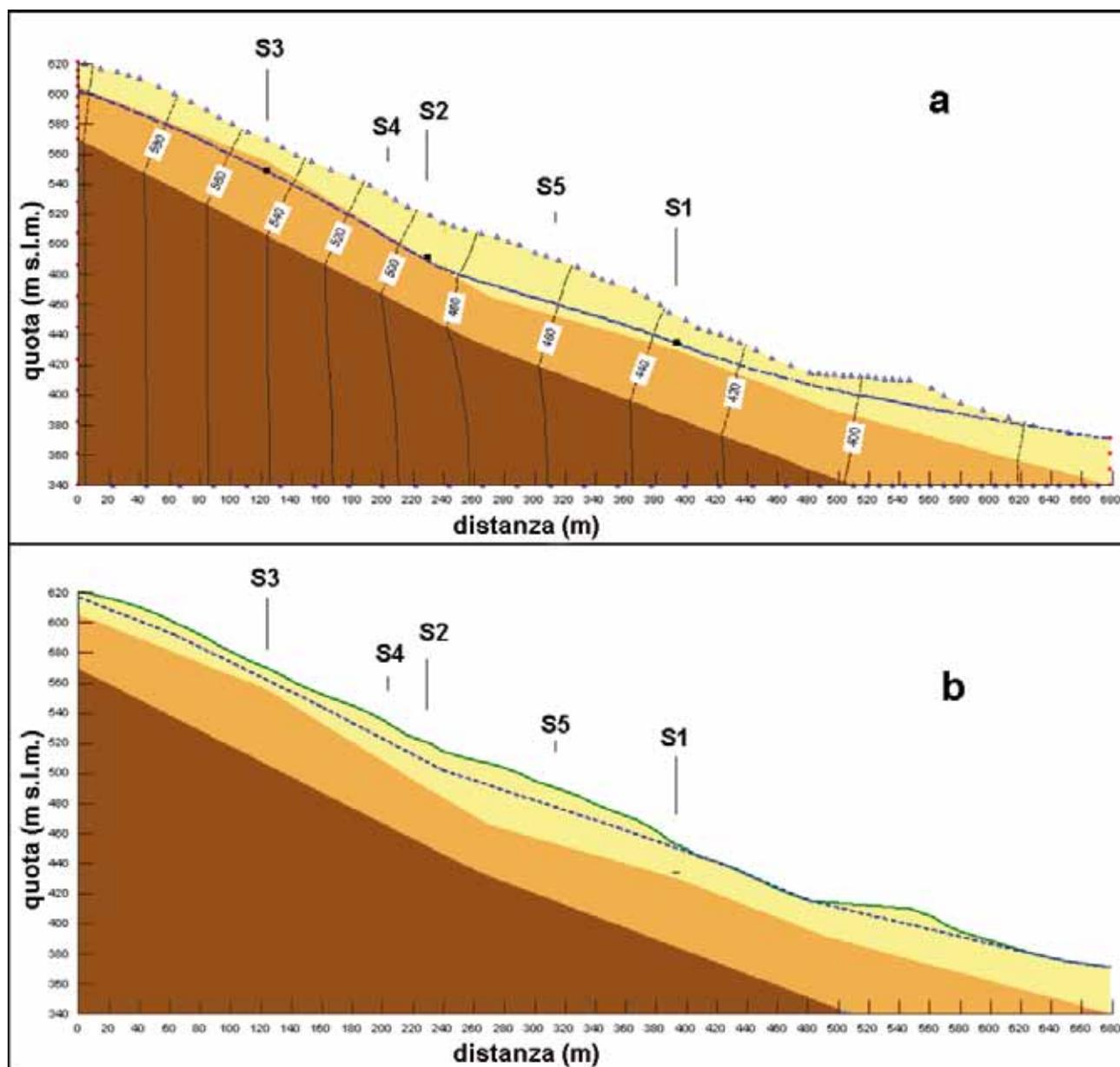


Figura 18 • Frana in località San Rocco: linee equipotenziali e livelli di falda calcolati per un regime d'infiltrazione in condizioni stazionarie (a), e massimo sollevamento di falda considerato nell'analisi parametrica (b).

successivo alla riduzione operata attraverso interventi di stabilizzazione (R_{Rr}):

$$f = \frac{R_{Rm}}{R_{Rr}} \times 100$$

Quanto più l'attività di consulenza scientifica riesce ad indirizzare efficacemente gli interventi di sistemazione, tanto più i suoi costi costituiscono un investimento per ottimizzare le spese relative agli interventi strutturali. Molto spesso non esistono valide ed immediate alternative alle attività di mitigazione fino alla realizzazione delle opere di sistemazione, per cui la tutela di beni e vite umane può essere affidata soltanto a questo tipo di azioni. La rete di sorveglianza potrebbe inoltre essere utilizzata anche successivamente alla realizzazione degli interventi strutturali, per la verifica della loro efficacia. In generale, le risorse finanziarie dedicate all'attività di consulenza scientifica dovrebbero costituire una frazione comunque limitata (intorno al 5%, variabile in relazione alla complessità e dimensione del fenomeno) del costo ipotizzato per la stabilizzazione del versante mediante interventi strutturali.

Nel presente studio, sulla base di analisi geo-idrologiche e geo-tecniche, è stato adottato un approccio fisico – anche se ancora preliminare – per valutare le condizioni di stabilità del pendio in località San Rocco di San Benedetto Ullano, e per definire la propensione dei differenti sub-corpi di frana a destabilizzarsi. Poiché, a causa delle limitate conoscenze specifiche legate alla breve durata del periodo d'osservazione, la risposta della falda alle precipitazioni non è stata ancora approfondita con sufficiente dettaglio, le analisi LEM sono state eseguite in termini parametrici per indagare la sensibilità delle condizioni di stabilità al variare del livello di falda. Ulteriori indagini geognostiche sono programmate nell'immediato futuro; il sistema ADs dovrebbe essere aggiornato mediante l'installazione di nuovi strumenti e la ricollocazione di alcuni di quelli esistenti.

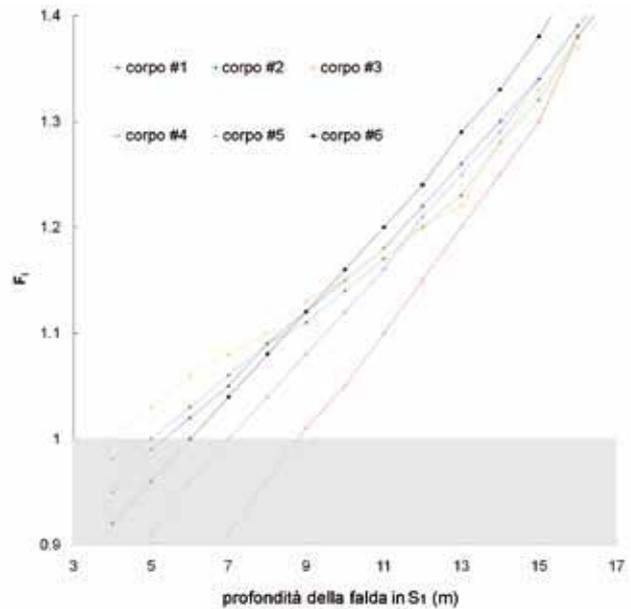


Figura 19 • Frana in località San Rocco: risultati dell'analisi parametrica agli elementi finiti. I valori di F_i calcolati per i sei sub-corpi di frana sono espressi in relazione ai livelli di falda in S1 (cfr. Tab. 3).

I risultati dell'approccio LEM hanno fornito indicazioni utili per prevedere il comportamento del fenomeno franoso sulla base di misure dei livelli di falda, da effettuare in una serie di punti significativi per mezzo di un sistema di monitoraggio (meglio se in continuo ed accoppiato con misure di spostamento superficiale e/o in profondità). Sulla base delle attuali conoscenze, se la profondità della falda in S1 varia da 15 a 9 metri, il fattore di sicurezza varia tra 1.3 e 1.0 per il sub-corpo di frana #4 – ovvero per il settore compreso tra la strada comunale per il cimitero e la SP 31, che ha mostrato di recente la più forte tendenza alla destabilizzazione. I risultati ottenuti hanno

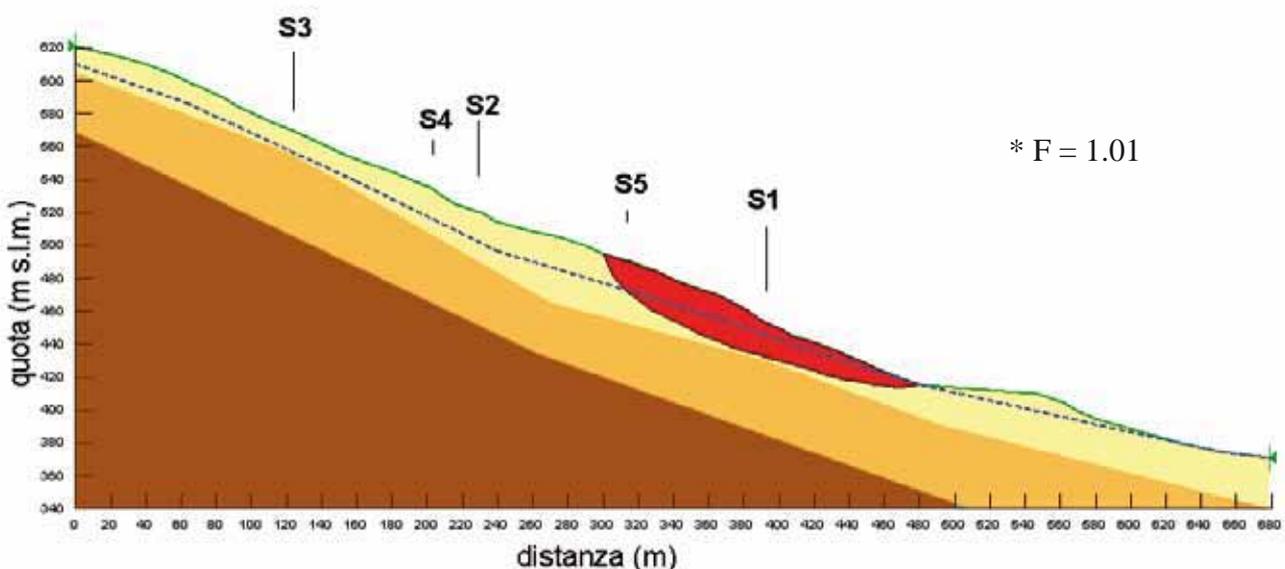


Figura 20 • Frana in località San Rocco: geometria della falda assunta per una profondità di 9 m in corrispondenza di S1. Per il sub-corpo di frana #4, si ottiene $F_4 = 1.01$.

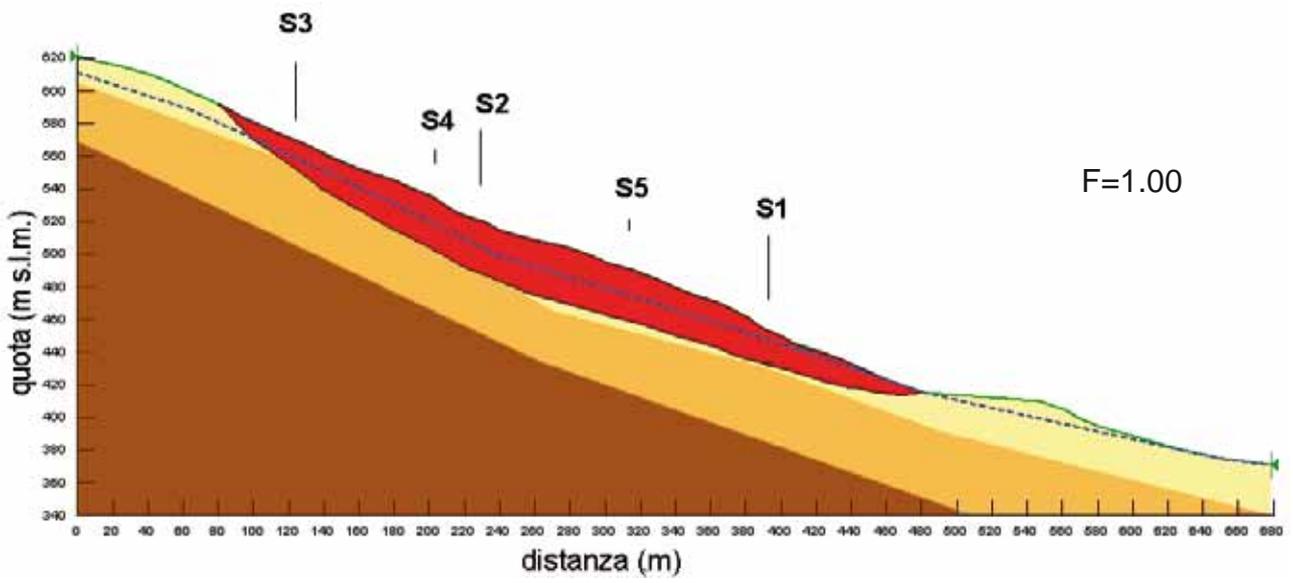


Figura 21 • Frana in località San Rocco: geometria della falda assunta per una profondità di 7 m in corrispondenza di S1. Per il sub-corpo di frana #5, si ottiene $F_5 = 1.00$.

consentito di aggiornare le procedure di emergenza iniziali, e di porre in relazione i livelli di allarme ai valori stimati del coefficiente di sicurezza (quest'ultimo dipendente dal livello di falda).
 Recentemente, è stata inoltre effettuata una modellazione idrologica finalizzata a valutare le precipitazioni critiche in grado di attivare la frana in oggetto (Capparelli et al., 2010). Partendo dalle date storiche di attivazione e dalle registrazioni di pioggia, il modello idrologico è stato calibrato sugli eventi innescanti conosciuti. Le principali fasi di accelerazione della frana, registrate in superficie dal sistema ADs, sono state correttamente previste dal modello, validando in tal modo la procedura. Ulteriori indagini sono in corso per definire meglio i rapporti tra

piogge, variazioni dei livelli piezometrici, e fattore di sicurezza dei diversi sub-corpi in cui è stata idealmente scomposta la frana di interesse. Nel prossimo futuro, il sistema di allerta a SBU dovrebbe essere ulteriormente affinato - condizionandolo ai nuovi dati e, possibilmente, ai risultati della modellazione idrologica - per fornire utili indicazioni sull'approssimarsi di condizioni di criticità e per fondare le procedure di mitigazione su una dettagliata schematizzazione geotecnica del versante.

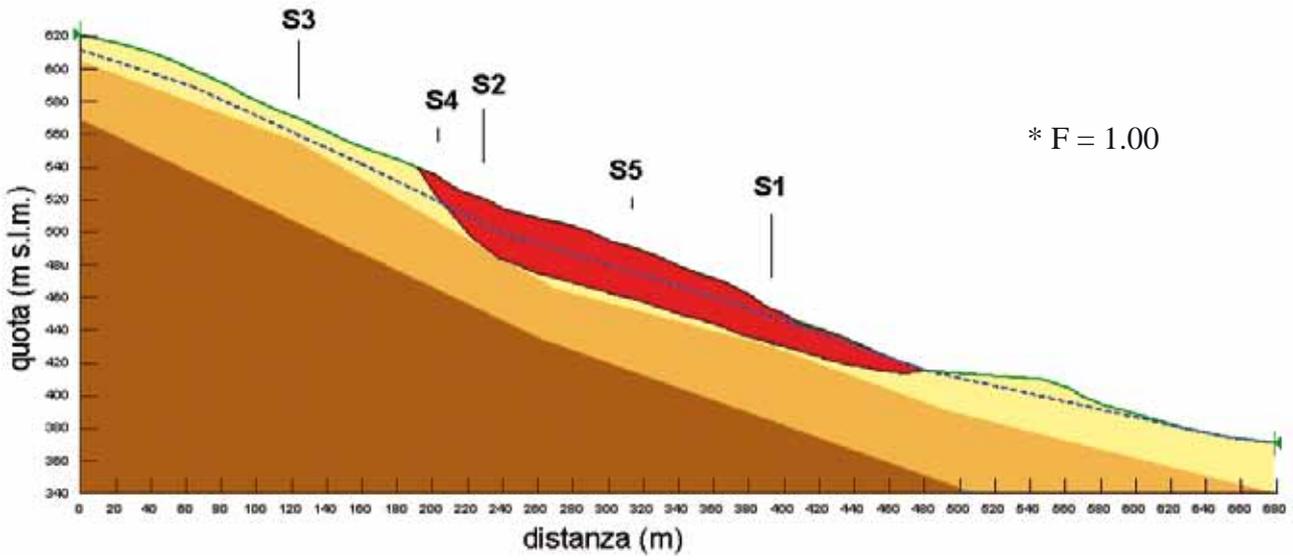


Figura 22 • Frana in località San Rocco: geometria della falda assunta per una profondità di 6 m in corrispondenza di S1. Per il sub-corpo di frana #6 si ottiene $F_6 = 1.00$.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato in parte finanziato dalla Amministrazione di San Benedetto Ullano attraverso una convenzione di consulenza scientifica con il CNR-IRPI. Si ringrazia il Sindaco Gianni Carnevale che ha gentilmente consentito di esaminare i risultati di alcuni sondaggi esplorativi, recentemente realizzati nelle zone di interesse, e delle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati. Il sistema di monitoraggio *in situ* è stato implementato da Advanced Devices S.p.A. I sopralluoghi sistematici nelle aree interessate dal fenomeno franoso sono stati effettuati, secondo

le procedure descritte, da volontari selezionati dall'Amministrazione comunale, all'uopo istruiti dagli scriventi. A tale riguardo, si ringrazia in special modo Wanessa Donato per aver coordinato le ispezioni e curato la raccolta e trasmissione quotidiana delle informazioni.

Manoscritto ricevuto il 4 luglio 2010

Manoscritto accettato il 10 novembre 2010

Ultime bozze ricevute il 12 novembre 2010

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AMODIO-MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976) - L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghebide. Mem. Soc. Geol. It., 17, 1-60.

ANDERSON M., HOLCOMBE L., FLORY R. & RENAUD J.-P. (2008) - Implementing low-cost landslide risk reduction: a pilot study in unplanned housing areas of the Caribbean. Natural Hazards, 47, 297-315.

ARYA L.M. & PARIS J.F. (1981) - A physico-empirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. Soil Sci. Soc. Am. J., 45, 1023-1030.

BISHOP A.W. (1955) - The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1), 7-17.

CAMPBELL R.H. (1975) - Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. US Geological Survey, Reston, VA., USGS Professional Paper 851.

CAPPARELLI G., IAQUINTA P., IOVINE G.G.R., TERRANOVA O.G. & VERSACE P. (2010) - Modelling the rainfall-induced mobilization of a large slope movement in northern Calabria. Natural Hazards (in stampa), doi: 10.1007/s11069-010-9651-1.

CARRARA A., CATALANO E., SORRISO-VALVO G.M., REALI C., MERENDA L. & RIZZO V. (1977) - Landslide morphometry and typology in two zones, Calabria, Italy. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 16(1), 8-13.

CARRARA A., MERENDA L., NICOLETTI P.G. & SORRISO-VALVO G.M. (1979) - Slope instability in Calabria, Italy. In: Proc. of the Polish-Italian Seminar on Superficial Mass Movement in Mountain Regions, Szymbark, May 1979, Instit. Meteor. i Gospod. Wodnej, Warszawa, pp.47-62.

CASCINI L. & GULLÀ G. (1993) - Caratterizzazione fisico-meccanica di terreni prodotti dall'alterazione di rocce gneissiche. Rivista Italiana di Geotecnica, 2-93, 125-147.

CASCINI L., CRITELLI S., DI NOCERA S., GULLÀ G. & MATANO F. (1994) - Weathering and landsliding in Sila Massif gneiss (Northern Calabria, Italy). In: Proc. 7th International IAEG Congress, Lisboa, Portugal, pp.1613-1622.

CASCINI L., GULLÀ G. & SORBINO G. (2006) - Groundwater modelling of a weathered gneissic cover. Canadian Geotechnical Journal, 43(11), 1153-1166.

CASMEZ (1967) - Carta Geologica della Calabria, F.229IIIINE "Lattarico" (in scale 1/25000). Poligrafica & CarteValori, Ercolano, Napoli.

CRESCENZI E., GRASSI D., IOVINE G., MERENDA L., MICELI F. & SDAO F. (1996) - Fenomeni di instabilità franosa nei centri abitati calabresi: esempi rappresentativi. Geol. Applicata e Idrogeologia, 31, 203-226.

CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - Landslide Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., pp.36-75.

DAI F.C., LEE C.F. & NGAI Y.Y. (2002) - Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology, 64, 65-87, 2002.

DUNCAN M. (1992) - State-of-the-art: static stability and deformation analysis. Stability and performance of slopes and embankments-II. Geotechnical Engineering Division Special Publication, American Society of Civil Engineers, 31, 222-266.

FELL R., HUNGR O., LEROUJEL S. & RIEMER W. (2000) - Keynote pa-

- per – Geotechnical engineering of the stability of natural slopes and cuts and fills in soil. In: Proc. GeoEng2000, Int. Conf. on Geotechnical and Geol. Eng., Melbourne, Australia, Technomic Publishing, Lancaster, 1, pp.21-120.
- FERRARI E., IOVINE G. & PETRUCCI O. (2000) - Evaluating landslide hazard through geomorphologic, hydrologic and historical analyses in north-eastern Calabria (southern Italy). In: Proc. EGS Plinius Conference Mediterranean Storms, Maratea, October 1999, Editoriale Bios, Cosenza, pp.425-438.
- FREDLUND D.G., MORGENSTERN N.R. & WIDGER R.A. (1978) - The shear strength of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 15, 313-321.
- GREEN R.E. & COREY J.C. (1971) - Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 3-8.
- GUZZETTA G. (1974) - Ancient tropical weathering in Calabria. *Nature*, 5473, 302-303.
- GUZZETTI F. (2000) - Landslides fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geol.*, 58, 89-107.
- IOVINE G. & MERENDA L. (1996) - Nota illustrativa alla "Carta delle frane e della mobilitazione diastrofica, dal 1973 ad oggi, nel bacino del Torrente Straface (Alto Jonio, Calabria)". *Geol. Applicata e Idrogeologia*, 31, 107-128.
- IOVINE G., PARISE M. & TANSI C. (1996) - Slope movements and tectonics in North-Eastern Calabria (Southern Italy). Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, ISL'96, "Landslides - Glissements de terrain", The Norwegian Institute of Technology, 17-21 June (Trondheim, Norway), A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 2, pp.785-790.
- IOVINE G. & PETRUCCI O. (1998) - Effetti sui versanti e nel fondovalle indotti da un evento pluviale eccezionale nel bacino di una fiumara calabra (T. Pagliara). *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 821-840.
- IOVINE G., PETRUCCI O., RIZZO V. & TANSI C. (2006) - The March 7th 2005 Cavallerizzo (Cerzeto) landslide in Calabria - Southern Italy. In: Proc. IAEG Conference, Nottingham, Conference CD, IAEG2006 Paper number 785, The Geological Society of London.
- IOVINE G., IAQUINTA P. & TERRANOVA O. (2009) - Emergency management of landslide risk during Autumn-Winter 2008/2009 in Calabria (Italy). The example of San Benedetto Ullano. In: Anderssen R.S., Braddock R.D. & Newham L.T.H. (Eds.), Proc. 18th World IMACS Congr. and MODSIM09 Int. Congr. on Modelling and Simulation, pp.2686-2693.
- IOVINE G.G.R., LOLLINO P., GARIANO S.L. & TERRANOVA O.G. (2010) - Coupling limit equilibrium analyses and real-time monitoring to refine a landslide surveillance system in Calabria (southern Italy). *NHESS*, 10. In: Iovine G.G.R., Huebl J., Pastor M. & Sheridan M.F. (Eds.), Special Issue on "Approaches to hazard evaluation, mapping, and mitigation", doi: 10.5194/nhess-10-1-2010.
- JANBU N. (1954) - Application of composite slip surfaces for stability analysis. In: Proc. European Conf. on Stability of Earth Slopes, Stockholm, 3, pp.43-49.
- LUPINI J.F., SKINNER A.E. & VAUGHAN P.R. (1981) - Drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique*, 31(2), 181-213.
- MONACO C. & TORTORICI L. (2000) - Active faulting in the Calabrian arc and eastern Sicily. *Journal of Geodynamics*, 29, 407-424.
- MORGENSTERN N.R. & PRICE V.E. (1965) - The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- MORGENSTERN N.R. (1992) - Keynote paper: The role of analysis in the evaluation of slope stability. In: Proc. 6th International Symposium of Landslides, Christchurch, New Zealand, Balkema, pp.1615-1629.
- OBONI F. (1988) - General Report: Analysis methods and forecasting of behaviour. In: Bonnard C. (Ed.), *Landslides. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides*, Lausanne, Balkema, Rotterdam, pp.491-499.
- PAI (2001) - Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Autorità di Bacino Regionale, Regione Calabria.
- RAMESH M.V. (2009) - Real-time Wireless Sensor Network for Landslide Detection. In: Third Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications. *SENSORCOMM 2009*, Athens/Glyfada, Greece, 18-23 June 2009, pp.405-409.
- SARMA S.K. (1973) - Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, 23(3), 423-433.
- SORRISO-VALVO G.M. (1985) - Mass movements and slope evolution in Calabria. In: 4th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Tokyo, pp.23-30.
- SORRISO-VALVO G.M. (1993) - The geomorphology of Calabria – a sketch. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 16(1), 75-80.
- SPENCER E. (1967) - A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- TANSI C., TALARICO A., IOVINE G., FOLINO GALLO M. & FALCONE G. (2005) - Interpretation of radon anomalies in seismotectonic and tectonic-gravitational setting of the south-eastern Crati Graben (Northern Calabria, Italy). *Tectonophysics*, 396(3-4), 181-193.
- TANSI C., MUTO F., CRITELLI S. & IOVINE G. (2007) - Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (Southern Italy). *Journal of Geodynamics*, 43(3), 393-414.
- VERSACE P., FERRARI E., GABRIELE S. & ROSSI F. (1989) - Valutazione delle piene in Calabria. *Geodata*, 30, CNR IRPI-GNDCl, Cosenza, Italia.