

DISTRIBUZIONE SPAZIO-TEMPORALE DI COLATE RAPIDE IN TERRENI PIROCLASTICI

Leonardo Cascini, Sabatino Cuomo, Maria Della Sala
Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno
l.cascini@unisa.it, scuomo@unisa.it, maria.dellasala@virgilio.it

Sommario

Nella presente comunicazione si analizza, a scala di massiccio, la distribuzione spazio-temporale delle aree di innesco e di propagazione delle colate rapide di fango occorse nel Maggio 1998 nella Regione Campania. I risultati evidenziano che la distribuzione spazio-temporale è correlata ai meccanismi di innesco, alla stratigrafia e alle condizioni idrauliche al contorno.

Introduzione

Nella letteratura scientifica, la distribuzione spaziale delle aree di innesco di fenomeni franosi superficiali è tipicamente analizzata con: i) modelli geologici, che si riferiscono a combinazioni di variabili spaziali quali pendenza e spessore dei depositi, e metodi euristici (Dai e Lee, 2002) e/o statistici (Corominas et al., 2003), ii) modelli fisicamente basati (Dietrich e Montgomery, 1998; Godt et al., 2008) che simulano, su area vasta, la risposta idrologica dei versanti e ne valutano le condizioni di stabilità utilizzando lo schema semplificato di pendio indefinito; iii) modelli geomeccanici/geotecnici (Cascini et al., 2010) che si riferiscono a singole sezioni di versante ed accurate ricostruzioni stratigrafiche. Le aree di propagazione sono, invece, analizzate facendo ricorso a : i) modelli empirici che mettono in relazione le distanze di propagazione con la topografia ed il volume della massa instabile (Corominas, 1996), ii) modelli matematici che simulano i caratteri cinematici dei fenomeni di colata (Pastor et al., 2009). La distribuzione temporale dei suddetti fenomeni franosi è solitamente analizzata prescindendo dal loro accadimento spaziale e solo più raramente vengono utilizzati modelli fisicamente basati che invece consentono un'analisi congiunta del loro accadimento spaziale e temporale. A tal riguardo è, comunque, utile sottolineare che il successo e l'errore dei modelli fisicamente basati dipende fortemente dai meccanismi di innesco analizzati (Sorbino et al., 2007).

In mancanza di un approccio generale proposto nella letteratura per l'analisi spazio-temporale delle fenomenologie franose in esame, la presente nota vuole fornire un contributo sull'argomento ed illustra sinteticamente alcune analisi (Cascini et al., 2011) condotte per le colate rapide di fango occorse, nel Maggio 1998, lungo i versanti del Pizzo d'Alvano, per il quale è disponibile un'avanzata banca dati di natura geologica e geotecnica (Cascini et al., 2006).

Fase di innesco

Analisi della distribuzione spazio-temporale

La distribuzione spaziale dei fenomeni franosi è stata analizzata considerando le caratteristiche morfometriche e stratigrafiche delle principali unità geomorfologiche presenti sul massiccio del Pizzo d'Alvano (bacini di ordine zero, versanti aperti e fianchi vallivi) che

sono state sede di tre diversi meccanismi di innesco (rispettivamente denominati M1, M2 ed M3 in Cascini et al., 2008). Infatti, l'analisi delle pendenze e degli spessori dei depositi piroclastici, da sola, non consente di correlare la distribuzione spaziale delle aree di innesco con le caratteristiche morfometriche delle unità morfologiche sede degli eventi del Maggio '98 come messo in evidenza anche da altri Autori (Guadagno et al., 2005; Di Crescenzo e Santo, 2005). Viceversa, portando in conto la stratigrafia dei depositi piroclastici (nel caso in esame si è fatto riferimento a 325 profili stratigrafici e 111 campioni di laboratorio) si è riuscito ad evidenziare: i) quattro stratigrafie tipiche caratterizzate da differenti sequenze stratigrafiche dei principali litotipi (cinerite A, pomice e cinerite B) e ii) la stretta corrispondenza tra la profondità delle superfici di scorrimento ed il profilo stratigrafico. In particolare, gli eventi del Maggio 1998 hanno coinvolto principalmente gli strati cineritici superficiali e/o gli strati di pomice e, molto più raramente, gli strati cineritici più profondi. Risultati significativi si ottengono, infine, analizzando le unità morfologiche in relazione ai fattori di innesco e portando in conto le reali condizioni stratigrafiche del sottosuolo. Così operando si osserva, per esempio, che nei bacini di ordine zero (zob), nei quali sono presenti immissioni sorgentizie dal substrato, i fenomeni di primo distacco si riducono all'aumentare degli strati continui di pomice. Risultati simili non si ottengono, invece, per le altre unità morfologiche nelle quali hanno avuto sede i meccanismi di innesco M2 e M3.

Al fine di ricostruire l'accadimento temporale dei fenomeni franosi del '98 sono state preliminarmente analizzate le testimonianze raccolte subito dopo l'evento, dalle quali possono desumersi gli orari di arrivo delle masse instabili nelle zone pedemontane; tali orari si sono, di fatto, considerati coincidenti con quelli di innesco (Fig.1), in considerazione dei ridottissimi tempi (pochi minuti) impiegati dalle masse instabili per coprire le distanze tra le aree di innesco e quelle di deposizione. L'analisi dei dati così definiti evidenzia che i primi fenomeni di distacco si sono verificati secondo meccanismi di tipo M1 e M3 ed hanno avuto sede lungo i versanti di Quindici. Sono seguiti fenomeni del tipo M1 e M2 lungo i versanti di Bracigliano, Sarno Lavorate e Siano; successivamente, ulteriori eventi franosi sono occorsi a Sarno Episcopio. La sequenza temporale degli eventi è stata analizzata con riferimento alla

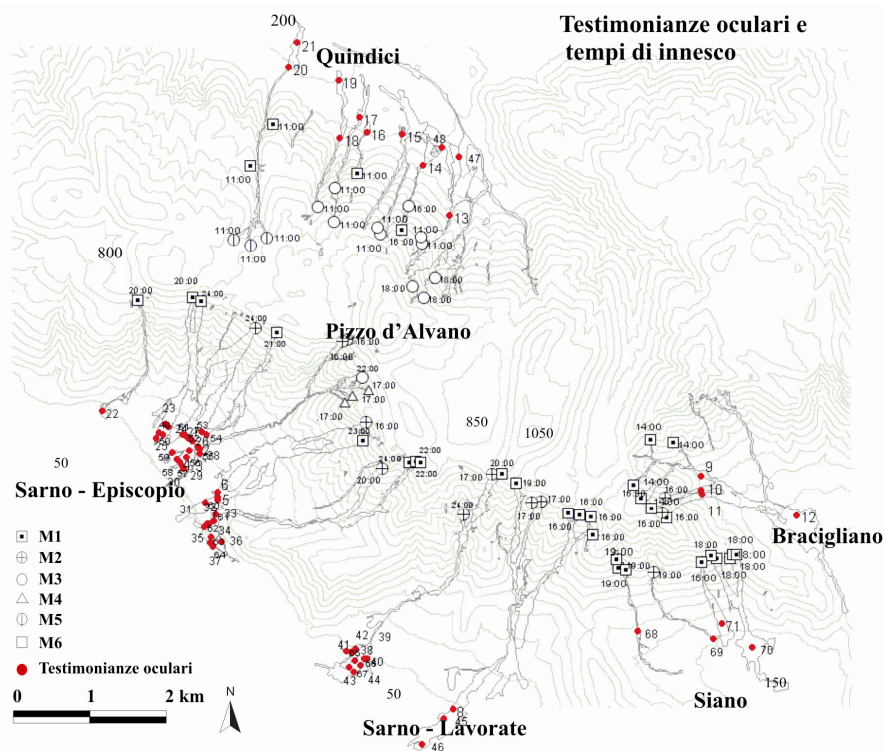


Figura 1. Testimonianze e ricostruzione della sequenza temporale delle colate del Maggio '98.

pioggia cumulata computata dal 4 maggio fino all'orario di innesco di ciascuna colata. Dall'analisi svolta emerge che non esiste una stretta correlazione tra la pioggia cumulata e la distribuzione temporale dei fenomeni di innesco risultando quest'ultima notevolmente influenzata da alcuni fattori locali e/o di tipo areale. Per esempio, si osserva che: i) per il meccanismo M3, verificatosi prima degli altri (quindi per valori più bassi della pioggia cumulata), l'accadimento temporale risulta connesso con fattori topografici locali, rappresentati da sentieri e stradine di montagna, che hanno determinato una rapida concentrazione delle acque meteoriche in corrispondenza dei tornanti, iii) per il meccanismo M1 verificatosi prima a Quindici, poi a Sarno Lavorate e, infine, a Sarno Episcopio, la diversa tempistica può essere spiegata facendo riferimento al differente assetto stratigrafico dei depositi piroclastici ed all'assetto strutturale del substrato carbonatico che favorisce il deflusso delle acque all'interno del substrato in direzione nord-est, vale a dire verso il territorio di Quindici (Cascini et al., 2008b).

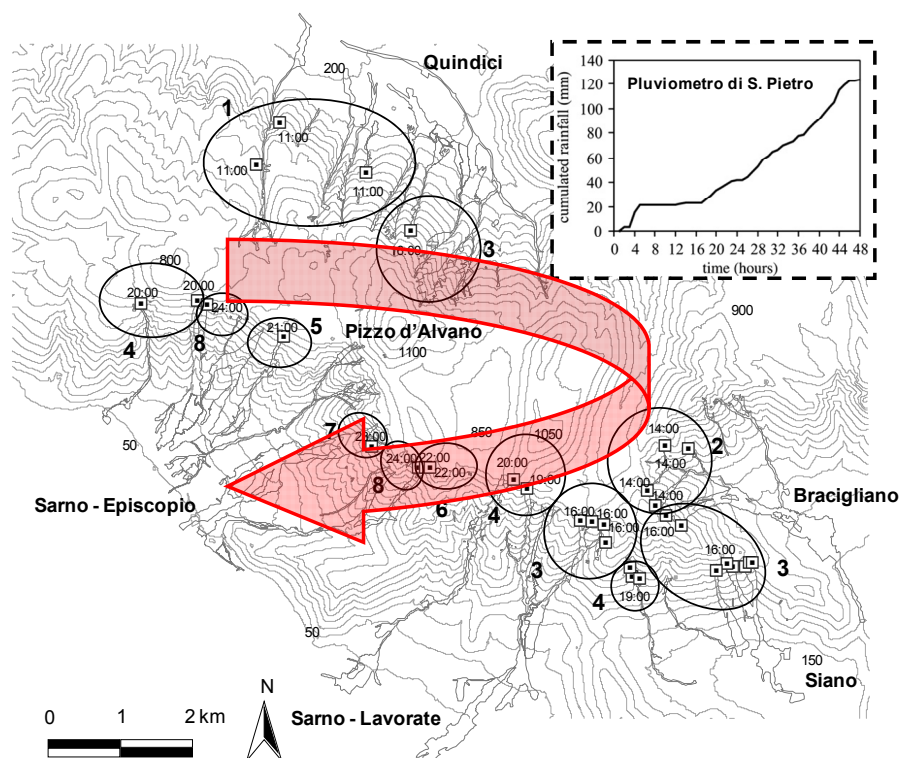


Figura 2. Sequenza temporale del meccanismo di innesco M1. I numeri si riferiscono alle ore del 5 Maggio '98 e i cerchi alla sequenza temporale degli eventi.

Modellazione geotecnica

Al fine di rendere maggiormente oggettive le precedenti osservazioni, si è condotta una modellazione geotecnica della fase di innesco per il meccanismo M1. Le analisi hanno preliminarmente riguardato la modellazione delle pressioni neutre, nel periodo 1 Gennaio – 5 Maggio 1998, che è stata effettuata con il codice di calcolo SEEP/W e con riferimento a schemi di pendio indefinito. Questi ultimi riproducono, con sufficiente approssimazione, l'assetto stratigrafico tipico delle concavità morfologiche dove si sono verificati i fenomeni di innesco M1. In particolare, sono stati presi a riferimento spessori delle coltri pari a 2m e 4.5m, inclinazione pari a 32°, ad eccezione del settore di Bracigliano in corrispondenza del quale si è assunta un'inclinazione di 34°. Le proprietà fisico-meccaniche sono state desunte dai risultati delle indagini in sito e di laboratorio oltre che dai dati disponibili in letteratura

(Bilotta et al., 2005). Per l'analisi del regime delle pressioni neutre si è fatto riferimento all'equazione di Richards per tener conto delle condizioni di parziale saturazione della coltre, e sono state assegnate al piano campagna i valori di pioggia desunti da Cascini et al. (2005). Il substrato carbonatico è stato assunto impermeabile tranne che nella parte centrale del versante, dove si è tenuto conto di immissioni derivanti dal substrato, con valori di portata posti pari a $8.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a partire dal 3 Maggio 1998. Inoltre, quale condizione iniziale, si è adottata una distribuzione uniforme di suzione con valore pari a 10kPa (Cascini et al., 2005). I risultati conseguiti mostrano che le pressioni neutre simulate differiscono significativamente per i diversi schemi di calcolo, particolarmente nella zona direttamente interessata dall'immissione idrica dal substrato (Fig. 3). Da sottolineare, inoltre, che laddove è presente il litotipo A, le pressioni neutre sono significativamente più alte che negli altri casi.

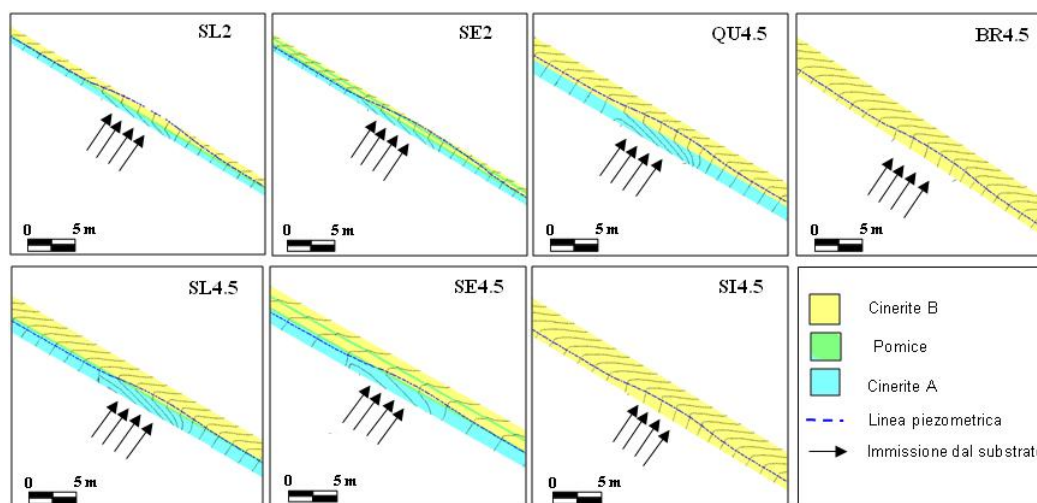


Figura 3. Tipico regime delle pressioni neutre per diversi schemi di calcolo dopo 12 ore.

Facendo riferimento ai valori delle pressioni neutre così calcolati, sono state valutate le condizioni di stabilità delle coltri con i metodi dell'equilibrio limite proposti da Janbu (1954) e da Morgenstern e Price (1965), utilizzando il codice di calcolo SLOPE/W ed effettuando una analisi parametrica basata su diversi valori delle proprietà meccaniche dei terreni (Bilotta et al., 2005).

Le condizioni di stabilità dei versanti, valutate all'inizio del 4 Maggio 1998, evidenziano che per gli schemi SL2, SL4.5, SE2, SE4.5 e QU4.5, il fattore di sicurezza del pendio (FS) è maggiore dell'unità solo se il valore di coesione efficace (c') del litotipo A è assunto non nullo. In particolare, per $c'=15\text{kPa}$, FS è maggiore dell'unità indipendentemente dal valore dell'angolo di attrito (ϕ') del litotipo B. D'altra parte, per gli schemi SI4.5 e BR4.5, si ottiene FS maggiore dell'unità solo se ϕ' del litotipo B è maggiore di 37° . Infine, per i restanti schemi SI2, BR2 e QU2, il fattore di sicurezza FS risulta più basso dell'unità indipendentemente dalle proprietà meccaniche dei terreni già all'inizio del 4 Maggio; circostanza questa in disaccordo con l'evidenza che gli eventi franosi si sono verificati a partire dal 5 Maggio 1998.

Per gli schemi più significativi (QU4.5, SL2, SL4.5, SE2, SE4.5, SI4.5 e BR4.5) sono state valutate le condizioni di stabilità, con cadenza oraria, durante il periodo 4-5 Maggio 1998 assumendo diverse proprietà meccaniche dei terreni cineritici. La Figura 4 mostra che i volumi simulati come instabili: i) corrispondono all'intera profondità dei depositi piroclastici per il settore di Bracigliano (BR4.5), ii) coinvolgono solo i terreni di tipo B e gli strati di pomice per gli schemi che contengono anche il litotipo A (QU, SE e SL) (Fig. 4).

La sequenza temporale che scaturisce dalla modellazione geotecnica (Fig. 5) risulta in accordo con le evidenze in sito (vedi Figura 2) se si assumono per il litotipo A $c'=15 \text{ kPa}$ e $\phi'=35^\circ$ e per il litotipo B $c'=0 \text{ kPa}$ e $\phi'=39.5^\circ$. Oltre ad una soddisfacente analisi a ritroso

dell'evento del Maggio 1998, i risultati ottenuti consentono di delineare il ruolo dei diversi strati di terreno sulle condizioni di stabilità dei versanti. In particolare, si osserva che : i) per una coltre omogenea costituita dal solo litotipo B (SI4.5) le piogge e le immissioni dal substrato causano una lenta riduzione di FS, ii) per lo schema QU4.5 (che comprende i litotipi A e B) il coefficiente di sicurezza aumenta per circa 8 ore per poi diminuire rapidamente nelle successive 23 ore, iii) diversa è la risposta dei versanti che presentano uno o due strati di pomice (SL4.5 e SE4.5), risultando FS prima costante e poi in rapida diminuzione tra le ore 21:00 e le ore 23:00 del 5 Maggio (Fig. 5).

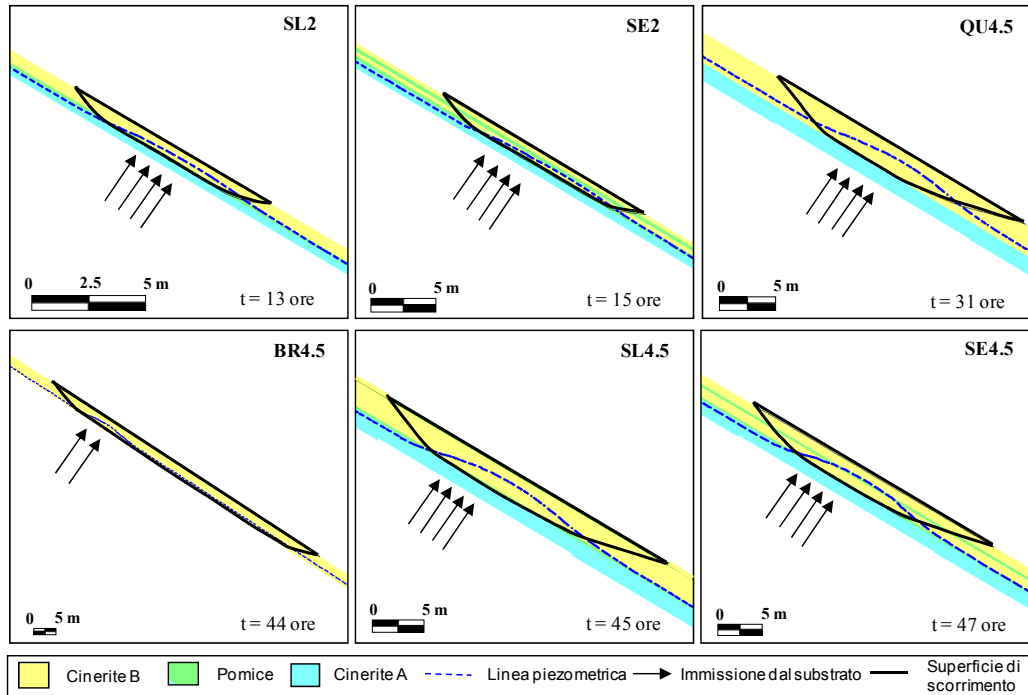


Figura 4. Volumi instabili per diversi schemi di calcolo.

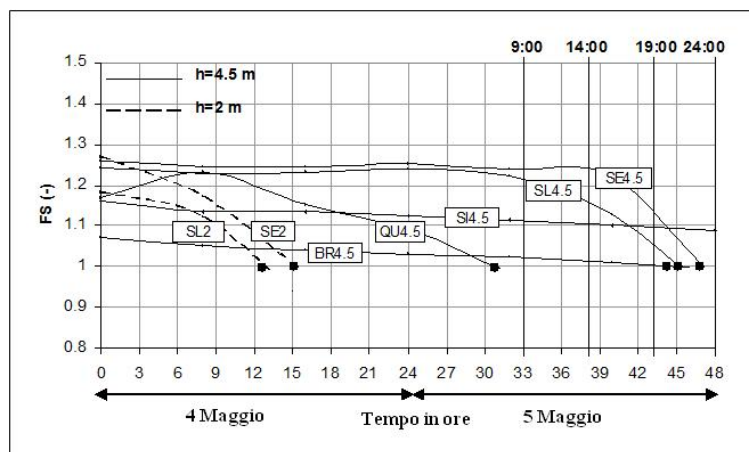


Figura 5. Sequenza temporale simulata per diversi schemi di calcolo, avendo assunto per la cinerite A $c'=15$ kPa e $\varphi'=35^\circ$ e per la cinerite B $c'=0$ kPa e $\varphi'=39.5^\circ$ (Cascini et al., 2011.)

Fase di propagazione

Con riferimento alla fase di propagazione, l'accadimento spaziale è stato analizzato mettendo in relazione il dislivello (H) e la distanza di propagazione (L) dei fenomeni franosi, come schematizzato in figura 6.

Le relazioni che intercorrono tra H ed L sono ben interpretate da semplici equazioni lineari

(Fig. 7a), in accordo con precedenti studi sviluppati da Pareschi et al. (2002) e Budetta e De Riso (2004). Si evidenzia, inoltre, che elementi antropici e manufatti (quali strade e canali) situati alla base dei versanti hanno significativamente aumentato il percorso dei flussi fangosi. I dati (H, L) sono stati poi distinti per settore di versante, per tipologia di fenomeni franosi (singoli o multipli) e per meccanismo di innesco. Le elaborazioni svolte hanno evidenziato che i flussi fangosi hanno avuto una mobilità simile nel settore nord-orientale del massiccio (Quindici e Bracigliano), mentre hanno percorso le distanze maggiori nel settore meridionale (Sarno e Siano). Inoltre, i dati sono molto ben interpretati da leggi di regressione lineare per i fenomeni innescati da meccanismi del tipo M1 o M2 mentre lo stesso grado di correlazione non si evidenzia, invece, per i dati relativi alle frane del tipo M3 (Fig.7b). Anche questo risultato conferma l'importanza di tenere debitamente in conto il meccanismi di innesco.

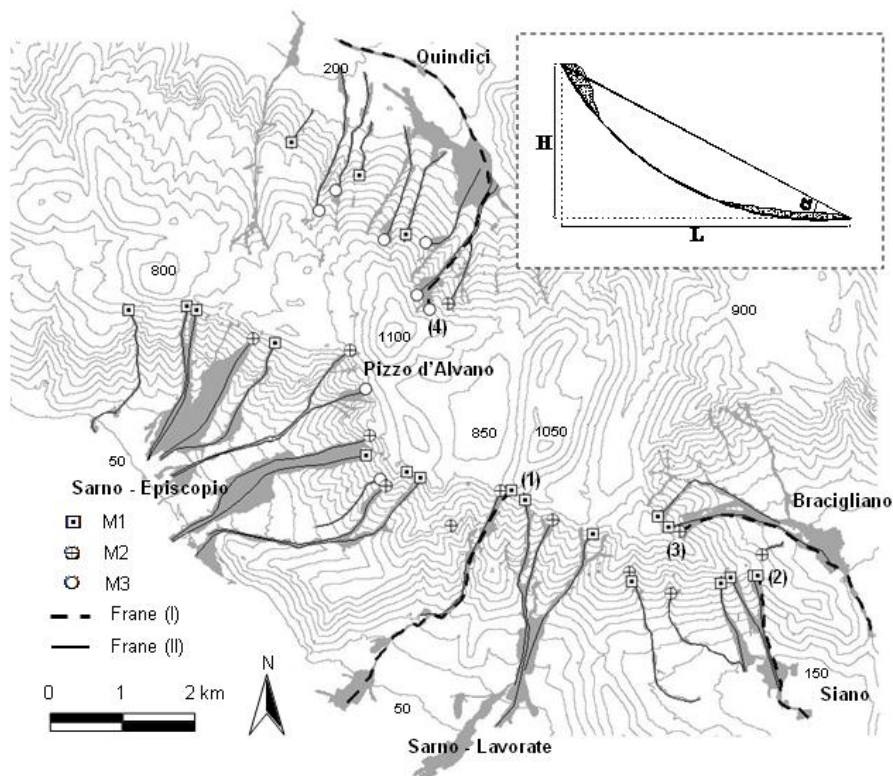


Figura 6. Distanze di propagazione delle frane influenzate (I) e non influenzate (II) da fattori antropici situati nelle zone pedemontane (Cascini et al., 2011).

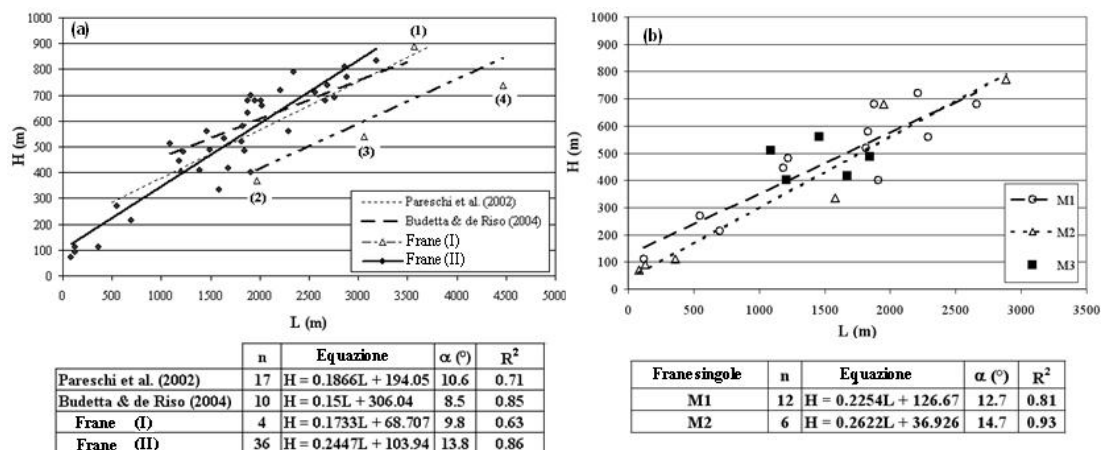


Figura 7. Dislivello (H) e distanza di propagazione (L) delle frane: a) tutti i dati, b) dati suddivisi per meccanismo di innesco (Cascini et al., 2011).

Bibliografia

- Bilotta, E., Cascini, L., Foresta, V., Sorbino, G. (2005). Geotechnical characterization of pyroclastic soils involved in huge flowslides. *Geotechnical and Geological Engineering* 23, 365–402.
- Budetta, P., de Riso, R. (2004). The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region southern Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63, 293–302.
- Cascini, L., Cuomo, S., Della Sala, M. (2011). Spatial and temporal occurrence of rainfall-induced shallow landslides of flow type: A case study of Sarno-Quindici, Italy. *Geomorphology* 126, 148–158.
- Cascini, L., Cuomo, S., Guida, D. (2008). Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy. *Engineering Geology* 96, 107–125.
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., Sorbino, G. (2010). Modelling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type. *ASCE's Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 1, 85–98.
- Cascini, L., Cuomo, S., Sorbino, G. (2005). Flow-like mass movements in pyroclastic soils: remarks on the modelling of triggering mechanisms. *Italian Geotechnical Journal* 4, 11–31.
- Cascini, L., Guida, D., Sorbino, G. (2006). Il Presidio Territoriale: una esperienza sul campo. G.N.D.C.I.-C.N.R. Edition, 139 pp.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33, 260–271.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards* 30, 421–435.
- Dai, C.F., Lee, C.F. (2002). Terrain based mapping of landslide susceptibility using a geographic information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 911–923.
- Di Crescenzo, G., Santo, A. (2005). Debris slides-rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region Southern Italy): morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility. *Geomorphology* 66, 255–276.
- Dietrich, W.E., Montgomery, D.R. (1998). SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. <http://istsocrates.berkeley.edu/geomorph/> 1998.
- Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H., Harp, E.L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS frame work. *Engineering Geology* 102, 214–226.
- Guadagno, F.M., Forte, R., Revellino, P., Fiorillo, F., Focareta, M. (2005). Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: the role of morphological slope discontinuities and the development of failure. *Geomorphology* 66, 237–254.
- Janbu, N. (1954). Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*. Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 43–49.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15, 79–93.
- Pareschi, M.T., Santacroce, R., Sulpizio, R., Zanchetta, G. (2002). Volcaniclastic debris flows in the Clanio Valley (Campania, Italy): insights for the assessment of hazard potential. *Geomorphology* 43, 219–231.
- Pastor, M., Haddad, B., Sorbino, G., Cuomo, S., Drempevic, V. (2009). A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 33, 143–284.
- Sorbino G., Sica C., Cascini L., Cuomo S. (2007). On the forecasting of flowslides triggering areas using physically based models. *Atti della First North American Landslide Conference*, (Colorado, USA), Schaefer, Schuster, Turner eds, AEG Special Publication 23, pp. 305–315.