

MODELLI A SCALA TERRITORIALE PER LA VALUTAZIONE DELLE SOGLIE PLUVIOMETRICHE DI INNESCO DI FRANE SUPERFICIALI

Diana Salciarini

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia
diana@unipg.it

Claudio Tamagnini

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia
tamag@unipg.it

Sommario

Nel presente lavoro è illustrato un modello per la determinazione delle soglie pluviometriche critiche per l'innescamento di frane superficiali in pendii costituiti da una coltre di materiale granulare. Tale modello è in grado di valutare, su base spaziale, la distribuzione della minima intensità di pioggia che attiva l'evento franoso, a partire dalla conoscenza di: *i*) durata delle precipitazioni previste; *ii*) caratteristiche meccaniche ed idrauliche della coltre; *iii*) informazioni relative alla morfologia dei pendii coinvolti. La caratteristica fondamentale del modello è la capacità di valutare l'istante t_p in cui si raggiunge il picco di pressione interstiziale in corrispondenza della potenziale superficie di scorrimento. Le capacità previsionali del modello sono state testate con una serie di analisi a scala locale (a livello di singolo versante), confrontando le soglie di pioggia critica previste dal modello per tre diversi pendii strumentati con alcune soglie pluviometriche empiriche disponibili in letteratura. Successivamente, il modello è stato applicato alla valutazione delle soglie pluviometriche in un'area di studio situata in Valnerina, Umbria meridionale, mediante implementazione in ambiente GIS. Per tale area, il modello ha permesso di ricavare soglie pluviometriche a scala territoriale (con previsioni specifiche per ciascun singolo versante) per diversi possibili scenari di precipitazione. Le previsioni ottenute sono risultate in buon accordo con le osservazioni disponibili, derivanti dall'inventario frane del CNR.

Introduzione

Le condizioni di stabilità di un pendio sono influenzate sia dalle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali che lo costituiscono, sia dai processi di natura idraulica innescati dalle precipitazioni meteoriche di varia intensità e durata che possono interessarlo.

L'innescamento di colate detritiche originate da frane superficiali pluvio-indotte, che si sviluppano in presenza di coltri granulari, rappresenta un serio pericolo per il territorio italiano (e.g., Salciarini et al., 2006; Montrasio and Valentino, 2008; Cascini et al., 2008; Olivares and Picarelli, 2001). Un aspetto importante nella valutazione quantitativa della pericolosità associata a tali fenomeni è la valutazione delle soglie di precipitazione critica, che possono innescare i processi di instabilità. Soglie pluviometriche di tipo empirico, sviluppate cioè a partire dalla registrazione di eventi di frana avvenuti nel passato in concomitanza di una determinata pioggia, sono stati e sono ancora ampiamente utilizzate per questo scopo. In base a tale approccio, le soglie di intensità-durata sono definite come la linea che collega i valori minimi dell'intensità di pioggia che, per una determinata durata, sono associati a frane effettivamente avvenute (ad esempio: Caine, 1980). Tuttavia, la natura empirica di tale metodologia non consente di tenere conto adeguatamente delle effettive proprietà fisiche e meccaniche del terreno potenzialmente instabile, che svolgono un ruolo fondamentale nel determinare le condizioni di stabilità del pendio. Inoltre, gli effetti idraulici indotti dalla infiltrazione delle precipitazioni sono associati all'intensità di pioggia cumulata, piuttosto che all'intensità di infiltrazione effettiva.

Per valutare l'effetto dell'infiltrazione della pioggia sulla variazione delle pressioni interstiziali e sulle condizioni di stabilità dei versanti a scala territoriale, Baum et al. (2008) hanno sviluppato un codice di calcolo – TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Slope-stability*) – che combina la soluzione analitica del problema transitorio di infiltrazione associato ad eventi di pioggia complessi (in termini di variazioni di pressione interstiziale nel

pendio) con una analisi di stabilità basata sul modello di pendio indefinito. Successivamente, Salciarini et al. (2008) hanno esteso la capacità del codice TRIGRS, aggiungendo un nuovo modulo chiamato CRF (*Critical RainFall*), per la valutazione delle soglie di intensità/durata di pioggia associate al raggiungimento di condizioni di equilibrio limite per il pendio.

Nel modulo CRF la valutazione dell'intensità critica è basata sulla ipotesi che il valore massimo della pressione interstiziale sulla superficie di scorrimento venga raggiunto ad un istante t_p coincidente con la durata t_{end} dell'evento meteorico. Tale ipotesi è ragionevole quando le precipitazioni hanno durata elevata rispetto al tempo caratteristico del processo di infiltrazione Salciarini et al. (2008). Tuttavia, essa può condurre a risultati in sfavore di sicurezza in caso di precipitazioni di breve durata – situazione tipica del centro Italia – dato che, in questo caso, il picco di pressione interstiziale si manifesta dopo un certo intervallo dal termine dell'evento piovoso.

Nel seguito viene discussa una nuova versione del modulo CRF – chiamata CRF.v2 – nella quale l'istante t_p è valutato in maniera rigorosa, e che può dunque essere applicata ad eventi meteorici di durata qualunque. Le capacità previsionali del modello sono state verificate a due livelli. In una prima fase, esso è stato applicato alla scala del singolo versante, utilizzando i dati disponibili da una zona strumentata localizzata nella penisola di Seattle (WA, USA). Successivamente, il modello è stato utilizzato per una valutazione preliminare a scala territoriale delle soglie pluviometriche associate ad alcuni scenari ipotetici di precipitazioni per un area di studio situata in Valnerina, nell'Italia centrale.

Basi teoriche del modello

Ipotesi fondamentali

Il modello CRF.v2 si basa sulle seguenti ipotesi: *i*) lo spessore della coltre superficiale è limitato rispetto alla lunghezza del pendio, e l'angolo di inclinazione del pendio non varia in modo significativo; *ii*) la superficie di scorrimento è parallela al piano campagna e si trova al contatto tra la coltre ed il substrato roccioso sottostante; *iii*) il substrato roccioso è molto meno permeabile rispetto alla coltre e può essere considerato impermeabile; *iv*) nelle condizioni iniziali, il terreno è completamente saturo; *v*) la pioggia che innesca il movimento è uniforme nello spazio e nel tempo.

Le ipotesi *i*)–*iii*) possono essere considerate largamente accettabili nella maggior parte dei casi reali in cui il processo si identifica come “frana superficiale”. L'ipotesi *iv*) è realistica per terreni a grana fine, per i quali la tensione superficiale all'interfaccia aria-acqua permette di mantenere la completa saturazione dello scheletro solido anche in presenza di pressioni interstiziali negative. Per quanto riguarda l'ipotesi *v*), Iverson (2000) e D'Odorico et al. (2005) hanno osservato che la variazione di pressione interstiziale in risposta ad uno ietogramma di pioggia costante è circa il 20–25% maggiore rispetto a quella ottenuta con uno ietogramma di pioggia non uniforme. Questa ipotesi può quindi essere considerata conservativa.

Modello meccanico del pendio

Nell'approccio del metodo dell'equilibrio limite, le condizioni di rottura lungo la potenziale superficie di scorrimento si raggiungono quando lo sforzo di taglio mobilitato – funzione del peso per unità di volume del terreno, dello spessore della coltre e dell'angolo di inclinazione del pendio – eguaglia la resistenza al taglio disponibile, valutata mediante il criterio di Mohr-Coulomb. Esprimendo la pressione interstiziale u sulla superficie di scorrimento in termini di altezza piezometrica, $\psi = u/\gamma_w$, le condizioni di equilibrio limite nel pendio si verificano quando:

$$\frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' - \gamma_w \psi \tan \phi'}{\gamma d_b \sin \alpha \cos \alpha} = 1 \quad (1)$$

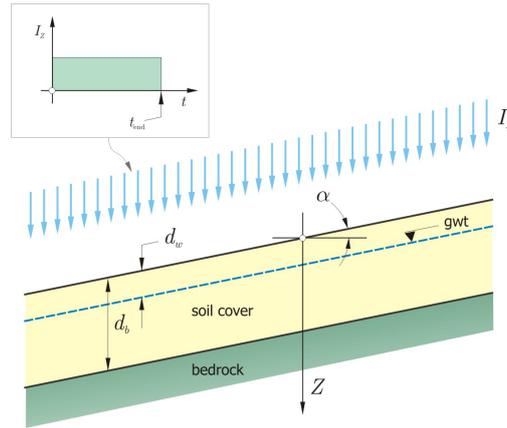


Figura 1. Modello di pendio indefinito e ietogramma di pioggia costante considerato nelle analisi.

nella quale c' e ϕ' sono la coesione efficace e l'angolo di attrito efficace del terreno, d_b è la profondità della superficie di scorrimento, α è l'angolo di inclinazione del pendio, γ è il peso per unità di volume del terreno, e γ_w è il peso specifico dell'acqua.

Note le caratteristiche geometriche del pendio e le proprietà fisiche e meccaniche del terreno, il valore limite dell'altezza piezometrica che corrisponde al raggiungimento della condizione di equilibrio limite si ricava facilmente dall'eq. (1):

$$\psi_{\text{lim}} = \frac{c'}{\gamma_w \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} d_b \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi'} \right) \quad (2)$$

Modello idraulico del pendio

Per un pendio indefinito in condizioni di completa saturazione, la variazione dell'altezza piezometrica al variare della profondità dal piano campagna e del tempo è governata dalla seguente equazione di continuità monodimensionale (Iverson, 2000):

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \quad (3)$$

dove Z è misurata in direzione verticale (Fig. 1); $D = c_v \cos^2 \alpha$, e D_0 è il coefficiente di consolidazione del terreno.

Una soluzione in forma chiusa per l'eq. (3) è stata ottenuta da Iverson (2000) per il caso di strato permeabile di spessore infinito. Successivamente, Baum et al. (2008) hanno esteso la soluzione di Iverson al caso di contorno impermeabile a profondità $Z = d_b$ finita. Per una pioggia di intensità costante I_Z e durata t_{end} , la soluzione di Baum et al. (2008) fornisce la seguente espressione per l'altezza piezometrica sulla superficie di scorrimento:

$$\psi(d_b, t) = \begin{cases} (d_b - d_w) \beta + 4(I_Z/k_Z)S(d_b, t) & (t \leq t_{\text{end}}) \\ (d_b - d_w) \beta + 4(I_Z/k_Z) [S(d_b, t) - S(d_b, t - t_{\text{end}})] & (t > t_{\text{end}}) \end{cases} \quad (4)$$

dove:

$$S(d_b, \tau) = \sqrt{D\tau} \sum_{m=1}^{\infty} \text{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_b}{2\sqrt{D\tau}} \right] \quad (5)$$

$$\text{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \text{erfc}(x) \quad (6)$$

	D (m ² /s)	k_Z (m/s)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	α (deg)	d_b (m)	d_w (m)
Pendio A	1.6e-4	5.0e-5	19.0	4.0	33.6	32.0	2.0	1.0
Pendio B	1.0e-4	2.5e-5	19.0	4.0	33.6	32.0	2.0	1.0
Pendio C	5.0e-4	1.0e-5	19.0	4.0	33.6	32.0	2.0	1.0

Tabella 1. Parametri del modello adottati nei test monodimensionali.

ed $\text{erfc}(x)$ è la funzione degli errori complementare. Nella eq. (4), d_w è la profondità della superficie piezometrica iniziale, misurata in direzione Z , mentre k_Z è la permeabilità del terreno in direzione Z .

L'istante t_p in cui ψ raggiunge il valore massimo in corrispondenza della superficie di scorrimento si ottiene massimizzando l'espressione fornita dall'eq. (4). L'equazione algebrica così ottenuta deve essere risolta numericamente nell'incognita t_p utilizzando il metodo di Newton. Il valore massimo dell'altezza piezometrica $\psi_{\max} = \psi(d_b, t_p)$ è ottenuto direttamente dall'eq. (4). E' opportuno osservare che il picco di pressione interstiziale – e quindi le condizioni più critiche per la stabilità del pendio – si raggiunge per $t_p > t_{\text{end}}$. L'intervallo $\Delta t_p = t_p - t_{\text{end}}$ diminuisce all'aumentare del rapporto tra la durata di pioggia e la scala temporale caratteristica associata al processo di diffusione della pressione interstiziale nella coltre:

$$\eta = \frac{t_{\text{end}}}{T_D} \quad \text{dove:} \quad T_D = \frac{d_b^2}{D}$$

Per eventi di pioggia di lunga durata (valori di η elevati), Δt_p tende a zero, mentre può assumere valori significativi per eventi di pioggia di breve durata (valori di η modesti).

Soglie pluviometriche di intensità/durata

Per una assegnata durata t_{end} dell'evento meteorico, l'intensità di pioggia critica I_{Zf} è definita come il valore di I_Z che da luogo, all'istante $t = t_p$, ad un valore di picco dell'altezza piezometrica $\psi_{\max} = \psi_{\text{lim}}$ in corrispondenza della superficie di scorrimento, con ψ_{lim} fornito dalla eq. (2). Dalle eq. (2) e (4) si ricava dunque:

$$I_{Zf}(d_b, t_{\text{end}}) = \frac{k_Z}{4[S(d_b, t_p) - S(d_b, t_p - t_{\text{end}})]} \times \left\{ \frac{c'}{\gamma_w \tan \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} d_b \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi'} \right) - (d_b - d_w) \beta \right\} \quad (7)$$

Nella precedente equazione, I_{Zf} deve essere considerata come una funzione della profondità della superficie di scorrimento, d_b , e della durata di pioggia, t_{end} , dal momento che $t_p = t_p(d_b, t_{\text{end}})$.

Validazione del modello ed applicazione a scala territoriale

Il codice CRF.v2 opera in un ambiente GIS, su griglie a maglie regolari, e le quantità che definiscono le caratteristiche meccaniche, idrauliche e geometriche del terreno vengono definite per ciascuna cella.

Una prima fase di validazione del modello è stata condotta mediante una serie di simulazioni alla scala del singolo versante (i.e., considerando una singola cella). I parametri adottati nelle simulazioni, riportati in Tab. 1, possono essere considerati tipici per un'area nei dintorni di Seattle, intensivamente monitorata e indagata mediante prove di laboratorio e in situ (Godt et al., 2008). Maggiori dettagli in proposito sono forniti in Salciarini et al. (2011).

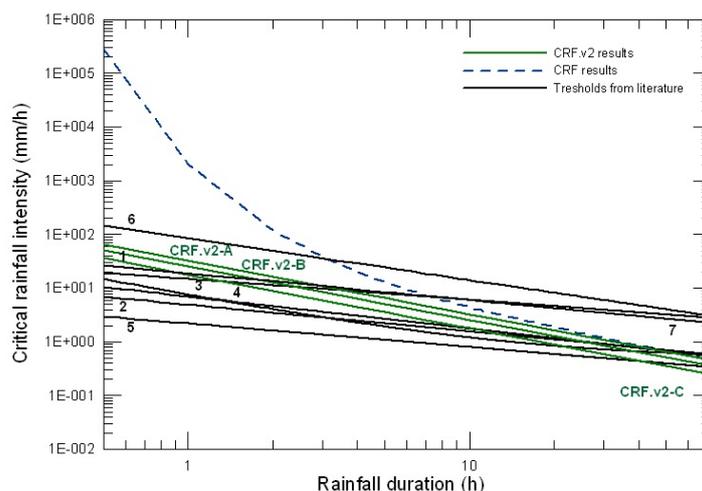


Figura 2. Confronto tra le soglie pluviometriche analitiche previste da CRF.v2 e le soglie pluviometriche empiriche fornite da: 1) Caine (1980); 2) Innes (1993); 3) Crosta and Frattini (2001); 4) Cannon and Gartner (2005); 5) Guzzetti et al. (2008); 6) Giannecchini (2005); 7) Aleotti (2004).

La Fig. 2 mostra l'andamento di I_{Zf} in funzione della durata dell'evento t_{end} , per i tre casi presi in esame (A, B e C). Nella stessa figura sono riportate per confronto alcune soglie di pioggia empiriche ed i risultati forniti per il caso A dal modello CRF originale (nell'ipotesi approssimata che $t_p = t_{end}$). Si osserva che gli andamenti delle tre soglie pluviometriche fornite da CRF.v2 decrescono all'aumentare della durata e sono confrontabili con le soglie pluviometriche empiriche prese in esame. Inoltre, si nota come l'approssimazione utilizzata nel modello CRF sia ragionevolmente valida solo per precipitazioni di durata non inferiore a circa 10 ore, mentre al di sotto di tale durata il modello sovrastima anche in misura notevole l'intensità di pioggia critica.

Una prima applicazione del modello a scala territoriale ha riguardato un'area campione già oggetto di studi precedenti (Salciarini et al., 2006) situata in Valnerina, Italia centrale. Dettagli sulle caratteristiche geologiche e topografiche dell'area di studio in questione sono reperibili in Salciarini et al. (2006, 2011).

La determinazione su scala territoriale delle soglie pluviometriche relative ad una assegnata durata di pioggia t_{end} richiede la definizione: a) delle caratteristiche morfologiche dell'area (α); b) degli spessori delle coltri superficiali potenzialmente instabili (d_b); c) delle caratteristiche meccaniche ed idrauliche dei terreni che le costituiscono (c' , ϕ' , k_v , D_0); d) della posizione iniziale della superficie freatica, d_w . Tali dati sono gestiti in ambiente GIS, come descritto in Salciarini et al. (2006), e sono derivati, mediante correlazioni empiriche, a partire dalla caratterizzazione geologica e idrogeologica degli affioramenti. La Fig. 3 illustra le distribuzioni spaziali di alcuni dei dati di input utilizzati per l'area di studio.

Per ciascuna analisi, la durata di pioggia t_{end} può essere assegnata in funzione dello scenario di pericolosità che si intende riprodurre. Nel caso preso in esame, è stata considerata una pioggia di progetto costante di durata pari a 6 ore (che riproduce ragionevolmente le condizioni di pioggia breve ed intensa, tipiche delle aree centro-appenniniche). La Fig. 4 illustra la distribuzione spaziale della minima intensità critica di pioggia I_{Zf} fornita dal modello CRF.v2 ottenuta per tale durata. Per una validazione preliminare delle capacità previsionali del modello a scala territoriale, nella stessa figura è stato sovrapposto l'inventario frane prodotto dal CNR (Guzzetti and Cardinali, 1990). Si nota come le aree interessate dai movimenti franosi catalogati si concentrino nelle aree associate alle soglie pluviometriche più basse.

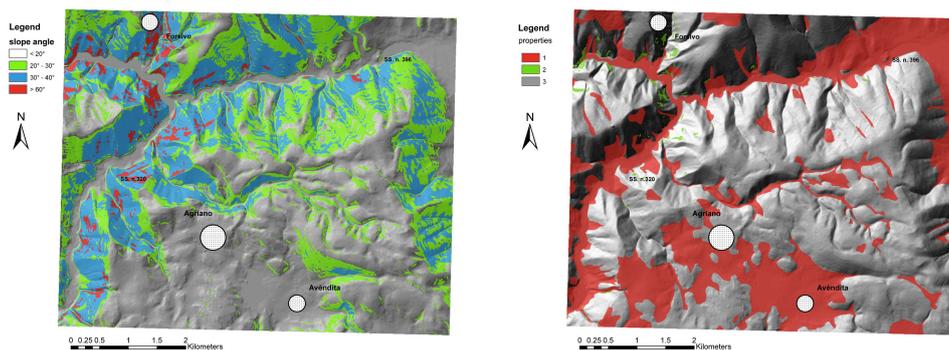


Figura 3. Dati di input utilizzati per l'area di studio: a sinistra, mappa delle pendenze; a destra, zonazione delle proprietà meccaniche dei litotipi presenti in affioramento.

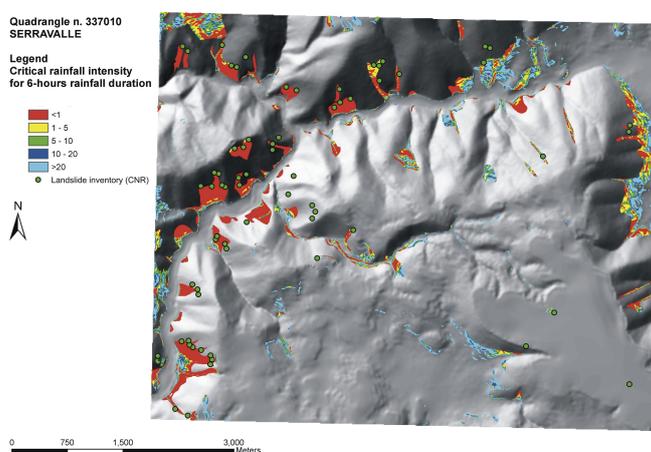


Figura 4. Distribuzione dell'intensità minima di pioggia in grado di produrre instabilità sulle coltri superficiali, per uno scenario di pioggia di durata pari a 6 ore.

Considerazioni conclusive

Strumenti di analisi basati su GIS, quali il codice TRIGRS, consentono di ottenere preziose informazioni sulla distribuzione spaziale delle potenziali aree instabili a scala territoriale. Il modello proposto, implementato nel modulo CRF.v2, consente di valutare – su base razionale – l'intensità di pioggia minima che è in grado di attivare fenomeni di scivolamento superficiale, dai quali possono originarsi colate detritiche che rappresentano un serio pericolo per il territorio. Il modello proposto estende il concetto di soglia pluviometrica critica alla dimensione spaziale e consente di tenere conto della geometria e delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni oggetto dei fenomeni di instabilità. L'applicazione di CRF.v2 al caso della Valnerina ha consentito di valutare le potenzialità di tale approccio. Ulteriori studi sono tuttora in corso per verificare la robustezza delle previsioni fornite in situazioni differenti da quella esaminata.

Bibliografia

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3):247–265.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., and Godt, J. W. (2008). Trigrs – a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0. *USGS Open File Report 08-1159*.

- Caine, N. (1980). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62:23–27.
- Cannon, S. H. and Gartner, J. E. (2005). Wildfire–related debris flow from hazards perspective. *Debris flow hazards and related phenomena*, pages 363–385.
- Cascini, L., Cuomo, S., and Guida, D. (2008). Typical source areas of may 1998 flow-like mass movements in the campania region, southern italy. *Engineering Geology*, 96:107–125.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35:131–145.
- Crosta, G. B. and Frattini, P. (2001). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flows. *Mediterranean storms. Proceedings of the 3rd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms*, 1:463–487.
- D’Odorico, P., Fagherazzi, S., and Rigon, R. (2005). Potential for landsliding: dependence on hyetograph characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 110:1–10.
- Giannecchini, R. (2005). Rainfall triggering soil slips in the southern apuane alps (tuscany, italy). *Adv Geosci*, 2:21–24.
- Godt, J. W., Schultz, W. H., Baum, R. L., and Savage, W. Z. (2008). Modeling rainfall conditions for shallow landsliding in Seattle, Washington. *Reviews in Engineering Geology*, 20:137–152.
- Guzzetti, F. and Cardinali, M. (1990). Landslide inventory map of the umbria region, central italy. *Proceedings of the 6th ICFL-ALPS 90*, 1:273–284.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5:3–17.
- Innes, J. L. (1993). Debris flows. *Progress in Physical Geography*, 7:469–501.
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7):1897–1910.
- Montrasio, L. and Valentino, R. (2008). A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards Earth System Science*, 8:1149–1159.
- Olivares, L. and Picarelli, L. (2001). Occurrence of flowslides in soils of pyroclastic origin and considerations for landslide hazard mapping. *Proc. 14th South-East Asian Conf., Hong-Kong*, pages 881–886.
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Baum, R. L., and Conversini, P. (2008). Modeling landslide recurrence in seattle, washington, usa. *Engineering Geology*, 102:227–237.
- Salciarini, D., Godt, J. W., Savage, W. Z., Conversini, P., Baum, R. L., and Michael, J. (2006). Modeling regional initiation of rainfall–induced shallow landslides in eastern umbria region of central italy. *Landslides*, 3(3):181–194.
- Salciarini, D., Tamagnini, C., Conversini, P., and Rapinesi, S. (2011). Spatially distributed rainfall thresholds for the initiation of shallow landslides. *Natural Hazard*, 10.1007/s11069-011-9739-2.
- Torres, R., Dietrich, W. E., Montgomery, D. S., Anderson, S. P., and Loague, K. (1998). Unsaturated zone process and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 34:1865–1879.