

## **MODELLAZIONE SPAZIO-TEMPORALE DI FRANE SUPERFICIALI INDOTTE DA PIOGGIA NELL'OLTREPO PAVESE**

Gian Luca Losi; Lorella Montrasio; Roberto Valentino

*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura  
Università degli Studi di Parma*

*gianluca.losi@unipr.it; lorella.montrasio@unipr.it; roberto.valentino@unipr.it*

Claudia Meisina; Davide Zizioli

*Dipartimento di Scienze della Terra  
Università degli Studi di Pavia*

*claudia.meisina@unipv.it; davide.zizioli@dst.unipv.it*

### **Sommario**

Il 27-28 Aprile 2009 l'area nord-orientale dell'Oltrepo Pavese è stata interessata da un'intensa precipitazione piovosa che ha provocato l'insacco di migliaia di frane. Tali fenomeni franosi sono avvenuti prevalentemente su pendii dedicati a vigneto o in boschi di recente formazione, causando una vittima e il danneggiamento o l'interruzione di numerosi tratti stradali. Sulla base di un inventario ottenuto tramite interpretazione di foto aeree successive all'evento, è stato possibile individuare 1600 frane, di cui 115 nel territorio comunale di Broni. Una volta acquisite le informazioni riguardanti la topografia, le proprietà geotecniche del terreno e l'uso del suolo, è stata svolta un'analisi di stabilità a scala territoriale, dapprima su un'area di 2.4 km<sup>2</sup> (area di prova) e successivamente su ulteriori due aree, rispettivamente di 17.5 km<sup>2</sup> (area di studio 1), coincidente in parte con l'area di prova, e di 15.8 km<sup>2</sup> (area di studio 2). L'analisi di stabilità è stata svolta mediante l'utilizzo di un modello d'insacco distribuito, denominato *SLIP (Shallow Landslides Instability Prediction)*, che è stato recentemente implementato in una piattaforma per il monitoraggio territoriale. I risultati della simulazione dell'evento sono stati confrontati, da un punto vista spaziale, con la localizzazione delle frane censite, mediante analisi *ROC (Receiver Operating Characteristic)*, e da un punto di vista temporale, rispetto alla data attesa, valutando per un periodo di due anni la quantità di aree instabili in relazione alle precipitazioni.

### **Introduzione**

I *soil slip* sono un tipo di frana che solitamente si innesca a seguito di piogge intense di breve durata o di media intensità prolungate nel tempo, oppure a seguito dello scioglimento del manto nevoso. Solitamente sono frane di neoformazione e accadono principalmente su versanti naturali caratterizzati da uno strato superficiale alquanto permeabile, di spessore massimo di un paio di metri, che sovrasta un substrato roccioso, o comunque un terreno dotato di maggiore compattezza, caratterizzato da una permeabilità ridotta.

Recentemente, la comunità scientifica ha proposto diversi approcci per la modellazione dell'insacco delle frane superficiali indotte da pioggia, finalizzati alla gestione del territorio o del rischio in tempo reale. Alcuni autori hanno redatto mappe di suscettibilità che indicano la possibile localizzazione dei movimenti franosi, in base alle caratteristiche del territorio, morfologia e topografia, trascurando la variabile temporale (Pack et al., 1998). Altri autori hanno stabilito soglie pluviometriche sulla base di analisi statistiche delle precipitazioni che in passato hanno innescato frane superficiali (Wilson e Wiczorek, 1995). Ulteriori autori hanno

accoppiato l'analisi di stabilità dei pendii con la modellazione idrologica dell'infiltrazione piovosa (Iverson, 2000). La formulazione di questi ultimi, assieme alla disponibilità di numerose informazioni disponibili in ambiente GIS (Geographic Information System), ha portato allo sviluppo di metodi apparentemente adatti alla determinazione spaziale e temporale dei *soil slip* a scala regionale, in relazione alle piogge (Godt et al., 2008).

### Le aree di prova e di studio per l'evento dell'Aprile 2009

L'area dell'Oltrepo Pavese si estende per circa 1100 km<sup>2</sup>. La parte meridionale coincide con il settore nord-ovest dell'Appennino. L'altitudine dell'area varia tra i 200 m e i 1725 m s.l.m..

La geologia è governata da formazioni sedimentarie, con una componente argillosa dominante. Le argille scistose (argille varicolori, complessi caotici) affiorano per tutta l'area dell'Oltrepo Pavese, mentre i flysch calcarei, soprattutto nella parte orientale, si alternano con marne, marne calcaree e scisti.

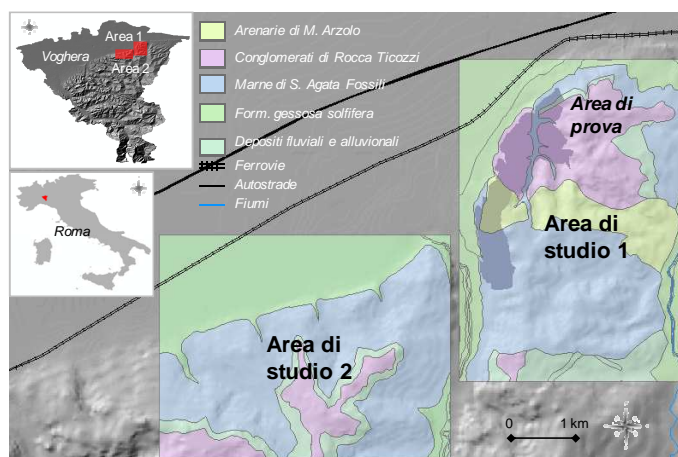


Figura 1. Localizzazione delle aree di prova e studio.

Il regime climatico dell'area è principalmente di tipo Mediterraneo-Appenninico, caratterizzato da estati secche e inverni freddi, con un picco di pioggia principale in autunno e secondario in primavera. La temperatura media annua è di 12 °C, mentre le precipitazioni medie annue sono di 700 mm nelle aree pianeggianti e di 998 mm in collina, con un incremento della piovosità da ovest verso est. Il 27 e il 28 Aprile 2009, il settore nord-est dell'Oltrepo Pavese è stato investito da un evento piovoso particolarmente intenso a seguito del quale si sono innescate diverse frane superficiali. In quei giorni, la stazione pluviometrica di Cigognola, considerata rappresentativa dell'area, ha registrato 150 mm di pioggia in 48 ore, pari al 20% della media annua, con un'intensità massima di 22 mm·h<sup>-1</sup> alle 21:00 del 27 Aprile. Le indagini in sito hanno permesso di identificare i versanti coinvolti e individuare la tipologia di movimento franoso. In particolare, nell'area di prova, si sono innescati principalmente scivolamenti rotazionali e frane complesse. Il totale della superficie coinvolta nei movimenti franosi è pari a circa 0.09 km<sup>2</sup>, che corrisponde al 4% totale dell'area. I movimenti franosi sono prevalentemente orientati nelle direzioni sud-ovest e nord-est, l'inclinazione dei versanti coinvolti è compresa tra 16° e 37° e la maggior parte è concentrato in aree dove la pendenza si evolve da lieve a ripida o viceversa.

### Caratterizzazione geotecnica dei terreni coinvolti in frane superficiali

La caratterizzazione geotecnica dei terreni presenti nelle aree di studio si è basata sulle tipiche analisi dei terreni secondo gli *standard ASTM*. Le prove includono:

- stima dei parametri fisici dei materiali (granulometria, densità secca e apparente e i limiti di *Atterberg*);

- prove di taglio diretto, che hanno permesso di determinare i parametri di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci.

I terreni coinvolti negli scivolamenti superficiali sono rappresentati da depositi colluviali derivanti dalla disgregazione delle rocce dovuta agli agenti atmosferici. Le caratteristiche geotecniche, suddivise per ogni formazione litostratigrafica presente nelle aree considerate, sono riassunte in Tabella 1.

Secondo la classificazione *USCS*, la maggioranza dei campioni analizzati sono terreni a bassa plasticità. La conducibilità idraulica del terreno saturo è stata determinata attraverso prove in sito (*test* a carico variabile), per i terreni originati dalle marne di S. Agata Fossili, mentre per gli altri sono stati determinati da analisi pedologiche. In generale i depositi colluviali possiedono una permeabilità medio alta, ma per i Conglomerati di Rocca Ticozzi e le Arenarie di Monte Arzolo risulta perfino superiore. Infine, è stato stimato lo spessore dello strato di terreno coinvolto ed è stata esaminata la tipologia di uso del suolo in cui si sono innescate le frane.

Formazione litostratigrafica	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	$W_L$ (%)	$PI$ (%)	$\gamma_d$ [kN·m <sup>-3</sup> ]	$n$ (-)	$c'$ [kPa]	$\Phi'$ (°)
Arenarie di Monte Arzolo	23-37	49-71	4-22	40-48	15-28	15.0-16.3	0.40-0.44	0-7	23-30
Conglomerati di Rocca Ticozzi	12-27	20-59	16-50	30-43	8-18	15.2-16.3	0.44-0.47	2	32
Marne di S. Agata Fossili	24-35	44-61	8-14	39-48	20-29	15.3-15.8	0.39-0.42	7-10	24-27
Formazione gessosa solfifera	33-39	47-52	4-16	45-47	24-27	-	-	4-7	25-27

Tabella 1. Caratteristiche geotecniche dei depositi colluviali.

### Applicazione del modello d'inesco *SLIP*

Il modello di stabilità *SLIP* (Montrasio e Valentino, 2008) è stato implementato in una piattaforma che permette di processare le informazioni a scala territoriale. In particolare, per raggiungere l'obiettivo, le aree di prova e di studio (*Fig.1*) sono state suddivise in celle quadrate di lato 10 m, ed ognuna di esse è stata modellata indipendentemente, in funzione delle caratteristiche del terreno. L'inclinazione dei versanti  $\beta$  è stata valutata sulla base del *Digital Terrain Model (DTM)*, invece i parametri geotecnici delle coperture potenzialmente instabili sono stati assegnati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio, descritti in precedenza, o in funzione dei litotipi individuati nella carta geologica (*Fig.1*). I parametri di *input* assegnati per ogni classe sono riportati in Tabella 2. Deve essere sottolineato che i valori di coesione efficace  $c'$  riportati in Tabella 1 sono stati determinati da prove di taglio diretto. È noto come tale prova sovrastimi la coesione efficace e, data l'estrema importanza di tale parametro nell'analisi di stabilità dei terreni superficiali, è stata considerata nulla nelle presenti simulazioni, in modo tale da non sovrastimare la resistenza del terreno. Il parametro  $K_T$  è stato determinato in relazione alla permeabilità di ogni terreno, sulla base di precedenti studi (Meisina e Scarabelli, 2007). Altri parametri del modello, come  $A$  e  $\lambda$ , sono stati considerati costanti per ogni classe di suolo (*Tab.2*), poiché i terreni superficiali individuati sono prevalentemente limo-argillosi. Il parametro  $\alpha$  del modello è stato considerato pari a 3.4 ovunque, sulla base di misure sperimentali.

Formazione litostratigrafica	$H$ [m]	$\Phi'$ (°)	$c'$ [kPa]	$\lambda$	$A$	$n$	$G_s$	$K_T$ (d <sup>-1</sup> )	$\alpha$
Arenarie di Monte Arzolo	0.8	26	0	0.4	80	0.42	2.75	0.604	3.4
Conglomerati di Rocca Ticozzi	1.1	32	0	0.4	80	0.45	2.90	0.777	3.4
Marne di S. Agata Fossili	0.8	25	0	0.4	80	0.40	2.64	0.432	3.4
Formazione gessosa solfifera	1.2	26	0	0.4	80	0.48	2.70	0.864	3.4
Depositi fluviali e alluvionali	1.2	32	0	0.4	80	0.40	2.70	0.0864	3.4

Tabella 2. I parametri di input per il modello *SLIP*.

I dati di pioggia sono stati rilevati dai pluviometri ricadenti nelle aree di calcolo. L'interpolazione per la definizione della mappa di precipitazione è basata sul metodo dell'inverso del quadrato della distanza, applicato ad ogni punto rispetto alla posizione del pluviometro. In particolare, le mappe di precipitazione prodotte a scala regionale sono adatte per un'analisi tempo-variante. Al momento, il modello può produrre i risultati del fattore di sicurezza due volte al giorno, sulla base delle condizioni meteorologiche dei 30 giorni precedenti all'istante di calcolo. Per una descrizione dettagliata del modello d'innesci si rimanda a *Montrasio e Valentino, 2008*.

### Analisi dell'innesci per l'area di prova

I risultati del modello d'innesci possono essere rappresentati mediante una mappa, che fornisce il fattore di sicurezza per ogni cella elementare (*Fig. 2*). La gradazione di colori utilizzata nelle mappe permette di identificare i livelli di criticità. L'analisi di stabilità è stata svolta per il periodo intercorso tra il 1° Maggio 2008 e il 30 Aprile 2010. I risultati dell'analisi tempo variante possono essere riassunti in *Figura 3b*, in cui è mostrata la frazione di aree instabili ( $F_s \leq 1$ ), in relazione all'altezza di pioggia giornaliera, per l'area di prova. La pioggia giornaliera è stata calcolata come media dei dati rilevati dagli 11 pluviometri presenti nell'area di interesse.

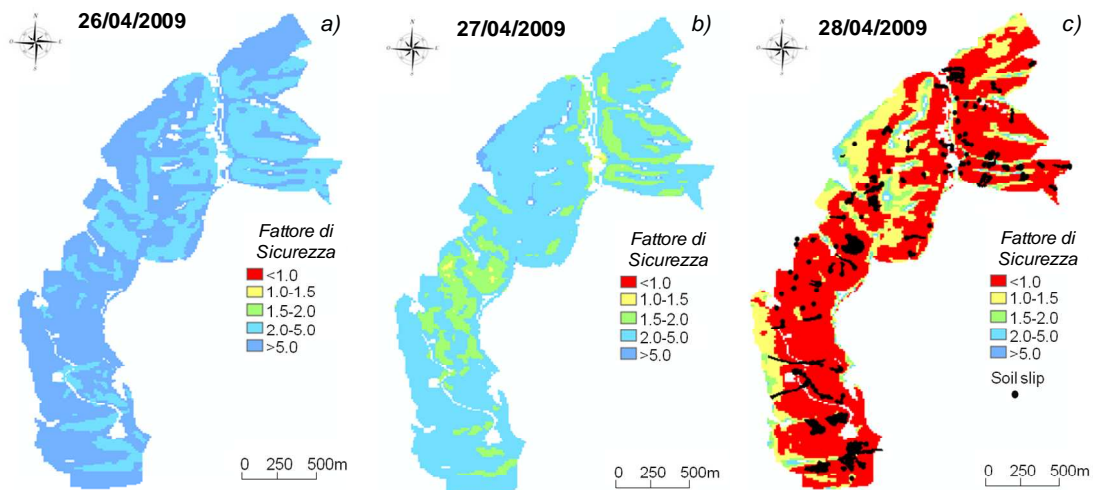


Figura 2. Mappe tempo varianti del fattore di sicurezza per l'evento del 27-28 Aprile 2009.

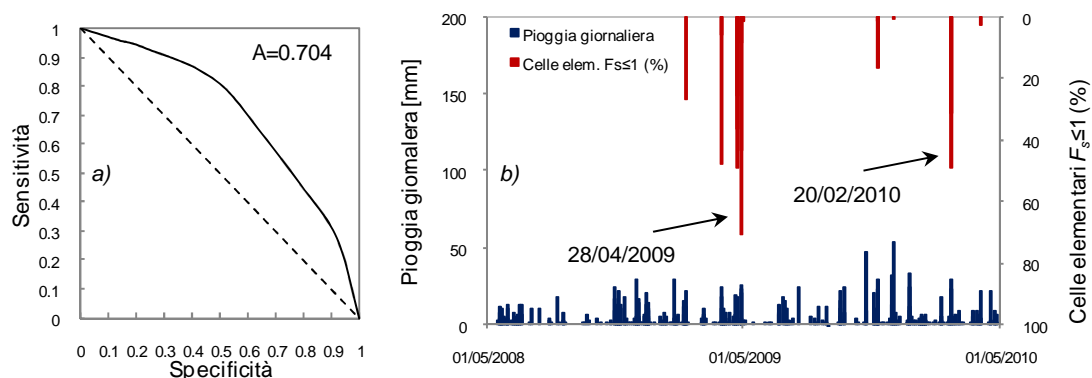


Figura 3. a) analisi ROC per l'area di prova. b) Frazione di celle instabili ( $F_s \leq 1$ ) per due anni di analisi.

Dalla *Figura 3b* si può notare che per il periodo di due anni di analisi le aree instabili raggiungono per due volte una percentuale tra il 16 e il 25% dell'area di prova, per una volta il 50% (data in cui si sono innescati nuovi *soil slip*) e solamente per l'evento del 28 Aprile 2009 si avvicinano al 70%. In particolare, per quest'ultimo evento è possibile comparare i

risultati del modello con i *soil slip* realmente accaduti (Fig.2c). L'indicazione fornita dall'analisi temporale rivela aspetti interessanti della modellazione, poiché eventi piovosi intensi, preceduti da periodi non piovosi, non provocano necessariamente le condizioni di instabilità; viceversa eventi piovosi di media intensità prolungati nel tempo comportano talvolta l'innescò dei movimenti franosi.

Per la valutazione, dal punto di vista spaziale, dei risultati della modellazione, è stata condotta l'analisi ROC (Bagueria, 2006), che prevede il calcolo della sensitività, definita come rapporto tra veri positivi e la somma dei veri positivi con i falsi negativi, e la specificità, definita come rapporto tra i veri negativi e la somma dei veri negativi con i falsi positivi. Infatti, una cella può essere valutata instabile, se sovrapposta ad una frana censita dà luogo ad un vero positivo, altrimenti ad un falso positivo. Viceversa, una cella valutata stabile, se sovrapposta ad una frana censita dà luogo ad un falso negativo, altrimenti ad un vero negativo. Per tracciare la curva ROC sono stati calcolati diversi punti facendo variare il valore limite del fattore di sicurezza. L'area sottesa dalla curva ROC fornisce un'indicazione sulla capacità del modello di discriminare correttamente tra le osservazioni positive e negative dell'area campione. La Figura 3a mostra che l'accuratezza globale del modello è pari a 0.704.

### Analisi dell'innescò per le aree di studio

Dopo lo svolgimento della simulazione per l'area di prova, l'analisi di stabilità è stata condotta per due aree, una di dimensioni maggiori (area di studio 1) e una limitrofa (area di studio 2). Le Figure 4 e 6 mostrano l'evoluzione delle mappe del fattore di sicurezza risultanti, per l'evento del 28 Aprile 2009, in risposta alle precipitazioni. Le Figure 4c e 6c, in particolare, mostrano il confronto tra le frane censite e il risultato della modellazione. La capacità di predizione di *SLIP*, da un punto di vista spaziale, è stata valutata mediante analisi ROC, la quale indica per l'area di studio 1 un'accuratezza globale pari a 0.800 (Fig.5a) e per l'area di studio 2 pari a 0.735 (Fig.7a). Le Figure 5b e 7b mostrano l'analisi temporale per le due aree di studio. I risultati sono analoghi a quelli ottenuti per l'area di prova.

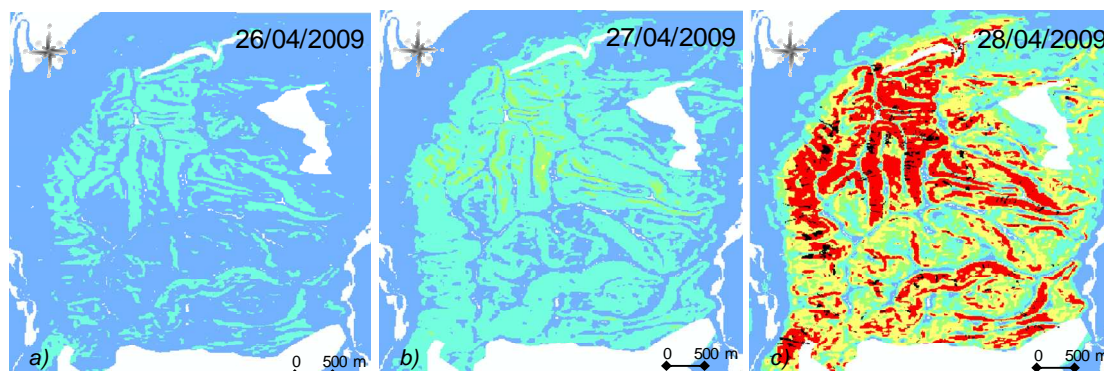


Figura 4. Mappe tempo varianti di  $F_s$  per l'evento del 27-28 Aprile 2009 (area di studio 1).

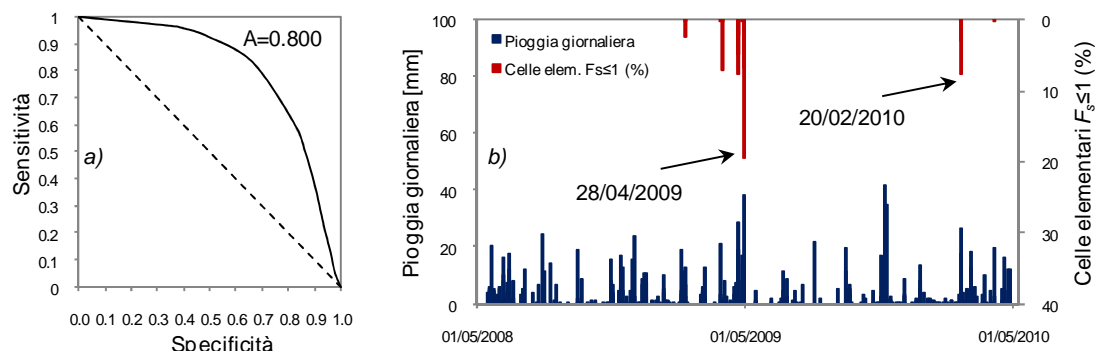


Figura 5. a) analisi ROC per l'area di studio 1. b) Frazione di celle instabili ( $F_s \leq 1$ ) per due anni di analisi.



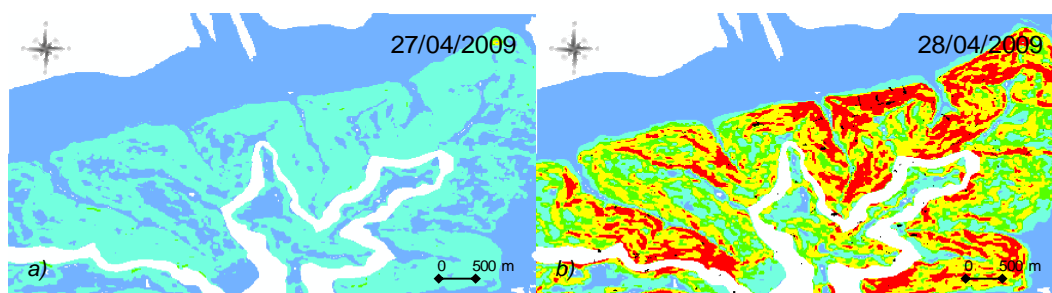


Figura 6. Mappe tempo varianti di  $F_s$  per l'evento del 27-28 Aprile 2009 (area di studio 2).

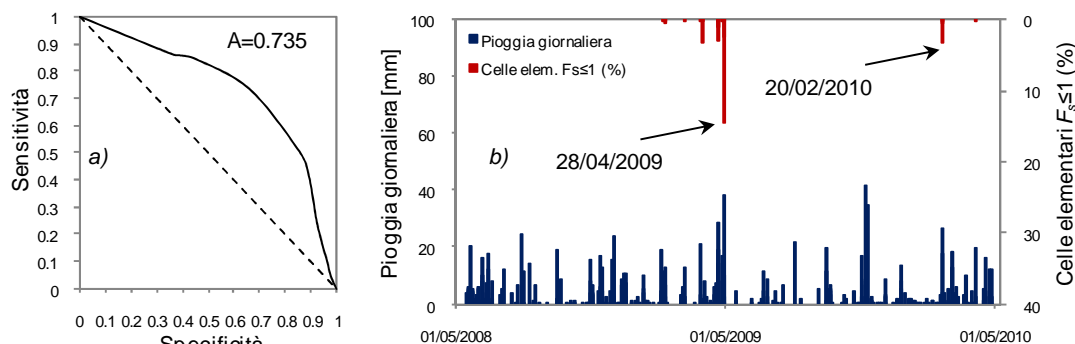


Figura 7. a) analisi ROC per l'area di studio 2. b) Frazione di celle instabili ( $F_s \leq 1$ ) per due anni di analisi.

## Conclusioni

Nella presente nota sono stati studiati alcuni recenti casi di *soil slip* accaduti nell'area dell'Oltrepò Pavese nell'Aprile 2009, mediante un'analisi di stabilità a scala territoriale per un periodo di due anni. Le analisi sono state possibili grazie all'implementazione di un modello di stabilità fisicamente basato in una piattaforma per il trattamento dei dati territoriali. I risultati della modellazione sono stati analizzati sia da un punto di vista spaziale, tramite analisi ROC, sia da un punto di vista temporale, valutando la percentuale di aree instabili per il periodo di analisi. L'analisi spaziale indica che l'accuratezza globale della modellazione risulta pari a 0.704 per l'area di prova, mentre è pari rispettivamente a 0.800 e 0.735, per le aree di studio. L'analisi temporale, invece, mostra che eventi di pioggia intensa, che accadono successivamente a periodi non piovosi, non necessariamente provocano le condizioni di instabilità. Soprattutto, l'analisi dei risultati, mostra la capacità del modello di individuare, per un'ampia area, il corretto accadimento dei *soil slip*.

## Bibliografia

- Bagueria, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37: 315-329.
- 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 framework. *Engineering Geology*, 102: 214-226.
- Iverson, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36 (7): 1897-1910.
- Meisina, C. & Scarabelli, S. (2007). A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*, 87: 207-223.
- Montrasio, L. & Valentino, R. (2008). A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1149-1159.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N. (1998). The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. *8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998.
- Wilson, R.C. & Wieczorek, G.F. (1995). Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1(1): 11-27.