

Sviluppo di un modello di previsione di frane per il bacino del fiume Arno

Angelo Iacopo Benedetti¹, Stefano Dapporto², Nicola Casagli³, Marcello Brugioni⁴

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, angelo.benedetti@geo.unifi.it

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, stefano.dapporto@geo.unifi.it

³Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, nicola.casagli@geo.unifi.it

⁴Autorità di Bacino del Fiume Arno, m.brugioni@arno.autoritaibacino.it

MONSTER: a landslide prediction model for the Arno river basin, Italy

ABSTRACT: Monster (acronym of MONitoraggio della Stabilità dei versanti in TEmpo Reale, Real Time Monitoring of Slope Stability) is a joint project between the Arno River Basin Authority and the Earth Sciences Department of the University of Florence, Italy. The project objective is to create a landslide prediction model for the whole Arno basin, to be used as an alert system. A double approach – hydrological modelling and statistical analysis – is followed to find hydrological thresholds for landslides. Research strategy can be explained as follows: (a) selection of some catchments as test sites and data collection on landslide, rainfall and flow time series; (b) establishment of a certain number of Unique Condition Units (UCU) based on different soil characteristics (land use and lithology); (c) hydrological characterisation of test catchments and related UCUs; (d) hydrological modelling of two series of rainfall events: with or without consequent landslide; (e) statistical analysis of the two series of hydrological data, to calculate triggering thresholds for each UCU. Bisenzio, Era and Greve basins are the model test areas and a large archive work was carried out to get temporal data-bases on landslides, as suitable time series are necessary to perform statistical analyses. Rainfall, flow and geological data were also collected. Hydrological characterisation of test areas is performed by mean of Curve Number method. A CN is assigned to the whole test basin by comparing runoff data against the results provided by the hydrograph separation with a digital recursive filter. UCUs' CN values are obtained rearranging literature data, in order to be coherent with the hydrological behaviour of the entire test site, represented by the comprehensive basin CN. For each UCU, two groups of major hydrological events are then analysed: rainfall events originating landslides and events not originating landslides. The CN method is used to calculate water retention values from rainfall inputs. Retention is assumed, in fact, as the most important factor related to the pore pressure increase causing slope instability. Statistical analysis of retention data and landslide events could supply, combined with suitable Antecedent Precipitation Indexes, threshold values useful to predict dangerous conditions.

Key terms: Landslide, rainfall, prediction, model

Termini chiave: Frane, precipitazioni, previsione, modelli

Riassunto

MONSTER è un progetto di ricerca per la creazione di un modello di previsione temporale di frana basato su soglie idrologiche, da utilizzare come sistema di allarme per il bacino dell'Arno.

La strategia di ricerca prevede un duplice approccio: modellistica idrologica ed analisi statistica.

Tre sottobacini dell'Arno (Bisenzio, Era e Greve) sono le aree pilota per le quali sono state ricostruite le serie storiche di frane, piogge e portate. Inoltre, per l'intero bacino dell'Arno, sono state individuate delle unità territoriali omogenee (UTO) basate su litologia e uso del suolo, in base alle quali differenziare le soglie di innesco dei fenomeni franosi.

La caratterizzazione idrologica dei bacini pilota e delle relative UTO viene effettuata con il metodo del Curve

Number. Un CN è assegnato all'intero bacino di prova confrontando i dati del ruscellamento con i risultati forniti dall'applicazione di un filtro digitale ricorsivo per la separazione dell'idrogramma di piena. I CN delle UTO sono ottenuti riadattando valori di letteratura in modo da rendere coerente il comportamento complessivo delle UTO rispetto a quello delle intere aree pilota, rappresentato dal relativo CN precedentemente calcolato.

Per ciascuna UTO vengono analizzati due gruppi di eventi idrologici: quelli seguiti da frane e quelli non seguiti da frane. Con il metodo del CN, dalle precipitazioni si ottengono i valori di infiltrazione, fattore legato all'aumento della pressione interstiziale, responsabile dell'instabilità dei versanti. Le soglie di innesco dei fenomeni franosi sono quindi ricavate dall'analisi statistica dei dati di infiltrazione legati a eventi seguiti da frane o meno, combinati con adeguati indici di precipitazione antecedente.

1. Introduzione

MONSTER (acronimo di MONitoraggio della Stabilità dei versanti in TEMpo Reale) è un progetto di ricerca in comune tra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze e l'Autorità di Bacino del Fiume Arno finalizzato alla definizione di un modello di previsione temporale di frane superficiali e profonde a scala di bacino. Associato ad un efficiente sistema di previsione meteo-idrologica, tale modello potrebbe costituire uno degli elementi fondamentali per la creazione di un sistema di allerta in tempo reale per il rischio idrogeologico che interessa il bacino dell'Arno.

In vista di questo obiettivo, i criteri guida per la definizione del modello sono stati individuati in: a) applicabilità del modello a scala di bacino; b) utilizzo di un numero limitato di dati di ingresso; c) semplicità di calcolo e di gestione.

L'individuazione delle relazioni tra eventi meteorici e frane rappresenta un tema di ricerca fondamentale per la comunità scientifica. In letteratura (Corominas, 2001) si fa spesso riferimento al concetto di "soglia pluviometrica", valore limite di intensità di un evento piovoso oltre il quale si ha mobilitazione di una o più frane in una data area.

Esistono due approcci fondamentali per la determinazione delle soglie pluviometriche: quello deterministico (basato su modelli numerici di infiltrazione e stabilità dei versanti) e quello statistico (fondato sull'analisi delle serie storiche di frane e precipitazioni). Per la previsione delle frane nel bacino dell'Arno, il progetto Monster propone lo sviluppo di un modello misto, tramite la combinazione di un modello idrologico e di analisi statistiche che individuino le condizioni di piovosità critiche per l'innesco dei movimenti di versante.

Il lavoro di ricerca è tuttora in atto e non sono ancora disponibili i risultati finali del modello. Quindi la presente nota costituisce al momento una proposta metodologica, che verrà integrata a breve termine dai relativi esiti.

2. Metodologia

La procedura prevede la ricostruzione del volume specifico di acqua infiltrato nelle aree interessate da frane, sia durante eventi pluviometrici associati a dissesti che durante eventi, di simile magnitudo, non connessi all'attivazione dei fenomeni. Tale parametro riveste un'importanza fondamentale poiché è l'acqua di infiltrazione a aumentare le pressioni interstiziali e, riducendo gli sforzi efficaci, costituisce la causa principale dell'innesco dei movimenti.

Pertanto, da un'analisi statistica delle due serie (eventi con presenza e assenza di frane), unita a quella dei corrispondenti valori di precipitazione antecedente, si potrà arrivare all'individuazione di valori soglia per l'attivazione di fenomeni franosi.

La realizzazione del modello segue uno schema articolato in quattro punti fondamentali, tra loro strettamente connessi:

1. individuazione di alcune aree pilota e ricerca dei relativi dati di base (frane, portate, precipitazioni, dati fisiotopici);
2. modellazione idrologica generale delle aree pilota;
3. parametrizzazione idrologica di due serie di eventi pluviometrici:
 - eventi seguiti da fenomeni franosi;
 - eventi non seguiti da frane;
4. analisi statistica dei parametri idrologici relativi alle due serie di eventi, finalizzata all'individuazione di soglie adatte a distinguere le situazioni di rischio.

3. Aree pilota e banca dati sulle frane

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio meteo-idrologico – fondamentale per l'utilizzo definitivo del modello – la telemetria è disponibile per gli idrometri alla sezione di chiusura dei bacini pilota e per almeno un pluviometro in ciascuna area.

Di primaria importanza per la scelta delle aree pilota è la presenza di adeguate serie storiche di portata oraria alla sezione di chiusura dei bacini e delle corrispondenti precipitazioni orarie nelle stazioni presenti nella zona. Nei casi in questione la disponibilità di dati è migliore che altrove, sebbene vi siano lacune che limitano le possibilità di analisi di eventi meteorologici significativi.

Parallelamente hanno giocato un ruolo di uguale valore i risultati dell'approfondita ricerca d'archivio effettuata per ricostruire la serie storica di fenomeni franosi avvenuti negli ultimi decenni. Nelle tre aree infatti è stato trovato un numero di casi esattamente datati e localizzati sufficiente per impostare un lavoro di analisi anche statistica, mentre in altre zone ciò non è stato possibile.

Sono state individuate tre aree pilota per lo sviluppo del modello, nel loro complesso rappresentative della maggioranza delle condizioni meteo-idro-geologiche presenti nel bacino dell'Arno. I risultati del modello ricavati per queste aree dovrebbero quindi essere estesi all'intero bacino oggetto di questo studio.

Le zone scelte (Fig. 1) sono dei sottobacini idrografici dell'Arno e in dettaglio si tratta della porzione collinare e montana dei bacini del Bisenzio, dell'Era e della Greve. Le tre zone hanno superfici rispettivamente di 150, 335 e 135 km² e tutte presentano un indice di franosità prossimo al 10%.

I risultati di questa ricerca condotta appositamente per il presente lavoro sono mostrati separatamente per ogni area pilota nelle Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3. Sono indicate anche i casi di frane datate ma non esattamente localizzate e viceversa, nonché le frane localizzate nelle immediate vicinanze del bacino.

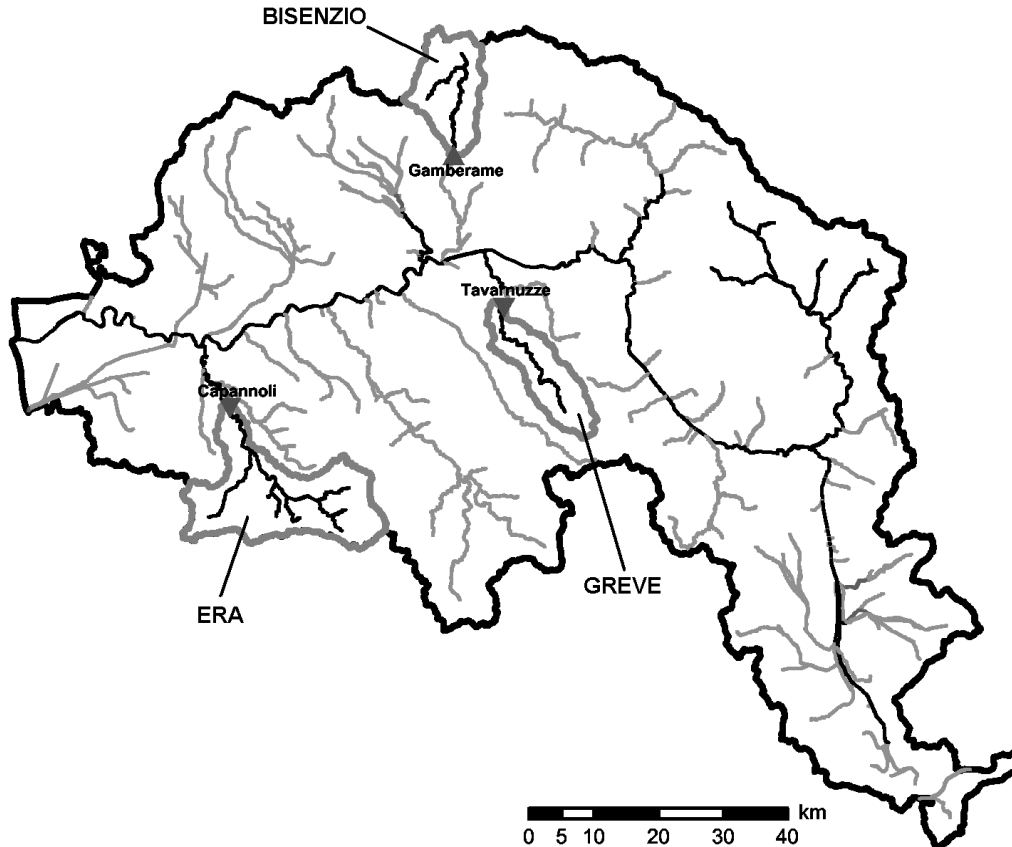


Figura 1 – I tre sottobacini del Bisenzio, dell’Era e della Greve, (in grigio, con indicazione della rispettiva stazione idrometrica di chiusura) adottati come aree pilota nel progetto Monster per il bacino del Fiume Arno

The three test sites (Bisenzio river, Era river and Greve river basins) selected for Monster project in the Arno River watershed

Tabella 1 – Sintesi degli eventi franosi registrati nella banca dati dell’area pilota del Bisenzio

Summary of landslide data base of the Bisenzio basin

	LOCALIZZATE			NON LOCALIZZATE	TOTALE
	interne	esterne	subTOTALE		
DATATE	79		79	20	99
NON DATATE	26	1	27	6	33
TOTALE	105	1	106	26	132

Tabella 3 – Sintesi degli eventi franosi registrati nella banca dati dell’area pilota della Greve

Summary of landslide data base for the Greve test site

	LOCALIZZATE			NON LOCALIZZATE	TOTALE
	interne	esterne	subTOTALE		
DATATE	30	10	40	0	40
NON DATATE	1	2	3	0	3
TOTALE	31	12	43	0	43

Tabella 2 – Sintesi degli eventi franosi registrati nella banca dati dell’area pilota dell’Era

Summary of landslide data base for the Era test site

	LOCALIZZATE			NON LOCALIZZATE	TOTALE
	interne	esterne	subTOTALE		
DATATE	23	19	42	21	63
NON DATATE	8	2	10	7	17
TOTALE	31	21	52	28	80

4. Parametrizzazione idrologica generale

La modellazione idrologica viene effettuata con il metodo del Curve Number (USDA – SCS, 1972), dotato di una serie di caratteristiche che ben si adattano al tipo di indagine da eseguire:

- è un metodo empirico (vale a dire non basato su parametri fisici), per la stima del ruscellamento superficiale e dell’infiltrazione;
- si fonda su un unico parametro, il Curve Number (CN), che esprime la capacità di produrre ruscellamento dei

vari gruppi idrologici di suolo;

- funziona a scala di evento pluviometrico;
- è stato ampiamente utilizzato e testato in ambienti e contesti diversi.

Nel progetto Monster questo metodo è applicato in maniera semplificata allo scopo di ridurre i parametri di ingresso e rendere più gestibile il modello. L'obiettivo ultimo dell'analisi idrologica, infatti, non è la ricostruzione rigorosa dei processi che regolano le trasformazioni degli afflussi nei deflussi, ma la ricerca di un indice che consenta di distinguere le condizioni di instabilità di un versante da quelle di stabilità.

Per ogni bacino pilota si intende ricostruire la relazione tra precipitazione totale e infiltrazione per i diversi gruppi idrologici e di uso del suolo. La procedura si riassume nelle fasi indicate di seguito:

1. selezione di eventi pluviometrici di diversa magnitudo verificatisi nel bacino da sottoporre ad analisi idrologica e calcolo della precipitazione totale relativa ad ogni evento, P_{ev} ;
2. calcolo, per ciascun evento pluviometrico, della relativa portata di pioggia unitaria (Q_{ev}) alla sezione di chiusura del bacino e separazione dell'idrogramma di piena nelle sue componenti principali: deflusso superficiale, ipodermico e di base;
3. valutazione delle condizioni di umidità del terreno al momento iniziale di ciascun evento e individuazione di gruppi distinti relativi a tali condizioni;
4. modellazione del comportamento idrologico complessivo del bacino tramite il metodo SCS Curve Number, con individuazione del CN relativo al bacino;
5. suddivisione del bacino in unità territoriali omogenee (UTO) e relativa attribuzione dei valori caratteristici di CN , ricalibrati coerentemente al CN dell'intero bacino pilota;
6. calcolo, per ogni evento, dei valori di ruscellamento e di deflusso profondo relativi a ogni singola UTO interna al bacino.

5. Separazione dell'idrogramma di piena

Il metodo di separazione degli idrogrammi di piena relativi a ciascun evento pluviometrico analizzato, prevede l'applicazione di una funzione di recessione per la separazione del deflusso di base originario (quello che si sarebbe misurato in assenza dell'evento pluviometrico) da quello dovuto all'evento (Q_{ev}) e l'individuazione degli istanti iniziale e finale dell'evento. Si applica successivamente un filtro digitale ricorsivo per ottenere in sequenza i valori di deflusso di base (Q_b), deflusso ipodermico (Q_{ip}) e deflusso superficiale (Q_s) relativi all'evento analizzato.

Per ricostruire le intere curve di esaurimento sia dell'evento di piena che della fase precedente il suo inizio, viene utilizzata l'equazione proposta da Wittenberg (1999)

per serbatoi a comportamento non lineare:

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{1/(b-1)}$$

I parametri a e b , caratteristici della curva, sono stimati selezionando la coppia che minimizza lo scarto quadratico medio tra i valori di portata teorici e quelli effettivamente misurati alla stazione idrometrica.

La ricostruzione di tali curve permette di individuare gli istanti iniziale e finale dell'evento e di effettuare la distinzione del deflusso di base originario – quello che si sarebbe misurato in assenza dell'evento pluviometrico – da quello dovuto all'evento (Q_{ev}).

In Fig. 2 è mostrato un esempio di ricostruzione delle curve di recessione – sia quella precedente e che quella successiva all'evento pluviometrico – effettuata col metodo indicato.

Per la separazione delle restanti componenti dell'idrogramma (variazione del deflusso di base, Q_b ; deflusso ipodermico, Q_{ip} ; deflusso superficiale, Q_s) si utilizza l'analisi di frequenza.

La portata si può considerare infatti un segnale composto, combinazione di più segnali nativi caratterizzati da frequenze diverse: quelle più alte si possono associare alle rapide variazioni del deflusso superficiale, mentre i segnali a frequenze progressivamente inferiori si possono legare agli apporti di deflussi via via più profondi.

L'applicazione di un filtro digitale ricorsivo è un metodo comunemente utilizzato nel trattamento dei segnali per separare le componenti a diversa frequenza e quindi può essere utilizzato anche nella scomposizione dell'idrogramma di piena (Lyne & Hollick, 1979).

Come filtro si è adottata l'equazione proposta da Chapman (1991), evoluzione dell'algoritmo introdotto da Nathan & McMahon (1990):

$$f_t = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} f_{t-1} + \frac{2}{3 - \alpha} (y_t - \alpha \cdot y_{t-1})$$

dove f_t è la risposta filtrata all'istante t , y_t è la portata totale, α è il parametro di filtro (con campo di variabilità generalmente compreso tra 0,9 e 0,99). Il filtro viene applicato inizialmente per separare la variazione del deflusso di base Q_b dalla componente rapida del deflusso ($Q_{ip} + Q_s$), come mostrato in Fig. 3.

Con la stessa tecnica, viene successivamente separato il deflusso ipodermico da quello superficiale, come proposto da Mugo & Sharma (1999).

Tale tecnica, analogamente ad altre tipicamente in uso, non è fisicamente basata, ma presenta il vantaggio dell'oggettività, della ripetibilità e della facile automatizzazione. Nella Fig. 4 è riportato come esempio il risultato finale dell'applicazione di questa tecnica all'evento idro-pluviometrico del 23/09/2002 avvenuto nel bacino pilota del Bisenzio.

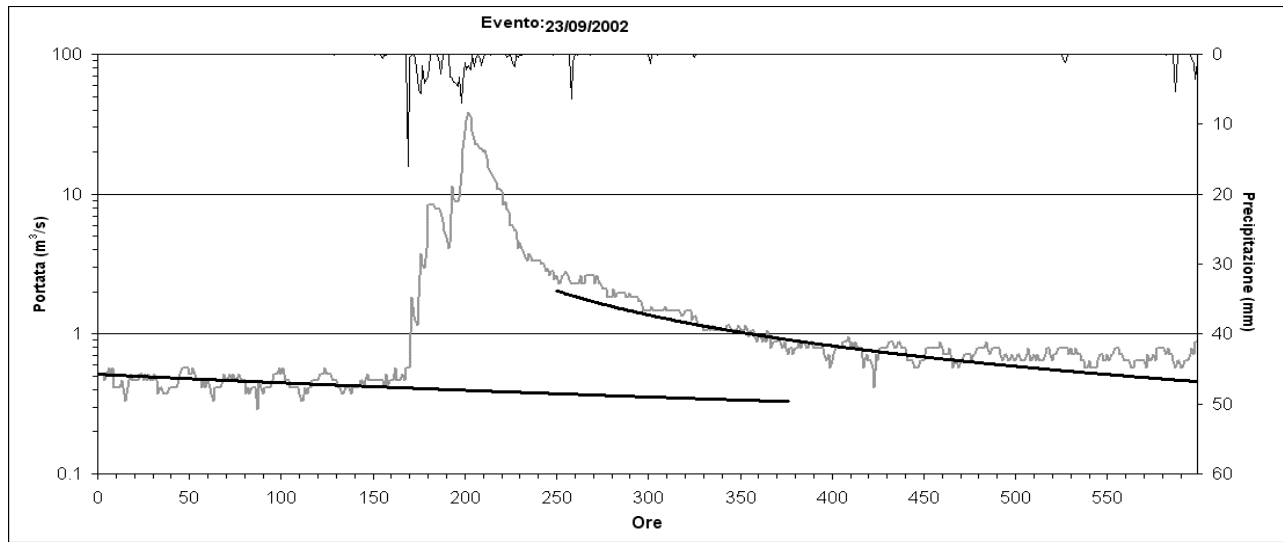


Figura 2 – Le curve di recessione (in nero, si noti la forma concava nel diagramma semilogaritmico) precedenti e successive all’evento pluviometrico del 23/09/2002 avvenuto nel bacino pilota del Bisenzio, ricostruite con il metodo indicato nel testo
Recession curves (in black) before and after the 23/09/2002 event in the Bisenzio river basin. The function is that proposed by Wittemberg (1999) for non-linear reservoirs (note the concave shape of the function in the semi-logarithmic plot)

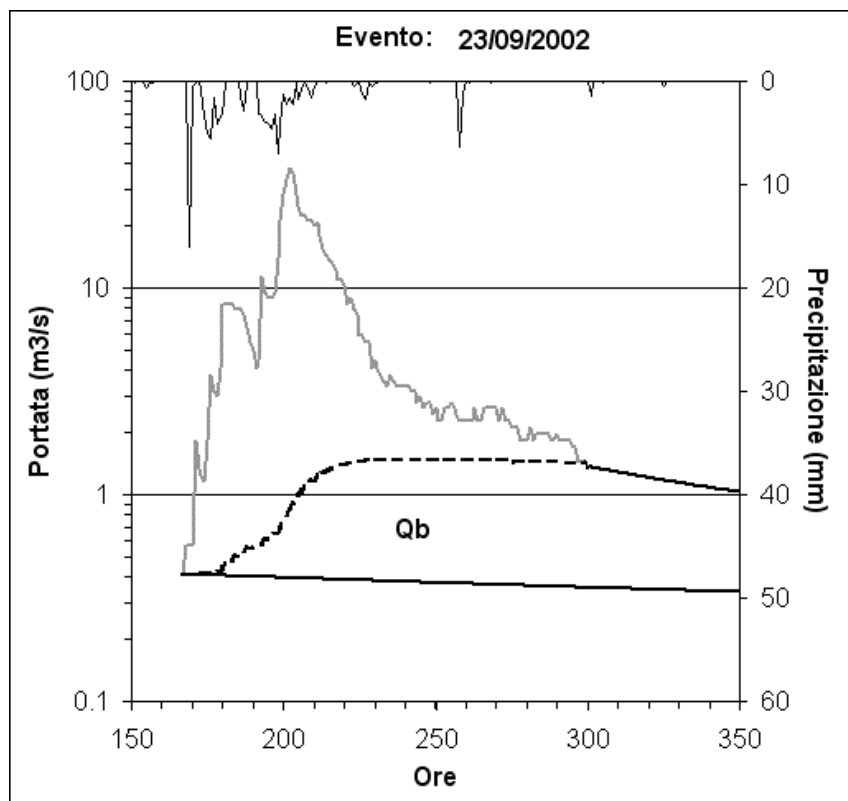


Figura 3 – Risultato dell’applicazione del filtro di Chapman (1991) per la separazione del deflusso di base (Q_b , al disotto della linea tratteggiata) dall’idrogramma di piena
Effect of the Chapman (1991) filter application to separate baseflow (Q_b , under the dashed line) from the hydrograph of the 23/09/2002 event

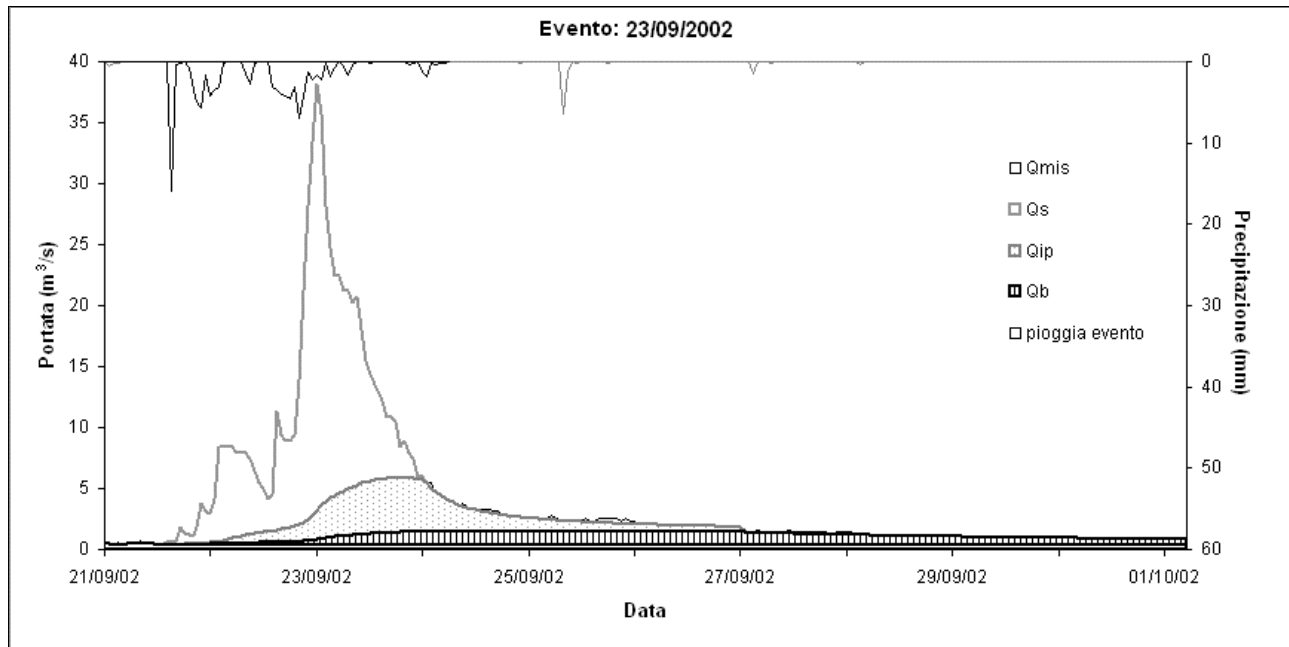


Figura 4 – Risultato finale dell'applicazione della tecnica di separazione dell'idrogramma di piena proposta in questo lavoro, con indicazione delle varie componenti del deflusso (Q_b , deflusso di base; Q_{ip} , deflusso ipodermico; Q_s , deflusso superficiale). L'esempio si riferisce all'evento idro-pluviometrico avvenuto attorno al 23/09/2002 nell'area pilota del bacino del Bisenzio

The graph shows an example of the application result of the hydrograph separation technique proposed in this paper. The hydrograph components (baseflow, Q_b ; interflow, Q_{ip} ; runoff, Q_s) are shown in different patterns and are referred to the 23/09/2002 event in the Bisenzio test site

6. Condizioni iniziali di umidità del terreno

La risposta di ruscellamento e infiltrazione di un bacino non è sempre identica a parità di evento pluviometrico; in particolare varia a seconda delle condizioni di umidità del terreno, che influenzano soprattutto le prime fasi del ruscellamento.

In Monster si assume che l'umidità del suolo sia funzione delle precipitazioni avvenute nel periodo precedente l'evento considerato e per ogni evento si calcola un Indice di Precipitazione Antecedente Pa_0 mediante l'espressione (Crozier & Eyles, 1980):

$$Pa_0 = kP_1 + k^2P_2 + k^3P_3 + \dots + k^gP_g$$

dove: $k = \text{cost. } (\sim 0,9)$; $g = \text{numero giorni antecedenti } (5)$.

Una volta calcolato tale indice per ciascun evento analizzato, le relative coppie $P_{ev}-Q_{ev}$ vengono suddivise in 3 gruppi distinti, a seconda del valore di Pa_0 (con le soglie al 33° e al 66° percentile degli eventi analizzati), cioè delle condizioni di umidità del terreno al momento iniziale di ciascun evento.

7. Modellazione col metodo del curve number

In letteratura esistono valori di CN già tabulati in funzione delle caratteristiche del terreno, anche adattati alla situazione delle aree italiane (Borselli, 1989; Passalacqua, 2002), ma nel progetto Monster l'ampiezza dei bacini pilota non permette un'immediata e univoca assegnazione di un

CN al bacino.

Utilizzando la relazione tipica del metodo,

$$Q_s = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + S(1 - \lambda)} \quad \text{con } S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{e } \lambda = 0.2$$

si è attribuito a ciascun bacino pilota il valore di CN che adatta al meglio i dati di deflusso superficiale Q_s calcolati con il metodo del Curve Number ai corrispondenti valori Q_s misurati (mediante separazione dell'idrogramma con filtro digitale ricorsivo) durante gli eventi di piena.

8. Unità territoriali omogenee (UTO)

L'adozione di unità territoriali omogenee si basa sull'idea che differenti caratteristiche dei terreni necessitano soglie di pericolo di frana diverse. Le UTO sono state definite in base ai principali fattori legati alla predisposizione al dissesto dei versanti e indispensabili per la modellazione idrologica secondo il metodo del Curve Number, vale a dire litologia e uso del suolo.

L'intero bacino dell'Arno è stato suddiviso in UTO secondo 11 classi di copertura del suolo e 4 classi di litologia corrispondenti ai 4 gruppi idrologici tipici del metodo Curve Number. Sono risultati 43 tipi diversi di UTO, di cui 12 soltanto contengono informazioni su frane e sono ben rappresentati nei tre bacini pilota.

L'assegnazione di un CN caratteristico a ciascuna UTO costituisce dunque la fase finale della parametrizzazione

idrologica alla base del modello di previsione di frane. I valori tipici di letteratura (Borselli, 1989) per le diverse combinazioni di gruppi idrologici e di uso del suolo vengono ricalibrati in modo che per i vari eventi analizzati sia rispettata l'equazione

$$Q_{S_{U1}} + Q_{S_{U2}} + Q_{S_{U3}} + \dots = Q_S$$

secondo la quale la somma dei deflussi delle varie UTO ($Q_{S_{Uk}}$) deve essere uguale al deflusso complessivo del bacino Q_S calcolato col CN complessivo del bacino pilota. Questa è infatti la condizione necessaria perché la modellazione idrologica delle UTO sia coerente con quella dei bacini.

9. Soglia di innesco di frane

Per trovare le soglie di innesco per il modello di previsione di frana vengono considerati nelle serie storiche di dati idropluviometrici due campioni di eventi distinti in base all'occorrenza o meno di fenomeni franosi a seguito degli stessi. L'obiettivo è la caratterizzazione idrologica con il metodo Curve Number delle due tipologie di eventi, mediante la stima del deflusso superficiale e quindi dell'infiltrazione. Quest'ultima quantità appare infatti la più significativa per la correlazione con l'innesco di fenomeni franosi.

In dettaglio, per tutti gli eventi con frana analizzati, vengono calcolati i valori di deflusso rapido (Q_{S_U}) e profondo (F_U) relativi ad ogni UTO, mediante le relazioni:

$$Q_{S_U} = \frac{(P_U - \lambda S_U)^2}{P_U + S_U(1 - \lambda)} \quad \text{e} \quad F_U = P_U - \lambda S_U - Q_{S_U}$$

Si vengono così a creare, per ciascuna UTO interessata da fenomeni franosi, la serie dei valori di infiltrazione di acqua F_U corrispondente agli eventi pluviometrici seguiti da fenomeni franosi e quella relativa agli eventi non seguiti da frane.

Per tenere conto degli effetti delle condizioni pregresse di umidità del terreno, gli eventi sono suddivisi secondo le tre classi definite con l'indice di precipitazione antecedente Pa_0 .

Le due variabili prese finora in considerazione (l'infiltrazione F relativa al singolo evento e l'indice Pa_0) sono riferite alle condizioni idrologiche di breve termine, le più significative per i fenomeni franosi superficiali.

Effettivamente le notizie raccolte sulla maggioranza dei dissesti registrati nella banca dati indicano una prevalenza di fenomeni a carattere superficiale, ma negli obiettivi di questo lavoro il modello di previsione non deve trascurare le frane più profonde. Secondo una valutazione empirica, se l'indice di precipitazione antecedente calcolato sui cinque giorni precedenti l'evento rende conto dello stato di imbibizione dei primi strati di terreno, un valore di precipitazione cumulata su un minimo di trenta giorni può rappresentare le condizioni di "riempimento" del serbatoio profondo, vale a dire il livello della falda che influisce sulla stabilità di eventuali superfici di scivolamento profonde.

Come terza variabile per la definizione di soglie di innesco di frane si intende perciò considerare la precipitazione cumulata su un periodo di almeno 30 giorni. L'esatta estensione della cumulata è da definire nella fase ultima di calibrazione del modello, in modo da ottenere i migliori risultati nell'individuazione di soglie che separino gli eventi che hanno causato frane da quelli che non hanno avuto conseguenze sulla stabilità dei versanti.

Il concetto di soglie di innesco dei fenomeni franosi sviluppato in questo lavoro si può schematicamente rappresentare secondo il grafico di Fig. 5.

In conclusione, costruendo un simile grafico separatamente per ciascuna UTO e per ognuna delle tre classi di umidità espressa dall'indice Pa_0 , si giunge a definire una soglia di innesco basata sulle due variabili F_U (infiltrazione) e P_{30} (precipitazione cumulata su almeno 30 giorni).

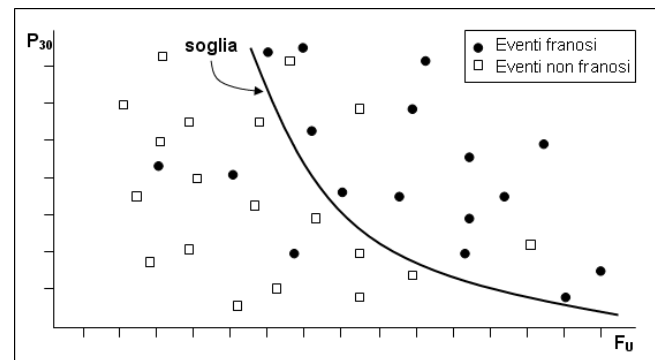


Figura 5 – Grafico esemplificativo del concetto di soglia di innesco ricavata dall'analisi di dati storici relativi ad eventi idropluviometrici seguiti o meno da frane. Il grafico si riferisce ad ogni singola UTO e a ciascuna classe di umidità pregressa del terreno. In ascisse è indicata la variabile F (infiltrazione) ricavata col metodo Curve Number, in ordinate la precipitazione cumulata sui 30 giorni precedenti l'evento

Example of triggering threshold obtained from the analysis of historical data relative to rainfall events, independently of whether they caused landslides or not. The diagram refers to each UCU and to the preceding moisture class. The x-axis contains the variable F (infiltration) determined with the Curve Number method, while the 30 days cumulative precipitation prior to the event is on the y-axis

10. Osservazioni e conclusioni

L'affidabilità delle soglie di innesco di fenomeni franosi stabilite con questa metodologia, oltre che dalla struttura logica del modello stesso, dipende anche dalla quantità e qualità dei dati storici di frane, precipitazioni e portate su cui è stata effettuata la taratura del modello. I dati sulle frane sono in genere i più difficili da reperire e i meno affidabili quanto a completezza e precisione temporale; ma nel caso studiato, nonostante la ricchezza della banca dati raccolta, la possibilità di analizzare numerosi eventi franosi è stata impedita dalla mancanza dei corrispondenti dati idropluviometrici. In virtù di questo fatto si prevede di poter

stabilire soglie attendibili su circa la metà delle 12 UTO interessate da frane nel bacino dell'Arno.

Oltre ai dati di base è da discutere la tipologia di modellazione scelta: l'analisi idrologica adottata, per quanto rappresenti una notevole semplificazione del problema dell'infiltrazione e della stabilità dei versanti, è certamente un passo avanti nel superamento del concetto di semplice soglia pluviometrica per l'innescare delle frane. Si deve considerare infatti che i modelli di previsione di frana a larga scala – quale vuol essere MONSTER – sono concepiti per dare informazioni di pericolosità a bassa risoluzione spaziale, ma ad alta risoluzione temporale. Questo significa

che devono essere come sistemi di pre-allerta su vaste aree, come base per più dettagliate analisi su singole aree a rischio elevato.

11. Ringraziamenti

Questa ricerca è finanziata dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, nell'ambito del Progetto di ricerca MONSTER in comune con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze. Si ringrazia inoltre il personale tecnico dall'Autorità di Bacino per il fondamentale supporto scientifico e organizzativo allo sviluppo di questo lavoro.

Bibliografia

- Borselli L., 1989. Previsione dei deflussi superficiali su versante: il metodo S.C.S. Curve Number e sua applicabilità nell'ambiente collinare italiano. *Quaderni di Scienza del Suolo*, 2, 145-160.
- Chapman T. G., 1991. Comment on "Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 27, 1783-1784.
- Corominas J., 2001. Landslides and climate. Keynote Lectures from the 8th International Symposium on Landslides, No 4, 1-33.
- Crozier M. J. & Eyles. R. J., 1980. Assessing the probability of rapid mass movement. *Proceedings of the Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, New Zealand Institute of Engineers, *Proceedings of Technical Groups, Group 6*, (1g), 2.47-2.51.
- Lyne V. & Hollick M., 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Institute of Engineers, Australian National Conference Publication*, 79/10, 89-93.
- Mugo J. M. & Sharma T. C., 1999. Application of a conceptual method for separating runoff components in daily hydrographs in Kimakia forest catchments, Kenya. *Hydrological Processes*, 13, 2931-2939.
- Nathan R. J. & McMahon T. A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26, 1465-1473.
- Passalacqua R., 2002. Vulnerabilità territoriale da frane e crolli in roccia. Progetto GERIA, dossier tematico. Collana territorio e ambiente. Regione Liguria.
- USDA – SCS (United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service), 1972. *SCS National Engineering Handbook*. Section 4, Hydrology. Chapter 10, Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall, 10.1-10.24.
- Wittemberg H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes*, 13, 715-726.