

# LE PRECIPITAZIONI METEORICHE E I FENOMENI DI INSTABILITÀ DEI VERSANTI IN AMBIENTE MEDITERRANEO

MAURIZIO POLEMIO (\*)

Principali relazioni tra le caratteristiche delle frane e i tipi di eventi meteorici significativi

Si può agevolmente stabilire un limite inferiore per il ruolo svolto dalle precipitazioni meteoriche sui fenomeni di instabilità dei versanti, se si considera che, comunque, questi fenomeni rientrano tra le sollecitazioni a cui un pendio è ordinariamente soggetto. Questa semplice considerazione deve indurre alla massima prudenza lo studioso che ipotizzi che le precipitazioni meteoriche possano essere causa dei fenomeni di instabilità dei versanti, allorché i fenomeni stessi si siano verificati contemporaneamente a copiose precipitazioni.

Solo raramente, in occasione di precipitazioni effettivamente eccezionali, esse possono essere l'unica causa; più spesso conducono alla crisi condizioni di stabilità già compromesse da vicende precedenti. Negli studi delle relazioni tra precipitazioni me-

## Abstract

A long and intense international research activity has by now confirmed the basic role of atmospheric precipitations on the dynamics of landslides. This paper is within the framework of such an activity and describes how solid and liquid meteoric precipitations really affect landslides. A detailed study of the empirical hydrological methods aimed at the determination of exceptional meteoric events to be correlated with landslide is performed. Finally, based on the analysis of real cases occurred in the Mediterranean environment, the opportunities offered by such an approach are discussed.

## Résumé

Une activité de recherche internationale intense et de longue durée a désormais confirmé le rôle fondamental des précipitations atmosphériques dans la dynamique des éboulements. Ce travail rentre dans le contexte d'une telle activité et brosse un tableau descriptif des modalités d'incidence réelle des précipitations atmosphériques solides et liquides sur les phénomènes d'éboulement. L'auteur approfondit l'étude des méthodes empiriques de nature hydrologique, visant à la détermination des caractères exceptionnels des événements météoriques à mettre en corrélation avec les éboulements. L'étude de cas réels qui se sont produits en milieu méditerranéen permet, enfin, de discuter des opportunités offertes par une telle approche.

teoriche e frane non si deve trascurare che ciascun territorio persegue condizioni di equilibrio dinamico sotto le sollecitazioni climatiche localmente ordinarie, qualora queste perdurino per tempi idonei, e solo eventi idrologici straordinari possono drasticamente mutare questo equilibrio (Govi et al., 1985).

L'analisi dell'influenza delle precipitazioni deve, quindi, tener conto della complessità dei fenomeni che conducono alla instabilità nel caso o nell'area in studio; in particolare, non si dovrà mai ignorare che lo studio del singolo evento precipitazioni-frana è un episodio appariscente ma istantaneo, estrapolato da vicende evolutive attive per

(\*) C.N.R. - Ce.R.I.S.T., Bari.

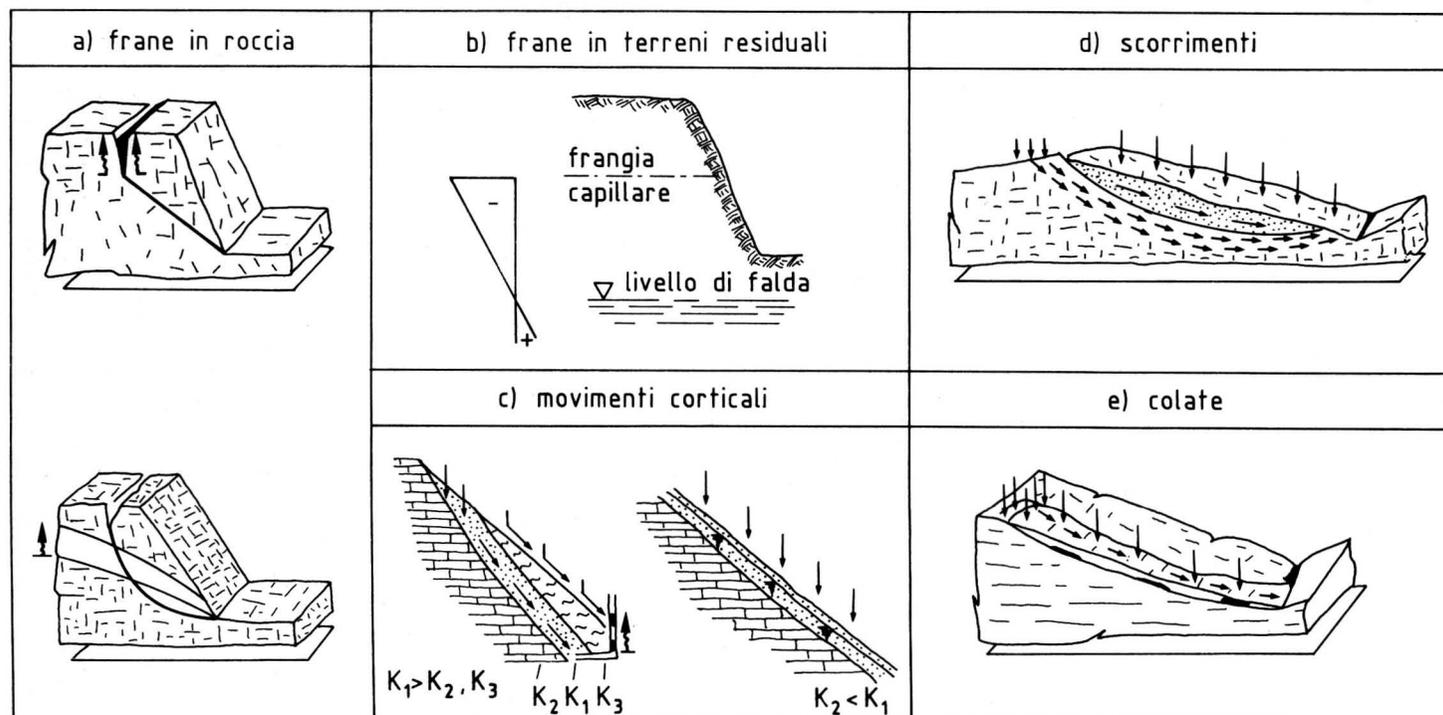


Figura 1 - Tipici esempi degli effetti delle precipitazioni meteoriche sulle frane (da Cascini e Versace, 1986).

tempi molto più lunghi di quelli in cui si manifesta una frana.

I differenti fenomeni innanzi accennati si combinano in modo complesso con le locali caratteristiche stratigrafiche, geotecniche e, in particolare, idrogeologiche dei terreni, limitando il ricorso a schematizzazioni semplici; d'altra parte, l'esperienza ha mostrato quali siano generalmente le modalità secondo cui le piogge possono influire sulle condizioni di stabilità di determinati tipi di versanti (Fig. 1).

Indipendentemente dalla natura dei terreni, le piogge più intense e di breve durata sono in genere artefici di movimenti superficiali e poco estesi (Govi et al., 1985), e molto spesso sono associate a nuove superfici di scorrimento, mentre periodi piovosi prolungati causano, in genere, la riattivazione di preesistenti superfici di scorrimento, non di rado collocate ad alcune decine di metri di profondità dalla superficie del suolo.

Coerentemente con tale quadro, Cascini e Versace (1986) segnalano che per le frane profonde risultano essere significative esclusivamente le variabili ottenute cumulando le piogge giornaliere. Si tratta di creare delle vere e proprie nuove variabili idrologiche, definite piogge cumulate o, semplicemente, *cumulate*, ottenute dalla somma delle piogge verificatesi in un dato numero di giorni consecutivi, antecedenti il giorno considerato. L'individuazione poi di quale cumulata, ovvero quale variabile sia significativa per la correlazione tra precipitazioni e frana, non può che discendere da tentativi su più cumulate. Un tale approccio conduce all'individuazione del *periodo critico*, inteso come numero di giorni consecutivi le cui precipitazioni complessive possono essere significative, in determinate condizioni climatiche e geomorfologiche.

## Modello di analisi precipitazioni - frane

Il modello di analisi più corretto per stabilire se e come le precipitazioni possono aver determinato l'instabilità di un pendio, dovrebbe necessariamente tener conto, nel modo più semplice, di ciascuna modalità secondo cui le acque superficiali e sotterranee possano nuocere alla stabilità di un versante. Come già compreso da Almagià (1910), le precipitazioni meteoriche possono risultare sia una causa provocatrice delle frane, quando particolarmente eccezionali (Polloni et al., 1991), che predisponente.

La grande complessità dei fenomeni significativi per la stabilità del pendio, nonché la diversa velocità delle variazioni delle condizioni di stabilità indotte da tali processi, permettono soprattutto simulazioni dei fenomeni che si svolgono nel sottosuolo. Questo tipo di modello, denominato «modello completo di versante», è stato descritto sulla base delle sue differenti possibilità applicative (Cascini e Versace, 1986) (Fig. 2). Un approccio completo è possibile solo

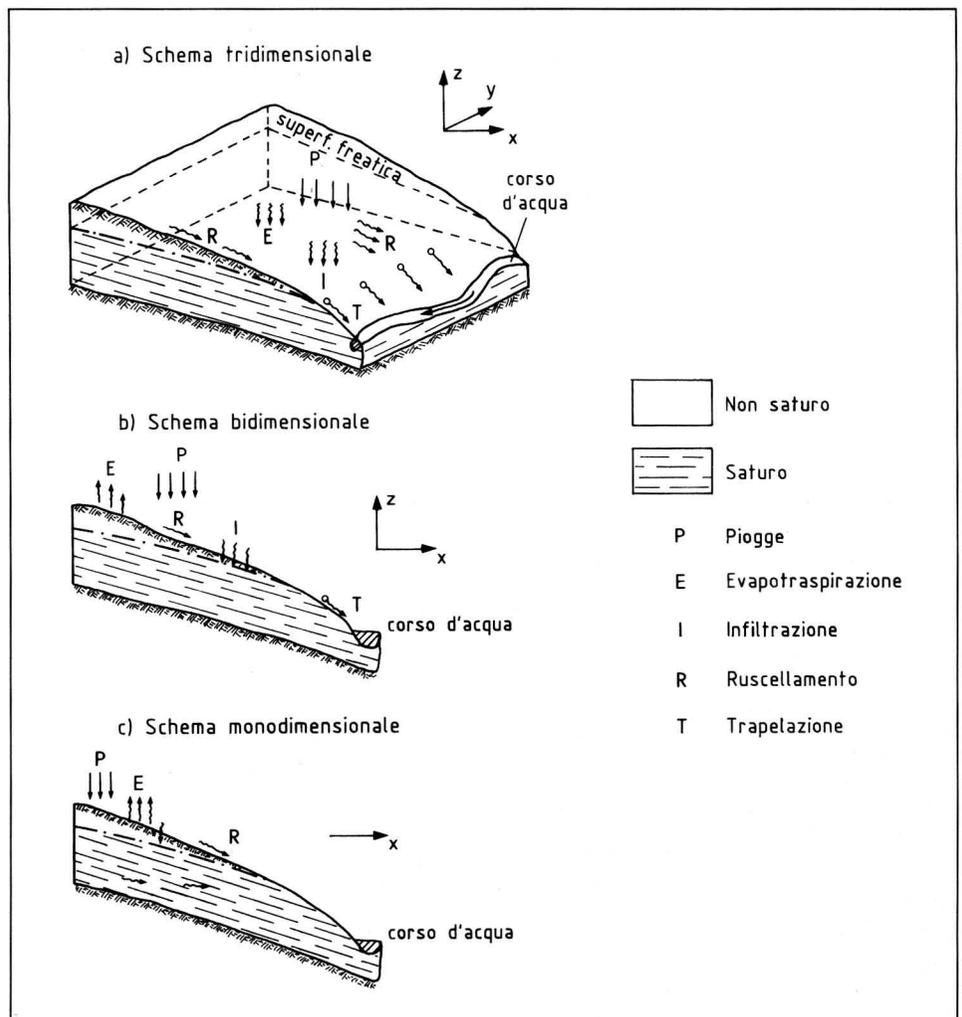


Figura 2 - Schematizzazioni di alcuni modelli completi di versante (da Cascini e Versace, 1986, modificata).

quando si matura una conoscenza globale del comportamento dei terreni costituenti il pendio. In particolare, solo di rado è possibile acquisire dati che permettano di ricostruire le modalità di deflusso superficiale e sotterraneo, focalizzando, in questo secondo caso, l'attenzione sulla filtrazione sia nella zona satura che in quella non satura, ricostruendo le modalità di circolazione della falda idrica. Inoltre risulta spesso difficile ricostruire l'effetto indiretto dovuto alle precipitazioni, connesso all'azione delle acque fluenti, in particolare al piede del versante, legato anche alla morfologia del territorio a monte del versante in studio.

Qualora siano indisponibili dati di natura geotecnica e idrogeologica tali da permettere la definizione di modelli completi di versante, preziose indicazioni vengono fornite dai modelli idrologici (Cascini e Versace, 1986). Si tratta generalmente di modelli empirici di analisi della relazione precipitazioni-frana. L'applicazione di tali modelli risulta economica, in quanto non richiede indagini di campagna, e laboriosa, prevedendo la raccolta e l'analisi di una grande quantità di dati.

Taluni autori (Simeone, 1992) suggeriscono

di studiare le infiltrazioni efficaci ottenute depurando le piogge effettive dall'aliquota del ruscellamento e dell'evapotraspirazione, nell'ottimistico tentativo di determinare, per via indiretta, le variazioni piezometriche dovute alle acque piovane infiltratesi nel sottosuolo.

La determinazione giornaliera dell'evapotraspirazione e del ruscellamento è possibile mediante numerose formule che, spesso, sono state definite per ambienti particolari, affatto mediterranei, e che comunque richiedono dati difficilmente disponibili in serie giornaliere pluridecennali. D'altra parte, considerare un passo temporale non giornaliero e maggiore, ad esempio mensile, impedisce di fatto di valutare gli effetti dell'estrema variabilità dei fenomeni meteorici e di ricarica. Comunque, la stima del ruscellamento alla scala del singolo versante, influenzato dalla trapelazione e dai piccoli invasi formati sulla superficie del terreno, richiede un'intima conoscenza della morfologia e del ruolo della copertura vegetale, nell'arco di tempo, in genere quasi secolare, che si considera in questi studi. Infine, la conoscenza indiretta delle infiltrazioni efficaci, afflitta dalle suddette incertezze è cosa

**Tabella 1** I coefficienti  $G_n$  e  $Y_n$  per le cumulate di Castronuovo S.A. (CSA) e Agrigento (A).

Sito	1	5	10	20	30	60	90	120	180
$G_n$ CSA	0,82	0,40	0,96	0,85	1,11	1,20	1,20	0,88	0,78
$G_n$ A	4,21	3,01	2,19	1,52	1,41	1,16	1,16	1,24	1,23
$Y_n$ CSA	2,3	2,1	2,3	2,4	2,3	2,3	2,3	2,1	2,0
$Y_n$ A	8,8	5,3	4,3	3,3	2,7	2,3	2,0	1,9	2,1

**Tabella 2** Fattore di forma K per le cumulate di Castronuovo S.A. (CSA) e di Agrigento (A).

Sito	1	5	10	20	30	60	90	120	180
K CSA	-0,06	0,05	-0,05	-0,03	-0,11	-0,13	-0,09	-0,03	0,03
K A	-0,34	-0,16	-0,10	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,06

ben diversa della conoscenza delle oscillazioni piezometriche, essendo queste dovute alle infiltrazioni ma condizionate dai meccanismi di circolazione idrica in mezzi saturi e non, nonché dal drenaggio stesso del corpo acquifero. Ne consegue che lo studio delle infiltrazioni efficaci non solo non aggiunge elementi conoscitivi ma determina delle variabili afflitte da "rumori" di difficile eliminazione o comprensione.

Tale approccio presenta, quindi, difficoltà pratiche generalmente insormontabili; qualora le si ignorino, tale approccio fornisce prestazioni, in termini di qualità del risultato, di discutibile pregio. Si dovrà, comunque, considerare che gli studi sulle relazioni tra acque superficiali e sotterranee possono fornire elementi utili se condotti sulla base di una dettagliata conoscenza idrogeologica (Polemio e Ricchetti, 1991) e solo se formulati per ambienti idrologici e idrogeologici sicuramente affini a quelli del versante di interesse (Simeone, 1992).

Lo studio delle piogge effettive, direttamente misurabili, condotto mediante cumulate che coprano un ampio spettro temporale, tanto ampio da descrivere per intero i periodi di deficit idrico, fornisce variabili più semplici, in cui l'effetto sulle oscillazioni piezometriche può essere dedotto, determinando per ciascun caso, ovvero per le specifiche condizioni climatiche e geologiche, quale, delle variabili cumulate, può avere significatività nello studio delle relazioni tra le recenti vicende climatiche e le frane.

I modelli idrologico-statistici studiano il carattere di eccezionalità dell'evento meteorico associabile alla frana mediante lo studio dei massimi valori assunti dalla variabile idrologica prescelta. Nel caso di fenomeni di instabilità superficiali, l'intervallo di tempo considerato per definire la variabile idrologica, espressa in termini di intensità di pioggia, è in genere molto breve, al più alcuni giorni, mentre copre periodi anche di 180-360 giorni, mediante le cumulate di

pioggia, nel caso di mobilitazioni di corpi franosi potenti alcune decine di metri.

Il carattere d'eccezionalità dell'evento pluviometrico associato alla frana si può esprimere, grazie a tali modelli, in termini di tempo di ritorno. Tale risultato permette di stabilire con quale ciclicità statistica il pendio è stato soggetto a condizioni idrologiche analoghe a quelle esaminate.

La disponibilità di notizie storiche su precedenti mobilitazioni del corpo franoso permette d'approfondire la conoscenza della relazione causa-effetto. Comunque, qualora l'influenza delle precipitazioni sia accertata, la determinazione del tempo di ritorno può divenire un utile strumento di prevenzione, specie se associato alla individuazione di «soglie idrologiche» di allarme.

Su aree limitate, a rilevante valore socioeconomico, come quelle urbanizzate, si può pervenire così alla definizione di un semplice strumento di prevenzione e allarme, di cui il nucleo potrebbe essere una stazione intelligente di monitoraggio in continuo dei parametri termopluviometrici. A tale fine, un approccio estremamente semplice è quello basato sulla definizione del *coefficiente di precipitazione critica* (Capecchi e Focardi, 1988). Tale coefficiente, adimensionale, è funzione sia delle vicende pluviometriche antecedenti il giorno in esame che delle piogge estreme verificatesi in passato; in tal modo gli autori definiscono una grandezza che, in ambienti idrogeologici simili, caratterizzati da permeabilità medio-alte, permette di valutare indirettamente la pericolosità dei fenomeni meteorici verificatisi o in corso.

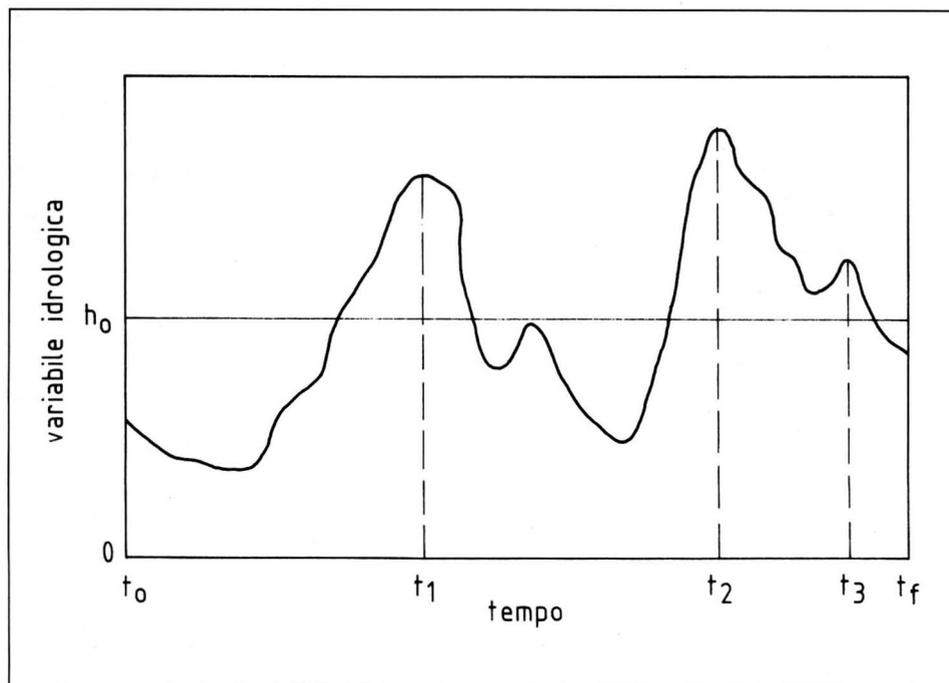
Analisi idrologiche condotte su aree geografiche estese hanno invece permesso di stabilire quale sia la probabilità che si verifichino frane o quale sia la densità per unità di superficie di queste, in occasione di differenti fenomeni pluviometrici (Fukuoka, 1980).

L'approccio idrologico-statistico allo studio delle relazioni piogge-frane conduce alla ricerca del valore massimo assunto da una variabile indipendente. Tale problema è comune ad altre disparate discipline; nel settore ingegneristico viene tradizionalmente trattato per la previsione delle portate fluviali di piena, di assegnato tempo di ritorno.

## La statistica dei valori estremi

Cronologicamente, i primi uomini di scienza ad occuparsi dello studio dei valori estremi sono stati gli astronomi, mossi dalla necessità di verificare la significatività delle osservazioni di presunti corpi celesti di grandezza apparentemente rilevante (Kinnison, 1985).

La storia recente della statistica dei valori estremi inizia intorno al 1920. I primi studi finalizzati ad applicazioni ingegneristiche si devono a Gumbel (1958). La funzione di distribuzione della probabilità definita da Gumbel per lo studio delle piene fluviali ha trovato vastissima applicazione in diversi



**Figura 3** - Esempio di individuazione di 3 valori superiori alla soglia  $h_0$  nell'intervallo di tempo  $t_0$   $t_f$

campi, fino ai nostri giorni.

La scelta di quale sia la funzione di distribuzione della probabilità, nota come *parent distribution*, da adottare per determinare il carattere di eccezionalità dell'evento meteorico associabile ad un evento di frana, assume un ruolo determinante per l'attendibilità del risultato. Tale problema, di natura prettamente statistica, è stato continuamente affrontato negli ultimi 30 anni, permettendoci oggi di descrivere la variabilità delle manifestazioni idrologiche mediante numerose funzioni, che ben si adattano ad essere utilizzate a seconda delle peculiarità delle variabili idrologiche e dell'estensione del campione di dati disponibili.

Il primo tipo di approccio, ispirato in origine da Gumbel, consiste nel considerare solo i massimi della variabile, verificatasi in un assegnato intervallo di tempo, generalmente un ciclo idrologico, più spesso, per semplicità, un anno.

Il secondo esamina tutti gli eventi che superano un'assegnata soglia non nulla e non piccola, fissata a priori; di tali eventi si considerano i valori costituenti i massimi, relativi o assoluti che siano.

Nel primo caso si potrà contare su un campione di dati costituito da tanti elementi quanti sono gli anni di osservazione, nel secondo il numero varierà di anno in anno. I risultati conseguiti per via di uno dei due approcci conduce sovente a relazioni simili a quanto altrimenti determinato.

Indipendentemente dal metodo seguito, lo sforzo degli studiosi è stato spesso diretto alla definizione di funzioni in grado di recepire le peculiarità della popolazione, di cui il campione di dati disponibili è l'unico rappresentante a noi noto.

#### La funzione GEV (Generalized Extreme Value)

Nel 1955 Jenkinson formula una soluzione generale all'equazione di Fisher e Tippet (1928), di cui la funzione di Gumbel è un caso particolare. A differenza di questa, a due parametri, la funzione  $F(x)$  definita da Jenkinson, oramai nota come GEV, è univocamente definita dai parametri di scala ( $a$ ), di posizione ( $e$ ) e di forma ( $K$ ):

$$F(x) = \exp\{-[1 - K(x - e)/a]^{1/K}\}, \text{ con } K \neq 0;$$

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x - e)/a]\},$$

con  $K=0$  (funzione di Gumbel).

Modelli basati sui valori superiori ad una soglia

Secondo tale approccio si considera l'intero diagramma cronologico degli eventi idrologici in studio, da tale serie continua si selezionano i massimi  $b_i$ , con  $i=1, 2, \dots, K$ , tra loro indipendenti, superiori alla soglia  $b_0$  (Fig. 3).

Anno per anno si verificano un numero variabile  $K$  di casi significativi.  $K$  costituisce

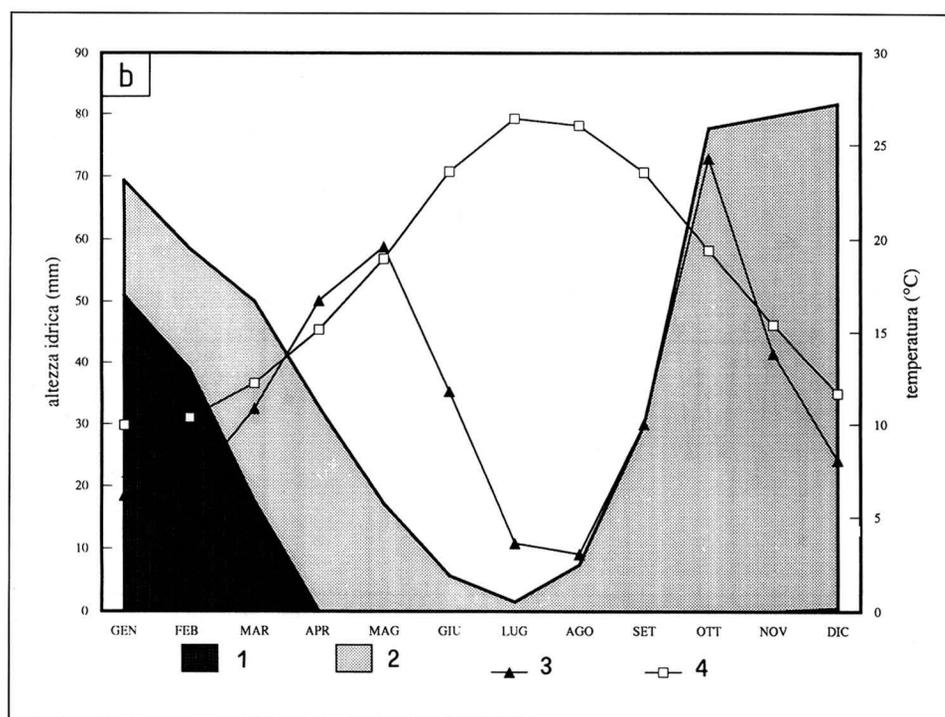
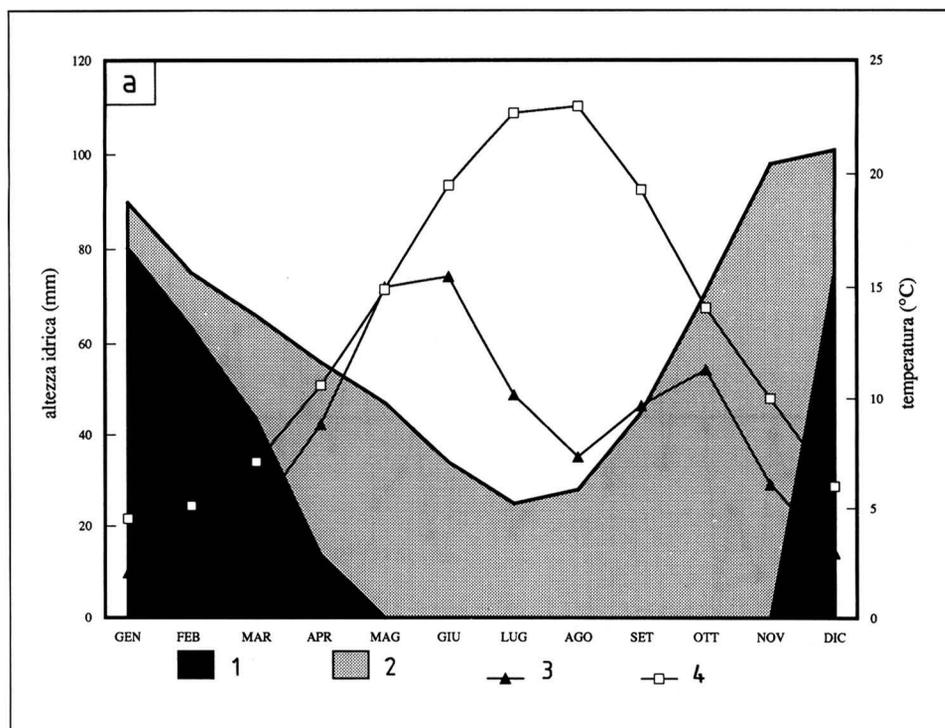


Figura 4 - Bilancio idrologico relativo al territorio di (a) Castronuovo S. Andrea e di (b) Agrigento: (1) surplus idrico; (2) precipitazione meteorica; (3) evapotraspirazione reale; (4) temperatura.

una variabile casuale che, se distribuita secondo la legge di Poisson, permette di stabilire, mediante la funzione  $F_b$  di distribuzione della probabilità della  $b_i$ , nell'ipotesi che la soglia  $b_0$  sia sufficientemente elevata, la funzione  $F_x$  relativa al massimo annuale:

$F_x(x) = \exp\{-\Lambda[1 - F_b(x)]\}$ , con  $x > b_0$ ; dove  $\Lambda$  è il parametro del processo poissoniano. Le potenzialità di tali metodi sono state più volte evidenziate, accertando la validità del metodo indipendentemente dal valore assunto dalla soglia, al limite assumibile pari a zero.

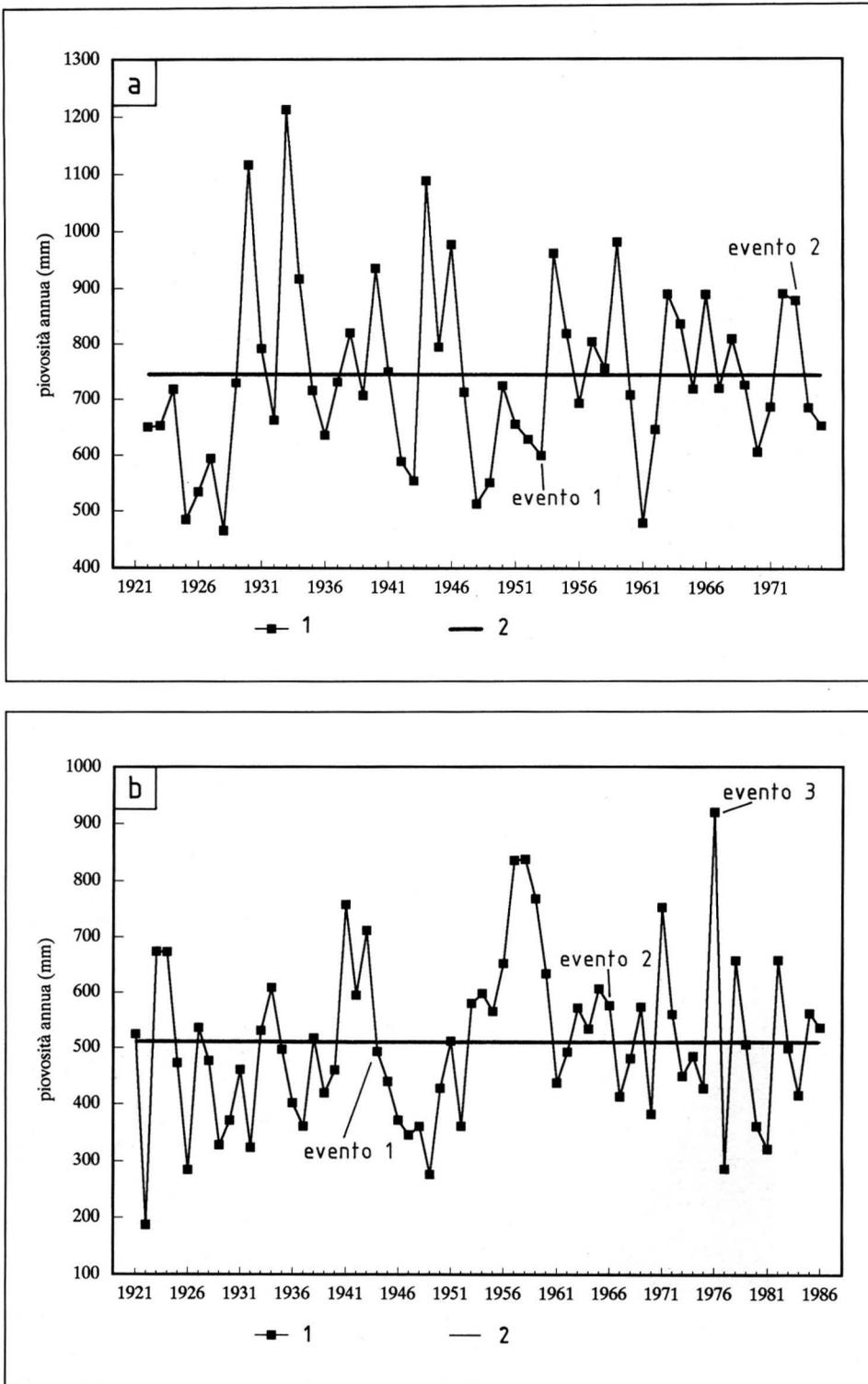


Figura 5 - Piovosità negli ultimi 60 anni a (a) Castronuovo S. A. e ad (b) Agrigento: (1) piovosità annua; (2) piovosità media nel periodo.

La condizione di separazione e la sovrapposizione delle funzioni di distribuzione della probabilità

Matalas et al. (1975) hanno evidenziato che le tradizionali funzioni di distribuzione delle probabilità non permettono di giustificare la forte variabilità del coefficiente di asimmetria che si riscontra per serie di dati rile-

vati in aree idrologicamente omogenee. Questa circostanza è dovuta all'incapacità di tali funzioni di distribuzione di soddisfare la *condizione di separazione*. La condizione si manifesta mediante il rilevamento di pochi valori, tanto eccezionali e tanto significativamente più grandi degli altri da sembrare statisticamente separati dai restanti (a meno dei possibili errori dipendenti dalle

misure). Tali valori sono noti come *outliers*, ovvero come *estranei*.

Per recepire tale effetto, particolarmente fastidioso perché in grado di limitare l'attendibilità delle elaborazioni proprio nel campo in cui si raccolgono i valori più eccezionali, furono inizialmente studiate distribuzioni empiriche quali quelle note come Wakeby (Houghton, 1978) e Lambda (Henriques, 1981). L'approccio teorico prevede il ricorso a distribuzioni di probabilità definite mediante la sovrapposizione di due o più distribuzioni, ciascuna relativa ad una sola popolazione riconoscibile. In tal caso si tratta di una «miscela» di tipiche distribuzioni applicate allo studio dei valori estremi.

Il problema si riconduce all'uso di consuete distribuzioni di probabilità, con l'unica condizione che la somma dei pesi  $P_i$  assegnati a ciascuna distribuzione, pari alla probabilità che un determinato caso rappresenti l'una o l'altra popolazione, sia uguale a uno.

*Funzione TCEV (Two Component Extreme Value)*

Un esempio di tali funzioni è rappresentato dalla funzione di distribuzione della probabilità definita mediante un modello a doppia componente (Rossi et al., 1984). Vista la complessità dell'argomento, rimandando all'ampia bibliografia derivata dal suddetto lavoro (Arnell e Gabriele, 1988), si consideri che la TCEV nasce dalla sovrapposizione di due funzioni studiate mediante due distinte soglie  $b_1$  e  $b_2$ , applicate alla stessa serie di dati. Si avrà così che:

$$Fb(b) = p_1 \times F_{b,1}(b) + p_2 \times F_{b,2}(b);$$

$$\text{con } p_1 + p_2 = 1.$$

La  $F_{b_2}(b)$  nasce per rappresentare quella popolazione di estranei, un tempo in grado di sfuggire alle nostre capacità descrittive del fenomeno. A tal fine, le soglie prescelte saranno tali che  $b_2 > b_1$ ; di conseguenza gli eventi significativi per la  $F_{b_2}(b)$  saranno più rari, di conseguenza la componente  $F_{b_2}(b)$  della  $F_b(b)$  è definita straordinaria o secondaria. Il caso limite che può verificarsi è che per un assegnato tempo di ritorno, non elevato, tale componente sia nulla.

Applicando tale distribuzione e ipotizzando che la singola variabile idrologica sia distribuita in modo esponenziale, si dimostra che la TCEV è equivalente al prodotto di due funzioni del tipo di Gumbel.

### Metodologia

Dal punto di vista teorico, quanto più aumenta il numero di parametri delle parent distribution utilizzate, tanto più strettamente si rappresenta il fenomeno studiato. D'altra parte, il numero limitato di dati disponibili rende le funzioni sempre più imprecise e inefficienti al crescere del numero di parametri; inoltre crescono le difficoltà connesse alla determinazione del valore dei parametri stessi (Rossi et al., 1984). Si dovrà quindi procedere per gradi, valutando l'attendibilità del risultato.

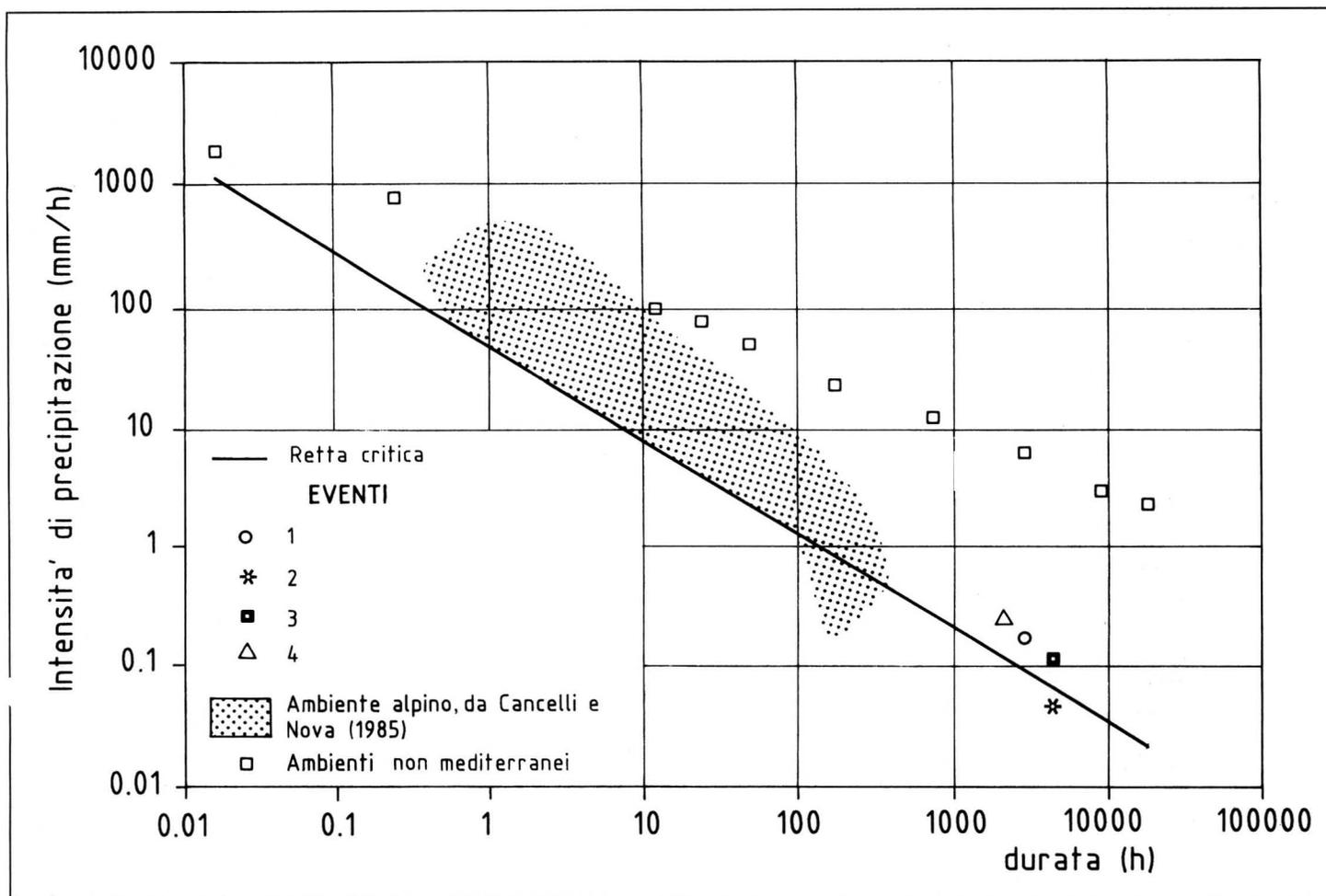


Figura 6 - Relazione tra intensità e durata degli eventi meteorologici verificatisi contemporaneamente a frane: (1) Castronuovo S. Andrea, evento 2; Agrigento, (2) evento 1, (3) evento 2, (4) evento 3.

L'uso della funzione GEV, a tre parametri, è ormai molto diffuso e sostituisce quello della funzione di Gumbel, ma è di limitata efficacia nei casi in cui si manifesti la condizione di separazione. In tali casi si giustifica il ricorso alle miscele di funzioni quali la TCEV.

A fronte del crescente onere di calcolo, quest'ultimo tipo di funzione permette di condurre uno studio a carattere regionale, potendo così evidenziare eventuali caratteri di omogeneità della variabile studiata, in zone e sottozone della regione in studio.

La stima dei quattro parametri del modello TCEV, basata su una singola serie di dati, induce una grande incertezza, soprattutto per quanto riguarda i parametri della componente straordinaria. L'incertezza diventa estremamente elevata per una serie che non presenti outliers. Per tale ragione, in tali casi si ripiega su modelli che utilizzino meno parametri, in un certo senso più rigidi, quali i modelli GEV. Rossi et al. (1984) suggeriscono di verificare l'esistenza di dati estranei mediante il calcolo di due coefficienti statistici.

Indicato con  $G$  il coefficiente di asimmetria, sia  $G_n$  quello del campione di dati  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , sicché:

$$G_n = n^{1/2} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{3/2}},$$

$$\text{con } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}.$$

Si determina così un valore che, nel caso di distribuzioni con asimmetria positiva, è molto sensibile all'andamento della coda destra della distribuzione stessa, ove si collocano i casi più rari.

Il coefficiente  $G_n$  assume valori in un intervallo che è funzione solo del numero  $n$  di dati costituenti il campione; i limiti sono pari a:

$$g_{1/2} = \pm(n-2) / (n-1)^{0.5};$$

nel caso della funzione di Gumbel, il valore teorico di  $G$  è pari a 1,14.

Ordinati e numerati in senso crescente gli  $n$  dati disponibili  $X_i$ , in modo che  $X_n$  sia il più grande, si può calcolare  $Y_n$ :

$$Y_n = (X_n - \varepsilon) / \Theta;$$

con  $\varepsilon$  e  $\Theta$  pari alle stime dei due parametri delle funzioni di Gumbel.

L'esame (positivo per  $Y_n > 7$ ) dei valori  $G$  e  $Y_n$  ottenuti, permette di concludere sull'opportunità di ricorrere a distribuzioni sensibili alla condizione di separazione. Applicando la *forward selection rule*, ovvero ignorando progressivamente gli  $i$  estranei individuati e ricalcolando  $G_{n-i}$  e  $Y_{n-i}$ , si può determinare il numero degli estranei presenti (Rossi et al., 1984).

## I casi studiati

Lo studio delle relazioni tra precipitazioni e frane trova riscontro in alcuni casi di fenomeni franosi verificatisi nel territorio di Agrigento in Sicilia (Polemio e Dragone, 1992) e in quello di Castronuovo Sant'Andrea (PZ) in Basilicata (D'Ecclesiis et al., 1991).

Le condizioni climatiche vigenti in entrambi i siti sono determinate dal regime delle precipitazioni, di tipo marittimo o mediterraneo, e da quello delle temperature, di tipo moderato (Fig. 4).

La significativa piovosità annua (736 mm) e la non elevata temperatura (13,1°C) giustificano per Castronuovo S. A. sia il tipo di clima, secondo Thornthwaite definibile da umido a subumido, con efficienza termica da secondo mesotermico e con elevata concentrazione estiva (maggiore dell'88%), che il surplus idrico, pari a 278 mm, concentrato tra dicembre e marzo (Fig. 4a). Invece, la modesta piovosità annua e l'elevata temperatura media determinano ad Agrigento un clima semiarido, con efficienza termica da terzo mesotermico e con elevata concentrazione estiva, con un surplus idrico annuo di 108 mm, distribuito da dicembre a marzo (Fig. 4b).

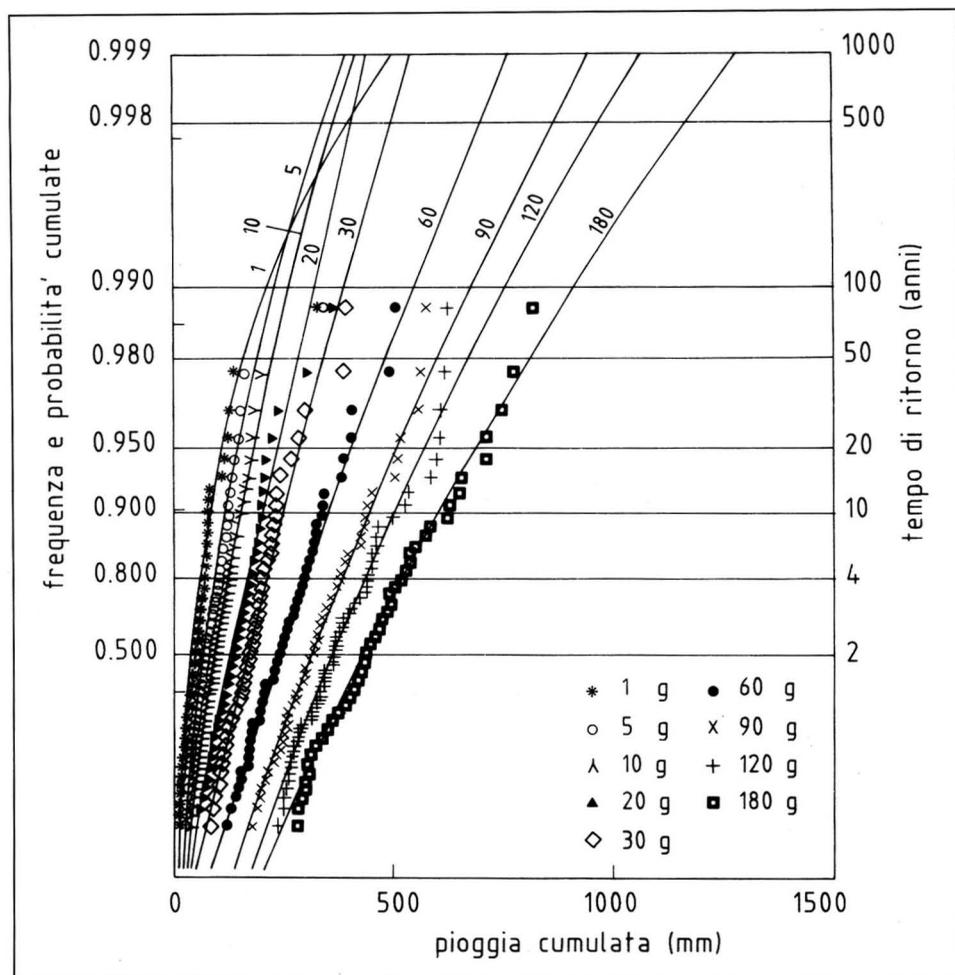


Figura 7 - Frequenza cumulata e probabilità cumulata secondo la distribuzione GEV delle cumulate per 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, e 180 giorni di Agrigento.

L'assetto morfologico del territorio suburbano di Castronuovo S. A. è di tipo appenninico: versanti acclivi disposti in modo da tracciare incisioni strette e profonde, esaltate da brusche variazioni morfologiche indotte dalle frane e dall'attività tettonica recente (D'Ecclesiis et al., 1991).

In loco, il ciclo sedimentario pleistocenico del Bacino di S. Arcangelo si manifesta con le formazioni note come: Sabbie di Aliano, Conglomerati di Castronuovo e Sabbie e Conglomerati della Serra Corneta. La prima formazione è costituita principalmente da sabbie giallastre a grana fine, talvolta limose, ben addensate. Le restanti due formazioni, generalmente sovrastanti alle Sabbie di Aliano, sono costituite da conglomerati poligenici e presentano una significativa variabilità granulometrica in funzione della posizione. Entrambe le frane considerate hanno corpo costituito da terreni afferenti a tali due formazioni. L'intera area, interessata da una regolare monoclinale, appare intensamente afflitta da fratture e faglie disposte secondo due principali direttrici tettoniche. Nel territorio di Castronuovo S. A. sono stati considerati due eventi di pioggia-frana: il primo, verificatosi il 7/7/53, è associato a una frana di primo distacco mentre il secondo,

verificatosi l'1/4/1973, è sostanzialmente legato a una rimobilizzazione del versante. In entrambi i casi si è verificato uno scorrimento rototraslazionale profondo a dispetto di una piovosità annua per niente (evento 1) o appena significativa (evento 2, Fig. 5a). Già nel 1921, Crinò aveva evidenziato come in Sicilia il peculiare alternarsi di periodi aridi a stagioni molto piovose induce una forte relazione tra piogge e frane. Diverse frane, nel corso del secolo, si sono verificate ad Agrigento: il 28/2/1944 (evento 1), il 19/7/1966 (evento 2) e il 25/12/1976 (evento 3); inoltre, due frane, verificatesi nel corso del gennaio 1907 e del gennaio 1919 (Crinò, 1921), precedute da piogge, sono note ma non sufficientemente per essere trattate in questa sede. In taluni anni la piovosità è stata tale da determinare ad Agrigento delle vere e proprie alluvioni, come accaduto sul finire del 1976 (Agnesi, 1989), nel corso del quale si è verificato l'evento 3, l'unico occorso in un anno particolarmente piovoso (Fig. 5b).

L'interesse per tale caso di studio è enfatizzato dal pregevole valore storico e artistico dell'area. Da tempo, infatti, anche l'importante sito archeologico della Valle dei Templi è afflitto dall'instabilità dei versanti che

lo delimitano (Croce et al., 1988).

L'assetto morfologico ivi è caratterizzato da scarpate subverticali orientate parallelamente ad allineamenti tettonici e dal reticolo idrografico spesso marcatamente rettilineo e subseguente alle direzioni tettoniche.

L'area di interesse sorge su un ampio terrazzo morfologico caratterizzato, dal basso verso l'alto, dalla presenza della Formazione di M. Narbone e della Formazione di Agrigento.

La prima formazione è essenzialmente argilloso-marnosa mentre la seconda è costituita da un basamento argilloso di colore grigio-azzurro che verso l'alto e, talora, lateralmente, passa a calciruditi bioclastiche in matrice sabbiosa, in varia misura cementate.

L'attività tettonica ha determinato la presenza di un reticolo di fratture, nelle porzioni superiori della successione di Agrigento, caratterizzate da litotipi a comportamento rigido.

In entrambi i casi la presenza di falde sotterranee, sia pure effimere, lo stato di fratturazione conseguente la tettonica, la rapida ablazione dei detriti di falda posti al piede dei pendii, nonché il complessivo grave stato di disordine idraulico, sono fattori determinanti per le condizioni di stabilità dei versanti.

L'applicazione è stata strutturata in tre parti fondamentali: la raccolta dei dati elementari disponibili, la loro trasformazione in variabili idrologiche significative e l'interpretazione dei risultati statistici.

In numerosi casi noti in bibliografia in cui è stato accertato il legame causa-effetto tra precipitazioni e frana hanno permesso di individuare relazioni empiriche tra il carattere del fenomeno meteorico, caratterizzato dai parametri di intensità di pioggia e della cumulata (Fukuoka, 1980) oppure dall'intensità e dalla durata (Cancelli e Nova, 1985), e l'evento di frana.

Nel secondo caso si verifica che la relazione tra intensità  $i$  e durata  $t$  è del tipo:

$$i = a \times t^b;$$

con  $a$  e  $b$  opportuni coefficienti.

Di questo stesso tipo è la funzione  $i = f(t)$ , rappresentata in scala bilogarithmica in Fig. 6; la funzione, definita da Cancelli e Nova (1985) mediante numerosi casi verificatisi in un ambiente definibile alpino, delimita inferiormente il semipiano dei punti  $(h, t)$  critici, cioè rappresentativi di eventi meteorici in grado di determinare delle frane. I casi relativi ad ambienti non mediterranei rappresentano eventi record registrati in climi diversi dai nostri. Essi individuano chiaramente una diversa  $f(t)$ , espressione di differenti condizioni climatiche; i casi raccolti descrivono una relazione grossomodo lineare tra le due variabili  $i$  e  $t$ , rappresentate nel piano bilogarithmico (D'Ecclesiis et al., 1991). Tale circostanza permette di ipotizzare che questa relazione, restando lineare, sia diversa in funzione delle condizioni geomorfo-

logiche e, soprattutto, climatiche.

L'evento 2 studiato da D'Ecclesiis et al. (1991) mostra una significativa influenza delle piogge; viceversa, l'evento 1, qualunque siano le variabili idrologiche scelte, è risultato rappresentativo da un punto tanto sottostante la retta critica da non essere rappresentabile in Fig. 6.

Per quanto attiene ai tre eventi di Agrigento, si può ipotizzare preliminarmente che l'esistenza di una relazione tra precipitazioni meteoriche e frane si affievolisce al passare dall'evento 3 all'1 e da questo al 2. Confortati da tali primi risultati, sono state calcolate le variabili  $PC_n$ , piogge cumulate per  $n$  pari a 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 giorni consecutivi, utilizzando le piogge giornaliere relative a tutto il periodo di osservazione.

I dati relativi alle nuove variabili statistiche  $PC_n$  sono stati calcolati secondo la seguente relazione:

$$PC_{n,j} = \sum_{i=j-n+1}^j P_i$$

con  $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180$ ;

dove:

$j$  = numero progressivo dei  $Z$  giorni che compongono il periodo di rilevazione, può essere pari a 1, 2, ...,  $Z$ ;

$P_i$  rappresenta l'altezza di precipitazione verificatasi l'iesimo giorno del periodo di osservazione.

Dalle serie di dati così generate sono stati estratti, anno per anno, i valori massimi. I valori calcolati di  $G_n$  avrebbero potuto assumere valori nell'intervallo (-7; 7) per Castronuovo S.A. ( $n=52$ ) e (-8, 8) per Agrigento ( $n=65$ ) (Tab. 1).

Nei casi esaminati  $G_n$  è risultato sempre positivo, come accade generalmente per i valori estremi delle variabili idrologiche. Il coefficiente  $G_n$  è risultato molto prossimo al valore teorico valido per la funzione di Gumbel per diverse cumulate relative a Castronuovo S.A. e ad Agrigento. Considerando anche  $Y_n$ , si può concludere che solo la variabile cumulata per 1 giorno di Agrigento presenta, perlomeno, un elemento estraneo (Rossi et al., 1984). Tale effetto è dovuto allo straordinario evento meteorico verificatosi il 28/9/1971, in cui caddero 336,8 mm di pioggia. Tale valore costituisce il massimo assoluto di tale variabile ed è inferiore rispettivamente solo di 13,4, 32,2, 51,4 e 55,6 mm ai massimi delle cumulate per 5, 10, 20 e 30 giorni, registrati sempre in un periodo che include il 28/9/1971.

Quindi, come confermato nel seguito, la straordinaria eccezionalità dell'evento verificatosi il 28/9/1971 determina la condizione di separazione, almeno per la variabile cumulata per 1 giorno. Tale circostanza riveste però un significato statistico che non è rilevante, per quanto si dirà, nel caso in esame, per le relazioni tra piogge e frane. Le funzioni di distribuzione della probabilità delle cumulate sono state determinate applicando il metodo PWM (Probability

Weighted Moments) alla funzione GEV (Greenwood et al., 1979). Il fattore di forma  $K$  ha spesso assunto valori negativi, come consueto in queste applicazioni, e prossimi a zero (Tab. 2).

Il confronto grafico, tra le funzioni di probabilità individuate e le frequenze dei valori misurati, rappresentato nel caso di Agrigento, permette di valutare l'attendibilità della metodologia applicata (Fig. 7). Il confronto si dimostra infelice solo nel caso di Agrigento e in relazione al caso rilevato più raro, in particolare per le cumulate fino a 20 giorni. Tale circostanza è essenzialmente legata all'evento estraneo segnalato in precedenza.

A causa della presenza di outliers, l'applicazione della GEV al caso di Agrigento fornisce risultati di limitata attendibilità nelle applicazioni in cui il tempo di ritorno ecceda circa i 50 anni. In tali casi l'uso della GEV, rispetto a funzioni sensibili alla condizione di separazione, induce generalmente alla sottostima dell'entità della cumulata per un assegnato tempo di ritorno, viceversa, assegnato un valore di cumulata, il tempo di ritorno risulta sovrastimato. Comunque, nelle applicazioni in esame non si è verificato il caso suddetto, non giustificando il ricorso a funzioni più complesse della GEV.

## Conclusioni

Lo studio ha evidenziato la complessità e la diversità dei fenomeni che regolano gli effetti delle precipitazioni meteoriche sulla stabilità dei versanti, individuando le caratteristiche principali degli eventi meteorici potenzialmente significativi in relazione al tempo di frana.

La necessità di disporre di elementi conoscitivi che prescindano dalla dettagliata conoscenza geotecnica e idrogeologica del versante induce a valorizzare metodi empirici quali quelli idrologico-statistici. Inquadrate in un quadro storico le attuali conoscenze circa lo studio dei massimi valori assunti da una variabile idrologica, è stata proposta una metodologia riferita al caso particolare dello studio delle cumulate delle piogge in relazione alle frane.

Due casi pratici, relativi alla stabilità dei versanti di Castronuovo S.A. e Agrigento, hanno fornito risultati significativi. Nel caso di Castronuovo S.A., la bassa ciclicità statistica dell'evento pluviometrico associato alla frana del 1973 (tempo di ritorno pari a circa 5 anni), accertata con la metodologia proposta, ha consentito al geomorfologo di rivalutare il ruolo svolto dalle lente e progressive modificazioni morfologiche che hanno condotto il versante all'instabilità (D'Ecclesiis et al., 1991). La frana del 1976 di Agrigento è stata l'unica di quelle studiate indotta essenzialmente da un rilevante fenomeno meteorico, la cui eccezionalità si esprime mediante un tempo di ritorno di circa 25 anni. ●

## Bibliografia

- Almagià R. (1910): *Studi geografici sulle frane in Italia*. Società Geografica Italiana, Vol. XIV, Roma.
- Arnell M. W. e Gabriele S. (1988): *The performance of the Two Component Extreme Value distribution in regional flood frequency analysis*. Water Resour. Res., 24(6), pp. 879-887.
- Cancelli A., Nova R. (1985): *Landslides in soil and debris cover triggered by Valtellina (Central Alps-Italy)*. Pro. IV int. Conf. and field workshop on landslides, Tokyo.
- Capecchi F., Focardi P. (1988): *Rainfall and landslides: research into a critical precipitation coefficient in an area of Italy*. Pro. V Simposium ISL, 1131-1136, Lossanna.
- Cascini L., Versace P. (1986): *Eventi pluviometrici e movimenti franosi*, Agi, XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna 14-16 maggio.
- Crinò S. (1921): *Distribuzione geografica delle frane in Sicilia e periodi di maggiore frequenza dei franamenti*. L'Universo, II, 6, pp. 421-466, Firenze.
- Croce A., De Miro E., Fenelli G. B., Liguori V., Morandi R., Nocilla N., Pace E., Pellegrino A., Rossi Doria P. (1980): *La città di Agrigento e la valle dei Templi. Questioni di stabilità del territorio e di conservazione dei monumenti*. XIV Convegno nazionale di Geotecnica, 28-31 ottobre, Firenze, pp. 109-124.
- D'Ecclesiis G., Grassi D., Merenda L., Polemio M., Sdao F. (1991): *Evoluzione Geomorfologica di un'area suburbana di Castronuovo S. Andrea (PZ) ed incidenza delle piogge su alcuni movimenti di massa*. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol XXVI, Bari.
- Fisher R. A., Tippett L. H. C. (1928): *Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample*. Proc. Camb. Phil. Soc., 24, pp. 180-190.
- Fukuoka M. (1980): *Landslides associated with rainfall*. Geotechnical Engineering, Vol II, pp. 1-29.
- Govì M., Mortara G., Sorzara P. F. (1985): *Eventi idrologici e frane*. Geol. Appl. e Idrogeol. Vol XX, P. II, Bari.
- Greenwood J. A., Lamowehr J., Wallis M. C. e J. R. (1979): *Probability weighted moments: definition and their relation to parameters of several distributions expressible in inverse form*. Water Resour. Res., 15(5), pp. 1049-1054.
- Gumbel E. J. (1958): *Statistics of extremes*, Columbia University Press, New York.
- Henriques A. G., (1981): *Modeling flood frequency relations using lambda distribution*. Memo 549, 121 pp., Lab. National de Engenharia Civic - Lisbon.
- Houghton J. C., Birth of a parent (1978): *The Wakeby distribution for modeling flood flow*. Water Resour. Res., 14(6), pp. 1105-1109.
- Jenkinson A. F. (1955): *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.
- Kimmison R. R. (1985): *Applied extreme value statistics* Macmillan Publishing Company a Division of Macmillan, Inc. New York. Collier Macmillan Publishers, London.
- Matalas N. C., Slack J. R., Wallis J. R. (1975): *Regional Skew in Search of a Parents*. Water Resour. Res., Vol 11, No. 6.
- Polemio M., Dragone V. (1992): *Studio idrologico del ruolo delle precipitazioni meteoriche nei fenomeni di instabilità dei versanti*. Rapporto tecnico interno, CNR - CERIST, Bari.
- Polemio M., Ricchetti E. (1991): *Caratteri idrogeologici dell'acquifero della piana costiera di Metaponto*. Atti del I Conv. dei giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Ricerca scientifica ed educazione permanente, 93, 417-427, 22-23 ottobre 1991, Gargano (BS).
- Polloni G., Ceriani M., Lauzi S., Padovan N., Crosta G. (1991): *Rainfall and soil slipping events in Valtellina*. Landslides, 183-188, Balkema, Rotterdam.
- Rossi F., Fiorentino M. e Versace P. (1984): *Two Component Extreme Value distribution for flood frequency analysis*. Water Resour. Res., 20(7), pp. 847-856.
- Simeone V. (1992): *Piogge e frane in Basilicata*. Atti del II Conv. dei giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Geologica Romana, Viterbo.