

Un nuovo metodo
basato sull'analisi
statistica dei dati storici

**Massimiliano Barbolini,
Federica Cappabianca**

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e
Ambientale, Università di Pavia
Via Ferrata, 1 - 27100 Pavia
e-mail: massimiliano.barbolini@unipv.it

Distanze d'arresto e Tempi di Ritorno



Un'applicazione al caso di studio al sito valanghivo Val Nigolaia, in Val di Rabbi, nella Provincia Autonoma di Trento.

La prevenzione del rischio di valanghe può essere operata sia "controllando" il fenomeno, ad esempio mediante la realizzazione di opere di difesa strutturali, sia "controllando" l'esposizione al fenomeno di beni e persone. In particolare il controllo della presenza può essere effettuato stimando il diverso grado di pericolo delle aree soggette a valanga e fissando un uso compatibile del suolo (la cosiddetta "zonizzazione").

Al fine della perimetrazione delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanga è essenziale la caratterizzazione di una relazione che leghi la "magnitudo" di un evento, esprimibile principalmente in termini di distanza di arresto, e il tempo di ritorno dell'evento stesso, ovvero l'intervallo di tempo (in anni) in cui mediamente si ripete un evento di tali dimensioni. E' infatti chiaro come una zona è esposta a un grado di pericolo tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza (ovvero quanto minore è il tempo di ritorno) con cui le valanghe la interessano.

La relazione tra distanza di arresto e tempo di ritorno di una valanga può essere determinata in principio attraverso due approcci distinti:

- metodi basati sull'analisi statistica dei dati storici di distanza di arresto;
- metodi basati sull'applicazione di modelli di dinamica delle valanghe.

Nel presente articolo verrà trattato in dettaglio il primo approccio al problema, proponendo una metodologia innovativa di analisi statistica dei dati storici di distanza di arresto, mentre il secondo approccio al problema verrà discusso in un successivo articolo, attualmente in fase di stesura. A titolo esemplificativo, la nuova metodologia proposta verrà applicata ad alcuni siti valanghivi della Val di Rabbi, una valle laterale della Val di Sole appartenente alla Provincia Autonoma di Trento.



MODELLI STATISTICI PER IL CALCOLO DELLE DISTANZE DI ARRESTO

Un'analisi critica degli approcci di letteratura

Nel corso degli anni '80 furono proposti due differenti modelli statistici per il calcolo delle distanze di arresto delle valanghe (per una rassegna esaustiva in merito si veda Harbitz, 1998): il modello "statistico-topografico norvegese", anche detto modello " α/β ", e quello usualmente denominato del "rapporto di arresto". Il modello statistico-topografico norvegese, originariamente sviluppato dai ricercatori del Norwegian Geotechnical Institute (Lied e Bakkehoi, 1980; Bakkehoi et al, 1983), si basa sulla determinazione di una relazione regressiva che consente di stimare la massima distanza di arresto raggiungibile da un evento valanghivo in un deter-

minato sito sulla base esclusiva di parametri topografici del sito stesso. La relazione predittiva è ottenuta considerando un campione di siti oggetto di una adeguata memoria storica e regredendo i valori delle distanze di arresto massimali delle valanghe ad essi relative (misurate attraverso il parametro α , vedi Fig. 1¹) in funzione di opportuni parametri topografici (β , δ , θ , H, etc., vedi Fig. 1 pag. 16).

La relazione regressiva ottenuta, in generale del tipo $\alpha=f(\beta, \delta, \theta, H, \text{etc.})$, può essere utilizzata al fine di prevedere il comportamento delle valanghe estreme (in termini esclusivi della distanza di arresto) in siti scarsamente documentati o privi di documentazione storica appartenenti allo stesso contesto geografico dei siti campione.

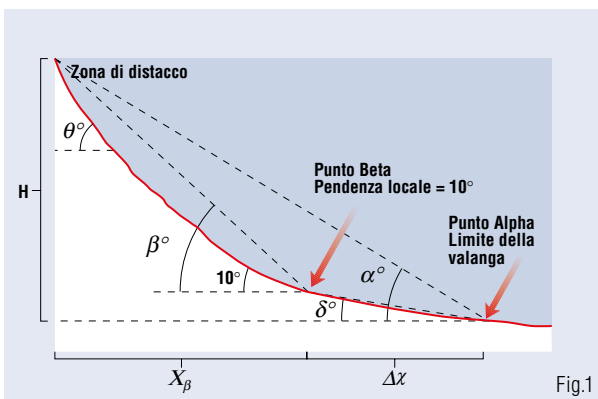
Sulla base dell'idea originale di Lied e Bakkehoi (1980) sono state successivamente sviluppate numerose relazioni regressive

"ad hoc" per differenti regioni montane alpine ed extra-alpine (per una rassegna in proposito si veda Fellini, 1999); tali modelli sono stati anche utilizzati come supporto tecnico per la redazione delle mappe di pericolosità, principalmente nei paesi nordeuropei (Norvegia ed Islanda) ed in Giappone. Un modello statistico per il calcolo delle distanze di arresto alternativo a quello proposto da Lied e Bakkehoi (1980) è quello cosiddetto "del rapporto d'arresto", elaborato originariamente da McClung e Lied (1987) e rivisitato successivamente da McClung e Mears (1991).

Questo metodo, che si basa sulla stessa metodologia di raccolta e misura dei dati adottata nel metodo " α/β ", introduce un parametro adimensionale al fine di esprimere le distanze di arresto massime delle valanghe (il "rapporto d'arresto" appunto, dato dalla relazione $RA=\Delta x/X_\beta$, vedi Fig. 1).

Immagini di eventi storici. La fotografia di pagina 14 si riferisce ad una valanga del 1931, e rappresenta uno dei più grossi eventi registrati sul sito.

Principali parametri topografici utilizzati nei modelli statistici



Principali parametri topografici utilizzati nei modelli statistici. L'angolo α misura le distanze di arresto, e si calcola come angolo formato con l'orizzontale dalla congiungente il punto più a monte della zona distacco con il punto più a valle del deposito della valanga (il punto Alpha). L'angolo β indica la pendenza media della zona di scorrimento e si calcola come angolo formato con l'orizzontale dalla congiungente il punto più a monte della zona distacco con il punto dove la pendenza locale del pendio scende al di sotto dei 10° (il punto Beta, ritenuto l'inizio della zona di arresto*). θ e δ indicano rispettivamente le pendenze medie della zona di distacco e arresto, mentre H indica il dislivello complessivo coperto dalla valanga. X_β indica la proiezione orizzontale della lunghezza della zona di scorrimento (zona compresa tra il punto più alto di distacco ed il punto Beta) mentre Δx indica la distanza di arresto, misurata come proiezione orizzontale della distanza percorsa dalla valanga a partire dal punto Beta.



Deposito di una valanga nella zona di conoide - la valanga ha oltrepassato la strada forestale ed il sacrario (foto della primavera 1986).

A differenza dell'angolo α il rapporto di arresto si rivelò un parametro topografico statisticamente indipendente dalle altre variabili topografiche; venne pertanto ritenuto una variabile casuale, caratterizzabile adattando al campione di rapporti di arresto relativi a siti valanghivi ben documentati una opportuna legge di distribuzione di probabilità. In particolare la variabilità del rapporto di arresto risultò essere ben rappresentata, per

popolazioni di dati relative a diverse regioni montuose, dalla distribuzione asintotica del massimo valore (o distribuzione "di Gumbel"); i parametri della distribuzione risultarono invece dipendenti dalla regione montuosa considerata (McClung et al., 1989).

Un'analisi comparativa dei relativi vantaggi e svantaggi dei due approcci statistici discussi è fornita in Johannesson (1998) e McClung (2001).

In ogni caso, ad opinione degli scriventi, uno dei principali limiti di entrambi i modelli è che di fatto essi forniscono relazioni predittive in grado di stimare esclusivamente la massima distanza di arresto (indicativamente quella relativa ad un evento centennale) raggiungibile da una valanga su di un dato sito valanghivo (l'errore associato a tale stima è fornito nel modello del rapporto di arresto direttamente attraverso l'adattamento del campione di dati ad una distribuzione di Gumbel, mentre nel modello " α/β " indirettamente attraverso l'ipotesi implicita di una distribuzione gaussiana dell'errore nel modello regressivo ai minimi quadrati).

Tali modelli non consentono invece di determinare un vero e proprio legame sito-specifico tra distanza di arresto e tempo di ritorno delle valanghe.

Inoltre, nel caso del modello del rapporto di arresto, l'adattamento dei dati di distanza di arresto relativi a differenti siti valanghivi ad una comune distribuzione di probabilità assume implicitamente l'ipotesi, di fatto non sempre verificata, che tali dati appartengano ad un stessa popolazione.

L'approccio di analisi innovativo proposto nel presente lavoro si propone di superare entrambi i limiti sopra esposti.

L'idea è quella di derivare un le-

game sito-specifico tra distanza di arresto e tempo di ritorno delle valanghe utilizzando il "metodo delle eccedenze" per analizzare statisticamente i dati storici di distanza di arresto relativi al sito valanghivo in esame.

Viene inoltre proposta una estensione di tale metodologia con riferimento ad analisi effettuate a scala regionale, ovvero analisi in cui dati di distanze di arresto relativi a differenti siti valanghivi vengono "opportunamente" accorpate. Il ricorso ad analisi a scala regionale è essenziale nel caso di siti scarsamente documentati o addirittura privi di documentazione storica, dove analisi sito-specifiche non possono essere effettuate o comunque non possono condurre a risultati sufficientemente accurati.

IL METODO DI ANALISI PROPOSTO

Le informazioni relative ad eventi del passato che si hanno a disposizione quando ci si appresta a studiare un sito valanghivo possono essere di diverso tipo e caratterizzate da un diverso grado di dettaglio.

Tipicamente si possono distinguere:

- le schede compilate per la realizzazione della Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV) o del Catasto Valanghe, che usualmente sintetizzano i risultati di inchieste sulla popolazione e indagini sul terreno e raccolgono le informazioni relative agli eventi storici di maggior estensione;
- i "Modelli 7 AINEVA", in cui sono contenute indicazioni di dettaglio relative ad eventi valanghivi passati, ma che in generale coprono un arco temporale relativamente limitato;
- altre tipologie di schede per la raccolta dei dati legati all'attività valanghiva che possono variare a seconda delle regioni alpine (ad

esempio la Provincia Autonoma di Trento ha utilizzato in passato delle schede molto sintetiche - le schede del vecchio catasto forestale - che riportano, per tutti gli eventi registrati, la massima distanza d'arresto espressa mediante la quota minima raggiunta dalla valanga).

Per un dato sito valanghivo si possono pertanto avere a disposizione, almeno in linea di principio, un buon numero di dati di distanze d'arresto, relativi ad eventi valanghivi caratterizzati da dimensioni (e periodicità) differenti. In generale tali dati possono essere suddivisi in due classi: (a) dati "storici", dedotti principalmente dalle CLPV, che in dipendenza del sito valanghivo e della regione coprono un arco di tempo tipicamente variabile tra 50 e 100 anni; (b) dati "sistemati", ricavati dai modelli 7 AINEVA o da altre tipologie di schede valanghe simili, che coprono un arco di tempo in generale non superiore a 20-30 anni, e comunque fortemente variabile in dipendenza del sito valanghivo e della regione considerata. Si deve osservare che, con riferimento alla serie di registrazioni sistematiche, i dati raccolti non sono dei massimi annuali; è possibile infatti che in alcuni anni non si verificano valanghe, così come che se ne verificano più d'una.

Ciò non permette di adottare un'analisi statistica di tipo "classico", ovvero di adattare alla serie dei massimi annuali di distanza di arresto una distribuzione di probabilità e determinare da questa il legame tra distanza di arresto e tempo di ritorno.

Per utilizzare al meglio le informazioni contenute in una serie di dati di distanze di arresto che possa essere ritenuta sistematica si è fatto ricorso al metodo di analisi delle eccedenze (Maione e Moiesello, 1993).

Analisi sito-specifica

Si consideri un sito valanghivo per il quale sia stata raccolta una serie di dati relativi a registrazioni sistematiche di distanze di arresto. Le distanze di arresto possono essere espresse attraverso diversi parametri, con l'unica condizione che il parametro utilizzato sia funzione monotona della distanza di arresto (in tal senso ad esempio l'utilizzo della quota minima di arresto non va bene); per il momento verrà utilizzata la proiezione orizzontale della distanza complessiva percorsa dalla valanga a partire dal punto più alto di distacco (x_i in Figura 2), ma tale scelta non è essenziale ai fini dell'analisi che segue, almeno nel caso di analisi sito-specifiche. Fissato un valore di soglia per le distanze di arresto (tipicamente la distanza che corrisponde all'entrata nella zona di conoide e più in generale all'entrata nella zona di arresto, x_i in Fig. 2 e Fig. 3), si considerino il numero m di eventi valanghivi che si arrestano a valle di tale soglia. Indicato con M il numero degli anni cui le osservazioni si riferiscono, il valore medio del numero di superamenti per anno (eccedenze) risulta:

$$\lambda = \frac{m}{M} \quad (1)$$

La distanza di arresto di un evento valanghivo che superi la soglia fissata è una variabile casuale, con funzione di probabilità cumulata $P(x)$. La distanza di arresto x verrà superata, in media, una volta ogni t eventi, avendo posto:

$$t(x) = \frac{1}{1-P(x)} \quad (2)$$

Poiché si contano in media λ superamenti per anno, con buona approssimazione il valore x risulta superato, sempre in media, una volta ogni T anni, con:

$$T(x) = \frac{t(x)}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{1}{1-P(x)} \quad (3)$$

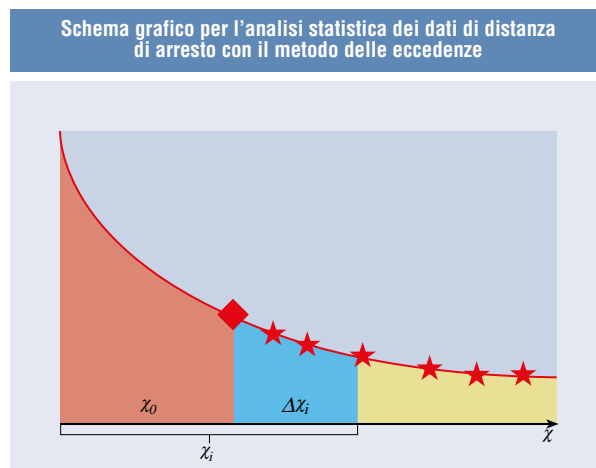


Fig.2



Fig.3

t è il tempo di ritorno del valore x della distanza di arresto espresso in numero di eventi valanghivi, mentre T è il tempo di ritorno espresso in anni.

La relazione (3) consente, in linea di principio, di associare per un determinato sito valanghivo ad ogni valore di distanza di arresto un determinato tempo di ritorno (e viceversa), e richiede:

- che sia stimato per il sito in esame il numero di eccedenze medio annuo (il parametro λ della relazione (1));
- che sia individuata la legge di distribuzione di probabilità

Figura 2: Lungo il profilo longitudinale del pendio sono indicate la soglia per le distanze di arresto (x_0) e la serie storica di eccedenze disponibili (x_i).

Figura 3: Veduta aerea del sito valanghivo "Val Nigolaia". In rosso sono indicati i limiti del sito, dedotti dalla CLPV; la freccia bianca indica la direzione principale di espansione tipicamente seguita dalla valanga nella zona di conoide.



($P(x)$ della relazione (2)) secondo la quale per il sito in esame sono distribuite le distanze di arresto degli eventi valanghivi che superano la soglia prefissata (a tal proposito sarebbe opportuno adottare una legge limitata inferiormente, anche se può essere utilizzata una qualunque legge che si adatti bene alle osservazioni, soprattutto nel campo delle maggiori distanze di arresto, che sono quelle di maggior interesse).

Sia la stima di λ che di $P(x)$ per essere effettuate in maniera sufficientemente accurata su di un determinato sito richiedono un campione di dati significativo, ovvero la conoscenza di un buon numero di eventi storici registrati in maniera sistematica; in tal caso è possibile effettuare analisi "sito-specifiche". In realtà tale situazione si riscontra solo raramente nella pratica e pertanto risulta necessario, al fine di ottenere stime statisticamente significative, fare ricorso a tecniche di analisi di tipo "regionale" (Kite, 1988; Cunnane, 1989).

Analisi regionale

Si considerino N siti valanghivi appartenenti ad un dato contesto montano (versante, valle, regione, etc.), per ciascuno dei quali siano note un certo numero di eccedenze registrate con sistematicità (distanze di arresto che per ciascun sito hanno superato la relativa soglia x_{0j}).

Indichiamo con x_{ij} l'eccedenza i -esima relativa al sito j -esimo, con $i=1, \dots, m_j$ (m_j è il numero di eccedenze sul sito j -esimo) e $j=1, \dots, N$. Per il sito j -esimo è possibile definire il tasso annuo di eccedenza: $\lambda_j = m_j / M_j$, dove M_j indica il numero degli anni cui si riferiscono le osservazioni sistematiche sul sito j -esimo.

La possibilità di effettuare l'analisi a scala regionale richiede che le serie di distanze di arresto relative ai diversi siti, a meno di un fattore di scala (tipicamente rappresentato dalla media), risultino appartenere alla stessa popolazione (siano cioè statisticamente omogenee), ovvero che le serie adimensionali x_{ij}^* .

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j} \quad i=1, \dots, m_j; j=1, \dots, N \quad (4)$$

con \bar{x}_j indicante il valore medio delle eccedenze sul sito j -esimo, abbiano la stessa varianza (o equivalentemente che i coefficienti di variazione delle serie dimensionali x_{ij} siano uguali).

In realtà è stato dimostrato (Cunnane, 1989) che un tasso di disomogeneità relativamente basso può essere accettato (la condizione limite è un coefficiente di variazione dei coefficienti di variazione, relativi alle singole serie x_{ij} , uguale a 0.4), in quanto il vantaggio acquisito accorpando informazioni relative a diversi siti è maggiore dell'effetto negativo indotto dalla parziale disomogeneità delle informazioni².

Accertata l'esistenza di omogeneità statistica tra le serie di eccedenze relative ai differenti siti, è possibile determinare una

relazione valida a scala regionale (la cosiddetta "curva di crescita regionale") tra distanze di arresto (adimensionali) e tempi di ritorno (in numero di eventi), del tipo:

$$t(x^*) = \frac{1}{1-P(x^*)} \quad (5)$$

I parametri della legge di distribuzione $P(x^*)$ possono essere stimati con differenti tecniche di regionalizzazione, ad esempio (Cunnane, 1989): (a) può essere calcolata la media regionale dei momenti (ordinari o pesati in probabilità) relativi alle singole serie adimensionali x_{ij}^* , ed applicato il metodo dei momenti; (b) i dati adimensionali relativi ai differenti siti (x_{ij}^*) possono essere accorpati e trattati come un unico campione ai fini della stima dei parametri.

Per passare dalla relazione (5) al legame sito-specifico di interesse tra distanza di arresto e tempo di ritorno (in anni) bisogna utilizzare il fattore di scala (distanza di arresto media sul sito, \bar{x}_j) ed il numero medio di eccedenze annue (λ_j) stimati alla scala del singolo sito. Infatti risulta:

$$T_j(x^*) = \frac{1}{\lambda_j} \frac{1}{1-P(x^*)} \quad (6)$$

e:

$$x_j(T) = x_j^*(T) \bar{x}_j \quad (7)$$

Nel caso di siti privi di documentazione storica (dove pertanto non è possibile effettuare stime sito-specifiche di \bar{x}_j e λ_j) è possibile pervenire alla determinazione di una relazione tra distanza di arresto e tempo di ritorno utilizzando la curva di crescita regionale $P(x^*)$ e stimando i valori sito-specifici di \bar{x} e λ mediante relazioni del tipo $\bar{x} = f(p_1; p_2; \dots; p_n)$ e $\lambda = f(p_1; p_2; \dots; p_n)$ che consentano di correlare tali grandezze alle caratteristiche topografiche del sito (con p_1, \dots, p_n si sono infatti indicati parametri topografici significativi allo scopo; ad esempio la distanza di arresto media su un sito può essere

ritenuta collegata alle pendenze della zona di scorrimento e della zona di arresto, così come alle dimensioni dell'area di distacco, mentre il numero di eccedenze medio annuo può essere ritenuto in qualche modo legato a pendenza, esposizione e quota media della zona di distacco).

APPLICAZIONE PRATICA DELLA METODOLOGIA PROPOSTA

Analisi sito-specifica

A titolo esemplificativo, la metodologia d'analisi statistica descritta precedentemente viene applicata al sito valanghivo denominato "Val Nigolaia", il sito maggiormente documentato della Val di Rabbi, una valle laterale della Val di Sole (TN). La Val Nigolaia si sviluppa in sinistra orografica della Val di Rabbi sulle pendici meridionali del monte Castel Pagano (2609 m s.l.m.).

Il sito ha una morfologia di tipo imbutiforme, copre un dislivello complessivo di circa 1500 metri ed ha uno sviluppo complessivo intorno ai 3 km (Figura 3).

La zona di distacco, orientata a Sud Sud-Ovest, è collocata approssimativamente tra le quote 2550 e 2150 m s.l.m., ha un'estensione areale di circa 14 ha e pendenze variabili tra i 35° e i 45°.

La zona di scorrimento è rappresentata da un canale incassato (larghezza pari a 10-15 m e fianchi con inclinazione di circa 35-40°), con una pendenza che decresce gradualmente dai 30° circa delle zone superiori ai 20° circa del tratto terminale; il canale di scorrimento sbocca in un'area di conoide intorno alla quota 1250 m s.l.m.

La zona di conoide rappresenta la zona di arresto della valanga; nella parte alta (sopra la Strada Comunale S. Bernardo-Zanon) le

pendenze sono notevoli (intorno ai 15°) mentre nella parte inferiore decrescono gradualmente (circa 10°) fino ad un tratto pianeggiante che termina in corrispondenza del torrente Rabbits. I dati storici relativi al sito "Val Nigolaia" sono rappresentati graficamente nella Figura 4; le distanze di arresto sono misurate a partire dalla zona di distacco, utilizzando nella zona di arresto la direzione principale di scorrimento indicata in Figura 5.

La serie di distanze di arresto può essere considerata "sistematica" a partire dall'anno 1975 (periodo storico di registrazione 1975-2000), considerando come soglia per l'analisi delle eccedenze l'inizio della zona di conoide, caratterizzata dalla progressiva $X_1=2125m$ (Figure 4 e 5). Si può infatti ritenere che tutti gli eventi valanghivi che hanno superato tale soglia e si sono arrestati nella zona di conoide siano stati registrati con sistematicità sia attraverso le schede del vecchio catasto forestale che sulle schede relative al modello 7 Aineva.

Il valore medio di superamenti per anno λ è dunque pari a 0.32 (8 eccedenze in 25 anni).

La distribuzione di probabilità di Gumbel ha mostrato un buon adattamento al campione di dati relativo a tale serie sistematica di eccedenze; la funzione di probabilità cumulata per tale distribuzione risulta:

$$P(x) = e^{-e^{-a(x-b)}} \quad (8)$$

dove a e b sono i parametri di forma e posizione della distribuzione (nel caso in esame stimati con il metodo dei momenti e rispettivamente pari a 0.0098 e 2355.14). Determinate le probabilità annue di non superamento associate a un qualsiasi valore della distanza di arresto x mediante la relazione (8), l'applicazione della relazione (3) consente la determinazione

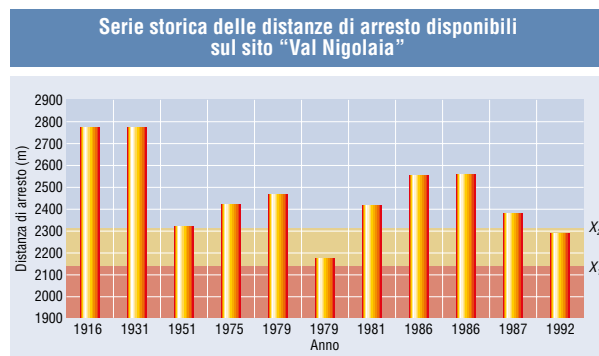


Fig.4

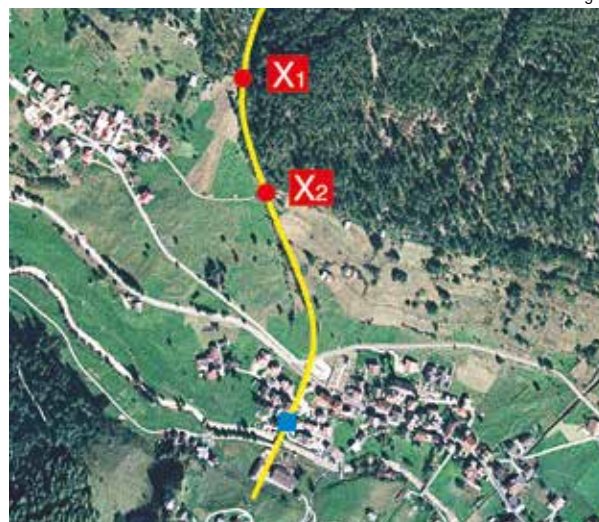


Fig.5

dei relativi tempi di ritorno. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 6, con riferimento ai dati di distanza di arresto campione. In tale analisi sono stati esclusi i dati storici relativi agli eventi del 1916, 1931 e 1951 in quanto antecedenti all'inizio delle registrazioni sistematiche (non è cioè escluso che nel periodo 1900-1975 alcune valanghe possano essersi arrestate nella parte alta del conoide senza essere state in qualche modo registrate); ciò comporta in particolare l'esclusione dall'analisi dei due dati relativi agli eventi conosciuti di maggiore estensione (1916 e 1931), e conseguentemente limita l'accuratezza dei risultati con riferimento alla stima delle distanze di arresto caratterizzate dai tempi di ritorno maggiori, ovvero a quelle di maggior interesse pratico. Infatti l'analisi statistica dei dati di distanze di arresto presenta dei forti limiti nel momento in cui si cercano di fare delle estrapolazioni (nel caso in

Figura 4: Nella figura sono indicate anche le due soglie (X_1 e X_2) utilizzate nell'analisi delle eccedenze.

Figura 5: Veduta aerea della zona di arresto del sito "Val Nigolaia". Sono indicati il profilo principale di scorrimento (lungo cui sono state misurate le distanze di arresto degli eventi storici), le due soglie X_1 e X_2 utilizzate per l'analisi delle eccedenze, e la massima distanza di arresto raggiunta dalla valanga (bollino blu).

Probabilità di non superamento e tempi di ritorno in Val Nigolaia 1975-2000			
Evento (anno)	x (m)	$P(x)$	T (anni)
1979	2180	0.0036	3
1992	2295	0.1639	4
1987	2385	0.4747	6
1981	2425	0.6050	8
1975	2425	0.6050	8
1979	2470	0.7243	11
1986	2565	0.8812	26
1986	2565	0.8812	26

Fig.6

Probabilità di non superamento e tempi di ritorno in Val Nigolaia 1900-2000			
Evento (anno)	x (m)	$P(x)$	T (anni)
1987	2385	0.1130	14
1975	2425	0.2095	16
1981	2425	0.2095	16
1979	2470	0.3412	19
1986	2565	0.6139	34
1986	2565	0.6139	34
1931	2755	0.9185	150
1916	2755	0.9185	150

Fig.7

Figura 6: dati di distanze di arresto relativi alla serie sistematica di registrazioni 1975-2000 (soglia $X_1=2125$ m, curva di distribuzione di probabilità di Gumbel, parametri stimati con il metodo dei momenti).

Distanze di arresto relative a tempi di ritorno assegnati in Val Nigolaia	
T (anni)	x (m)
15	2411
30	2548
50	2619
100	2706
150	2755
200	2789
300	2836

Fig.8

Figura 7: dati di distanze di arresto relativi alla serie di registrazioni 1900-2000, resa "artificialmente" sistematica mediante innalzamento del valore di soglia per le eccedenze (soglia $X_2=2320$ m, curva di distribuzione di probabilità di Gumbel, parametri stimati con il metodo dei momenti).

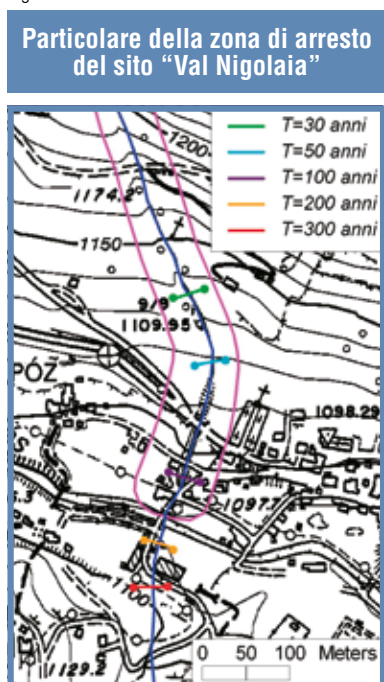


Fig.9

Figura 8: soglia per l'analisi delle eccedenze in corrispondenza del punto β , corrispondente alla progressiva $X_2=2320$ m.

Figura 9: sono indicate le stime delle distanze di arresto delle valanghe in funzione del tempo di ritorno ottenute analizzando i dati storici con il metodo delle eccedenze (soglia $X_2=2320$ m).

esame quando si cerchino di caratterizzare le distanze di arresto con periodicità superiore ai 30 anni o equivalentemente quando si cerchi di caratterizzare la frequenza di accadimento di eventi con spazi di frenata maggiori di 2565 m, vedi Fig. 6).

L'inferenza statistica infatti non tiene in alcun modo in considerazione la morfologia del territorio a valle delle distanze di arresto caratteristiche della serie analizzata (che contengono invece informazioni relative alla topografia del profilo a monte di esse), fattore che influenza fortemente le distanze di arresto potenzialmente raggiungibili dalle valanghe in tale zona.

Per caratterizzare adeguatamente la periodicità delle distanze di arresto maggiori è necessario includere nell'analisi i dati storici che contengono informazioni di questo tipo; si è allora alzato il valore della soglia per l'analisi delle eccedenze, fissandolo in corrispondenza del punto β (Figura 1), caratterizzato nel caso in esame da una progressiva $X_2=2320$ m (Figure 4 e 5).

Poiché il punto β può essere considerato come l'inizio della zona di arresto di eventi "estremi" (si osservi che nella Val di Rabbi tale punto è stato identificato con riferimento ad una pendenza locale pari a 15-16°, a differenza dei 10° proposti in letteratura), si è potuta fare l'ipotesi di considerare sistematica la serie degli eventi che oltrepassano il punto β , e che quindi vanno ad arrestarsi immediatamente a monte o ad interessare il centro abitato (Figura 5), ovvero si è ipotizzato che nel periodo storico 1900-2000 siano state registrate tutte le valanghe di dimensioni notevoli. Sono stati ricalcolati il valore di λ pari in questo caso a 0.08 (8 eccedenze in cento anni), ed i valori delle probabilità di non superamento associate a ciascun valore della distanza di arresto x , utilizzando sempre la distribuzione di Gumbel (Equazione 8); i parametri a e b della distribuzione, calcolati con il metodo dei momenti, sono risultati in questo caso pari rispettivamente a 0.0088 e 2477.47. Le probabilità $P(x)$ e i tempi di

ritorno associati a ciascun valore delle distanze di arresto campione sono riportati in Figura 7.

Questo tipo di analisi permette di calcolare in un modo più preciso i valori di T per gli eventi valanghivi caratterizzati dalle distanze di arresto maggiori (1916, 1931, 1986), ma tende a sovrastimare i tempi di ritorno relativi alle distanze di arresto più piccole, associate ad eventi arrestatisi in prossimità del punto β (1975, 1979, 1981, 1987), come si può vedere da un confronto dei risultati riportati nelle Figure 6 e 7.

Ciò è legato al fatto che non si può essere sicuri di non aver perso nessun dato relativo ad eventi di minor rilievo in un periodo di tempo lungo come quello considerato per questa seconda analisi.

I valori di distanza di arresto relativi a tempi di ritorno assegnati, fissata la soglia per l'analisi delle eccedenze in corrispondenza del punto del punto β ($X_2=2320$ m), sono riportati in Figura 8; la relativa perimetrazione è presentata in Figura 9.

Gli eventi trentennali e cinquantennali si arrestano a monte della strada provinciale, l'evento secolare, superando la provinciale, si arresta in corrispondenza dell'abitato, mentre l'evento trecentennale oltrepassa il torrente Rabbiés e si arresta sul versante opposto; il dato della CLPV è stimato avere un tempo di ritorno compreso tra 100e 200 anni.

Analisi regionale

Per l'implementazione pratica dell'analisi a scala regionale si considerano accanto al sito Val Nigolaia (identificato nel seguito anche con il suo numero catastale 7204) un gruppo di altri siti appartenenti alla Val di Rabbi caratterizzati da adeguata documentazione storica (specificatamente i siti n. 7205,

7209, 7216, 7217). Per le ragioni esposte a pagina 17 come soglia nell'analisi delle eccedenze è utilizzato il punto β (e le distanze di arresto sono state misurate a partire da questo punto), ipotizzando che gli eventi di maggiori dimensioni siano stati registrati in modo sistematico su tutti i siti considerati.

Quest'ipotesi può ritenersi valida soprattutto considerando che per la Val di Rabbi il punto β si trova molto a valle, nella zona generalmente in prossimità di centri abitati e le vie di comunicazione.

Si osservi che l'adozione di un valore di soglia elevato, se da un lato consente di includere in una serie ritenibile sistematica gli eventi di maggior entità, dall'altro riduce il numero di eventi campione per ciascun sito, accentuando il problema della scarsità di dati con riferimento ad analisi sito-specifiche e rendendo di fatto necessario il ricorso a tecniche di analisi di tipo regionale.

In Figura 10 sono sintetizzati i dati di partenza disponibili per l'analisi regionale.

Il criterio di omogeneità risulta verificato (CV dei CV pari a 0.39), con i siti 7209 e 7216 che sembrano essere quelli maggiormente disomogenei rispetto agli altri (ed in particolare al n. 7204).

Il campione esteso ottenuto accorpando i dati adimensionalizzati relativi ai vari siti ha mostrato un buon adattamento alla legge di distribuzione di probabilità di Gumbel (Eq. 8), come mostrato in Figura 11; i relativi parametri stimati con il metodo dei momenti sono risultati pari a: $a=2.5219$; $b=0.7711$. La curva di crescita regionale risulta pertanto:

$$P(\Delta x^*) = e^{-e^{-a(\Delta x^* - b)}} \quad (9)$$

L'utilizzo della relazione (9) e dei parametri sito specifici relativi al sito 7204 ($\lambda=0.08$; $\Delta x_{medio}=225$

m), consente di determinare le distanze di arresto relative a valori prefissati del tempo di ritorno (Equazioni 5, 6 e 7); i risultati sono riportati in Figura 12.

Un confronto con i risultati ottenuti su tale sito valanghivo mediante l'analisi sito-specifica (Fig. 8), ha mostrato un buon accordo tra i due differenti approcci, soprattutto con riferimento ai tempi di ritorno più bassi (30, 50 anni), e differenze comunque non superiori ai 50-60 metri anche per i tempi di ritorno maggiori (200, 300 anni).

Si osservi che se la regionalizzazione è limitata ai siti maggiormente omogenei (7204, 7205 e 7217, vedi Fig. 10), l'accordo tra le due analisi risulta molto buono anche per le periodicità più alte, con differenze inferiori ai 15 metri per tutti i tempi di ritorno considerati (Fig. 12).

E' stata anche condotta un'analisi regionale eliminando le informazioni relative al sito 7204; il campione adimensionale esteso si riduce pertanto ai soli dati relativi ai siti 7205, 7209, 7216 e 7217, ed i parametri della curva di crescita regionale, ottenuta adattando la distribuzione di Gumbel a tale campione, risultano differenti ($a=2.7445$; $b=0.7896$).

L'utilizzo di tale curva di crescita regionale sul sito 7204 (concomitantemente al λ e Δx_{medio} di tale sito) fornisce ancora valori delle distanze di arresto per tempi di ritorno prefissati (Fig. 12) in discreto accordo con i risultati dell'analisi sito-specifica (Fig. 8); le differenze sono estremamente contenute per i tempi di ritorno più bassi (30, 50 anni), non superano i 30m per l'evento secolare, e risultano pari a circa 70-80m per i tempi di ritorno maggiori (200, 300 anni).

Si osservi che anche in questo caso, se la regionalizzazione è limitata ai siti maggiormente omogenei al sito 7204 (ovvero il

Sintesi dei dati disponibili per l'analisi regionale									
Valanga n.7204 ($\lambda = 0.08$)		Valanga n.7205 ($\lambda = 0.02$)		Valanga n.7209 ($\lambda = 0.02$)		Valanga n.7216 ($\lambda = 0.4$)		Valanga n.7217 ($\lambda = 0.2$)	
Anno	Δx	Anno	Δx	Anno	Δx	Anno	Δx	Anno	Δx
1916	435	1805	840	1916	400	1975	50	1981	25
1931	435	1845	265	1931	590	1979	20	1984	25
1975	105	1888	720			1979	50	1985	25
1979	170	1916	75			1981	20	1986	25
1981	105					1984	50	1986	70
1986	245					1986	50		
1986	245					1986	20		
1987	65					1987	51		
						1990	50		
						1992	50		
Media	225	495	495			41		34	
Dev. st	144.6	363.9	134.4			14.57		20.12	
CV	0.641	0.766	0.271			0.355		0.592	

Fig.10

Adattamento del campione di dati ottenuto accorpando i dati adimensionalizzati relativi ai siti campione (7204, 7205, 7209, 7216, 7217) alla legge di distribuzione di probabilità di Gumbel

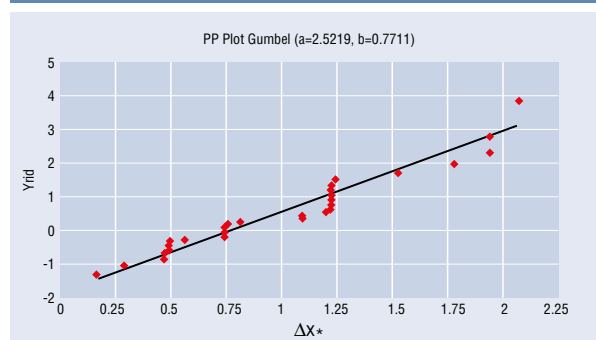


Fig.11

Distanze di arresto, per tempi di ritorno fissati in Val Nigolaia

T (anni)	X (m) Analisi regionale sui siti 7204, 7205, 7209, 7216, 7217	X (m) Analisi regionale sui siti 7205, 7209, 7216, 7217	X (m) Analisi regionale sui siti 7204, 7205, 7217	X (m) Analisi regionale sui siti 7205, 7217
15	2442	2450	2420	2417
30	2549	2549	2550	2550
50	2605	2601	2618	2619
100	2674	2664	2701	2704
150	2712	2699	2747	2752
200	2739	2723	2779	2785
300	2776	2758	2824	2831

Fig.12

n. 7205 e n. 7217), l'accordo con l'analisi sito-specifica risulta molto buono anche per le periodicità più alte (Fig. 12), con differenze tra le distanze di arresto comunque non superiori ai dieci metri, a conferma dell'efficacia della regionalizzazione quando si vogliono effettuare stime su siti non documentati o scarsamente documentati, soprattutto qualora condotta su siti caratterizzati da notevole omogeneità statistica con il sito in esame. In realtà, se si operasse realmente su un sito privo di documentazione storica, si avrebbe l'ulteriore problema che non sarebbe possibile stimare per tale sito il tasso annuo di eccedenza (λ) e il valore medio delle eccedenze (Δx_{medio}).

Figura 10: Sintesi dei dati disponibili per l'analisi regionale; le distanze di arresto (Δx) sono misurate a partire dal punto β .

Figura 12: distanze stimate con tecniche di analisi regionale basate su campioni di dati di partenza differenti.

Relazione tra il valore medio della distanza di arresto (misurata a partire dal punto Beta) e la differenza di pendenza tra zona di scorrimento e zona di arresto, per i cinque siti campione

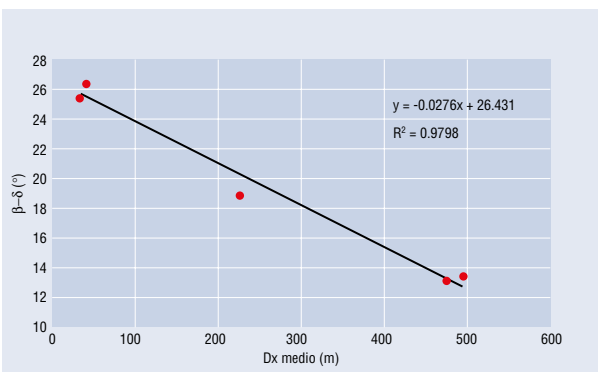


Fig.13

Relazione tra la pendenza media della zona di distacco e il numero medio di eccedenze annue, per i cinque siti campione

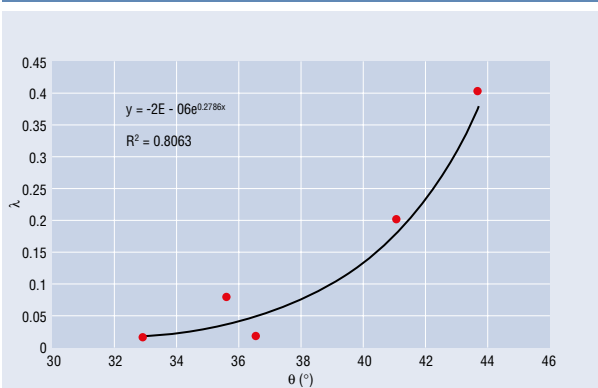


Fig.14

Figura 15: indicazione della massima espansione storica conosciuta; lungo la direzione principale di espansione delle valanghe sono indicate le stime delle distanze di arresto delle valanghe in funzione del tempo di ritorno ottenute tramite l'analisi regionale dei dati di distanza di arresto relativi ai siti 7204, 7205, 7209, 7216 e 7217.

Particolare della zona di arresto del sito n. 7201



Fig.15

A tal proposito, l'analisi dei dati relativi ai 5 siti campione di Figura 10, per quanto parziale, ha mostrato la possibilità di

derivare relazioni regressive che consentono di stimare tali parametri in dipendenza delle caratteristiche topografiche del sito. In particolare, l'analisi dei dati ha mostrato che il valore medio della distanza di arresto su un sito appare essere una funzione decrescente dell'entità del cambio di pendenza in corrispondenza della transizione tra zona di scorrimento e zona di arresto (Figura 13), mentre il tasso annuo di eccedenza sembra essere ben correlato con la pendenza media della zona di distacco (Figura 14).

Nella Figura 14 i due punti contraddistinti dai valori più alti di λ (siti 7216 e 7217) sono gli unici due siti esposti verso nord.

I siti esposti a nord sono quelli caratterizzati da una maggiore attività valanghiva, in quanto, durante l'inverno, ricevono una piccola quantità di raggi diretti solari e il manto nevoso, rimanendo più freddo, si stabilizza più lentamente.

Questo fatto potrebbe spiegare l'elevato numero di eccedenze medie annue che si ha per i due sopracitati siti.

Il grafico di Figura 14 può quindi anche essere letto in base all'esposizione del sito, adottando un valore medio dei λ dei siti 7216 e 7217 (0.3) nel caso in cui il sito sia esposto a nord, e negli altri casi un valore medio dei restanti λ (0.04).

L'utilizzo delle relazioni regressive riportate nelle Figure 13 e 14 (adottando per λ il valore medio dei siti esposti a sud) e della curva di crescita regionale (Equazione 9) ha consentito di caratterizzare il legame tra distanza di arresto e tempo di ritorno per il sito 7201, sostanzialmente privo di documentazione storica (se si esclude la sola indicazione della massima distanza di arresto conosciuta).

I risultati, presentati graficamen-

te in Figura 15, appaiono estremamente sensati, con un tempo di ritorno attribuito all'evento massimo di cui si è a conoscenza pari a circa 200 anni.

CONCLUSIONI

I metodi statistici per la stima delle distanze di arresto delle valanghe risultano un utile complemento ai calcoli di dinamica in applicazioni pratiche finalizzate alla mappatura del pericolo, in quanto di utilizzo relativamente semplice ed oggettivo; inoltre tali metodi possono fornire utili indicazioni anche nei casi in cui non si hanno a disposizione informazioni sufficientemente dettagliate per l'applicazione dei modelli di simulazione della dinamica delle valanghe. In particolare, la metodologia innovativa di analisi statistica dei dati storici di distanza di arresto proposta nel presente lavoro consente, rispetto agli approcci di letteratura, di sfruttare al meglio tutte le informazioni storiche disponibili, e di ottenere un legame "sito-specifico" tra distanza di arresto e tempo di ritorno delle valanghe, essenziale in un'ottica di zonizzazione. Un altro aspetto importante del lavoro è sicuramente quello di avere proposto una metodologia che, sulla base di tecniche di "regionalizzazione", consente di definire il legame tra distanza di arresto e tempo di ritorno anche per siti scarsamente documentati o addirittura privi di documentazione storica. Appare importante evidenziare il fatto che nell'applicazione della metodologia proposta bisogna fare molta attenzione ogniqualvolta si effettuino delle "estrapolazioni", in quanto vi è la possibilità di commettere errori, anche rilevanti, quando si utilizza il legame statistico tra distanze di arresto e tempi di ritorno nelle aree a valle della massima espansione storica conosciuta sul sito in esame.



Note

¹ Si noti che la proposta iniziale dagli autori di tali modelli di utilizzare una pendenza pari a 10° per identificare il punto Beta e l'inizio della zona di arresto, in applicazioni successive relative ad altri contesti montani è stata talvolta modificata, ed il punto Beta è stato fatto corrispondere ad una pendenza locale differente (tipicamente maggiore); questo è ad esempio il caso dei siti valanghivi della Val di Rabbi, utilizzati per le applicazioni pratiche nel contesto del presente articolo, dove è stato valutato più adeguato l'utilizzo una pendenza locale pari a 16° per l'identificazione della transizione tra zona di scorrimento e arresto (vedi § 4.1).

² Si noti che mentre nel caso di analisi sito-specifiche il tipo di parametro utilizzato per misurare le distanze di arresto non era importante (ad esempio era inessenziale il fatto che le distanze di arresto fossero misurate a partire dal punto più alto di distacco o a partire dalla soglia x_0 , Fig. 2), tale scelta diviene

cruciale nel caso di analisi a scala regionale in quanto influenza la verifica del criterio di omogeneità che dipende anche dal tipo di parametro utilizzato. Per evitare che indesiderati effetti di scala vadano ad influenzare la verifica del criterio di omogeneità sulle eccedenze, nel caso di analisi a scala regionale si consiglia di misurare le distanze di arresto sui vari siti a partire dal rispettivo valore di soglia (Δx in Fig. 2) e non dal punto più alto di distacco (x in Fig. 2).

Ringraziamenti

Si desidera ringraziare l'Ufficio Neve, Valanghe e Meteorologia della Provincia Autonoma di Trento per avere fornito tutto il materiale necessario allo svolgimento del presente lavoro (dati valanghivi, cartografie, documentazione fotografica), in particolare l'Arch. Giorgio Tecilla, l'Ing. Mauro Gaddo, l'Ing. Gianluca Fruet ed il Geom. Marco Gadotti per l'indispensabile supporto tecnico e per la disponibilità e l'interessamento dimostrati.

Bibliografia

Bakkehøi, S., Domaas, U. and Lied, K. 1983. Calculation of Snow Avalanche Run-out Distance. *Annals of Glaciology*, Vol. 4, 24-29.

Cunnane, C. 1989. Statistical distribution for flood frequency analysis. WMO-Operational Hydrology Report No. 33. 61pp.

Harbitz, C. 1998. A Survey of Computational Models for Snow Avalanche Motion. NGI Internal Report No. 581220-1 (also Deliverable D4 of the 4th EU Framework Project SAME: Snow Avalanche Mapping and Warning Systems in Europe. Edited by European Community).

Fellini, M. 1999. Calcolo della distanza di arresto di valanghe estreme: applicazione di un modello statistico-topografico all'Alta Valtellina ed all'Alta Valmalenco. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Pavia.

Johannesson, T. 1998. Iceland avalanche runout models compared with topographical models used in other countries. In: Proceedings of the Anniversary Conference for the 25 Years of Snow Avalanche Research at NGI, Voss, Norway, 12-16 May, 1998, NGI Publications No. 203. 43-53.

Kite, G. W. 1988. Frequency and risk analysis in hydrology. Water resources publications. 224 pp.

Lied, K. and Bakkehøi, S. 1980. Empirical Calculations of Snow Avalanche Run-Out Distance Based on Topographic Parameters. *Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94, 165-177.

Maione, U. e Moisélo, U. 1993. Elementi di statistica per l'idrologia. La Goliardica Pavese, 299 pp.

McClung D.M. and Lied K. 1987. Statistical and Geometrical Definition of Snow Avalanche Run-out. *Cold Regions Science and Technology*, No. 13, 107-119.

McClung, D.M., Mears, A.I. and Schaerer, P. 1989. Extreme avalanche run-out: Data from four mountain ranges. *Annals of Glaciology* Vol. 13, 180-184.

McClung, D. and Mears, A. 1991. Extreme value prediction of snow avalanche runout. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 19, 163-175.

McClung, D.M. 2001. Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 1254-1265.

In alto a sinistra: vista dell'area di conoide. Sono visibili l'alveo del torrente, i cunei di frenaggio, alcuni degli elementi vulnerabili (strade e manufatti isolati). Fino al terzo cuneo (quota 1200 m s.l.m. circa) le fuoriuscite di masse nevose (in direzione Zanon) sono rese relativamente difficoltose dal fatto che l'alveo è abbastanza incassato, mentre sono molto più probabili nella parte più bassa del conoide (a valle del terzo cuneo).

In alto a destra: Deposito di una valanga nella zona di conoide (inverno 1975)

A sinistra: Zona di distacco relativa ad una valanga dell'inverno 1975; sono ben visibili in più punti le linee di coronamento.