

MODELLO

PER LA DINAMICA DELLE VALANGHE DI NEVE DENSA

**Edmondo Arena,
Lo Riggio,
Mirko Mura,
Daniele Bocchiola*,
Maria Cristina Rulli
e Renzo Rosso**

*Politecnico di Milano,
Dip. DIIAR, Sez. CIMI
Autore corrispondente tel. 02.23996223
e-mail: daniele.bocchiola@polimi.it

Si propone un modello per lo studio della dinamica delle valanghe di neve densa, del tipo a centro di massa. Le equazioni del moto si basano su una formulazione energetica, adattata per il calcolo delle valanghe tramite la parametrizzazione tipica del metodo Voellmy-Salm.

Tale formulazione permette di esprimere la dinamica del moto in termini di altezze e velocità del flusso su di una maglia di calcolo a passo variabile. Il modello viene applicato al caso di studio del monte Vallecetta, a Bormio, per gli eventi del Maggio 1983. I risultati vengono confrontati con quelli del modello di letteratura AVAL1D®, sviluppato dal personale dell'istituto SLF di Davos, fornendo risultati del tutto comparabili.

Il modello può quindi essere considerato uno strumento atto alla valutazione delle aree a rischio di valanga. Sviluppi futuri del modello prevedono la validazione del modello per altri siti valanghivi e la modellazione del trasporto di massa lungo il percorso della valanga.





INTRODUZIONE

Le moderne tecnologie di calcolo costituiscono un supporto fondamentale nelle procedure di mappatura del pericolo valanghe. L'utilizzo di modelli numerici opportunamente sviluppati e calibrati consente di determinare, a partire da date condizioni iniziali ed al contorno, le grandezze di interesse per la definizione dei livelli di rischio, ossia la lunghezza del percorso valanghivo e le pressioni esercitate dalla massa nevosa (p.es. Barbolini et al., 2004).

I modelli presenti in letteratura per il calcolo delle valanghe si possono nella sostanza dividere in modelli di tipo empirico e modelli di tipo dinamico.

Ai primi appartengono ad esempio i modelli di tipo regressivo, che tentano stimare la massima distanza di arresto raggiungibile da un evento valanghivo in un determinato sito sulla base esclusiva di parametri topografici del sito stesso (p.es. Bovis e Mears, 1976; Lied e Bakkehoi, 1980), ed i modelli *statistici* (p.es. McClung e and Mears, 1991; McClung, 2001), che assegnano opportune distribuzioni di probabilità a valori osservati delle distanze di arresto in un determinato sito, oppure a scala regionale, tramite opportune trasformazioni.

Al secondo tipo appartengono differenti modelli, tipicamente distinti in relazione alla tipologia di valanghe che si intende studiare (i.e. densa o polverosa).

Per lo studio delle valanghe di neve densa, che sono maggiormente rilevanti ai fini della mappatura del pericolo sull'arco alpino Italiano, i modelli di dinamica si suddividono essenzialmente in due classi, i modelli a *centro di massa* ed i modelli di tipo *continuo*.

Tra i modelli a *centro di massa* vi sono ad esempio il modello PCM (Perla et al., 1980) ed il ben noto modello di Voellmy (Voellmy, 1955), utilizzato per esempio come base tecnica per la perimetrazione delle aree a rischio di valanga in Svizzera (Salm et al., 1990), ed ampiamente adottato per i calcoli tecnici delle valanghe nell'arco alpino Italiano (p.es. Martinelli, 1991; Bocchiola e Medagliani, 2007). I modelli di tipo continuo descrivono il moto della massa valanghiva mediante le equazioni di bilancio della massa e quantità di moto, nell'ipotesi di un'analogia con la dinamica dei continui deformabili (p.es. l'acqua).

A tale classe di modelli appartengono, ad esempio, il modello AVAL1D (p.es. Christen et al., 2002a,b e, per una applicazione di AVAL1D alla mappatura del

rischio valanga al sito del Monte Vallecetta, Riboni et al., 2005; Bocchiola e Rosso, 2007) ed i modelli VARA ed MN2D (p.es. Barbolini et al., 2000) e RAMMS (p.es. Christen et al., 2007).

Tali modelli possono essere sviluppati in maniera tale da includere anche il fenomeno di erosione e deposito di massa lungo il percorso (p.es. Sovilla et al., 2006; Sovilla et al., 2007). Il modello qui presente si inquadra nella tipologia di modelli del tipo a *centro di massa*, in assenza di variazioni di massa. Rispetto ai modelli presenti, tuttavia, il modello qui proposto contempla alcuni aspetti originali.

Tale modello si basa infatti su un approccio di tipo energetico, che permette una modellazione spazio-temporale della valanga di tipo distribuito, similmente ai modelli basati sull'ipotesi di mezzo continuo, permettendo però una più rapida implementazione numerica rispetto ai tali modelli.

La formulazione energetica adottata consente infatti di esprimere la dinamica del moto in termini di altezze e velocità del flusso su di una maglia di calcolo a passo variabile, mediante l'uso di sole equazioni algebriche.

I parametri di attrito utilizzati dal modello sono in sostanza equivalenti a quelli solitamente considerati nei modelli di tipo Voellmy (e.g. Bartelt et al., 1999), circostanza che permette un confronto diretto dei risultati con quelli ottenuti tramite i modelli di letteratura più noti.

IL MODELLO

Schema fisico e ipotesi

Il modello presentato basa il proprio algoritmo di calcolo su considerazioni di tipo energetico. Il flusso è trattato come un fluido omogeneo e incompressibile, o più in generale come una massa a densità costante che si muove lungo un percorso sotto l'azione della forza di gravità, ma presenta una modellazione energetica differente da quella di tipo idraulico a causa delle interazioni solido-fluido (p.es. Iverson et al., 1997).

Il modello realizzato permette di condurre l'analisi del moto per diversi materiali con



comportamento assimilabile alla tipologia descritta, quali ad esempio i debris flow e le valanghe di neve densa (come p.es. il modello RAMMS, Christen et al., 2007). Le equazioni del moto si basano sulla conservazione dell'energia totale posseduta tra due sezioni successive appartenenti al percorso più probabile, a meno di un termine dissipativo.

L'energia totale quindi è determinata da due contributi, uno di posizione rispetto ad una quota di riferimento, l'altro cinetico, legato alla velocità del flusso.

Dal punto di vista dinamico, all'innesco di una valanga, vi è un transitorio nel quale la massa nevosa passa da uno stato di stabilità ad uno di instabilità, nel quale poi si mobilizza.

Pur considerando la molteplicità dei possibili meccanismi di innesco, si può nella sostanza dire che l'innesco del movimento avviene per il superamento di una resistenza meccanica per uno o più strati critici, solitamente dovuta all'incremento del carico dovuto ad una crescita dello spessore del manto nivale (tipicamente l'altezza di precipitazione nivale cumulata su tre giorni, si veda p.es. Barbolini et al., 2004; Bocchiola et al., 2006), ad un fattore naturale (sciatore, animale, etc.), oppure ad un effetto termico (si veda p.es. Bocchiola e Medagliani, 2007 per una descrizione delle cause di distacco per una settantina di eventi valanga nell'area del Bormiese).

Questo transitorio è piuttosto rapido rispetto al tempo di run-out, ovvero il tempo intercorrente tra l'inizio della "corsa" fino all'arresto del corpo di valanga. Sulla base di tale differenza di ordini di grandezza temporali, il modello trascura nella sostanza il transitorio, ossia ipotizza che successivamente alla rottura si abbia direttamente la formazione della valanga. Si considera quindi direttamente lo stato finale, andando a studiare lo scorrimento della valanga lungo il pendio.

L'approccio energetico

L'approccio qui presentato, in Figura 1, fa riferimento ad un approccio utilizzato in letteratura per lo studio di flussi granulari

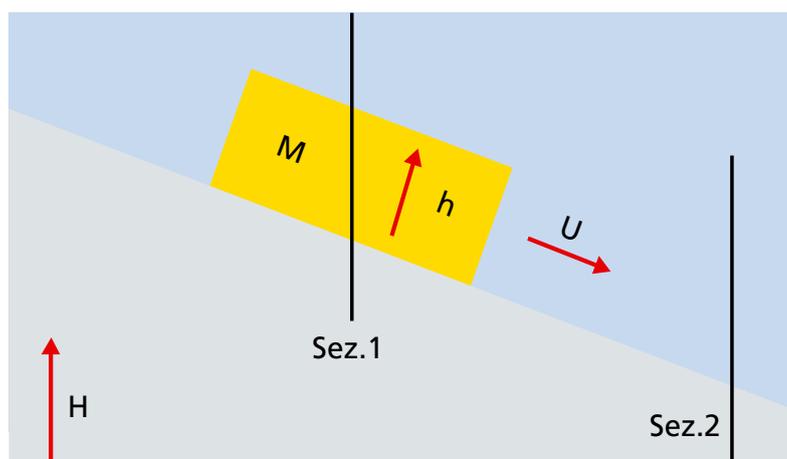
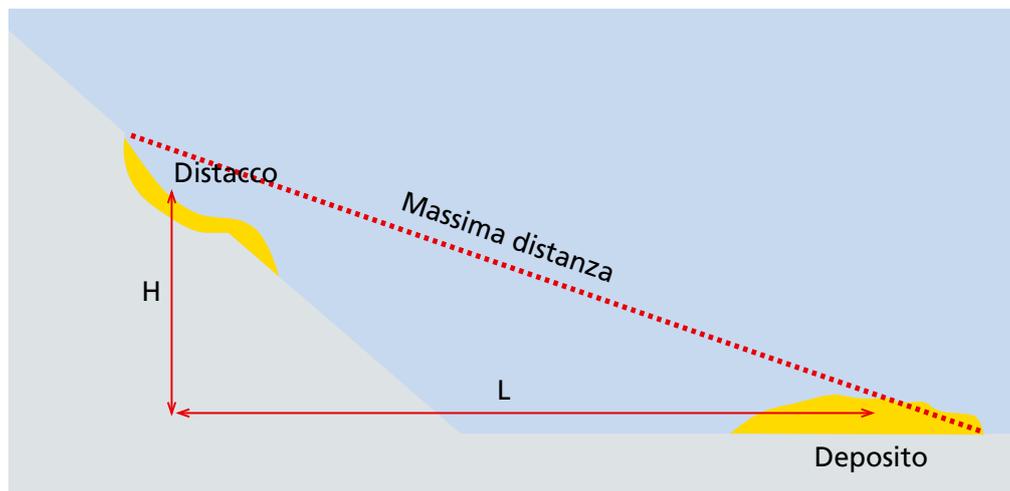


Fig. 1
Schematizzazione del fenomeno di valanga secondo l'approccio energetico (adattato da Iverson et al., 1997)

Fig. 2
Rappresentazione schematica dell'approccio energetico proposto

(p.es. Iverson et al., 1997; Iverson et al., 2001). Nel momento in cui la massa distaccata incomincia la sua discesa lungo un pendio, si verifica la trasformazione di energia potenziale in cinetica, seguito da un aumento di calore in seguito alle trasformazioni chimico - fisiche e agli attriti interni che si accompagnano in seguito al movimento della massa.

L'efficienza netta del moto descrive la conversione dell'energia potenziale in lavoro effettuato dalla massa durante la traslazione. L'equazione del moto si può ottenere eguagliando l'energia potenziale persa durante il movimento, MgH , con l'energia totale trasformata in maniera irreversibile in forze resistenti, MgR , che lavorano attraverso la distanza L di runout Eq. (1). Dove M è la massa della valanga, g è l'accelerazione di gravità ed R è il coefficiente di resistenza netta, che incorpora gli effetti delle forze interne ed esterne presenti. Le grandezza H ed L rappresentano il dislivello e la distanza di runout, rispettivamente.

Il modello qui proposto si basa sulla schematizzazione per passi discreti del fenomeno di trasformazione dell'energia potenziale in cinetica, a meno di una variazione del contenuto energetico dovuta all'energia dissipata a causa degli attriti interni e con il suolo.

La dissipazione è dipendente, oltre che dalla natura del suolo, anche dalla velocità del fluido, dalla superficie e dalla forma che la valanga assume in un certo istante su una certa area.

Basandosi sulla schematizzazione in Figura (2), in cui il corpo valanga si muove tra due successive sezioni di controllo, il principio di conservazione dell'energia in Eq. (1) viene espresso come (vedi Eq. (2), dove E_{tot} fa riferimento all'energia totale (p.es. in *Joules*) posseduta da un certo volume collocato nello spazio in un determinato istante, mentre il termine E_{dis} (p.es. sempre in *Joules*) rappresenta la quantità di energia dissipata per gli attriti al moto.

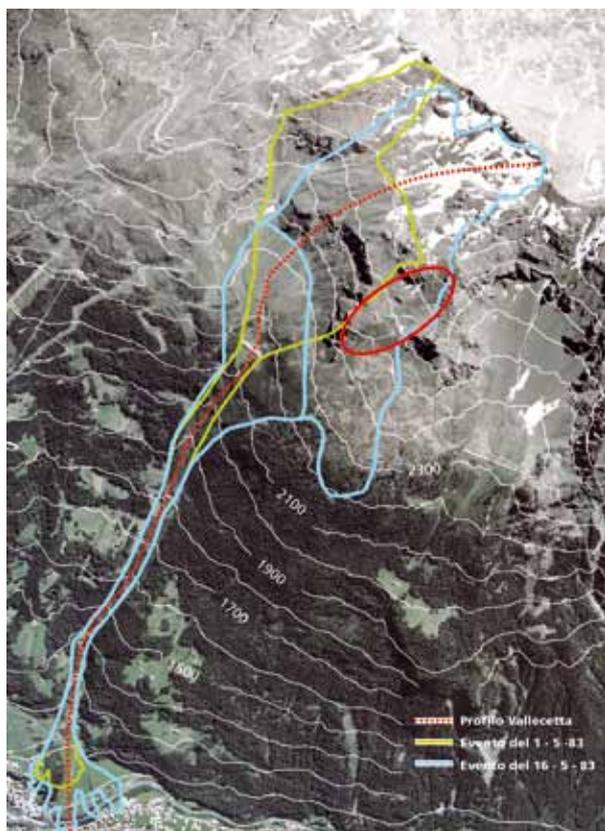


Fig. 3
Monte Vallecetta.
 Ortofoto del canalone e area occupata dagli eventi valanga del 1/5/1983 ed 16/5/1983. Si osservino i ponti da neve installati a seguito degli eventi (in Sx della zona di distacco, contornati in rosso). Si riporta il profilo di calcolo scelto.

L'uguaglianza sopra citata esprime la conservazione dell'energia tra due sezioni adiacenti durante il passaggio della massa, in istanti temporali successivi. Si può scrivere che l'energia totale è data dalla Eq. (3), con U velocità del flusso. L'unione delle Eq. 2 ed Eq. 3 fornisce il risultato descritto nella Eq. 4.

L'energia dissipata viene qui valutata modellando la valanga tramite in approccio di tipo Voellmy (p.es. Sovilla e Bartelt, 2002) (vedi Eq. 5), con ϕ pendenza locale ed h altezza del corpo valanga.

Il primo termine a destra nell'Equazione (5) tiene conto dell'attrito che si ha all'interfaccia tra materiale in moto e fondo, o componente di attrito di tipo Mohr-Coulomb, parametrizzata tramite il coefficiente di attrito μ .

Il secondo termine rappresenta le dissipazioni per la turbolenza interna al materiale in movimento, rappresentate dal coefficiente ξ .

Il terzo termine non rappresenta a stretto rigore un termine di dissipazione energetica, ma serve a descrivere la variazione di energia dovuta alle azioni interne alla valanga, schematizzata come un fluido bifase solido-liquido (p.es., un terreno)

in condizioni di spinta attiva (λ_a , in fase di accelerazione in direzione del moto) o passiva (λ_p , in fase di decelerazione nella stessa direzione, si veda p.es.

Sovilla e Bartelt, 2002). Tali situazioni vengono discriminate dai differenti valori del coefficiente λ (variabile tra $\lambda_a = 0.2-0.5$ nel primo caso e tra $\lambda_p = 2-4.6$ nel secondo, p.es. Sovilla e Bartelt, 2002; Sovilla et al., 2007).

Un'analisi preliminare ha mostrato come in assenza di tale termine le simulazioni condotte tramite modello portassero a risultati incongruenti con l'osservato, oltre che con i modelli di confronto.

Si è quindi deciso di inserire tale termine a favore di una migliore descrizione del fenomeno valanghivo.

Le equazioni sopra descritte vengono applicate localmente in funzione della discretizzazione utilizzata.

Il canale di scorrimento è definito a priori, ed è costituito da un profilo di valanga definito tramite un'analisi sito specifica, diviso in elementi rettangolari dei quali si conosce la larghezza e si ipotizza un'altezza di bordo infinita.

Tale approccio è in sostanza consistente con i modelli attualmente presenti in letteratura per il moto monodimensionale. Il modello viene implementato tramite uno schema numerico di soluzione di tipo esplicito, con condizione di Courant, dove l'intervallo temporale di integrazione viene definito iterativamente tramite calcolo della massima velocità di propagazione. Il criterio di convergenza si basa sulla valutazione globale dell'energia dissipata. La simulazione termina nel momento in cui l'energia totale dissipata risulta essere uguale all'energia potenziale iniziale, e conseguentemente la velocità stimata a valle raggiunge un valore nullo.

La simulazione degli eventi qui proposti, condotta su di una griglia spaziale di dimensioni medie di circa 60 metri, più fitta nella zona di runout, con una risoluzione temporale di 0.05 s, che fornisce risultati più che soddisfacenti, richiede pochi secondi, utilizzando un normale computer portatile. Le elaborazioni qui mostrate sono state condotte con l'ausi-

lio di MATLAB® 6.5, che rappresenta uno strumento di modellazione matematica assai diffuso e di facile utilizzo.

CASO DI STUDIO. IL MONTE VALLECETTA

In questo studio si considera il sito valanghivo del Monte Vallecetta, a Bormio (SO), riportato in Figura 3. Il monte Vallecetta e il canalone omonimo che costituisce la zona di scorrimento fanno parte del Comune di Valdisotto, a sud di Bormio.

La località è situata in una zona montuosa che ha subito notevoli modellamenti ad opera delle recenti glaciazioni quaternarie, che hanno conferito alla valle il caratteristico profilo ad U.

L'azione modificatrice ha agito sia nel fondo valle che alle quote più elevate, con la presenza di numerosi circhi sospesi a quote superiori ai 2000 m, divenuti visibili una volta ritirati i ghiacciai alle dimensioni odierne.

Questi sono attualmente dei potenziali bacini di accumulo nevoso che, in condizioni particolari, possono dare origini ad eventi valanghivi.

Il percorso valanghivo del Monte Vallecetta può essere così descritto: la zona di distacco principale è un ampio anfiteatro compreso tra la cima del Monte Vallecetta, la Cima Bianca e le dorsali che da esse si dipartono.

L'anfiteatro si restringe scendendo di quota fino a 2400 m s.l.m., dove è presente un brusco cambio di pendenza, per poi arrivare all'imbocco dello stretto canale che costituisce la zona di scorrimento vera e propria della valanga.

Raramente si assiste ad eventi che coinvolgano tutta la zona sopraccitata, ma spesso si verificano distacchi localizzati, che non arrivano oltre la parte ad "anfiteatro" (come si può vedere anche dalla CLPV). La zona di scorrimento è il canale del Rio Vallecetta, la cui sommità è facilmente individuabile in prossimità del cambio di pendenza e di morfologia situato alla quota di circa 2100 m s.l.m., che spesso coincide con la fine della zona di distacco.

La zona di arresto è il vasto conoide formato dal Rio Vallecetta, situato dove il versante della montagna raccorda con il fondovalle, con un percorso aperto di circa 600 m.

In questo contesto si verificano fenomeni valanghivi con frequenza annuale; la gran parte di essi sono eventi di piccole dimensioni che si staccano generalmente durante l'inverno e si arrestano a quote elevate. In Figura 3 si riporta la mappatura degli eventi significativi relativi al canale del Vallecetta qui studiati, ricostruiti tramite i dati del catasto del Corpo Forestale dello Stato e le schede valanga AINEVA (p.es. Bocchiola e Medagliani, 2007). Tali fenomeni valanghivi si riferiscono al 1 ed al 16 maggio 1983 e rappresentano nella sostanza gli eventi con il massimo runout osservato (a parte un evento occorso nell'anno 1886, per il quale si ha però scarsa documentazione). Entrambe le valanghe si sono staccate dal vallone Nord - Ovest del Monte Vallecetta.

La massa si è incanalata nell'alveo del torrente raggiungendo il fondovalle e depositandosi sul conoide di deiezione che comprende le località di Piazza e Piazzistolo. Nel primo caso la valanga ha interessato la zona attigua ai centri abitati, danneggiando solo in parte le strutture di un camping e non arrecando rilevanti danni a persone e strutture.

La valanga del 16 maggio invece ha completamente invaso tutto il conoide ed i detriti hanno raggiunto in più punti il fiume Adda, ostruendo la sottostante S.S. 38, provocando ingenti danni alle abitazioni ed anche la morte di una persona. Le due valanghe si sono staccate da una quota compresa tra i 3000 ed i 2200 m s.l.m.

La quantità di neve al distacco per l'evento del 1 Maggio è stimata in circa ottocentomila metri cubi, mentre per l'evento del 16 Maggio si stimano due milioni di metri cubi circa.

In seguito a tali eventi, sono stati costruiti dei ponti da neve, situati in Sx della zona di distacco (Figura 3), tra i 2440 ed 2900 m slm circa.



IL MODELLO ENERGETICO IN AZIONE

Dati di input e procedura

Le simulazioni della valanga del Monte Vallecetta si basano su di un profilo di scorrimento della valanga definito sulla base di studi precedenti (p.es. Riboni *et al.*, 2005, Profilo 1, riportato qui in Fig. 3). Dalla zona di distacco a circa 3100 m s.l.m. la massa di neve scende a valle seguendo un'ampia curva verso sinistra; arrivata ad una quota di 2500 m circa incontra un salto di quota di 100 m per poi proseguire fino all'imbocco del canale.

Seguendo il percorso del canale giunge fino a valle, dove si trova la zona di arresto, definita in corrispondenza dell'allargamento del canale in prossimità di Piazza. Le altezze al distacco utilizzate per i due eventi considerati sono state dedotte dalle schede valanga AINEVA.

In Tabella 1 sono riportati i dati utilizzati. A_0 è la quota al distacco, A_L la quota all'arresto, L la distanza di runout, H_s l'altezza di neve al distacco e W_0 , L_0 e V_0 , la larghezza, profondità e volume della valanga al distacco, rispettivamente. La parametrizzazione del modello viene condotta in maniera semplificata, allo scopo di fornire un confronto con i risultati forniti da un modello di riferimento comunemente utilizzato in letteratura, AVAL1D. I valori di ξ utilizzati nel modello sono riportati in Figura 5 e sono stati valutati tramite le ben note tabelle fornite dal manuale di utilizzo di AVAL1D (p.es. Sovilla, 2002; Riboni *et al.*, 2005). Il valore di λ è stato posto pari a $\lambda_a = 0.3$ ed a $\lambda_p = 2.5$, per spinta attiva e passiva, rispettivamente. Si è comunque osservata in pratica una maggiore influenza del parametro λ_p rispetto a λ_a . Il valore di μ viene ottenuto tramite calibrazione, ossia imponendo

l'esatta distanza di runout, sia per il modello proposto sia per il modello AVAL1D. Tale confronto serve a mostrare la differente implementazione dei modelli atta a riprodurre in maniera esatta l'evento (in termini di distanza di runout). Si conduce poi un'analisi di sensitività del modello al variare del parametro μ .

Come noto (p.es. Ancey et al., 2004; Bocchiola e Medagliani, 2007), tale parametro è nella sostanza il più influente sulla valutazione del runout. Si mostra il comportamento dei modelli al variare del parametro μ e se ne confrontano gli output in termini di runout, velocità ed altezze. L'analisi qui condotta serve a mostrare il grado di

consistenza dei risultati del modello qui proposto, al variare del parametro μ , anche in confronto ad AVAL1D.

Confronto con AVAL1D

Il modello AVAL1D, sviluppato dal personale dell'istituto SLF di Davos, rappresenta come noto un modello completo di dinamica delle valanghe dense, poiché risolve le equazioni complete di conservazione della quantità di moto, considerando tutti i termini dinamici. Il confronto con il modello energetico serve quindi a valutare se con quest'ultimo sia possibile, tramite il più semplice l'approccio energetico qui proposto, riprodurre in maniera corretta almeno le proprietà fondamentali della valanga (i.e. altezza, velocità) lungo il percorso. In Figura 4 e 5 si riporta l'andamento delle altezze e velocità massime simulate tramite il modello energetico per i due eventi considerati, ottenuti tramite calibrazione. I valori di μ sono riportati in Tabella 1. Si osservi il basso valore del coefficiente di attrito statico ($\mu = 0.05$) per la valanga del 16 Maggio. Tale valore è sicuramente dovuto alla dinamica della valanga, verificatasi in una situazione del tutto particolare. Infatti, la valanga occorsa pochi giorni prima, il primo di maggio, ha lasciato una considerevole copertura nivale sulla zona di conoide all'uscita del canalone del Vallecetta, la quale ha fornito nella sostanza una superficie di scorrimento priva di attrito, su cui la seconda valanga ha potuto scivolare, percorrendo in pratica un tratto assai più lungo di quello prevedibile in assenza di tale substrato nivale. La stessa procedura di calibrazione viene condotta per AVAL1D, sempre in Tabella 1, dove si mostra in effetti un basso valori del coefficiente di attrito statico ($\mu = 0.03$) per Aval1D per la valanga del 16 maggio, a conferma di quanto detto. Si osserva in effetti una sostanziale omogeneità nel comportamento del modello energetico con AVAL1D. L'andamento delle velocità ed altezza calcolate tramite AVAL1D viene riportato in Figura 4 e 5 per confronto. Si osserva come il modello energetico tenda a simulare altezze di flusso (mas-

Fig. 4 Monte Vallecetta. Massime altezze calcolate a seguito della calibrazione del modello energetico e di AVAL1D per i due eventi considerati.

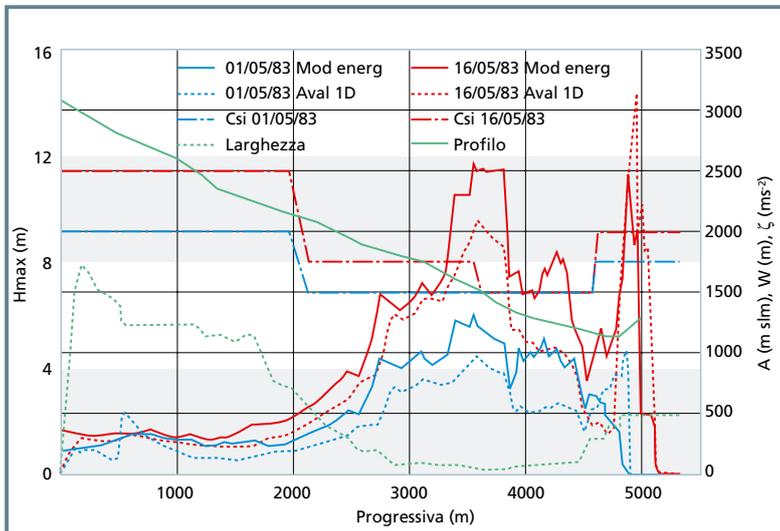
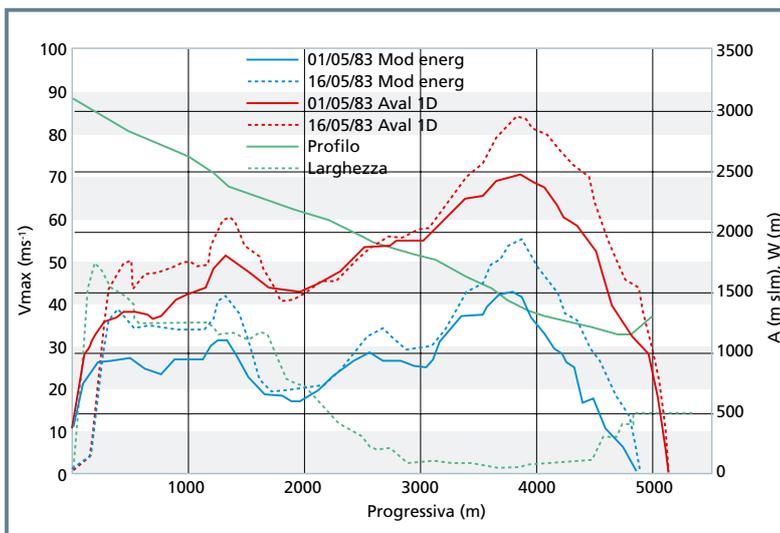


Fig. 5 Monte Vallecetta. Massime velocità calcolate a seguito della calibrazione del modello energetico e di AVAL1D per i due eventi considerati.



Tab. 1 Principali caratteristiche degli eventi di valanga considerati. Condizioni al contorno ed analisi di sensitività delle distanze di runout L rispetto al parametro μ . E_L è l'errore di valutazione sul runout. I valori in grassetto rappresentano i valori di calibrazione. Si considera una tolleranza sulle valutazioni della coincidenza del runout di ± 30 metri, pari ad un errore del $\pm 0,5\%$ circa, anche in ragione dell'incertezza legata alla mappatura dell'evento, condotta tramite mappa al 250.000.

EVENTI	Ao [m asl]	Al [masl]	L [m]	Hs [m]	Wo [m]	Lo [m]	VO [m3]	μ [-]	E_L [%]
Osservato 1 Maggio 1983	2950	1174	4877	0.9	800	1110	7.99E ⁵	-	-
Osservato 16 Maggio 1983	3140	1144	5172	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	-	-
Modello 1 Maggio 1983	2950	1174	4877	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.18	-
Modello 16 Maggio 1983	3140	1144	5172	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.05	-
AVAL1D@ 1 Maggio 1983	2950	1174	4877	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.15	-
AVAL1D@ 16 Maggio 1983	3140	1144	5172	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.03	-
Modello 1 Maggio 1983	2950	1174	4984	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.12	2.2
Modello 16 Maggio 1983	3140	1144	5177	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.03	0.0
AVAL1D@ 1 Maggio 1983	2950	1174	4994	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.12	2.4
AVAL1D@ 16 Maggio 1983	3140	1144	5172	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.03	0.0
Modello 1 Maggio 1983	2950	1174	4731	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.24	-3.0
Modello 16 Maggio 1983	3140	1144	5172	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.07	0.0
AVAL1D@ 1 Maggio 1983	2950	1174	4569	0.9	800	1110	7.99E ⁵	0.24	-6.31
AVAL1D@ 16 Maggio 1983	3140	1144	5116	1.3	1300	1254	2.118E ⁶	0.07	-1.1

sime) più basse (con differenze fino al 20% circa in alcuni tratti) di quelle simulate tramite AVAL1D, con velocità (massime) superiori (anche qui con differenze fino al 20% circa). Si osservi che dati di altezza e velocità misurati, come noto estremamente rari, non sono disponibili per gli eventi in questione, ed il confronto tra modelli qui proposto ha lo scopo di valutare la verosimiglianza dei risultati ottenuti dal modello energetico, più che la loro esattezza assoluta. In tale ottica, i risultati sembrano soddisfacenti. Si mostrano poi in Tabella 1 i risultati dell'analisi di sensitività condotta sul valore di μ . Si sono utilizzati i valori di μ relativi al modello energetico (che nella sostanza non differiscono molto dai valori di AVAL1D) per entrambe le valanghe e si sono assunte variazioni del coefficiente di attrito statico pari a circa un terzo, in più o in meno, $\pm 33\%$. Tale oscillazione sembra ragionevole, data la ben nota complessità nell'assegnazione del coefficiente μ . In Tabella 1 si riportano le variazioni percentuali della distanza di arresto calcolata dal modello energetico e da AVAL1D, che come si osserva sembrano in sostanza consistenti. Nelle Figure da 6 a 9 si riportano invece i confronti condotti per le altezze (Fig. 6 ed 8) e velocità (Fig. 7 e 9) massime lungo il percorso tra il modello energetico ed AVAL1D, per i due eventi studiati. Il modello energetico riproduce nella sostanza con buona approssimazione le caratteristiche fondamentali della valanga (altezza e velocità massima), almeno per come descritte dal modello AVAL1D, anche in relazione a variazioni non trascurabili del coefficiente di attrito statico. Si osserva la stessa tendenza del modello a fornire altezze inferiori e velocità superiori rispetto ad AVAL1D. Una maggiore discrepanza sembra apparire nel caso della valanga del 1 Maggio 1983. Tale discrepanza è sicuramente dovuta all'influenza del valore di μ , che cambia notevolmente ($0.12 \leq \mu \leq 0.24$), mentre nel caso della valanga del 16 Maggio 1983, il valore di μ rimane in sostanza piccolo ($0.03 \leq \mu \leq 0.07$), fornendo un risultato più stabile. Inoltre, il modello energetico

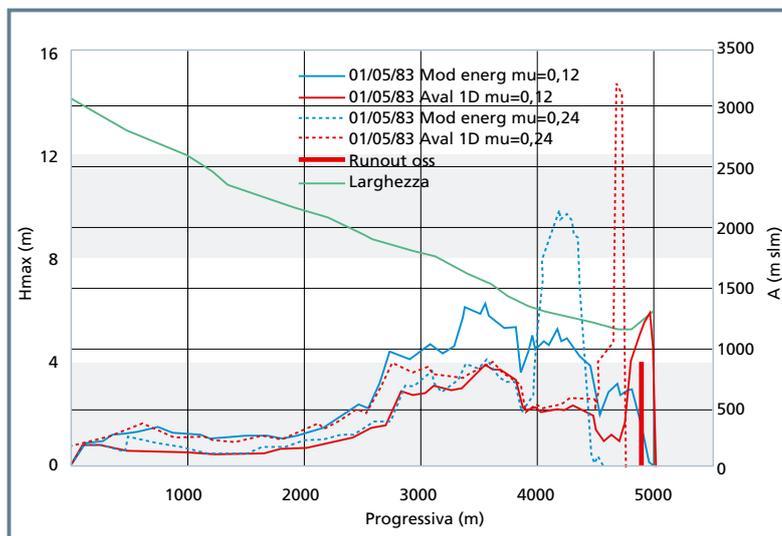


Fig. 6 Monte Vallecetta. Analisi di sensitività tramite il modello energetico e AVAL1D. Evento del 1 Maggio 1983. Altezze massime. Parametri indicati in Tabella 1.

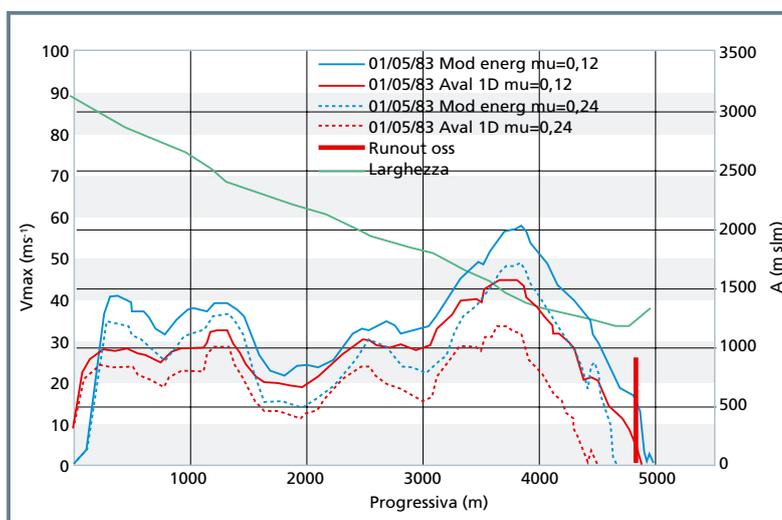


Fig. 7 Monte Vallecetta. Analisi di sensitività tramite il modello energetico e AVAL1D. Evento del 1 Maggio 1983. Velocità massime. Parametri indicati in Tabella 1.



Fig. 8
Monte Vallecetta. Analisi di sensitività tramite il modello energetico e AVAL1D. Evento del 16 Maggio 1983. Altezze massime. Parametri indicati in Tabella 1.

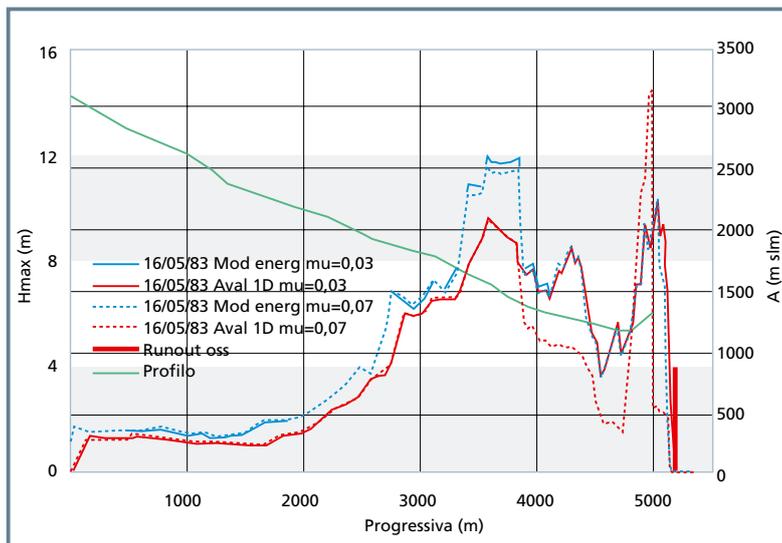
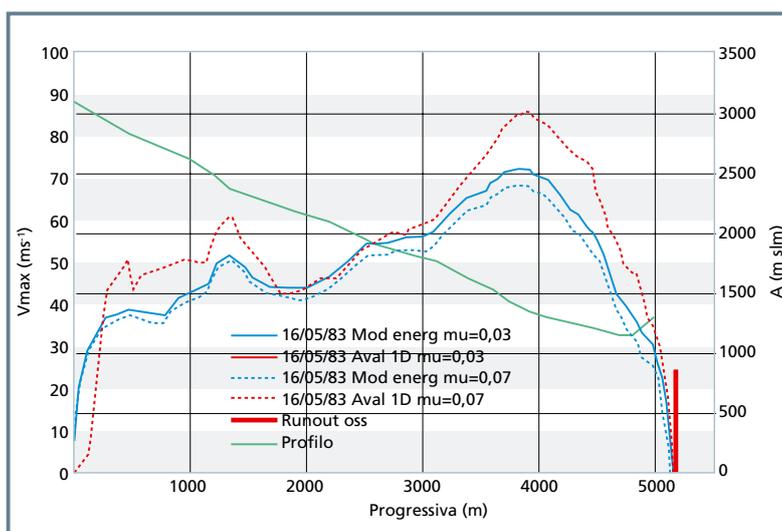


Fig. 9
Monte Vallecetta. Analisi di sensitività tramite il modello energetico e AVAL1D. Evento del 16 Maggio 1983. Velocità massime. Parametri indicati in Tabella 1.



sembra lievemente meno sensibile del modello AVAL1D a variazioni percentuali dell'ordine qui illustrato ($\pm 33\%$) del coefficiente μ , come si vede dall'analisi comparata del runout (Tabella 1, visibile anche nelle Figure 4-9) e delle altezze e velocità (Figure 4-9).

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il modello proposto sembra fornire risultati nella sostanza accettabili. Il confronto con il modello AVAL1D, che rappresenta di fatto un riferimento nel campo investigato, mostra una sostanziale aderenza, anche per quanto riguarda la parametrizzazione. Tale risultato è confortante, soprattutto in ragione della relativa semplicità del modello proposto, in termini sia concettuali, sia di implementazione numerica. Ulteriori sviluppi saranno dedicati alla validazione del modello per altri siti ed eventi valanghivi ed al suo utilizzo a scopo di valutazione delle aree a rischio di valanga. Il modello, data la sua semplicità, ben si presta ad essere innestato all'interno di un modello idrologico distribuito su partizione del bacino idrografico del tipo a *tubi di flusso*. Inoltre, si vuole investigare il problema della variazione della massa valanghiva, tramite un approccio da calibrare su un data base di eventi disponibili con valutazione della massa al distacco ed al deposito.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano qui ringraziare l'Ingegnere Michele Medagliani, per l'aiuto fornito nella raccolta ed elaborazione dei dati valanghivi qui utilizzati. Si ringrazia inoltre il personale ARPA (Centro Nivometeorologico di Bormio, AINEVA) e del Corpo Forestale dello Stato, Comando Regionale Lombardia, per aver messo a disposizione il materiale relativo agli eventi valanghivi. Le simulazioni con AVAL1D® sono state condotte su software dell'istituto SLF di Davos, in licenza al Dip. DIAR del Politecnico. Un supporto parziale alle attività di ricerca qui riportate deriva dal progetto UE IRASMOS (Contratto EC 018412).





Equazioni

1. $MgH = MgRL$

2. $E_{tot} (1) = E_{tot} (2) + E_{dis} (1,2)$

3. $E_{tot} = E_{pot} + E_{cin} = MgH + MU^2/2g$

4. $MgH_1 + MU_1^2/2g = MgH_2 + MU_2^2/2g + E_{dis}$

5. $E_{dis} = MgL \cos \phi \mu + MgL U^2/\xi h + MgL \cos \phi \lambda \frac{\delta h}{\delta x}$

Bibliografia

- Barbolini, M., Gruber, U., Keylock, C. J., Naaim, M., Savi, F. (2000). Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites, *Cold Regions Science and Technology*, 31,133-149.
- Barbolini M., Natale L., Cordola M., Tecilla, G. (2004). Linee Guida metodologiche per la perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe, *Neve e Valanghe*, 53, 6-13.
- Bartelt, P., B. Salm, Gruber, U. (1999). Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining, *Journal of Glaciology*, 45, 242-254.
- Bocchiola, D., Medagliani, M., Rosso, R. (2006). Regional snow depth frequency curves for avalanche hazard mapping in central Italian Alps, *Cold Regions Science and Technology*, 46, 3, 204-221.
- Bocchiola, D., Medagliani M. (2007). Caratteri morfologici delle valanghe: uno studio nell'area del Bormiese, *Neve e Valanghe*, 3, 70-79.
- Bocchiola, D., Rosso, R. (2007). The use of regional approach for hazard mapping at an avalanche site in northern Italy, *Advances in Geosciences*, 14, 1-9.
- Bovis, M.J., Mears, A.I. (1976). Statistical prediction of snow avalanche runout from terrain variables, *Arctic and Alpine Research*, 8, 115-120.
- Christen, M. Bartelt, P., Gruber, U., Filaferro, E. (2002a). AVAL1D: Un programma di dinamica delle valanghe per l'uso comune, *Neve e Valanghe*, 47.
- Christen, M. Bartelt, P., Gruber, U. (2002b). AVAL-1D: Numerical calculations of dense flow and powder snow avalanches, *User Manual*, SLF Davos, Switzerland, 2002.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U. (2007). Modelling Avalanches, *GE-Oconnexion International* 6, 4, 38-39.
- Iverson Richard M., Reid M. E., LaHusen R. G. (1997). Debris flow mobilization from landslides, *Annu. Rev. Earth Planet*, 25, 85-138.
- Iverson Richard M., Denlinger Roger P. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three - dimensional terrain, *Journal of Geophysical Research*, 106, 537-552.
- Lied, K., Bakkehøi, S. (1980). Empirical calculations of snow avalanche run-out distance based on topographic parameters, *J. of Glaciol.*, 26 (94), 165-177.
- Martinelli, M. (1991). L'applicazione della modellistica di Salm, *Neve e Valanghe*, 13.
- McClung, D. M., Mears, A. I. (1991). Extreme value prediction of snow avalanche runout, *Cold Regions Science and Technology*, 19, 163-175.
- McClung, D.M. (2001). Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models, *Can. Geotech. J.*, 38, 1254-1265.
- Perla, R. I., Cheng, T. T., McClung, D. M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion, *J. of Glaciol.*, 26(94), 197-207.
- Riboni, A., Sovilla, B., Bocchiola, D., Rosso, R. (2005). Un approccio regionale per la stima delle altezze al distacco nel calcolo dinamico delle valanghe applicato per due casi di studio in Lombardia, *Neve e Valanghe*, 55, 22-39.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. (1990). Berechnung von Fließlawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen [Calcolo delle valanghe: un metodo pratico con esempi], *Eidg. Inst. Schnee- und Lawinenforsch. Mitt.* 47.
- Sovilla, B., Bartelt, P. (2002). Observations and modelling of snow avalanche entrainment, *Nat. Hazards*, 2, 169-179.
- Sovilla, B. (2002). Parametri di input per simulazioni di valanghe dense, In: *Corso di dinamica delle valanghe*, Eidg. Inst. Schnee- und Lawinenforsch. SLF Davos, Bormio, 4-5 Dicembre 2002.
- Sovilla, B., Burlando, P., Bartelt, P. (2006). Field experiments and numerical modeling of mass entrainment in snow avalanches, *Journal of Geophysical Research*, 111, F03007, doi:10.1029/2005JF000391.
- Sovilla, B., Margreth, S., Bartelt, P. (2007). On snow entrainment in avalanche dynamics calculations, *Cold Regions Science and Technology*, 47, 69-79.
- Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von lawinen [Sulla forza distruttiva delle valanghe], *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrgang, 73.