



# Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

## FENOMENI DI COLATA DETRITICA ALLA TESTATA DI UN BACINO DOLOMITICO

### DEBRIS FLOWS AT THE VALLEY HEAD OF A BASIN IN THE DOLOMITES

Vincenzo D'Agostino<sup>1</sup>, Lorenzo Marchi<sup>2</sup> e Roberto Coali<sup>3</sup>

#### RIASSUNTO

Nella regione dolomitica sono diffuse le colate detritiche che, innescandosi ai piedi delle pareti rocciose, si sviluppano sulle falde detritiche sottostanti. A seconda delle condizioni topografiche locali, queste colate possono proseguire verso valle o arrestarsi al piede dei ghiaioni detritici. In questo secondo caso, solitamente, non si hanno conseguenze dirette, in termini di rischio, per le zone del bacino abitate o interessate da infrastrutture viarie. A causa della relativa semplicità rispetto a sistemi torrentizi più complessi, l'osservazione delle colate detritiche che si sviluppano sulle falde detritiche è però di notevole interesse per approfondire la conoscenza delle condizioni di innesco e dei processi di trasporto e deposizione. Questi aspetti sono stati analizzati, con particolare riferimento ai meccanismi di innesco, in un'area di studio ubicata alla testata del bacino del Torrente Travignolo (Provincia di Trento).

**Key words:** Colata detritica, processi d'innesco, conoide detritico, Dolomiti.

#### ABSTRACT

In the Dolomites, widespread debris flows initiated at the contact of scree slopes with overhanging rock cliffs. Depending on the topographic conditions of lower slopes, debris flows can travel downstream or stop at the foot of scree slopes. In the latter case, they do not cause risk for inhabited areas and transportation routes. Debris flows affecting scree slopes are usually less complex than those occurring in larger basins. This makes them suitable for detailed analyses of initiation, transportation and deposition processes. These aspects have been analysed, with particular regard to triggering mechanisms, in a study area located at the valley head of the Torrente Travignolo basin (Province of Trento).

**Key words:** Debris flow, triggering processes, debris fan, Dolomites.

1 Professore Associato, Università di Padova – Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Viale dell'Università, 16, 35020 Legnaro (PD), Italia (Tel: +390498272682, email: vincenzo.dagostino@unipd.it)

2 Ricercatore, CNR IRPI, Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italia

3 Direttore Ufficio di Zona, Provincia Autonoma di Trento, Servizio Sistemazione Montana, Via G.B. Trener 3, 38100 Trento, Italia

## **INTRODUZIONE**

Le colate detritiche sono un processo geomorfologico fra i più diffusi e rilevanti nei bacini alpini, così come in numerosi altri ambienti morfoclimatici; esse presentano grande varietà di caratteristiche per quanto riguarda i meccanismi di innesco e l'assetto morfologico delle pendici e dei bacini interessati. Nella regione dolomitica, notevole diffusione hanno le colate che, in seguito a piogge di forte intensità, si originano ai piedi delle pareti rocciose che costituiscono le parti superiori dei rilievi e si sviluppano, lungo canali più o meno incisi e confinati, sulle sottostanti falde detritiche.

In presenza di edifici ed infrastrutture viarie nelle parti inferiori dei versanti e sui conoidi alluvionali questi fenomeni possono essere all'origine di elevate condizioni di rischio. In altri casi le colate innescatesi sulle falde detritiche si esauriscono in zone a bassa pendenza occupate da praterie alpine o da foreste di protezione o confluiscono nella rete idrografica di ordine superiore, alimentando i processi di trasporto solido. In assenza di danni ad edifici ed infrastrutture, il verificarsi dei fenomeni rimane spesso inavvertito, nonostante la sua rilevanza ai fini dell'evoluzione morfologica delle parti superiori dei bacini idrografici e della dinamica del sedimento.

Alle colate detritiche che si sviluppano sulle pendici dei rilievi dolomitici sono stati dedicati in anni recenti studi che hanno riguardato le caratteristiche morfologiche generali ed i volumi mobilizzati (Marchi e Tecca, 1996), la misura dei parametri del flusso in stazioni di monitoraggio e la ricostruzione delle caratteristiche reologiche (Tecca et al., 2003), la valutazione della pericolosità e la zonazione del rischio (Pasuto e Soldati, 2003). Colate detritiche che interessano le falde detritiche presenti ai piedi di rocce carbonatiche, presentando caratteristiche simili a quelle osservate nella regione dolomitica, sono state descritte anche in altre regioni alpine (Mortara et al., 1994) ed extra-alpine (Jackson et al., 1989).

Questa memoria intende fornire un ulteriore contributo allo studio di questi fenomeni, attraverso lo studio di un caso rappresentativo. L'analisi è stata condotta in un'area ubicata alla testata del bacino del Travignolo (Trentino Orientale) e ha riguardato, in particolare, i meccanismi di innesco ed un'analisi dell'area di deposizione della colata. Le dimensioni contenute del bacino studiato, la relativa facilità di accesso alle zone d'innesco delle colate detritiche (circostanza non frequentissima in ambiente alpino), l'assenza di interventi di sistemazione o di rimozione del materiale solido accumulato rendono il sito prescelto adatto allo studio di dettaglio delle colate detritiche. Un ulteriore motivo di interesse dell'area di studio risiede nella notevole entità dei fenomeni in essa avvenuti negli ultimi anni.

## **AREA DI STUDIO**

Il bacino oggetto di studio, le cui principali caratteristiche morfometriche sono presentate nella tabella 1, è ubicato presso la testata del Torrente Travignolo (bacino dell'Avisio, Trentino Orientale) (Fig. 1).

La litologia (Fig. 2) è rappresentata in netta prevalenza da formazioni dolomitiche (Dolomia dello Sciliar e Dolomia del Serla); modesta estensione hanno affioramenti della Formazione di Livinallongo e di conglomerati e calcareniti della Serie Werfeniana.

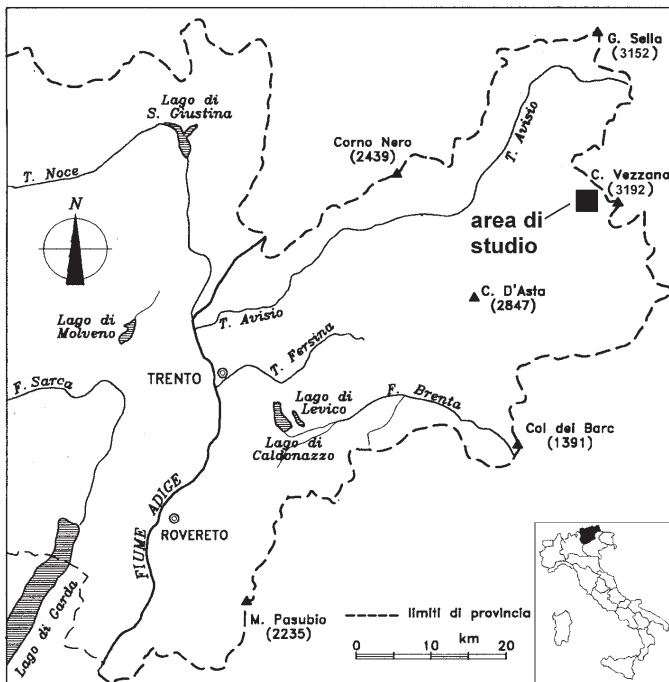


Fig. 1: Inquadramento geografico dell'area di studio

Fig. 1: Location map

Tab. 1: Principali caratteristiche morfometriche del bacino oggetto di studio

Tab. 1: Principal morphometric characteristics of studied basin

Superficie (km <sup>2</sup> )	0.497
Altitudine massima (m)	3118
Altitudine minima (m)	2111
Altitudine media (m)	2517
Pendenza media (°)	58
Lunghezza dell'asta principale allo spartiacque (m)	1460

Nel bacino oggetto di studio è possibile riconoscere due sottobacini, denominati “Cima dei Bureloni”, con una superficie di 15900 m<sup>2</sup> e “Cima di Val Grande” (19200 m<sup>2</sup>), che danno il maggior contributo, sia in termini di deflussi liquidi, sia come produzione di sedimento, alla formazione delle colate detritiche (Fig. 3). Osservazioni di campagna hanno mostrato come il contributo della restante parte del bacino alla formazione delle colate detritiche sia decisamente limitato, specialmente per quanto riguarda gli apporti di materiale solido.

La parte superiore del bacino è occupata interamente da affioramenti rocciosi a forte pendenza; a questi fa seguito, verso il basso, un'ampia fascia di detrito di falda. Allo sbocco del bacino si estende un conoide di deiezione edificato dalle colate detritiche che traggono origine ed alimentazione dalle falde detritiche presenti a monte. Una visione d'insieme del sistema bacino-conoide, rappresentativo di situazioni morfologiche ricorrenti in ambiente dolomitico, è presentata nella figura 4, nella quale si possono osservare due distinte zone di innesco riconducibili ai due sottobacini di figura 3.

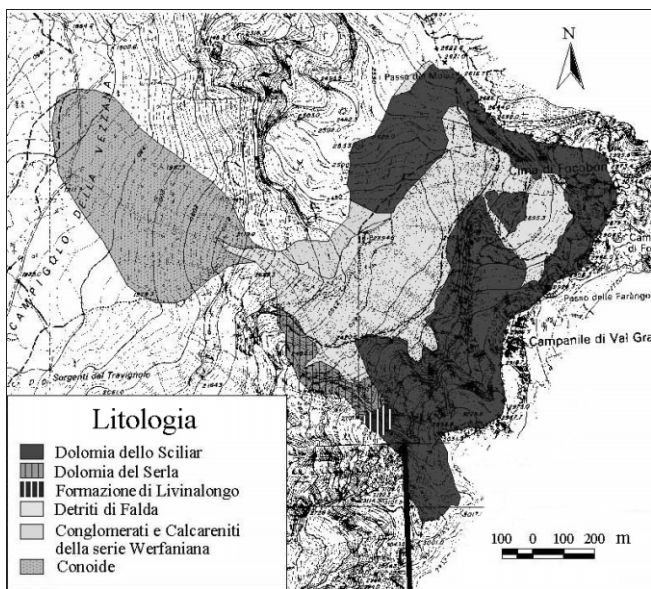


Fig. 2: Litologia del bacino

Fig. 2: Basin lithology

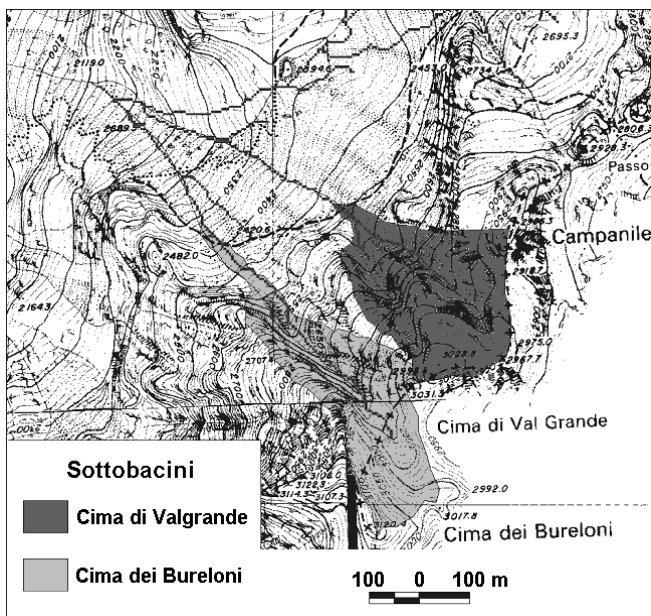
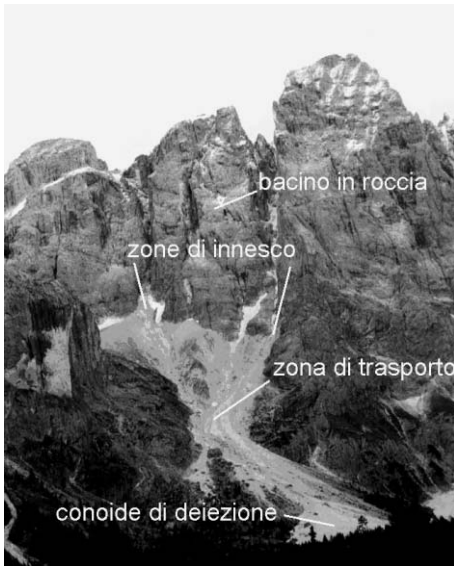


Fig. 3: Sottobacini a monte dei punti di innesco delle colate detritiche

Fig. 3: Subbasins upstream of debris-flow initiation points



**Fig. 4:** Veduta d'insieme del bacino e del conoide alluvionale

**Fig. 4:** Drainage basin and alluvial fan

Su gran parte del bacino la copertura vegetale è assente o è limitata a vegetazione erbacea rada e discontinua, mentre la parte inferiore del conoide si estende fino ad un'area occupata da un popolamento rado di conifere.

Il clima dell'area di studio è tipico delle zone più elevate della regione dolomitica. L'afflusso meteorico medio annuo alla stazione meteorologica di Passo Rolle, ubicata a circa 3 km dal bacino oggetto di studio, ammonta a circa 1300 mm con minimi nel periodo invernale, quando le precipitazioni avvengono prevalentemente in forma nevosa. Nelle altre stagioni le precipitazioni sono abbondanti con massimi nel mese di maggio (153 mm) e di settembre (146 mm). La temperatura media annua corrispondente all'altitudine media del bacino, stimata sulla base dei dati delle stazioni meteorologiche più prossime, risulta pari a circa 0 °C.

Le caratteristiche topografiche del bacino sono state analizzate realizzando un modello digitale del terreno a maglie quadrate di 5 m di lato. Sulla stessa base sono state gestite le carte tematiche utilizzate nello studio. I software utilizzati sono stati Arcview GIS 3.2 (ESRI, 1999), per l'organizzazione dei dati e la produzione degli output grafici, mentre il package WODITEM (Cazorzi, 1996) è stato impiegato per l'analisi idrologica.

## INDAGINI DI CAMPAGNA

L'analisi dei processi di innesco, propagazione e deposito delle colate detritiche richiede una serie di indagini preliminari che riguardano l'assetto topografico del bacino, le caratteristiche dei materiali coinvolti e la determinazione dei volumi depositati.

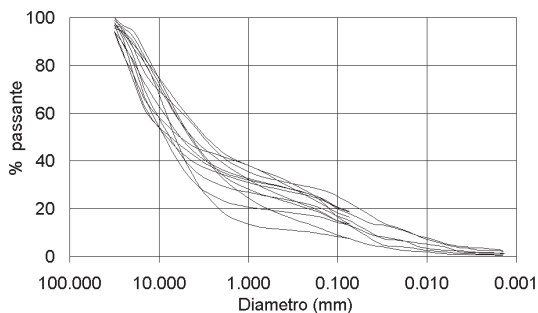
Aspetti di dettaglio della topografia del bacino, con particolare riguardo alla zona interessata dalle colate detritiche, sono stati oggetto di rilievi sul terreno. Sono state rilevate numerose sezioni trasversali dei canali ed il loro profilo longitudinale, nonché la superficie dei depositi.

Le quote entro cui si estende il bacino, come pure l'esposizione prevalentemente settentrionale ed il suo assetto morfologico (caratterizzato dalla presenza di alte ed articolate pareti rocciose su cui si formano valanghe che si depositano sulle pendici sottostanti), hanno suggerito di indagare l'eventuale presenza di ghiaccio sepolto all'interno della falda detritica da cui si generano le colate. La presenza di ghiaccio sepolto nella zona d'innesco di una colata detritica è stata rilevata da Del Longo et al. (2001) nello studio di un evento avvenuto nel 1994 ai piedi del Monte Pelmo (Dolomiti). Del Longo et al. (2001) osservano che, mentre la fusione di ghiaccio presente all'interno del detrito ha avuto un ruolo marginale nell'innesco del fenomeno, la superficie della massa di ghiaccio, inclinata nella stessa direzione del

versante, ha costituito una superficie di scivolamento preferenziale, favorendo il distacco della sovrastante massa detritica satura. E' parso dunque opportuno indagare l'eventuale presenza, estensione e spessore di masse di ghiaccio sepolto nelle falde detritiche dell'area di studio mediante l'uso di georadar (*ground penetrating radar* - GPR). Questa tecnica si basa fondamentalmente sulla misura della velocità di propagazione di onde elettromagnetiche trasmesse nel sottosuolo per mezzo di un'antenna trasmittente e registrate da antenne riceventi dopo essere state riflesse al passaggio attraverso strati di differenti caratteristiche elettriche. L'intensità, la fase e la frequenza del segnale ricevuto dipendono dalle caratteristiche del materiale attraversato. I risultati ottenuti nell'analisi della falda detritica dell'area di studio non hanno evidenziato la presenza di ghiaccio sepolto. Ciò ha permesso di sviluppare le successive analisi sull'innesco e lo sviluppo delle colate senza la necessità di considerare i complessi fenomeni legati alla presenza di masse di ghiaccio nella falda detritica.

Benché non sia stata evidenziata la presenza di ghiaccio sepolto, i fenomeni di deglaciazione possono aver influenzato la dinamica torrentizia alla testata del bacino del Torrente Travignolo. La presenza di un nevaio persistente nella parte superiore della falda detritica è infatti documentata fino all'anno 1990. L'estinzione di questo nevaio, accompagnata alla fusione del permafrost sottostante e ad un'accresciuta incidenza delle precipitazioni in forma liquida nel periodo estivo, ha verosimilmente contribuito all'attivazione dei fenomeni di colata detritica verificatisi nell'ultima decade.

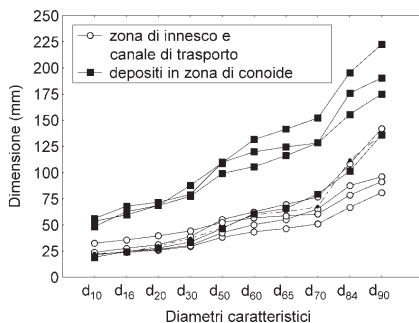
Una serie di analisi granulometriche è stata effettuata per analizzare le caratteristiche tessiturali del materiale interessato dalle colate detritiche. Le analisi hanno riguardato sia il materiale costituente la matrice, analizzato con metodo ponderale e per sedimentazione, sia il materiale superficiale, analizzato per mezzo di tecniche numerali (*quadrillage*). La distribuzione granulometrica della matrice (diametri < 32 mm) è presentata nella figura 5.



**Fig. 5:** Distribuzione granulometrica della matrice delle colate detritiche  
**Fig. 5:** Particle size of debris-flow matrix

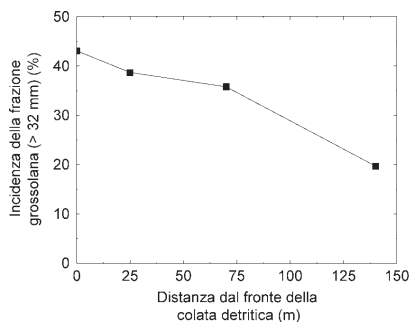
L'andamento segue quello tipico delle colate detritiche in ambiente dolomitico, caratterizzato da una prevalenza delle componenti ghiaiose e sabbiose. Relativamente alle componenti più fini si riscontra la presenza di una frazione limosa relativamente abbondante ed un'incidenza molto modesta delle argille (Moscarello et al., 2001). Per quel che riguarda la matrice (Fig. 5), non si sono osservate per differenze rilevanti fra le aree di innesco delle colate, il canale di trasporto ed il conoide alluvionale. La figura 6 presenta i diametri caratteristici dei vari campioni di materiale superficiale analizzati con metodo numerale nelle varie parti della colata detritica. Si osserva una netta differenza fra la maggior parte dei rilievi effettuati sul conoide alluvionale e quelli condotti nelle altre parti della falda detritica. Il conoide mostra, infatti, una maggior presenza di materiale grossolano in superficie; questo si accorda con

quanto comunemente osservato sulla concentrazione delle frazioni di diametro maggiore sulle parti esterne dei depositi. Anche nell'ambito della zona di deposito, le parti più prossime al fronte risultano più ricche di materiale grossolano (Fig. 7). Le osservazioni presentate nella figura 7 derivano dall'analisi di campioni di materiale sottosuperficiale; come separazione fra la componente grossolana e la matrice è stato adottato un valore soglia di 32 mm, corrispondente al diametro maggiore utilizzato nell'analisi per vagliatura.



**Fig. 6:** Diametri caratteristici del materiale superficiale

**Fig. 6:** Representative grain sizes of surface material



**Fig. 7:** Relazione fra distanza dal fronte dei depositi e incidenza della frazione grossolana (> 32 mm)

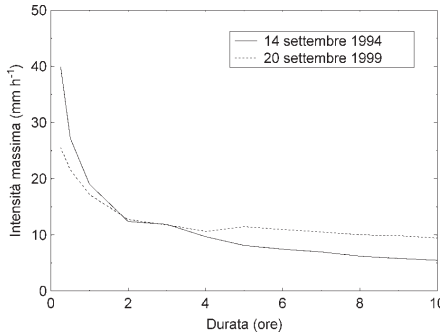
**Fig. 7:** Relation between distance from front deposits and percentage of coarse debris (> 32 mm)

Il confronto fra foto aeree riprese nel 1973 e nel 1999 ha evidenziato una forte espansione del conoide, che testimonia un'accresciuta attività delle colate detritiche. Nell'ultima decade, nel bacino oggetto di studio si sono verificate due colate detritiche, avvenute, rispettivamente, il 14 settembre 1994 ed il 20 settembre 1999. Non sono disponibili misure dei volumi detritici depositati nei due singoli eventi. Il volume complessivamente depositato è stato determinato confrontando la superficie del conoide rilevata mediante un rilievo topografico effettuato nell'estate del 2001 con quella ricavata dalla Carta Tecnica Provinciale in scala 1:5000, relativa alla situazione precedente le colate detritiche del 1994 e del 1999. Il volume così determinato è pari a 150000 m<sup>3</sup>. E' parso opportuno verificare questo valore con un rilievo del materiale eroso dai canali detritici percorsi dalla colata. La misura del volume eroso è stata effettuata confrontando le sezioni trasversali rilevate nel 2001 con quelle precedenti gli eventi del 1994 e del 1999. Il volume così ottenuto, pari a 130000 m<sup>3</sup> è coerente, tenuto conto delle approssimazioni implicite nei rilievi effettuati, con quello ricavato dall'accrescimento del conoide. Nelle successive analisi, mediando le due misure, si è quindi preso come riferimento un volume complessivo di 140000 m<sup>3</sup>, cui corrisponde, tenendo conto della porosità del deposito, un volume effettivo di circa 100000 m<sup>3</sup> di sedimento.

## BACK-ANALYSIS DEGLI EVENTI

E' stata effettuata una *back-analysis* degli eventi di colata detritica avvenuti in data 14 settembre 1994 e 20 settembre 1999. La prima colata è stato generata da un evento di precipitazione composto: il 13 settembre sono caduti a Passo Rolle circa 54 mm di pioggia, mentre il giorno successivo si è cumulata una precipitazione di 55 mm in circa 9 ore con un picco di intensità di 10 mm in 15 minuti. Il secondo evento ha fatto registrare una pioggia cumulata di 126 mm in 16 ore con due picchi di intensità di 5.8 e 6.4 mm in 15'. In figura 8

viene sintetizzata la curva di massima intensità - durata che ha caratterizzato i due eventi. Entrambi i fenomeni di colata detritica si sono innescati ai piedi di due canali in roccia che solcano la testata del bacino (Fig. 4) e precisamente nei punti di contatto fra la parete rocciosa ed il sottostante pendio detritico fortemente acclive. Durante le precipitazioni più intense si verifica, infatti, l'attivazione del flusso entro questi canali e l'impatto della portata liquida sulla falda di sedimenti morenici rappresenta un importante fattore di innesco del moto gravitativo.



**Fig. 8:** Curva massima intensità – durata per le piogge che hanno innescato le colate detritiche  
**Fig. 8:** Maximum intensity-duration curves for two debris-flow causing storms

E' stata condotta una ricostruzione idrologica dei due eventi di piena, analizzando separatamente i due sottobacini (Cima dei Bureloni e Cima di Val Grande; Fig. 3) da cui si originano le colate detritiche alla testata del bacino del torrente Travignolo. La chiusura di questi sottobacini è stata fatta coincidere con le soglie morfologiche a partire dalle quali si innescano le colate detritiche. La simulazione idrologica dei due eventi è stata condotta mediante il modello WODITEM (Cazorzi, 1996). Questo modello si basa sull'applicazione distribuita del calcolo della pioggia efficace secondo il metodo SCS (Soil Conservation Service, 1972), che viene combinata con l'ipotesi di trasferimento cinematico del deflusso efficace mediante l'assegnazione di una velocità del flusso su reticolo e di una corrispondente velocità su versante. Nella tabella 2 sono sintetizzati i risultati della simulazione dei due eventi; nella tabella sono evidenziati i volumi efficaci ( $V_e$ ) di deflusso prodotti dai due sottobacini e il valore al colmo ( $Q_p$ ) dell'idrogramma di piena a questi associato.

**Tab. 2:** Volumi di deflusso ( $V_e$ ) e portate liquide di picco ( $Q_p$ ) ricostruiti per i punti di innesco delle colate detritiche

**Tab. 2:** Runoff volumes ( $V_e$ ) and peak water discharge ( $Q_p$ ) at debris flow initiation points

Sottobacino	14/09/1994		20/09/1999	
	$V_e$ (m <sup>3</sup> )	$Q_p$ (m <sup>3</sup> )	$V_e$ (m <sup>3</sup> )	$Q_p$ (m <sup>3</sup> )
Cima dei Bureloni ( $A=15900$ m <sup>2</sup> )	1025	0.63	3265	0.51
Cima di Val Grande ( $A=19200$ m <sup>2</sup> )	1071	0.61	3450	0.51

I risultati del calcolo idrologico dimostrano come il volume solido complessivamente prodotto dai due eventi (100000 m<sup>3</sup>) sia di un ordine di grandezza superiore al volume d'acqua complessivamente defluito (circa 9000 m<sup>3</sup>). Questo risultato mostra chiaramente come, nel fenomeno in esame, un apporto determinante alla volumetria della colata sia stato causato dalla destabilizzazione massiva del canale che raccoglie il contributo dei due piccoli sottobacini di testata (zona di trasporto, Fig. 4). Se così non fosse, infatti, le sole portate liquide, avrebbero dovuto possedere la capacità di mobilitare, per semplice meccanismo idraulico, una colata avente una concentrazione solida volumetrica media pari al 90%, valore

che, nonostante le forti pendenze in gioco, risulta decisamente troppo elevato se confrontato con i valori proposti in letteratura.

A conferma di ciò basta ricordare che la larghezza al fondo della sezioni del canale, ubicate immediatamente a valle dei punti di innesco, è passata, a seguito dell'evento dell'1994, da un valore di 4 m ad oltre 7 m. Vi è anche da osservare che lo scheletro granulare della falda detritica ( $d_m=48$  mm;  $d_{90}=81$  mm) determina una permeabilità piuttosto elevata e tale che il flusso fuoriuscente dai canali in roccia, dopo il primo impatto con il ghiaione, tende rapidamente ad infiltrarsi nell'ammasso detritico, provocando un rapido innalzamento del livello freatico.

La *back-analysis* del processo di innesco è stata condotta adottando due diversi schemi interpretativi: il primo considera le condizioni di stabilità del materiale detritico localizzato ai piedi della soglia morfologica e sollecitato dal flusso fuoriuscente dal canale in roccia; il secondo schema assimila la stabilità del canale a quello di un pendio omogeneo parzialmente saturo e delimitato inferiormente dalla presenza di materiale roccioso.

Questi due condizioni di innesco sono abbastanza simili a quanto proposto da Tognacca e Bezzola (1997) che, per un flusso che abbandona un letto rigido ed impermeabile e va a "sollecitare" un letto erodibile, distinguono: un meccanismo di incremento rapido del deflusso superficiale e un meccanismo di incremento progressivo del deflusso superficiale. Nel primo caso il fenomeno è innescato da un'erosione localizzata ai piedi della soglia morfologica e dalla successiva mobilitazione del sedimento, nel secondo caso l'innalzamento del livello freatico fino alla quota del fondo dà luogo ad un moto di acqua e sedimento che è un continuo alternarsi fra una destabilizzazione degli strati superficiali del pendio e fenomeni di mobilitazione di sedimenti in superficie. Per l'aumento improvviso del flusso, Tognacca et al. (2000), suggeriscono di determinare la portata di deflusso superficiale che corrisponde all'inizio di una colata detritica per mezzo della relazione:

$$q_c = \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0.5} g^{0.5} \frac{d_m^{1.5}}{(\tan \theta)^{1.17}} \quad (1)$$

essendo  $q_c$  la portata unitaria critica per unità di larghezza del letto ( $m^2/s$ );  $d_m$  il diametro medio del materiale costituente il letto (m);  $\theta$ : l'inclinazione del letto rispetto all'orizzontale ( $^\circ$ );  $g$  l'accelerazione di gravità ( $m/s^2$ );  $\rho_s$  e  $\rho$  la densità dei sedimenti e dell'acqua ( $kg/m^3$ ). Considerando il termine  $(\rho_s - \rho) / \rho$  pari ad 1.65, l'eq. (1) si può scrivere:

$$q_c = \frac{4 d_m^{1.5}}{(\tan \theta)^{1.17}} \quad (2)$$

Un'alternativa all'eq. (1) può essere rappresentata dalla relazione proposta da D'Agostino (1994) per determinare la portata che determina l'inizio dell'erosione per un letto di materiale granulare disposto orizzontalmente e interessato dall'impatto di una lama d'acqua defluente da uno stramazzo. La relazione può scriversi semplicemente:

$$q_c = (1.7 d_{90})^{1.5} \quad (3)$$

Nella valutazione della portata di innesco complessiva  $Q_c$  occorre inoltre tenere conto della larghezza del canale ( $B$ ) che, come si è detto, è passata dai 4 m ai 7 m dopo l'evento del 1994.

Nella tabella 3 viene riassunta l'applicazione delle eq. (2) e (3) al caso in esame, avendo assunto nell'eq. (2) una pendenza del letto erodibile  $\theta=30^\circ$ , valore rilevato in campo per le due zone di innesco.

**Tab. 3:** Portate liquide critiche per i due punti di innesco di debris flow  
**Tab. 3:** Critical water discharge at debris flow initiation sites

	eq. (2)	eq. (3)
$q_c$ (m <sup>2</sup> /s)	0.08	0.051
14/09/1994: $Q_c$ (m <sup>3</sup> /s)	0.32	0.20
20/09/1999: $Q_c$ (m <sup>3</sup> /s)	0.56	0.36

Dal confronto dei valori di  $Q_c$  con i valori di  $Q_p$  ricostruiti mediante la modellazione idrologica, si desume che, in entrambi gli eventi, il valore di soglia fornito dalle equazioni dedotte in laboratorio risulta essere stato superato o, per lo meno, raggiunto, anche se vi è da notare che l'allargamento di sezione prodotto dall'evento del 1994 ha causato un incremento non trascurabile della soglia critica del deflusso. E' inoltre interessante osservare che, nonostante i diversi diametri caratteristici impiegati nelle eq. (2) e (3), queste forniscono nel complesso risultati confrontabili.

Il secondo meccanismo di innesco considerato prende in esame lo schema di equilibrio di un pendio indefinito. I canali a valle delle due soglie di innesco presentano mediamente una pendenza di 30°, mentre la profondità dell'incisione è passata da 1-1.5 m, prima dell'evento del 1994 a quasi 5 m dopo l'evento del 1999. Ai bordi dei due canali, in prossimità delle zone di innesco, sono stati prelevati tre campioni di materiale che si sono considerati rappresentativi della matrice di supporto delle colate detritiche. L'analisi sul campione rimaneggiato (frazione passante il vaglio con diametro di 0.85 mm) ha prodotto un valore medio dell'angolo di attrito ( $\phi$ ) di 39° ed un valore della coesione  $c$  di 3 kPa. La valutazione del peso di volume unitario del terreno indisturbato ( $\gamma$ ) si è eseguito praticando nel terreno tre piccole buche (volume dell'ordine dei 1500 cm<sup>3</sup>), pesando il materiale asportato in condizioni asciutte, e procedendo, infine, alla misura del volume occupato dalle buche. Ne è risultato un valore medio di  $\gamma$  pari a 20 kN/m<sup>3</sup> - valore che può considerarsi con discreta approssimazione il peso volumico secco del materiale - ed una porosità media dei tre campioni del 23%. L'equazione che esprime il fattore di sicurezza ( $FS$ ) per un pendio indefinito può esprimersi mediante la relazione (Lambe e Whitman, 1968):

$$FS = \frac{c + (\gamma_s - m \gamma_a) z \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma_s z \cos \beta \sin \beta} \quad (4)$$

ove, oltre ai simboli già introdotti,  $c$  è la coesione,  $z$  rappresenta la profondità (valutata verticalmente) dello spessore di pendio in potenziale scorrimento,  $m$  rappresenta la frazione di  $z$  interessata dalla presenza della falda,  $\beta$  è l'inclinazione del pendio rispetto all'orizzontale,  $\gamma_s$  è il peso di volume unitario del terreno prossimo alla saturazione è  $\gamma_a$  (9.81 kN/m<sup>3</sup>) il peso specifico dell'acqua. Se nell'eq. (4) si ricerca il valore critico di  $m$  (per  $FS=1$ ;  $m=m_c$ ) che corrisponde al limite di stabilità del pendio per  $z=5$  m (profondità di erosione del canale dopo l'evento dell'anno 1999), si riesce a desumere, seppure con una certa approssimazione, la posizione della falda che ha indotto la destabilizzazione del pendio. Utilizzando i parametri rilevati nelle due zone di innesco ( $\gamma_s = 22.2$  kN/m<sup>3</sup>;  $\beta=30^\circ$ ;  $c=3$  kPa;  $\phi=39^\circ$ ), si ottiene un valore di  $m_c=0.75$ , che corrisponde ad una profondità della falda di circa 1.3 m. Questo risultato indica che, nell'evento del 1999, considerando unicamente la stabilità del versante su cui insistono i due canali di innesco, il distacco di materiale solido potrebbe verosimilmente essersi verificato per la sola saturazione del pendio ad una profondità pari o superiore al valore critico di 1.3 m (pari all'incirca alla profondità del canale dopo l'evento del 1994). L'azione combinata del ruscellamento dell'acqua proveniente dalle soglie in roccia induce localmente un'ulteriore azione destabilizzante, vuoi per la rimozione meccanica delle particelle (inizio del trasporto di sedimenti), vuoi per il fatto che l'abbassamento del letto

determina l'innalzamento relativo della falda rispetto al piano di potenziale scivolamento del pendio-canale.

L'analisi condotta dimostra che proprio alla sinergia fra il meccanismo di rimozione idraulica e quello di destabilizzazione del pendio si deve attribuire la formazione delle due colate detritiche.

L'ampio cono di deposizione creatosi a valle del punto di fuoriuscita delle colate (superficie del deposito  $A_d=35000 \text{ m}^2$ ) ha permesso, infine, una valutazione della distanza di arresto delle colate detritiche. Il deposito ha un'estensione longitudinale di circa 400 m, una massima larghezza di dispersione di 180-200 m. Lo spessore massimo, pari ad 8 m, ha raggiunto un valore doppio rispetto allo spessore medio sull'intera area di deposito. La superficie di deposizione presenta nella sua parte terminale una pendenza di 5-7°, mentre la pendenza media del terreno nella zona di arresto ha un'inclinazione  $\alpha=15^\circ$ . E' interessante verificare come la relazione predittiva proposta da Ikeya (1981) fornisca, nel complesso, un'interpretazione soddisfacente del fenomeno. Bathurst et al. (1997) hanno rielaborato la relazione di Ikeya, presentandola nella forma:

$$L_r = 8.6 (V \tan \alpha)^{0.42} \quad (5)$$

essendo  $V$  il volume dei sedimenti della colata ( $\text{m}^3$ ), ed  $L_r$  la corrispondente distanza di arresto (m). Se si considera che il volume prodotto complessivamente possa egualmente ripartirsi tra i due eventi, il valore di  $L_r$  risulta pari a 465 m o a 535 m a seconda che si consideri il volume della sola frazione solida ( $50000 \text{ m}^3$ ) oppure il volume depositato ( $70000 \text{ m}^3$ ). Poiché i due eventi hanno interessato il medesimo punto di fuoriuscita, è verosimile ipotizzare che  $L_r$  sia stato determinato soprattutto dall'evento dell'1994, in quanto il secondo deposito, sovrapponendosi al precedente, è andato ad arrestarsi su una pendenza inferiore ai 15°.

## DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Le colate detritiche che si sviluppano e si esauriscono nelle parti superiori dei bacini dolomitici solitamente non danno luogo a situazioni di rischio per i centri abitati e per le maggiori strutture viarie. Tuttavia, il crescente sviluppo della frequentazione turistico-escursionistica della montagna e l'aumentata frequenza degli eventi, dovuta anche alla riduzione della copertura nevosa e del permafrost sulle parti superiori delle falde detritiche, rendono consigliabile un più elevato livello di attenzione. Il loro riconoscimento e monitoraggio, accompagnato da una valutazione di massima della pericolosità, sono dunque auspicabili in vista della predisposizione delle misure di controllo. Queste ultime, stante la limitata presenza di elementi a rischio, potranno essere di tipo prevalentemente non-strutturale (indicazione di norme di comportamento agli escursionisti, zonazione della pericolosità). Un altro possibile intervento è rappresentato dal rimodellamento dei canali e delle aree di deposito, realizzabile con costi contenuti e con un modesto impatto visivo.

L'analisi fenomenologica di colate detritiche che si manifestano in aree non alterate da interventi di sistemazione idraulica rappresenta inoltre un'occasione per verificare la coerenza fra le prove sperimentali condotte su piccola scala, relazioni empiriche e la realtà di campo. Nel caso esaminato è stato possibile verificare come risulti difficile attribuire la causa di innesco delle colate detritiche ad un unico meccanismo e come, d'altra parte, la magnitudo di un evento potrebbe essere ampiamente sottostimata se non si considerasse una sinergia fra i fenomeni erosivi dovuti al flusso e i fenomeni di instabilità superficiale del versante.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. Mirco Baldo per la collaborazione nei rilievi di campo e il Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento per l'esecuzione delle indagini geofisiche e geotecniche. Il lavoro è stato svolto con fondi del progetto COFIN 2001 'Sistemazioni idrauliche non convenzionali a basso impatto ambientale' e del GNDCI, U.O. 2.63.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bathurst J.C., Burton A., Ward T.J. (1997): "Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests". *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 123(5), 410-419.
- Cazorzi F. (1996): "Watershed Oriented Digital Terrain Model - Manuale per l'utente." Laboratorio IDEA, Agripolis, Università di Padova 80 pp.
- D'Agostino V. (1994): "Indagine sullo scavo a valle di opere trasversali mediante modello fisico a fondo mobile". *L'Energia Elettrica*, 74 (2), 37-51.
- Del Longo M., Finzi E., Galgano A., Godio A., Luchetta A., Pellegrini G.B., Zambrano R. (2001): "Responses of the Val d'Arcia small dolomitic glacier to recent climatic changes. Geomorphological and geophysical study." *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 24, 43-55.
- ESRI (1999): "ArcView GIS 3.2".
- Ikeya H. (1981): "A method of designation for area in danger of debris flow". *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands* -, IAHS Publ. No.132, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K., 576-588.
- Jackson L.E., Hungr O., Gardner J.S., Makay C. (1989): "Cathedral Mountain debris flows, Canada." *Bulletin of the IAEG*, 40, 35- 54.
- Lambe T.W., Whitman R.V. (1968): "Soil Mechanics". John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Marchi L., Tecca P.R., 1996: "Hill-slope debris flows in the Dolomites: characteristics and associated risk." *Internationales Symposion Interpraevent 1996*, vol. 3, 83-92.
- Mortara G., Ceriani M., Laffi R. (1994): "L'evento alluvionale del 22 luglio 1992 nella conca di bormio in Alta Valtellina." Supplemento a *GEAM*, 31(4), 25-33.
- Moscariello A., Marchi L., Maraga F., Mortara G. (2001): "Alluvial fans in the Italian Alps: sedimentary facies and processes." In: P. Martini, V.R. Baker & G. Garzon (eds.), *Flood & Megaflood Processes and Deposits - Recent and Ancient Examples*, Blackwell Science, Oxford (UK), 141-166.
- Pasuto A., Soldati M. (2003): "An integrated approach for hazard assessment and mitigation of debris flows in the Italian Dolomites." Accepted for publication in *Geomorphology*.
- Soil Conservation Service (1972): "National Engineering Handbook, section 4, Hydrology", Washington D.C.
- Tecca P.R., Galgano A., Genevois R., Deganutti A.M. (2003): "Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy)." *Hydrological Processes*, 17, 1771-1784.
- Tognacca C., Bezzola G. R. (1997): "Debris-flow initiation by channel-bed failure". In: C Chen (ed.), *Proceedings of the First International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation*, Water Resources Engineering Division / ASCE, New York, 44-53.
- Tognacca C., Bezzola G. R., Minor H.E. (2000): "Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure". In: G.F. Wiczorek & N.D Naeser (eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation*, Balkema, Rotterdam, 89-97.