

AZIONE 4

Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati

Contributo dei partner italiani:

Giovanni RUBERTO
Regione Piemonte
Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione
Settore Progettazione interventi geologico-tecnici e
sismico

Paolo TONANZI con la collaborazione di Riccardo Carlo
CONTE, Luigi Andrea BEDONI, Paola MAGOSSO
Regione Piemonte
Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione
Settore Prevenzione territoriale del rischio geologico
(Area TO, NO, VB). Indagini geotecniche ed idrogeologiche

Gennaro BIANCO, Luca FRANZI
Politecnico di Torino - Dipartimento di Idraulica Trasporti
e Infrastrutture Civili

Massimo ARATTANO, Alessandro MARCHI
C.N.R. - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologi-
ca del Bacino Padano di Torino

Contributo dei partner svizzeri:

Giorgio BEATRIZOTTI, Andrea SALVETTI, Renata MÜLLER
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana
- Istituto Scienze della Terra

IV-1. PREMESSA

Considerato che gran parte dei centri abitati in ambiente alpino, sia nazionale che internazionale, si sviluppa su conoidi potenzialmente riattivabili, risulta importante la definizione di una metodologia di lavoro che permetta di valutare il grado di pericolosità di tali ambiti, al fine di fornire utili elementi a livello di pianificazione territoriale. Gli ingenti interessi socio-economici che gravitano in queste zone richiedono una puntuale definizione dei parametri (geologici, idraulici, geomorfologici, ecc.) che permettono di valutare la pericolosità dei siti interessati dagli interventi di urbanizzazione.

Poiché le problematiche delle colate di detrito riguardano gli ambiti territoriali italiani e svizzeri, gli organismi coinvolti nel programma si sono proposti di condividere le proprie conoscenze ed accrescere l'insieme delle osservazioni di campo, sviluppando in particolare i seguenti punti:

- tipologie di *debris-flow*;
- relazioni tra trasporto solido di fondo e *debris-flow*;
- caratteristiche dinamiche dei *debris-flow*;
- analisi delle tipologie di opere necessarie al contenimento, all'arresto e/o alla prevenzione dei potenziali *debris-flow*;
- indicazioni per una gestione ottimale e la manutenzione delle opere di difesa;
- definizione di criteri per la stima dei livelli di pericolo e di conseguenza dei livelli di rischio;
- indicazioni per un'adeguata pianificazione territoriale dei territori soggetti a *debris-flow*.

L'analisi dei dati relativi ad alcuni bacini italiani e svizzeri ha consentito di verificare l'influenza dei fattori che determinano la formazione delle colate, il loro peso relativo (pluviometria e clima precedenti l'evento, morfologia, litologia, sedimentologia, ecc.) ed i parametri geometrici dell'impluvio in cui può avvenire la propagazione.

Il risultato di fondamentale importanza a livello di pianificazione territoriale è la definizione di una metodologia di studio per la valutazione dei diversi gradi di pericolosità a cui sono sottoposte le aree di conoide, urbanizzate e non, che costituisce la base per una corretta azione di pianificazione e prevenzione territoriale.

IV-2. INTRODUZIONE

L'attività del gruppo di lavoro ha trovato applicazione pratica nel bacino del Rio Inferno a Omegna (VB), pesantemente colpito dagli eventi alluvionali del luglio 1996, e si è sviluppata attraverso le fasi di seguito elencate:

- Acquisizione di dati storici su fenomeni di colate (volumi, data e ora dell'evento), fenomeni di trasporto solido e fenomeni di dissesto su versanti.
- Esame delle fotografie aeree, delle cartografie a varia scala, delle documentazioni fotografiche, dei rilievi e dei progetti di sistemazione.
- Esame della pluviometria registrata in stazioni il più possibile vicino al sito di interesse.
- Acquisizione della documentazione e della cartografia geologica.
- Esame della documentazione acquisita e studio retrospettivo.
- Rilievi di dettaglio, *in situ*, di tipo topografico (pendenze e sezioni), granulometrico, geologico e geomorfologico.
- Elaborazione ed esame qualitativo dei dati di pioggia per la determinazione del peso pluviometrico degli eventi associati ai fenomeni gravitativi.
- Riconoscimento delle zone di possibile innesco delle colate con i criteri attualmente disponibili.
- Determinazione dell'ordine di grandezza dei volumi di materiale solido movimentabili lungo i versanti e lungo il reticolo idrografico, fino alle zone di innesco delle colate.
- Studio della movimentazione (modellizzazione numerica in varie condizioni) delle colate, dalle zone di innesco fino all'apice del conoide.
- Analisi dei risultati ottenuti.
- Scelta dei parametri di ingresso per la modellizzazione numerica delle colate in zona di conoide (con vari scenari relativi alla direzione del flusso e volumi di colata uscenti dall'asta torrentizia).
- Analisi dell'estensione delle zone di espansione e deposito del materiale, delle velocità e degli spessori del materiale depositato.
- Studio delle interferenze con opere e/o insediamenti esistenti.
- Studio dei gradi di suscettibilità al danno.
- Studio dei possibili interventi passivi e/o attivi e dei sistemi di allertamento e controllo del fenomeno.
- Studio delle possibili linee programmatiche per la difesa e l'uso della zona di conoide.

IV-3. ATTIVITÀ DELLA DIREZIONE REGIONALE SERVIZI TECNICI DI PREVENZIONE

L'attività della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione nell'ambito del programma INTERREG II è consistita, oltre al coordinamento degli organismi coinvolti nel programma, nell'effettuazione di rilievi di dettaglio in sito con lo scopo di definire le caratteristiche geologiche e geomorfologiche del bacino del Rio Inferno ad Omegna (VB), attraverso i rilievi effettuati nella parte medio-alta del bacino, che si sviluppa sulle pendici del M. Mottarone (1491 m s.l.m.), e lungo l'asta torrentizia principale, dall'apice del conoide (circa 350 m s.l.m.) fino alla cava dismessa presente ad una quota di circa 900 m s.l.m..

Il rilevamento si è sviluppato attraverso un'analisi speditiva delle litologie affioranti nell'area ed una più accurata analisi geomorfologica del bacino, dell'asta torrentizia e del conoide. Durante i sopralluoghi sono stati prelevati, nelle zone di testata del bacino in corrispondenza delle nicchie dei *soil slip*, alcuni campioni disturbati del terreno di copertura, sui quali sono state eseguite prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica.

Durante l'analisi dell'asta torrentizia è stata posta particolare attenzione all'individuazione ed alla misurazione di alcune sezioni d'alveo.

A seguito del rilevamento geologico-geomorfologico di terreno e degli approfondimenti tecnici successivi, è stata redatta una cartografia rappresentativa delle condizioni geologiche e geomorfologiche del bacino del Rio Inferno.

IV-4. CONSIDERAZIONI GENERALI

Il presente contributo riassume sinteticamente le attività svolte dagli organismi coinvolti nel programma di ricerca. I risultati completi delle attività sono illustrati nei rapporti finali ai quali si rimanda per ogni eventuale approfondimento.

Dall'analisi dell'attività svolta, emerge che la definizione dei livelli di pericolosità presenti in conoide non può prescindere da un esame complessivo di tutte le variabili (morfologiche, geologiche, geomorfologiche, idrauliche, idrologiche, topografiche, ecc.) che concorrono a definire le caratteristiche dei bacini oggetto di studio, integrate, ove necessario e/o possibile, dall'applicazione di modelli matematici.

L'applicazione al caso in esame (Bacino del Rio Inferno a Omega) di alcuni modelli matematici ha dimostrato l'utilità degli stessi, come strumento di supporto necessario alla definizione complessiva delle problematiche legate alle colate di detrito.

Gli studi effettuati evidenziano, inoltre, che l'utilizzo esclusivo della modellizzazione matematica non consente di fornire adeguate previsioni in merito all'idoneità geologica per l'utilizzazione urbanistica del territorio.

La pianificazione territoriale degli ambiti di conoide necessita, pertanto, di un approccio multidisciplinare in grado di garantire un'analisi completa dei processi e dei conseguenti effetti delle colate di detrito.

**CONTRIBUTO DEL DIPARTIMENTO
DI IDRAULICA TRASPORTI E INFRASTRUTTURE
CIVILI DEL POLITECNICO DI TORINO**

IV-5. PREMESSA

L'attività di ricerca svolta è stata finalizzata alla definizione di una metodologia di studio a livello di singolo bacino per la valutazione del grado di pericolosità da colate detritiche. Tale conoscenza è determinante per la successiva valutazione del rischio da colata e per l'individuazione delle misure e interventi necessari per la sua mitigazione, tra cui la limitazione alle attività di trasformazione e uso del suolo.

La definizione di una metodologia, cui il DITIC ha contribuito con metodologie idrauliche, rappresenta la naturale evoluzione dei precedenti studi sviluppati nell'ambito dell'INTERREG II Italia - Francia rivolti alle modalità di riconoscimento e quantificazione delle grandezze e fattori deterministici e casuali da cui dipende una colata detritica e delle possibilità di intervento con misure di tipo attivo e passivo, per la riduzione della pericolosità in conoide. Essa è stata applicata al Rio Inferno, corso d'acqua già interessato da tale tipologia di evento, mostrando le peculiarità della stessa sia per studi a carattere retrospettivo sia previsionali con particolare riguardo alle questioni pluviometriche, alla valutazione dei volumi solidi inizialmente mobilizzati, a quelli depositati in conoide ed alla modellizzazione numerica delle colate lungo l'asta torrentizia, da parte del DITIC, e sul conoide da parte dell'Istituto di Scienze della Terra del Canton Ticino.

In questa sede viene presentata una sintesi del lavoro svolto, contenuto integralmente nel Rapporto Finale degli Studi, mostrando attraverso l'applicazione le potenzialità ed i limiti sia nei riguardi degli aspetti previsionali sia di quelli retrospettivi.

IV-6. IL CASO IN STUDIO

Nella figura IV-1 sono rappresentati il bacino del Rio Inferno (che si sviluppa sul versante del monte Mottarone in destra idrografica del torrente Strona nel comune di Omegna provincia di Verbania), la rete idrografica naturale, e il conoide investito dalla colata detritica sviluppatasi nel luglio 1996.

Essa ha rilasciato in conoide, e sulla infrastruttura stradale che lo attraversa, un volume stimato compreso tra 30.000 e 50.000 m³ nell'ambito di un importante evento pluviometrico che ha interessato la zona del lago d'Orta con maggiore concentrazione sul Monte Mottarone sul quale, in testata al bacino, sono presenti due pluviometri. Per il primo, indicato nel seguito con PR e gestito dal Servizio Meteorografico e Reti di Monitoraggio della Regione Piemonte, sono disponibili i dati pluviometrici dal 1988 al 1998; per il secondo, PC, gestito dall'Istituto di Idrobiologia di Pallanza del CNR, sono invece disponibili i dati registrati dal 1982 al 1998.

Dal 1897 al 1996 ben sei eventi parossistici hanno interessato il Rio Inferno. Il volume depositato in conoide storicamente conosciuto è 35.000 m³, mentre quello associato all'evento del luglio 1996 è stato stimato dai Tecnici della Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte in 50.000 m³.

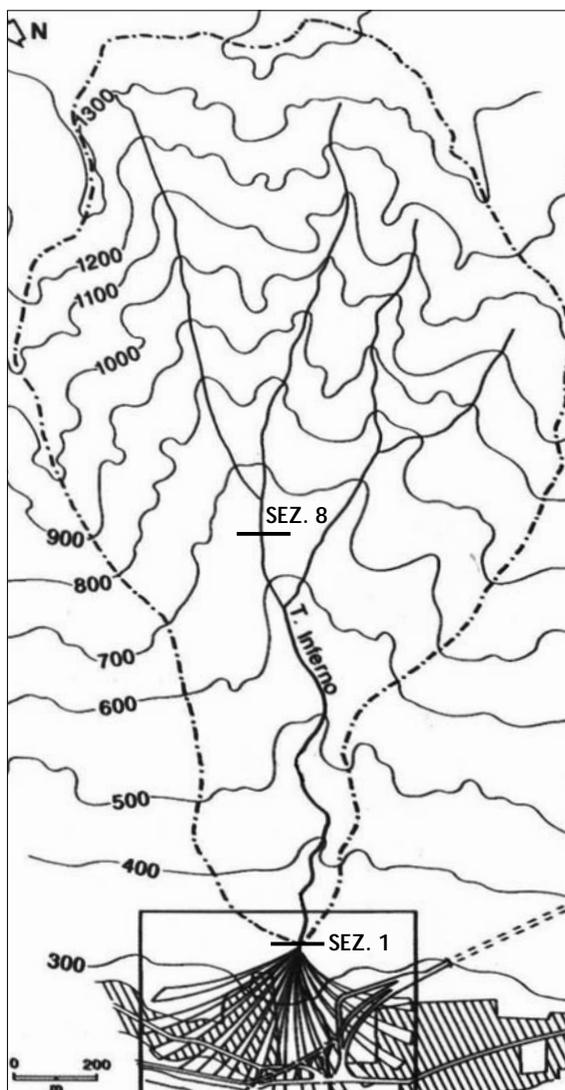


Figura IV-1. Bacino e conoide del Rio Inferno (da Chiarle e Luino, 1996 - modificato)

Dall'esame della documentazione tecnica e dei dati raccolti per l'esecuzione degli studi sono stati dedotti:

- a. i principali parametri morfometrici del bacino: area topografica 1.89 km², 1.76 km² all'apice conoide, area effettiva 2.08 km², pendenza media bacino 95%, pendenza media dell'asta torrentizia 47%, quota max 1437 m s.l.m., quota apice conoide 319 s.l.m., quota confluenza nello Strona 256 m s.l.m., pendenza conoide 16% (valutata lungo la bisettrice);
- b. le caratteristiche geolitologiche, geomorfologiche lo stato attuale del bacino e dell'asta torrentizia principale:
 - bacino: substrato granitico affiorante o subaffiorante, discontinuità che isolano speroni rocciosi anche di notevole dimensione instabili e soggetti a fenomeni di crollo, fratture da azione criogena, disgregazione meccanica con produzione di sabbione arcosico, copertura detritica vegetata con potenza media di 1 metro arealmente poco estesa, nicchie di *soil-slip* in testata, discariche di cave dismesse, aree potenzialmente instabili, decisamente instabili alle testate dei canali;
 - asta torrentizia principale: alveo che si estende per circa 2,5 km in cui sono presenti ancora con evidenza i segni lasciati dal deflusso della corrente nel luglio 1996; sezioni di tipo raccolto con forma tra la trapezoidale e la semiellittica con larghezze mediamente di 10 metri; evidenti tracce di erosione spondale, materiale residuo in alveo con locali spessori anche di 2 metri e fino a 3-4 metri con diametro rappresentativo intorno al metro. L'asta da monte a valle è sufficientemente rettilinea per i primi 2/3 della lunghezza; a valle sinuosa con curve a S e doppia S. Poco a monte dell'apice del conoide, nell'ultimo salto in roccia di circa 10 metri, è presente una briglia.

Al momento il bacino è ancora ricco di materiale mobilizzabile, posto in zone ad elevata pendenza; il conoide dopo l'evento del '96 è stato sistemato con una briglia e una piazza di deposito della capacità di circa 20.000 - 25.000 m³.

Si tratta sostanzialmente di un bacino che presenta valori di grandezze e parametri ricadenti nei campi di valori tipici dei bacini nei quali possono essere presenti correnti classificabili come *debris-flow*.

Ciò è confermato dai risultati dell'applicazione di quattro noti criteri attualmente disponibili:

1. un criterio geomorfologico che riconduce il problema al calcolo del numero di Melton, che nel caso in esame è risultato

$$Me = 0.84 > 0.5, \quad (2.1)$$

o con un criterio più accurato, come suggerito da Marchi e al. e successivamente da D'Agostino che fanno rientrare i bacini appartenenti alla categoria a rischio di *debris-flow/debris-flood*, quelli per i quali i valori di Me ed S (espressi in gradi sessagesimali) soddisfano la disequazione:

$$S > 7 - 14 Me \quad (2.2)$$

che nel caso in esame con $S = 9.09^\circ$ risulta verificata;

2. la metodologia usata nello studio promosso dall'Autorità di Bacino del fiume Po "Sottoprogetto S.P1.2 Stabilità dei Versanti", da cui risulta un grado di intensità del fenomeno pari a 4;
3. il criterio del Ministero dei Lavori Pubblici Giapponese (PWRI), dall'applicazione del quale si riconosce che il bacino in esame è caratterizzato da un alto pericolo di occorrenza di *debris-flows* e che la situazione inerente all'innescio di possibili frane è da giudicarsi pericolosa;
4. il criterio di Aulitzky, ultimamente utilizzato dalla Provincia Autonoma di Trento per cartografare le aree di conoide da considerare alluvionabili, con il quale resta confermato che il torrente Inferno è potenzialmente a rischio di *debris flows* e che l'area in conoide verrebbe inclusa nella classe *zona rossa*, cioè a maggior rischio nei riguardi di possibili accadimenti di fenomeni ad elevato potere distruttivo.

I quattro criteri applicati si differenziano per il grado di accuratezza, crescente dal primo al quarto; essi forniscono valutazioni di carattere generale sulla maggiore o minore propensione di un bacino al verificarsi di fenomeni parossistici di colata, e pertanto utili allorché deve essere esaminata una vasta porzione di territorio, e quindi un grande numero di bacini. Tuttavia al primo rapido screening devono seguire gli studi di dettaglio, che devono essere svolti attraverso fasi successive di carattere interdisciplinare cui concorrono competenze diverse. Nel seguito vengono riportate le valutazioni effettuate nell'ambito delle discipline idrauliche.

IV-7. ESAME DELLE CARATTERISTICHE PLUVIOMETRICHE DELL'EVENTO ASSOCIATO ALLA COLATA DETRITICA VERIFICATASI NEL BACINO DEL RIO INFERNO NEL LUGLIO 1996

IV-7.1. Caratteristiche dell'evento

A valle dell'evento dell'8 luglio 1996 fu reso disponibile, quasi immediatamente, lo studio eseguito dai Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte nel quale veniva esaminata la serie storica delle massime precipitazioni registrate nell'area della Bassa Ossola-Verbanò nel periodo 1913-1996. L'evento veniva definito come "caratterizzato da una intensità eccezionale (circa 150 mm in due ore)" con "probabilità inferiore all'1% ovvero un tempo di ritorno plurisecolare".

Ciò veniva confermato dallo studio di regionalizzazione delle precipitazioni proposto dall'Autorità di Bacino del fiume Po, che suddividendo il Piemonte in 23 aree pluviometriche omogenee, fa ricadere l'area di interesse nella zona pluviometrica n°3 per la quale ad un tempo di ritorno di 200 anni è associata una precipitazione di circa 142 mm in due ore, poco inferiore, quindi, ai 150 mm registrati al Monte Mottarone.

L'ordine di grandezza del tempo di ritorno veniva anche confermato dall'applicazione del modello TCEV; ed infine una elaborazione delle massime precipitazioni di durata 1, 3, 6, 12, 24 ore registrate negli anni dal 1931 al 1968 nella stazione di Gignese, ritenuta quella più vicina al centro di scroscio dotata di una serie sufficientemente lunga di osservazioni, permetteva di ricavare addirittura un tempo di ritorno millenario, ovviamente da prendersi solo ed esclusivamente come indicatore di un evento di carattere eccezionale.

Le suddette valutazioni a larga scala, certamente di interesse per inquadrare l'evento nella sua globalità nell'ambito del regime pluviometrico della zona geografica di appartenenza, vanno integrate con un'analisi a piccola scala temporale corrispondente a frazioni dell'ora.

Come già detto erano disponibili le registrazioni di due pluviografi posizionati in testata al bacino: il "pluviometro RP" che registra dati a scansione 10' ed il "pluviometro CNR" che registra dati a scansione 30'. Tali registrazioni seppure con lievi differenze nella durata e altezza cumulata, da ascriversi perlopiù al differente posizionamento dei due strumenti di misura, mostrano che l'evento pluviometrico del 7 ed 8 luglio è stato caratterizzato da 3 scrosci successivi, come si evince dalla figura IV-2 nella quale, per il pluviografo RP, sono riportate

l'andamento della pioggia cumulata e le intensità su base temporale 10'.

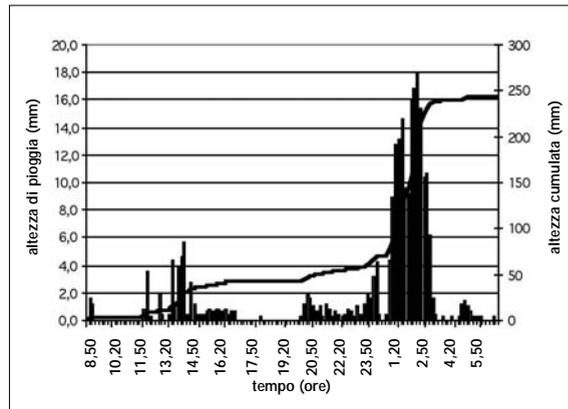


Figura IV-2. Andamento temporale delle altezze di precipitazione e dell'altezza cumulata (Evento pluviometrico 7-8/7/96 - Monte Mottarone)

Nell'ambito del terzo scroscio, che rappresenta anche la parte dell'evento di pioggia del 7-8 luglio in corrispondenza del quale si è verificata la colata di detrito, si possono riconoscere tre fasi, ciascuna caratterizzata da valori differenti di intensità media di pioggia come riportato nella tabella IV-1 seguente.

La prima fase copre un intervallo di tempo di circa 4.5 ore e presenta una intensità di pioggia inferiore; la seconda fase presenta una durata di circa 2.5 ore, successiva alla prima fase e avente un'intensità di pioggia superiore. La terza fase rappresenta la "coda" dello scroscio, con una bassa intensità di precipitazione. I valori medi di intensità e la durata delle tre fasi sono riportati in tabella IV-1, per entrambi i pluviometri.

Tabella IV-1. Valori di intensità media e di durata del terzo scroscio. Stazioni pluviometriche CNR e Regione Piemonte

	Pluviometro CNR			
	intensità media	durata	dalle ore	alle ore
I FASE	6,35 mm/h	4h 30'	20,30	1,00
II FASE	63,04 mm/h	2h 30'	1,00	3,30
III FASE	2,6 mm/h	3h	3,30	6,30
	Pluviometro Regione Piemonte			
	intensità media	durata	dalle ore	alle ore
I FASE	5,8 mm/h	4h 40'	20,10	0,50
II FASE	71,3 mm/h	2h 20'	0,50	3,10
III FASE	2,3 mm/h	3h 20'	3,10	6,30

La suddivisione in tre fasi ed il riferimento ai valori medi di intensità di pioggia sono stati utilizzati per il calcolo della portata massima defluente nei collettori (principale e secondari) del Rio Inferno.

Tale metodologia si è mostrata utile per riconoscere quali siano le condizioni di precipitazione necessarie a provocare i deflussi idrici minimi per destabilizzare gli ammassi granulari al fondo alveo dei collettori, e si è dimostrata essere uno strumento utile per la ricostruzione della dinamica degli eventi che causarono la colata detritica dell'8 luglio 1996.

IV-7.2. Confronto dell'evento pluviometrico dell'8 luglio 1996 con gli eventi pluviometrici ante e post l'8 luglio 1996

L'evento pluviometrico concomitante la colata è stato analizzato nel contesto delle precipitazioni di grande intensità verificatesi storicamente sul Monte Mottarone. Attraverso un'analisi dei dati pluviometrici (periodo 1982-1998) registrati alla stazione del CNR-Stresa, è stato possibile caratterizzare l'evento dell'8 luglio, con riferimento sia all'intensità di precipitazione di picco e sia all'intensità media riferita a diverse basi temporali.

Per ciò che riguarda l'intensità di picco di precipitazione, sono stati individuati negli anni suddetti gli eventi pluviometrici che hanno fatto registrare la massima intensità di picco in un intervallo di mezz'ora. L'analisi ha indicato una maggiore frequenza nei mesi estivi, con la massima frequenza nel mese di agosto. Ciò sembra sottolineare una tipologia di precipitazione a carattere più spiccatamente temporalesco. Per tali eventi, nella figura IV-3, è riportato il confronto tra le intensità di picco e le intensità medie; si può notare come l'evento del 7-8 luglio 1996, seppure caratterizzato da un'intensità media non elevata, presenti un'intensità di

picco sulla mezz'ora superiore a tutti i casi verificatisi negli anni esaminati.

Da ciò emerge come il solo riferimento all'intensità media di precipitazione (intesa come il rapporto tra l'altezza di pioggia cumulata dell'evento e la sua durata) non sia un criterio sufficientemente descrittivo della tipologia dell'evento, ma sia necessario considerare anche la distribuzione dell'intensità della precipitazione durante l'evento, considerando intervalli temporali anche di gran lunga inferiori a quelli dell'intera durata di precipitazione.

Ciò per riconoscere all'interno dell'evento la durata degli intervalli di tempo nei quali si sono verificate intensità elevate e persistenti. Infatti forti intensità persistenti per tempi più o meno lunghi (2 ore, 3 ore o mezz'ora) danno luogo a sollecitazioni differenti che influiscono sulla stabilità degli ammassi granulari.

Pertanto si è proceduto a caratterizzare l'evento dell'8 luglio anche considerando basi temporali superiori alla mezz'ora. In particolare si è visto come sia possibile individuare, all'interno del pluviogramma, una fase di pioggia (indicata come II fase) in cui è stata registrata una ragguardevole intensità per un esteso lasso di tempo, ovvero 2.5 ore.

Con tale base temporale sono stati nuovamente analizzati i pluviogrammi del pluviometro CNR, individuando gli eventi che tra il 1987-1998 hanno fatto registrare una "ragguardevole" intensità di pioggia in 2.5 ore. Dall'estesa indagine è emerso come la maggior parte degli eventi di precipitazione siano caratterizzati da intensità medie (su base 2.5 ore) inferiori ai 30 mm/(2.5 ore), cioè 12 mm/h.

I risultati dell'indagine riportati in figura IV-4 e limitatamente ai casi caratterizzati da una intensità superiore a 12 mm/h mostrano che, anche considerando una base temporale più ampia della mezz'ora, l'evento dell'8 luglio 1996 è stato comunque caratterizzato da intensità di pioggia superiori a quelle verificatesi negli anni a disposizione.

Figura IV-3. Massimi annuali delle intensità medie di precipitazione e delle intensità di picco

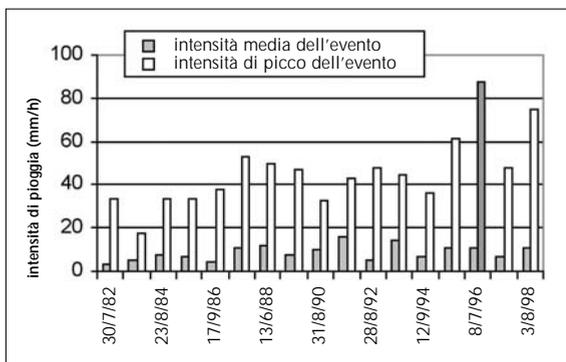
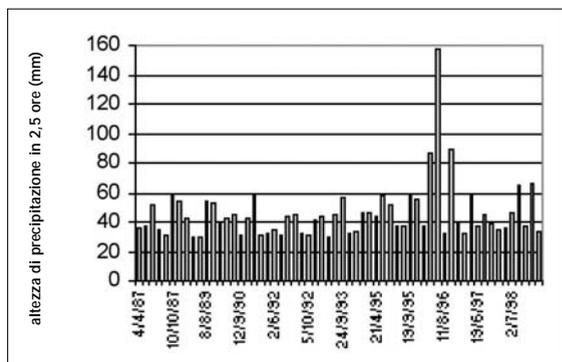


Figura IV-4. Altezze di precipitazione per durate di pioggia di 2,5 ore per gli eventi ad intensità media superiore ai 12 mm/(2,5 ore)



Il 46,7% dei casi trattati presenta un'intensità tra i 30 e i 40 mm/(2.5 ore) (corrispondenti a 12-16 mm/h) mentre si è verificato un solo evento (quello del 7-8 luglio) ad intensità di pioggia superiore ai 150 mm/(2.5 ore) cioè 60mm/h.

Si noti infine che sono state presenti negli anni esaminati elevate intensità di pioggia che non hanno fatto registrare eventi di *debris flows*; esse ricadono nell'intervallo 80-90 mm/(2.5ore), cioè 32-36 mm/h.

IV-7.3. Soglie pluviometriche di innesco

I dati di pioggia, attualmente disponibili, significativi per lo studio della pluviometria di elevata intensità associata a fenomeni gravitativi nel bacino del Rio Inferno, sono quelli già usati per le elaborazioni precedenti che coprono il periodo di tempo dal 1982 al 1998. In tali anni, già in questo particolare e fortunato caso, il solo evento gravitativo verificatosi nel bacino è quello dell'8 luglio 1996 e pertanto la ricerca di una soglia limite più utile per bacino del Rio Inferno risulta vana.

Il campo pluviometrico nel quale possono verificarsi eventi gravitativi è spesso individuato da soglie espresse dalla relazione $i_m = a D^b$ definita utilizzando le durate e le intensità medie degli eventi desunte dalle registrazioni di strumenti posti il più possibile vicino ai luoghi in cui tali eventi sono già stati registrati.

L'informazione desumibile da tali espressioni, per le argomentazioni prima riportate, e ancor più per la distanza degli strumenti misuratori rispetto ai luoghi in cui gli eventi gravitativi si sono verificati, è di tipo orientativo.

Tuttavia considerato che nell'intorno dell'area in esame è presente un discreto numero di strumenti, si potrebbe tentare una raccolta di dati pluviometrici concomitanti l'innesco dei fenomeni in parola; ciò darebbe la possibilità di determinare una espressione del tipo $i_m = a D^b$ che indicherebbe approssimativamente il limite oltre il quale si ricade nel campo pluviometrico degli eventi parossistici entro il quale presumibilmente, se risultano verificate tutte le altre condizioni richieste, è possibile che nell'area geografica indagata si verifichino *debris-flow*.

IV-8. RICONOSCIMENTO DELLE POSSIBILI ZONE DI INNESCO DI COLATE DETRITICHE

Sono stati seguiti due approcci al problema:

1. il primo, indicato come "metodo delle pendenze" deriva dalla conoscenza del campo di pendenze

di innesco acquisita sia tramite conoscenze teoriche, sia dall'osservazione empirica di casi reali;

2. il secondo, invece, è basato sulla teoria della stabilità degli ammassi granulari in questa sede limitata alla stabilità del materiale presente lungo l'asta torrentizia.

IV-8.1. Metodo delle pendenze

Indipendentemente dai meccanismi che portano alla formazione delle colate, è noto che l'innesco delle colate detritiche risulta correlata con valori di pendenza superiori ai 15°, in un campo approssimativamente compreso tra 15° e 30°.

Attraverso l'utilizzo della cartografia disponibile a scala 1:5000 è stato possibile evidenziare le aree di bacino in cui la pendenza dei versanti e dei rami della rete idrografica ricade nel campo sopra indicato.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che la totalità della superficie del bacino (chiuso alla sezione all'apice del conoide) è interessata da pendenze superiori al 14%, con valori più elevati (maggiori del 30%) in corrispondenza della parte alta del bacino stesso. Per ciascun collettore della rete idrografica, e per l'asta principale è stato costruito un profilo evidenziando la fascia di pendenze comprese tra il 27% ed il 58%, cioè tra i valori di pendenza corrispondenti agli angoli di inclinazione d'alveo di 15° e di 30° rispettivamente.

Dai risultati ottenuti si evince che la quasi totalità dell'asta principale del Rio Inferno può essere soggetta a fenomeni di colata detritica, così come i numerosi affluenti laterali, che presentano, nella maggior parte dei casi, pendenze elevate per le quali la mobilitazione del materiale avviene sotto forma di *land-slide* anche in condizione di parziale saturazione.

IV-8.2. Metodo basato sulla meccanica della stabilità

La questione è stata trattata limitatamente alla stabilità del materiale presente lungo l'asta torrentizia, in quanto uno dei meccanismi di innesco più frequenti è proprio quello della mobilitazione dei detriti presenti nel letto del torrente per il raggiungimento di valori di portata liquida che compatibilmente con la granulometria presente e le pendenze ivi esistenti fanno osservare valori di concentrazioni tali da classificare la corrente nell'ambito dei *debris-flow*. Si è fatto riferimento alla seguente nota relazione:

$$\tan(\theta) = \frac{c^* (\sigma - \rho) \tan(\phi)}{c^* (\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{\sigma_s}\right)} \quad (4.1)$$

che individua, date le caratteristiche σ e $\text{tg}\phi$ del materiale detritico, l'altezza h_0 della lama d'acqua defluente e la pendenza dell'alveo $\text{tg}\theta$, lo strato di materiale a_s in incipiente movimento. Se a_s risulta inferiore al diametro del materiale in alveo, allora il fondo è stabile, e non vi può essere erosione. In esso solo le particelle di diametro inferiore presenti sulla superficie dell'alveo sono coinvolte nel trasporto. Questo fenomeno è classificato da Takahashi come *bed load* (Takahashi, 1994). Affinché si possa parlare di *debris flow* occorre che sia

$$a_s = nd \text{ dove } n \gg 1 \quad (4.2)$$

Tuttavia, anche quando la condizione $n > 1$ è soddisfatta, se a_s è molto inferiore ad h_0 , le particelle solide di dimensioni maggiori non possono essere disperse nella profondità della corrente, ma si concentrano, per la maggior parte, in prossimità del fondo della profondità della corrente stessa. Pertanto occorre che

$$a_s > kh_0 \quad (4.3)$$

in cui k è una costante vicina all'unità.

Ciò premesso, è stata applicata tale metodologia al caso del Rio Inferno, individuando la tipologia di corrente, che si è potuta manifestare in concomi-

sezioni di interesse si è fatto ricorso ad una trasformazione afflussi-deflussi sulla base del metodo della corrivazione, adatto per il caso in studio. Nella tabella IV-2 sono riportati i valori massimi della portata defluente ritenuta costante durante tutto lo sviluppo della seconda fase dell'evento pluviometrico, caratterizzato da una intensità media affluente di 71.3 mm/h.

La conoscenza del tirante idrico permette di conoscere il valore di a_s della eq. (4.1) e conseguentemente lo spessore dello strato al fondo che può essere movimentato.

Il calcolo è stato effettuato per valori differenti di densità del fluido interstiziale ρ_m . Per i differenti valori di ρ_m si sono ricavate le rispettive concentrazioni del materiale solido poste variabili da 0% al 24%, e per ognuno dei casi si è proceduto al calcolo degli strati erosi al fondo alveo nelle condizioni descritte. Il calcolo del peso specifico del miscuglio, assunto che il peso specifico delle particelle fosse 2650 kg/m³, ha fornito valori variabili da 1000 a 1400 kg/m³.

In figura IV-5 e in figura IV-6 sono rappresentati rispettivamente gli andamenti di $n = a_L/d$ e gli spessori degli strati che, nello schema proposto da Takahashi, possono essere erosi (con $d = d_{50}$).

Tabella IV-2. Portate defluenti dalle sezioni di chiusura alle diverse sezioni di chiusura del bacino del Torrente Inferno

Sottobacino	Sezione di chiusura	Sezione	Area (m ²)	Portata (m ² /s)
A1	Confl.za asta principale-T6	S8	881.600	16.9
A5	Confl.za asta principale-T5	S7	955.850	18.3
A2	Confl.za asta principale-T2	S7	1.284.350	24.6
A3	Confl.za asta principale-T3	S6	1.334.975	25.6
A4	Confl.za asta principale-T4	S4	1.505.475	28.8
Aint3	Sezione S3	S3	1.531.725	29.4
Aint2	Sezione S2	S2	1.531.725	30.4
Ac	Sezione S1	S1	1.588.500	33.8

tanza dell'evento di pioggia considerato, nelle varie sezioni d'alveo rilevate da quota di circa 325 m s.l.m. a quota 650 m s.l.m..

Per la conoscenza degli idrogrammi liquidi nelle

Dalla figura IV-5 si possono individuare tratti soggetti alla destabilizzazione del materasso alluvionale e tratti soggetti al solo trasporto solido ordinario, anche se gli uni e gli altri dipendono dal

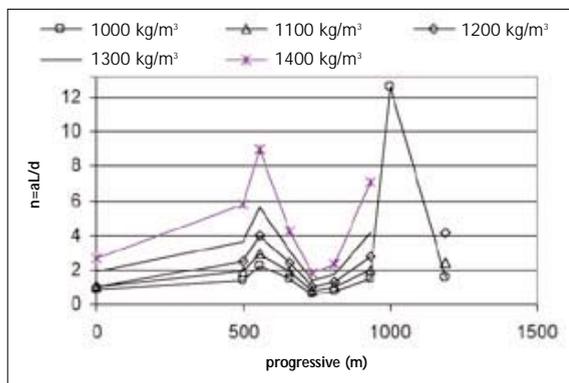


Figura IV-5. Andamento di $n=aL/d$ lungo l'asta principale del T. Inferno, per differenti valori di peso specifico del fluido interstiziale. Dal valore di n si riconoscono i tratti soggetti a semplice erosione superficiale, altri a destabilizzazione dell'ammasso granulare e, al limite, a frana

valore del peso specifico del fluido interstiziale mobilizzante l'ammasso detritico.

Utilizzando le indicazioni di Takahashi, i casi in cui $n < 1$ sono caratterizzati dal solo trasporto solido in quanto lo strato che viene movimentato è dell'ordine di grandezza del diametro dei sedimenti presenti in alveo.

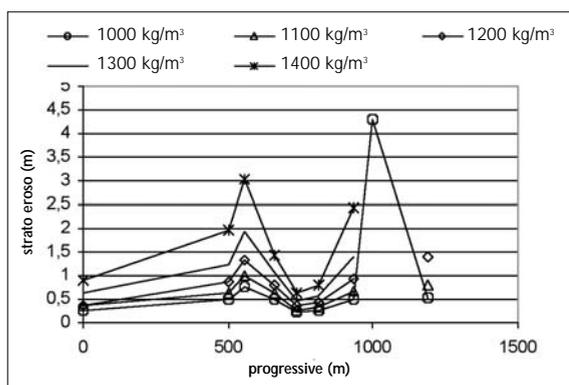


Figura IV-6. Andamento dello strato eroso lungo l'asta principale del T. Inferno, per differenti valori di peso specifico del fluido interstiziale. I valori in corrispondenza della prog. 1000 non sono stati riportati in quanto, in essa, si verificano destabilizzazioni dell'intero ammasso granulare

Nel caso in studio è sembrato più opportuno elevare tale limite a $1.5 \div 2.0$, poiché la forma degli elementi litici non è perfettamente sferica ma grossolanamente ellittica e che la distribuzione delle particelle del fondo alveo non segue lo schema "a quadrato", ma piuttosto uno schema simile a quello "a palle di cannone".

Il tratto dell'asta principale nell'intorno della progressiva 1000 m (sez. 8) presenta (per una miscela solido-liquida defluente avente un peso specifico superiore a 1000 kg/m^3) spessori di materiali erosi che si estendono fino al primo contrasto roccioso sottostante. L'applicazione del modello di erosione di Takahashi indicherebbe, nell'intorno di quella progressiva, addirittura situazioni di movimentazione di materiale di tipo franoso.

IV-8.3. Considerazioni sull'uso dei metodi proposti per la ricerca delle zone di innesco di colate

Il metodo proposto al punto IV-4.2 costituisce un esempio di trasferibilità delle conoscenze dal campo scientifico a quello applicativo; l'applicazione del metodo richiede l'assunzione di ipotesi che, se formulate correttamente, permettono di riconoscere i tratti di alveo dove ci si può aspettare trasporto solido e quelli in cui è prevedibile l'innesco di una colata o addirittura la movimentazione sotto forma di destabilizzazione dell'alveo fino al basamento roccioso.

Il metodo delle pendenze, di facile applicazione, risulta limitativo poiché permette il solo riconoscimento di una delle grandezze da cui dipende l'innesco di una colata. Peraltro, il riconoscimento del numero di tratti, con la relativa ampiezza, ed il riconoscimento dell'estensione delle zone di versante da cui può derivare materiale al reticolo idrografico, possono risultare utili se rapportate rispettivamente alla lunghezza della rete idrografica ed all'estensione del bacino, quali indicatori da aggiungersi ad altri per apprezzare la maggiore o minore propensione nei riguardi di innesco di colate.

IV-9. VOLUMI SOLIDI

Le prime valutazioni sono state rivolte alla determinazione dell'effettivo volume solido depositato in conoide a seguito dell'evento del luglio 1996 attraverso le cartografie disponibili ante e post evento. Esse risultavano di diversa precisione planimetrica e altimetrica, cosa che ha comportato una stima del volume depositato nella quantità $G_s = 35.000 \pm 20\% \text{ m}^3$. Da ciò deriva un'ulteriore conferma alla necessità di disporre, almeno per

quei conoidi che presentano una forte suscettibilità alla fenomenologia in parola, di un rilievo topografico di dettaglio della situazione ante e post-evento.

Successivamente è stata eseguita una valutazione di tipo idraulico del possibile volume solido mobilizzato nella zona di innesco, rispetto a quello depositato in conoide, utilizzando la metodologia suggerita da Takahashi già citata (per i dettagli della quale si rimanda al Rapporto finale sugli studi eseguiti).

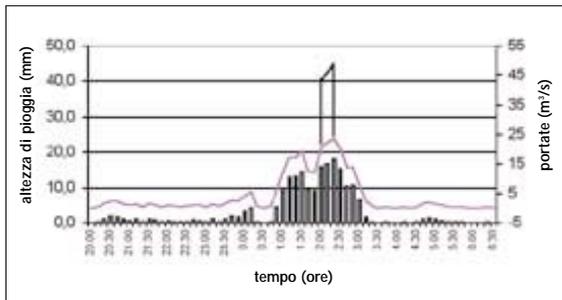


Figura IV-7. Diagrammi di precipitazione, di portate liquide e solide

Seguendo tale approccio, sommando i contributi di materiale solido trasportati da ogni singola portata liquida defluente (rappresentativa di quelle presenti nell'intervallo di tempo 10' di registrazione di precipitazione), si ottiene che il volume solido totale mobilizzato dalla sola azione della corrente superficiale è di 17.500 m³.

Il confronto con quello depositato in conoide, porta a riconoscere un accrescimento di volume compreso tra 10.500 m³ e 24.500 m³.

Esso in parte è dovuto a fenomeni di aratura e di deposito-erosione lungo l'alveo, limitati però al tempo di propagazione della colata (di gran lunga inferiore alla durata dell'evento pluviometrico), ed in parte alla movimentazione del materiale, sotto altre forme di trasporto, negli intervalli di tempo ante e post colata.

Il metodo ha notevoli potenzialità per la previsione del volume inizialmente mobilizzabile dalla zona di innesco. La stima del volume risulta necessaria per definire con un buon grado di attendibilità l'idrogramma solido-liquido necessario alla modellizzazione numerica della colata lungo l'alveo fino al conoide. Tuttavia, occorre segnalare che i risultati sono fortemente dipendenti sia dallo scenario pluviometrico assunto sia dallo scenario di innesco che ipotizza la sola mobilizzazione del materiale in alveo.

Successivamente si è provveduto a selezionare tra le espressioni disponibili in letteratura per la previsione del possibile volume in conoide, quelle

più adatte per l'area geografica piemontese.

Sono state segnalate le espressioni suggerite da Bianco e Franzi (2000) in grado di fornire in funzione di uno o più fattori deterministici un campo di valori di volume atteso in conoide, di Tropeano e Turconi (1999) che tengono conto della frequenza delle colate, di Brochot (2000) messa a punto nell'ambito del programma INTERREG II Italia-Francia, che deriva dall'interpolazione di dati ritenuti associabili a tempi di ritorno centennali ed infine una metodologia messa a punto da Franzi che affronta il problema da un punto di vista probabilistico (Franzi, 2000; Franzi e Bianco, 2000) accompagnando in tal modo il volume previsto con la relativa significatività statistica.

Per i dettagli si rimanda al già citato Rapporto Finale; tuttavia in questa sede riteniamo utile segnalare che l'espressione suggerita da Bianco e Franzi (2000) ha la seguente struttura (5.1):

$$G_{S_{\max-\min}} = 14.000 A^{i(1,5-i)} I.G.^{(1+0,1 I.G.)} \pm 13.000 A^{0,6}$$

che fornisce un campo di valori variabile da bacino a bacino. In generale bisogna orientarsi empiricamente sul valore minore in quei casi caratterizzati da una elevata frequenza di colate, sul valore maggiore se il bacino in esame è caratterizzato da una bassa frequenza, tenendo comunque in debito conto lo stato del bacino nei riguardi della stabilità dei versanti e della disponibilità del materiale in alveo.

In tale espressione:

G_S è il volume di materiale solido espresso in m³;

A è l'area del bacino, espressa in km²;

i è la pendenza media dell'asta principale;

I.G., indice geologico, parametro in grado di descrivere la maggiore o minore propensione del bacino a produrre materiale, definito come prodotto tra gli indici di erodibilità delle specie litologiche presenti (si veda Tabella 6.1.a nel Rapporto Finale) e le aree delle superfici da queste occupate rapportate all'area totale del bacino.

La metodologia probabilistica messa a punto da Franzi (Franzi, 2000; Franzi e Bianco, 2000) può essere utilizzata per completare la stima effettuata con la precedente espressione, o usata in maniera indipendente anche a livello previsionale, scegliendo un valore di probabilità di non superamento; difatti, ammesso che in un determinato bacino di area A possa verificarsi una colata, il metodo permette, scelto un valore di G_S, di conoscere la probabilità di superamento e di non superamento di tale valore in casi caratterizzati dalla stessa area A, a fronte di un ampio numero di casi osservati, o viceversa assunto un valore di probabilità si può dedurre il G_S ad esso associato.

Per l'uso pratico è stato fornito il diagramma seguente.

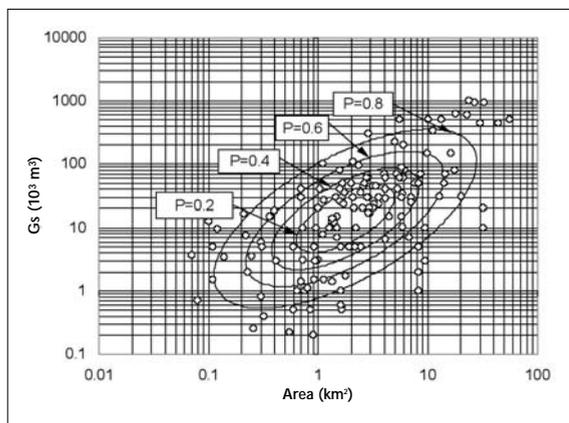


Figura IV-8. Rappresentazione in diagramma bilogarithmico dell'insieme dei valori Gs-A e delle curve di isofrequenza cumulata

Tale metodo, seppure condizionato dai limiti delle attuali conoscenze sui valori degli altri parametri da cui dipende Gs, si presenta nei riguardi della correlazione Gs-A, come l'unico metodo che associa una significatività statistica, dedotta in maniera razionale, al generico valore Gs.

Occorre però sottolineare che l'applicazione delle espressioni prima citate e del metodo suggerito, pur agevolando la valutazione del possibile volume atteso in conoide, a rigori non esaurisce il problema. È determinante infatti la sensibilità dell'operatore accompagnata da verifiche di campo e diretta conoscenza dello specifico ambiente fisico, con particolare riferimento alla frequenza delle colate, alle condizioni di stabilità dei versanti e del materiale in alveo, alla presenza di fattori antropici o altre condizioni particolari.

Infine nel corso del lavoro svolto è stato evidenziato che le complicazioni più importanti per la definizione di efficaci strumenti previsionali derivano da una scarsa disponibilità di dati statistici quantitativamente e qualitativamente significativi relativi a zone omogenee dal punto di vista climatico e geologico, da utilizzarsi sia per la determinazione della frequenza nel tempo e nello spazio, sia per la definizione della relativa intensità.

IV-10. MODELLIZZAZIONE MATEMATICA DELLA COLATA DI DETRITO LUNGO L'ASTA PRINCIPALE DEL TORRENTE INFERNO

IV-10.1. Equazioni differenziali utilizzate e modello reologico

Si è fatto uso delle equazioni di De Saint Venant,

generalizzate per il caso di un alveo in cui la pendenza non sia trascurabile, che ipotizzato il moto della corrente nell'asta principale del Rio Inferno approssimativamente monodimensionale, sono:

- equazione del moto (6.1):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} \cos(\theta) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gAS_r - gA \tan(\theta) = 0$$

- equazione di continuità del miscuglio (6.2):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

- equazione di continuità della fase solida (6.3):

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial (CUh)}{\partial x} + \frac{1}{b} \frac{\partial Z_b}{\partial t} = 0$$

in cui i simboli utilizzati indicano:

- Q = portata del miscuglio,
- h = altezza dello strato di corrente in moto,
- b = larghezza dell'alveo,
- x = l'ascissa curvilinea,
- t = il tempo,
- A = area occupata, nella generica sezione, dalla corrente superficiale defluente,
- Z_b = quota del fondo alveo,
- tan(θ) = pendenza dell'alveo,
- S_r = pendenza del pelo libero.

Le tre equazioni scritte sono sufficienti per descrivere il comportamento delle correnti di debris flows nel caso in cui siano verificate le seguenti ipotesi: a) fluido defluente omogeneo, b) distribuzione idrostatica delle pressioni nella generica sezione, c) alveo gradualmente prismatico.

Il termine, gAS_r, rappresenta i fenomeni dissipativi che avvengono sia all'interno del miscuglio (collisioni tra particelle, interazione tra il fluido interstiziale e le particelle, ecc.) sia sulla superficie di contatto tra corpo di colata e l'alveo stesso. La sua esplicitazione richiede l'assunzione di un adeguato modello reologico. Nel caso in esame si è ritenuto che il comportamento della corrente nel Rio Inferno sia stato, nel suo complesso, più vicino a quello di uno stony debris flow che a un mud debris flow (Coussot, 1994). Tale ipotesi può considerarsi valida anche per colate che si possono verificare in un futuro più remoto, stante al tipo di materiale ancora mobilizzabile.

Pertanto il modello reologico adottato è quello di un fluido non-Newtoniano a comportamento dilatante. Per questa ragione per S_r si è adottata

l'espressione proposta da Takahashi (1997). Essa stringe un rapporto univoco tra la velocità della colata e il tirante della stessa, in funzione di parametri geometrici (come la pendenza dell'alveo), di caratteristiche proprie della colata stessa (come la concentrazione) e del materiale solido trasportato (come il diametro medio degli elementi litici trasportati e del loro peso specifico) ed è ricavabile dalla seguente espressione (6.4):

$$u = \frac{2}{5d} + \left[\frac{gSf}{a \cdot \sin(\alpha)} \left\{ C + (1-C) \frac{\rho_m}{\sigma} \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C^*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2}$$

con "a" costante numerica pari a 0.04, α angolo di attrito interno dinamico ($\tan(\alpha)=0.6$), C^* massima concentrazione del materiale solido, valore che si è assunto pari a 0.7 (vedere paragrafi precedenti).

IV-10.2. Condizioni al contorno

L'integrazione numerica delle equazioni complete di De Saint Venant, unite all'equazione di continuità della fase solida, necessita della definizione delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali.

Come noto la definizione di tali condizioni determina la risposta fornita dal sistema in termini di velocità della corrente, portate defluenti, altezze della corrente defluente ecc...

Pertanto, a differenti condizioni al contorno corrispondono, in generale, risposte del modello anche marcatamente differenti. Ciò è di fondamentale importanza per il raggiungimento delle finalità ultime che ci si propongono, prime fra tutte la definizione delle aree a rischio sul conoide del bacino.

Ciò posto le suddette condizioni sono descritte dai due seguenti gruppi di equazioni:

Condizioni iniziali	Condizioni al contorno
$q(x,0) = f_1(x)$ per $0 < x < L$	$q(0,t) = f_4(t)$ per $0 < t < T$
$y(x,0) = f_2(x)$ per $0 < x < L$	$y(0,t) = f_5(t)$ per $0 < t < T$
$C(x,0) = f_3(x)$ per $0 < x < L$	$C(0,t) = f_6(t)$ per $0 < t < T$

(in cui L è la lunghezza del collettore principale e T è il tempo in cui il fenomeno viene studiato).

IV-10.3. Ipotesi e criteri per la definizione dell'idrogramma solido-liquido in ingresso

Si è voluto ricorrere ad uno scenario gravosissimo, sinteticamente indicato nella tabella seguente.

Caratteristiche dell'idrogramma	
Durata della movimentazione	12 minuti
Durata del ramo di salita	8 minuti
Durata del ramo di discesa	4 minuti
Portata liquida di inizio movimentazione	definita idrologicamente
Portata liquida di fine movimentazione	definita idrologicamente
Portata di picco	definita con l'eq. 6.e.

Tabella IV-3. Dati caratterizzanti la movimentazione di materiale detritico in sez. 8 a quota 650 circa

È stato ipotizzato che l'idrogramma solido-liquido verificatosi all'apice del conoide del Rio Inferno nel luglio 1996 potesse verificarsi in futuro intorno a quota 650 (sezione S8 già individuata come più presumibile sezione in cui si è innescata la colata).

Poiché l'intervallo di tempo in cui presumibilmente c'è stato l'innescò della colata di detrito, per sola mobilitazione del materiale solido presente sul fondo alveo, si estende per circa 12 minuti (dei quali 8 minuti per la fase ascendente) si può ritenere che sia stato raggiunto il colmo in concomitanza della massima intensità di pioggia.

Ciò posto, facendo riferimento all'intera area del bacino chiusa all'apice del conoide, le portate idriche massime che si sono verificate, istante per istante, durante la seconda fase del terzo scroscio dell'evento pluviometrico sono indicate in tabella IV-4.

Esse sono state ottenute con un modello di trasformazione afflussi-deflussi a cui si è fatto cenno.

A tale idrogramma è associato il corrispondente andamento delle portate solide sopra indicate, ottenute seguendo la metodologia di seguito riportata.

La portata di colata che si raggiunge al colmo è data dalla seguente relazione, più volte proposta da Takahashi ed Armanini (6.e):

$$Q_{df} = \frac{C^*}{C^* - C} Q_o \quad (6.5)$$

dove si indica: con Q_{df} la portata solido liquida della colata, con Q_o la portata idrica di innescò, con C^* la concentrazione di massimo impaccamento del materiale solido a riposo, e con C la concentrazione della colata posta uguale a $C=0.55$. Tale

valore corrisponde ad una elevata concentrazione solida del miscuglio solido-liquido (circa uguale a 0.8 C*) e corrisponde al valore ricavabile applicando l'equazione (6.e) allorché si consideri, come

Tabella IV-4. Caratteristiche dell'idrogramma solido liquido

Riferimento ore	Tempo	Portate liquide (idrologiche)	Portate solide (Bed load-imm.debris-flow)	Portate di debris flows Qdf	Portate solido-liquide	Concentrazioni (Qsol/Qtot)
1.5	(sec)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
	0	24.3	°°°	°°°	24.3	°°°
	600	42.2	°°°	°°°	42.2	°°°
	825	43.0	12.9	°°°	55.9	0.23
	1200	44.3	13.3	°°°	57.6	0.23
	1320	44.7	13.4	inizio colata	58.2	0.23
	1800	47.52(picco)		221.76÷83.16		0.55÷0.30
	2040	44.7	13.4	fine colata	58.2	0.23
	2100	44.1	13.2	°°°	57.3	0.23
	2200	43.0	12.9		56.0	0.23
	2400	40.65	°°°	°°°	40.6	°°°
2.5	3000	27.45	°°°	°°°	27.4	°°°

pendenza dell'alveo, il valore massimo riscontrato lungo il corso dell'asta stessa (43%) e $\phi=41^\circ$.

Inoltre, poichè il fenomeno di colata detritica è in genere preceduto e/o seguito da un trasporto di materiale solido, considerare la sola colata non può essere un procedimento esaustivo della complessità del fenomeno. Ciò in quanto occorre definire, seppure limitatamente alle ore 1.50 – 2.50 ricadenti nella seconda fase del terzo scroscio in cui essa si è manifestata, anche la percentuale di materiale solido che, presumibilmente, è stata trasportata sul conoide del Rio Inferno mediante i meccanismi noti propri del *bed-load* e dell'*immature debris-flow*.

A tal fine, tra le formule disponibili in letteratura, quella proposta da Smart e Jaegge dà ragione del carico solido fino a concentrazioni tipiche dell'*immature debris-flow*. Essa si presenta nella seguente forma:

$$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} i^{0.6} \sqrt{8/\theta}^{0.5} (\theta - \theta_{cr}) \quad (6.6)$$

con g accelerazione di gravità, d diametro del materiale solido, s il rapporto tra il peso specifico del materiale solido e il peso specifico dell'acqua, i pendenza media del fondo, q_s la capacità di trasporto per unità di larghezza dell'alveo, q_l la portata liquida per unità di larghezza dell'alveo, e q il parametro di Shield. Ponendo $s=1.65$, si ottiene,

sviluppando i termini dell'espressione sopra riportata:

$$\frac{q_s}{q_l} = 2,42 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} i^{1.6} \quad (6.7)$$

nella quale posto $d_{90}/d_{30}=10$ ed $i=0.2$ (valore massimo di pendenza per cui è valida la formula di Smart e Jaegge) si ottiene: $q_s=0.3 q_l$ da cui risulta che la concentrazione totale solida nella miscela solido liquida è:

$$q_s/(q_s + q_l) = 0.3q_l/(0.3q_l+q_l) = 0.3/1.3 = 0.23 \quad (6.8)$$

La formula proposta va utilizzata con cautela (cfr. Rapporto Finale); difatti, se si operasse il calcolo del trasporto solido nell'intero intervallo di precipitazione, si otterrebbero valori di volumi solidi mobilitati estremamente elevati rispetto a quelli effettivamente depositati. Inoltre, in tal modo, si ascriverebbe alla sola tipologia di trasporto solido ordinario la causa del fenomeno.

In realtà si verifica un istante in cui dall'*immature debris-flow* si passa al *mature* ovvero alla colata. A tal fine è stato adottato il minimo valore del rapporto $\theta/\theta_{cr} = 18$ ricavato dagli Autori sperimentando con valori di pendenza del 20%. Per valori superiori, infatti, si osservavano sempre correnti classificabili come *debris-flow*. Tale modo di procedere è giustificato sia dalla complessità del fenomeno sia dalla schematizzazione che se ne è fatta e pertanto corretto nell'ambito delle finalità che si

sono intese perseguire. Nel caso in esame tale condizione viene raggiunta nella sezione n°8, in prossimità della quale sono poste le condizioni al contorno per portate defluenti pari a 43 m³/s.

In tale posizione e con i valori di portata liquida e di concentrazione indicati, sono stati ricavati i valori delle grandezze riportate nella tabella IV-4. L'ordine di grandezza dei volumi solidi trasportati attraverso il trasporto *bed load+immature debris-flow*, e per *debris-flows*, possono essere ottenuti interpolando i valori riportati in tabella IV-5.

Nel caso in cui $C=0.55$ si ricaverebbero i volumi di materiale solido trasportati indicati in tabella IV-6.

Questi risultati, seppur indicativi, si avvicinano notevolmente alle valutazioni dei volumi solidi V_{tot} che sono stati depositati sul conoide del Rio Inferno ed indicano che il procedimento seguito per la definizione dell'idrogramma solido liquido in ingresso al modello, a prescindere dalle schematizzazioni numeriche del modello (più sofisticate), possa essere anche un valido strumento per una prima valutazione dell'ordine di grandezza dei volumi solidi associati ad una colata.

Tipologia di trasporto	Intervallo di tempo (sec)	Volumi solidi (m³)
Bed load/imm. debris-flow	da t=825" a t=1320"	6517
Debris flow	da t=1320" a t=1800"	26204÷9160
Debris flow	da t=1800" a t=2040"	13102÷4580
Bed load/imm. debris-flow	da t=2040" a t=2200"	2106

Tabella IV-5. Tipologie di trasporto e volumi solidi

Tipologia di trasporto	Volumi trasportati (m³)
Debris flow	39300
Bed load/imm.debris-flow	8623

Tabella IV-6. Tipologia di trasporto e volumi trasportati

IV-10.4. Implementazione del modello e risultati ottenuti con la simulazione

Il modello matematico è stato implementato su calcolatore seguendo un metodo di approssimazione dei termini differenziali alle differenze finite. Il

metodo di integrazione è di tipo *one-step* implicito e porta alla scrittura di un sistema algebrico di 2N equazioni in 2N incognite, risolto mediante i noti metodi proposti dal Calcolo Numerico.

Per la definizione delle condizioni iniziali del modello (funzioni f_1, f_2), si è supposto che, per la portata di 24.3m³/s, siano raggiunte lungo tutta l'asta principale del Rio Inferno condizioni di moto permanente. Questa condizione non limita la validità del modello matematico, in quanto il successivo moto vario (di sole correnti liquide con trasporto solido) che si propaga lungo l'asta modifica notevolmente le condizioni iniziali, tanto che la successiva colata di detrito si inserisce in un sistema idraulico caratterizzato da condizioni di moto vario. La funzione f_4 è facilmente ricavabile dalle condizioni al contorno di tabella IV-4 mentre per la funzione f_5 , si è imposto che le condizioni di deflusso siano di tipo uniforme.

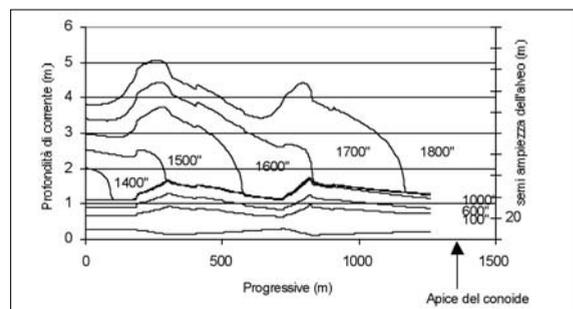
Per la valutazione delle concentrazioni solide della corrente defluente, è stato necessario utilizzare una relazione con la quale determinare, istante per istante e sezione per sezione, la concentrazione del materiale solido associata alla colata. La relazione, che si basa su considerazioni teorico-sperimentali e permette di associare alla pendenza motrice S_f una concentrazione C del miscuglio solido-liquido, è la seguente (Franzi, 2000):

$$C = 3,3 \frac{(1-\theta cr/\theta) \cdot S_f^{1.6}}{1+(1-\theta cr/\theta) \cdot S_f^{1.6}} \quad (6.9)$$

in cui, oltre ai parametri S_f e C di cui è già stata data la definizione, si aggiunge il parametro di Shields. Questa relazione permette di associare alla corrente solido-liquida un valore di concentrazione, in qualunque istante e in tutte le sezione dell'alveo schematizzato nel modello; essa è stata utilizzata per la definizione delle funzione prima indicate con f_3 e con f_6 . Una formula simile ma tarata su dati sperimentali di concentrazione di correnti defluenti su basse pendenze, è stata proposta da Armanini e Fraccarollo (1999).

Le figure IV-9 e IV-10 mostrano l'andamento del

Figura IV-9. Andamento del pelo libero in diversi istanti



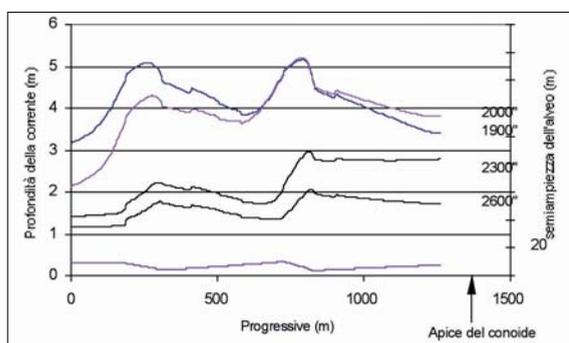


Figura IV-10. Andamento del pelo libero in diversi istanti

pelo libero della corrente solido-liquida in diversi istanti. L'intervallo temporale di rappresentazione dei profili è stato ridotto durante la propagazione della colata lungo l'alveo, al fine di rappresentare quest'ultima il più fedelmente possibile. La formazione del caratteristico "muso" della colata di detrito è dovuta sia all'improvvisa variazione di portata defluente proveniente da monte, sia alla variazione della concentrazione della corrente stessa e sia al conseguente aumento delle resistenze al moto.

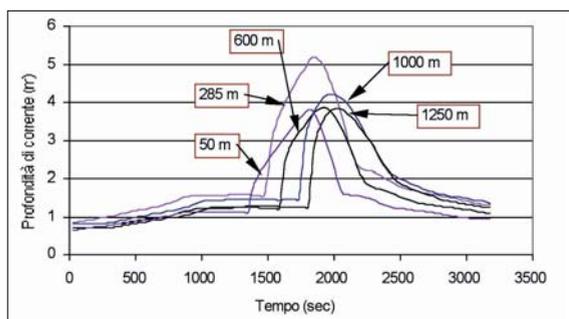


Figura IV-11. Andamento del pelo libero in cinque sezioni

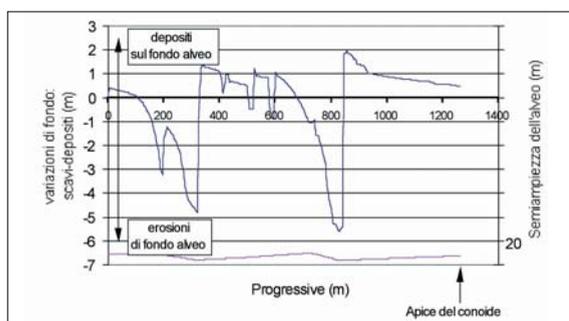


Figura IV-12. Andamento delle erosioni e depositi

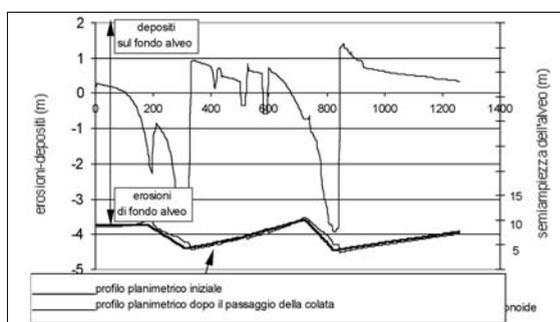


Figura IV-13. Valori di erosioni e depositi

Dai profili che sono stati rappresentati è evidente l'influenza che le variazioni di sezione d'alveo hanno sulla propagazione della corrente.

La figura IV-11 mostra l'andamento delle altezze di pelo libero in cinque sezioni dell'alveo. Si nota come il massimo di profondità di corrente non si verifica in corrispondenza del fronte della colata, bensì nella parte centrale della stessa, come conseguenza della scelta operata riguardo l'idrogramma solido-liquido in ingresso al modello. Dalla figura si può notare anche come la morfologia del torrente (in particolare, la larghezza dello stesso) influenzi notevolmente il massimo di altezza di pelo libero.

La figura IV-12 mostra l'andamento delle erosioni e dei depositi che, presumibilmente, avvengono lungo l'asta. Si noti l'influenza su di essi degli allargamenti e dei restringimenti dell'alveo: nel primo caso avvengono depositi, nel secondo forti erosioni. Il calcolo è stato effettuato supponendo che sia presente un sufficiente quantitativo di materiale solido erodibile, e che esso sia localizzato esclusivamente sul fondo alveo. In altri termini i depositi e le erosioni che si verificano avvengono esclusivamente attraverso alterazioni altimetriche del collettore principale del Rio Inferno (cioè variazioni z_b), senza alterazioni di larghezza del torrente stesso. Pertanto è evidente che i valori anche molto elevati di erosioni sono da ascrivere, oltre che alle erosioni del fondo alveo, anche ai contributi di materiale solido dovuti a frane laterali, crolli per scalzamento al piede ecc.

Supponendo invece, in maniera del tutto qualitativa, che circa il 70% del volume di erosione o depositato avvenga con variazioni del fondo alveo e che il rimanente 30% avvenga con variazioni della larghezza dell'alveo stesso, si ottengono i valori di erosione o deposito del fondo alveo e delle pareti laterali del canale indicati in figura IV-13.

Sezione	Volume totale transitato (m ³)
8	44500
1	48200
a) Volume totale depositato lungo il percorso	7600 m ³
b) Volume totale eroso lungo il percorso	11300 m ³
Volume eroso al netto dei depositi: b)-a)	3700 m ³

Tabella IV-7. Bilancio di volumi

È risultato inoltre che circa il 50% dei depositi avviene nella parte terminale dell'asta del Rio Inferno, a valle della briglia, a causa della riduzione di pendenza che il corso d'acqua subisce.

IV-11. POSSIBILI INTERVENTI PASSIVI E/O ATTIVI E DEI SISTEMI DI ALLERTAMENTO E CONTROLLO DEL FENOMENO

Sono stati esaminati interventi

- di tipo diffuso che impediscano la produzione di materiale detritico (interventi di ingegneria naturalistica) o ne limitino il trasporto (ad esempio briglie selettive);
- di protezione passiva (arginature, vasche d'espansione, ecc.);
- di tipo pianificatorio;
- di allertamento mediante misuratori dei livelli idrometrici.

In particolare l'attenzione è stata posta sulle:

- azioni dirette sui fattori che generano il fenomeno (sistemazione dei versanti, consolidamento di depositi in alveo, ecc.);
- opere che limitano o controllano il trasporto di materiale detritico con particolare riguardo alle strutture di intercettazione individuandone: tipologia, efficacia, sollecitazioni e criteri di dimensionamento.

Per i dettagli di quanto sopra descritto rimandiamo al Rapporto Finale.

In questa sede con riferimento alle briglie a fessure, ai bacini o piazze di deposito, alle arginature e cunettoni opere più frequentemente realizzate, rammentiamo:

“Le briglie impermeabili hanno il grande inconveniente che la capacità di accumulo del materiale

a monte della struttura può risultare drasticamente ridotta a causa dei depositi di eventi ordinari, per cui tali strutture possono risultare inadeguate a intercettare successive colate detritiche. Per questo motivo vengono spesso utilizzate strutture semipermeabili, costruite con aperture larghe così che ritengano solo i detriti più grossi insieme al materiale vegetale in genere sempre presente. Tali aperture hanno dimensioni tali da consentire il passaggio del trasporto solido ordinario (almeno due volte il diametro medio caratteristico del materiale trasportato dalle piene ordinarie), ma non devono comunque eccedere una dimensione pari a 1,5-2 volte la dimensione dei massi presumibilmente convogliati dalle colate. La scelta della struttura ottimale deriva quindi da un compromesso fra la necessità di intercettare le colate di detriti, quantomeno il fronte che trasporta il materiale di maggiori dimensioni, e la necessità di evitare una completa occlusione delle aperture a seguito della deposizione di una colata.

In base agli esperimenti condotti da Senoo e Mizuyama (1984) risulta che se il rapporto tra le dimensioni delle aperture e il massimo diametro del materiale è inferiore a 1,5 la riduzione del picco di portata di sedimenti rispetto al valore osservato in assenza di strutture di intercettazione è pari a quella che si avrebbe in una diga impermeabile, per cui la colata viene completamente intercettata e l'occlusione delle aperture non consente il passaggio della frazione più fine.

Per valori del rapporto compresi tra 1,5 e 2 si realizza una soddisfacente riduzione del picco di portata (più del 50%) evitando la completa ostruzione delle aperture. In ogni caso tali strutture semi-permeabili devono poter consentire il sicuro smaltimento per tracimazione della portata prevedibile qualora le aperture risultino completamente ostruite dal materiale depositato a monte.”

“Per ciò che riguarda il dimensionamento delle dighe di intercettazione, si può segnalare che viene effettuato utilizzando come valori di riferimento per la velocità delle colate nel tratto terminale dei torrenti, 5-10 m/s per “*stony debris flow*” (cioè *debris flow* in cui è prevalente il materiale di grandi dimensioni) e 15 m/s per i “*mud flow*” (ove la componente fine è predominante).

L'azione dinamica del fluido è esercitata invece sull'intero corpo diga e viene quantificata attraverso la seguente relazione (PWRI, 1984) :

$$P_D = k(\sigma u^2/g) B/B_d \quad (7.1)$$

dove P_D è la forza di impatto per unità di superficie, σ è la densità del miscuglio (il valore di riferimento è 2 kg/dm³), u è la velocità della colata in

arrivo, B e B_d sono rispettivamente la larghezza del torrente e quella della diga; valori di k pari a 2 consentono una stima di PD che risulta in buon accordo con i valori misurati.

Armanini e Scotton (1993), comunque, confermano l'utilità della regola empirica, in uso in diversi paesi europei che insistono sull'arco alpino, di assumere la forza sollecitante in 7-11 volte la spinta idrostatica."

"I bacini di deposito dei detriti, che vengono inseriti sul conoide di deiezione o poco a monte del suo apice, hanno lo scopo di realizzare un temporaneo o definitivo deposito dei materiali trasportati dalla colata, lasciando però passare la maggior parte del carico solido trasportato durante le condizioni di deflusso ordinarie.

Si conoscono due possibili configurazioni di posizionamento:

- in serie, quando il bacino è situato sul corso abituale del torrente;
- in parallelo, quando il bacino è posto di fianco o su una derivazione del corso d'acqua e perciò non è normalmente percorso dal torrente ma è interessato solo in caso di piena.

Le tecniche di realizzazione dei bacini di deposito possono essere molto diverse e fare ricorso a rilevati in materiali sciolti che risultano vantaggiosi per il basso costo e per la facilità di mascheramento con inerbimento e vegetazione.

Le parti essenziali che costituiscono detti bacini sono una struttura di ingresso al bacino, il bacino stesso, la diga che intercetta il flusso in uscita e un'eventuale contro diga a valle.

L'aspetto più importante da tener presente è che ogni bacino compie la sua funzione tanto più a lungo quanto più esso è libero di materiale; a ciò concorre il periodico svuotamento del bacino.

A tal fine è stato segnalato l'iter burocratico necessario per realizzare uno svuotamento e gli attuali orientamenti delle Autorità preposte alle autorizzazioni, ultimamente orientate verso procedure snelle anche nei riguardi degli aspetti economici che lasciano spazio a procedure di compenso tra i costi sostenuti per lo svuotamento ed il valore di mercato del materiale estratto.

Relativamente alla forma da assegnare al bacino di deposito si è visto che due sono le forme migliori: quella a pera col picciolo situato a monte o a valle. Se si vuole raggiungere lo scopo di ottenere la "self-cleaning degradation", la forma a pera col picciolo a monte è la migliore poiché ciò è adatto alla tendenza del flusso a oscillare cercando la via ottimale, con punto di fulcro costituito dalla struttura di ingresso. Dal punto di vista invece del massimo

volume di deposito, la soluzione migliore è una forma a semicerchio con centro nella struttura di ingresso e diametro intero posto di traverso al flusso.

Per determinare in fase di progetto il volume da assegnare al bacino di deposito, occorre valutare il volume di materiale solido atteso in conoide a seguito della colata, con le procedure illustrate al punto 5.

Arginature e cunettoni: spesso non si riesce a trattenere la colata a monte di centri abitati, ma si riesce tuttalpiù a rallentare la colata stessa o a mantenere i massi di dimensione maggiore. È necessario allora a valle delle opere di trattenuta canalizzare opportunamente il torrente o costruire canali artificiali in grado di fare defluire la colata di detriti (cunettoni).

Assai problematica è la gestione dell'innalzamento che una colata defluente ha nel percorrere un tratto in curva di un canale o di un cunettone. Il rialzo in curva viene calcolato con riferimento al carico cinetico della colata:

$$\Delta h = \alpha b U^2 / r g \quad (7.2)$$

b ed r sono rispettivamente la larghezza del canale ed il raggio di curvatura ed α un coefficiente che secondo le raccomandazioni del Ministero dei Lavori Pubblici Giapponese può raggiungere anche il valore 10, e ciò in dipendenza della tipologia della colata attesa.

IV-12. POSSIBILI LINEE PROGRAMMATICHE PER LA DIFESA E L'USO DELLA ZONA DI CONOIDE

Le possibili linee programmatiche per la difesa e l'utilizzo della zona conoide di un bacino torrentizio, da ricercarsi nell'ambito delle attuali conoscenze sulle colate detritiche, devono soddisfare gli indirizzi in materia di pianificazione territoriali contenuti nelle recenti disposizioni, sia regionali che nazionali (Es. C.P.G.R. n. 7/LAP/96, P.A.I.).

Si evidenzia la necessità di procedere a livello del singolo conoide a studi di dettaglio rivolti al riconoscimento e quantificazione degli elementi che concorrono alla definizione della pericolosità e successivamente del rischio; ciò per la migliore individuazione e scelta delle misure e interventi necessari per la sua mitigazione cui è strettamente connesso il successivo grado di uso del suolo.

Si ritiene quindi necessario, per i corsi d'acqua montani e soprattutto per i conoidi soggetti a trasporto di massa e sovralluvionamento che comportano grave rischio, procedere alle seguenti attività:

- a. caratterizzazione litologico-strutturale di dettaglio del bacino con individuazione delle aree più degradate in relazione allo stato di fratturazione ed alterazione delle rocce ed alla presenza di depositi sciolti sui versanti e lungo le aste;
- b. studio geologico applicato sulla franosità reale e potenziale dei versanti;
- c. studio forestale sia sul grado di copertura vegetale e boscosa che sulle caratteristiche di erodibilità dei suoli;
- d. studio idrologico ed idraulico del bacino con valutazione delle portate solide e della dinamica delle piene in relazione ai fenomeni di deposizione nella zona di conoide in funzione delle caratteristiche geometriche e della presenza di abitazioni ed infrastrutture sulla stessa nonché in funzione delle opere di protezione prevedibili.”

Gli studi eseguiti sul Rio Inferno, allo stato attuale delle conoscenze, hanno permesso di mostrare l'applicazione di diverse metodologie di indagine, applicabili a scala di singolo bacino, utili per la definizione del livello di pericolosità.

Relativamente al punto d. sopraindicato, le metodologie idrauliche utilizzate per la ricostruzione del possibile scenario nell'ambito del quale si è innescata e propagata la colata fino al conoide del Rio Inferno hanno richiesto un certo numero di ipotesi e la conoscenza dello scenario pluviometrico sotto cui si sono sviluppati i deflussi solido-liquidi fino alla colata.

Come più volte evidenziato nel corso degli studi, ciascun caso è diverso dagli altri, e pertanto nel

caso di studi previsionali l'applicazione delle suddette metodologie è fortemente affetta dallo scenario assunto nell'ambito del quale spicca quello pluviometrico.

I margini di incertezza sia nei riguardi delle ipotesi assunte sia dello stato evolutivo della modellazione numerica, bidimensionale in conoide, consigliano di non affidarsi unicamente ai risultati numerici per la definizione delle fasce di rischio.

Ciò è emerso dalle simulazioni numeriche sul conoide del Rio Inferno effettuate dall'Istituto Scienze della Terra del Canton Ticino alle quali si rimanda.

Tuttavia le peculiarità di tale strumento che permettono in tempi brevi e costi contenuti di studiare più scenari inducono ad affinare tale metodologia, come evidenziato nel rapporto dell'Istituto di Scienze della Terra del Canton Ticino e come confermato dalle recenti iniziative intraprese dalle Autorità di Bacino preposte alla gestione del territorio.

L'uso di tali strumenti, come già accennato, richiede la definizione delle condizioni al contorno e iniziali, ovvero appositi idrogrammi solido-liquidi in una sezione di monte del corso d'acqua laddove si ipotizza l'innescò del flusso di colata.

La conoscenza dei volumi inizialmente posti in movimento è quindi elemento indispensabile per la modellazione; quelli attesi in conoide costituiscono, invece, dato di progetto con cui avviare la scelta delle misure da adottare per la mitigazione della pericolosità in conoide, realizzabile con le opportune opere indicate in precedenza, e tra queste i bacini di raccolta in conoide.

CONTRIBUTO DEL C.N.R.-I.R.P.I. DI TORINO

IV-13. PREMESSA

L'attività svolta dal C.N.R. I.R.P.I. di Torino nell'ambito del presente studio ha riguardato i seguenti aspetti:

1. raccolta e validazione dei dati storici e delle informazioni risultanti da precedenti studi sui dissesti nel bacino del Torrente Inferno;
2. determinazione del volume di materiale solido mobilizzabile;
3. stima della velocità media e della profondità di flusso all'apice del conoide;
4. studio delle possibili misure di tipo passivo per la mitigazione del rischio.

Nelle pagine seguenti verranno sinteticamente presentati i risultati ottenuti. I metodi utilizzati sono invece descritti in dettaglio nei lavori citati in bibliografia e nella relazione di Arattano e Marchi (2001).

Saranno inoltre fornite alcune indicazioni per la difesa delle zone di conoide dei bacini torrentizi e sui rilievi post-evento da effettuare in bacini interessati da colate detritiche.

IV-14. ACQUISIZIONE DATI

Sono stati reperiti presso l'Archivio Comunale di Omegna, l'Ufficio di Novara del Genio Civile e l'Archivio di Stato della Provincia di Novara i documenti contenenti segnalazioni ed informazioni relative ad eventi alluvionali e frane nel bacino del Torrente Inferno. Nessuno dei documenti acquisiti contiene dati relativi ai volumi depositati ed alle portate al colmo osservate; inoltre la tipologia dei processi appare di non univoca determinazione: risulta difficile distinguere tra piene con trasporto solido e colate detritiche.

La colata detritica dell'8 luglio 1996 è stata studiata da Chiarle e Luino (1998) ed Arcuri et al. (1998). Sono state reperite presso l'Istituto di Idrobiologia "De Marchi" del CNR di Pallanza le piogge relative alla stazione pluviografica del Rifugio CAI sul M. Mottarone. Sono state acquisite anche le sezioni trasversali rilevate da Chiarle e Luino (1998).

IV-15. VALIDAZIONE DEI DATI ACQUISITI

I volumi detritici depositati dalla colata detritica del luglio 1996 sono stati valutati in 30.000 m³ da Chiarle e Luino (1998) ed in 50.000 m³ da Arcuri et al. (1998). Chiarle e Luino (1998) hanno stimato in 750 m³/s la portata al colmo, Q_c , della colata del

luglio 1996. Il metodo della sopraelevazione in curva (Johnson e Rodine 1984) da loro usato per tale stima consente di ottenere stime di velocità e portata preziose per l'attività di progettazione di misure di difesa e di previsione di eventi futuri. Occorre, tuttavia, una certa cautela nel suo utilizzo e soprattutto nella scelta delle sezioni ove effettuare le misure (Arattano e Marchi, 2001).

Le colate detritiche si formano talvolta per sbarramento del corso d'acqua e accumulo progressivo di un miscuglio solido liquido alle spalle dello sbarramento. Il metodo del *dambreak*, che prende in esame uno scenario di questo tipo, (Hungry et al., 1984; Armanini, 1999) stima Q_c in 278 m³/s. Con il *metodo volumetrico* (Armanini, 1999; Hungry, 1984; Meunier, 1991) si otterrebbe una Q_c pari a 190 m³/s. Il metodo volumetrico sottostima la portata di picco rispetto al valore di Chiarle e Luino (1998) poiché considera la massima quantità di detrito mobilizzabile dalla portata liquida, senza tener conto della natura impulsiva delle colate detritiche. Secondo VanDine (1985), in bacini di dimensioni ridotte, la portata solida può arrivare a 40 volte quella liquida e dunque, nel caso in esame, a 760 m³/s, valore prossimo a quello stimato da Chiarle e Luino (1998). Anche Mizuyama et al. (1992) indicano un elevato rapporto tra portate di picco delle colate detritiche e relative portate liquide: tale rapporto può a loro avviso arrivare fino a circa 35 volte la Q_l . Vi sono anche altri riscontri in letteratura che possono rendere ragione del valore di Q_c stimato da Chiarle e Luino (1998). Sempre VanDine (1996) pubblica un grafico che stima la portata di picco in funzione del volume: ad una colata di 50.000 m³ corrisponderebbe, in base a tale grafico, una $Q_c = 600$ m³/s. Takahashi (1991) ha invece osservato sul Monte Sakurajima portate di 500 m³/s per volumi di circa 30.000 m³.

Uno scattergramma delle relazioni fra volume delle colate e portata di picco è stato presentato da Rickenmann e Zimmermann (1993): ad un volume V di 50.000 m³ corrisponderebbe un valore medio di Q_c di 650 m³/s, un valore minimo di 400 m³/s ed un valore massimo di 900 m³/s. Ad un volume di circa 30.000 m³ corrisponderebbe invece un valore medio di Q_c di 600 m³/s, un valore minimo di 500 m³/s ed un valore massimo di 700 m³/s.

Elementi più precisi per la valutazione delle relazioni fra volume e portata di picco delle colate detritiche si possono trovare in Mizuyama et al. (1992). Mizuyama et al. (1992) presentano infatti due distinte relazioni, corrispondenti a colate detritiche a matrice fangosa ed a colate detritiche di tipo granulare. I *debris flow* del Torrente Inferno appartengono a quest'ultima tipologia. In base alla

relazione di Mizuyama et al. (1992) ad un volume di 50.000 m³ corrisponderebbe un valore medio di Q_c pari a 624 m³/s, un valore minimo di 400 m³/s ed un valore massimo di 1000 m³/s. Ad un volume di 30.000 m³ corrisponderebbe invece un valore medio di Q_c di 419 m³/s, un valore minimo di 260 m³/s ed un valore massimo di 700 m³/s.

Il grafico di Mizuyama et al. (1992) può anche essere utilizzato, nota la portata di picco, per determinare i volumi depositati dalle colate. Questo approccio è già stato seguito da Bovis e Jakob (1999).

Ad una portata di 750 m³/s nel Torrente Inferno corrisponderebbe, in base al grafico di Mizuyama et al. (1992), un volume depositato di 63.200 m³. I risultati ottenuti con le diverse formule precedentemente discusse sono sintetizzati nella sottostante tabella IV-8.

Tabella IV-8. Valori della portata di picco risultante dall'applicazione di diversi metodi

	Q_c minima [m ³ /s]	Q_c [m ³ /s]	Q_c massima [m ³ /s]
Valore ricostruito da Chiarle e Luino (1998)		750	
Metodo volumetrico *		190	
Metodo volumetrico (Meunier, 1991) *		133	
Metodo grafico (VanDine, 1985) *		760	
Equazione dambreak		(343)	
Grafico $Q_c - v$ (VanDine, 1996) **		600	
Grafico $Q_c - v$ (VanDine, 1996) ***		450	
Grafico $Q_c - v$ (Takahashi, 1991) ***		500	
Grafico $Q_c - v$ (Rickenmann e Zimmermann, 1993) **	400	650	900
Grafico $Q_c - v$ (Rickenmann e Zimmermann, 1993) ***	500	600	700
Equazione Mizuyama et al. (1992) **	400	624	1000
Equazione Mizuyama et al. (1992) ***	260	419	700
* $Q_0 = 19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ** $V = 50.000 \text{ m}^3$ *** $V = 30.000 \text{ m}^3$			

IV-16. DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI MATERIALE SOLIDO MOBILIZZABILE

Una valutazione sufficientemente affidabile dei volumi delle colate detritiche richiede l'applicazione critica di approcci differenziati. Per la valutazione dei volumi delle colate detritiche nel Torrente Inferno sono state utilizzate formule empiriche, semi-empiriche ed un approccio di tipo geomorfologico.

IV-16.1. Valori unitari di riferimento e metodi empirici di inviluppo

I metodi empirici di inviluppo delimitano i massimi volumi detritici attesi in un bacino in base ad alcuni semplici parametri del bacino e/o del conoide alluvionale. I metodi in questione, non diversamente, peraltro, dalle formule semi-empiriche e correlative che saranno considerate in seguito, si basano su campioni di dati relativi a particolari regioni geografiche. Particolari cautele sono necessarie, pertanto, qualora si intenda procedere ad applicazioni di tali metodi in altre zone.

L'Università di Berna e Geo7 - Geoscientists (1996) forniscono alcune indicazioni sui massimi valori unitari osservati in un campione di bacini svizzeri. Un valore di 20.000 m³ km⁻² è indicato come limite superiore del volume prodotto per unità di superficie. Un limite superiore pari a 70.000 m³ km⁻² è stato indicato da Marchi e Tecca

(1996) per i volumi unitari delle colate detritiche in bacini delle Alpi Orientali Italiane. VanDine (1985) ha indicato un volume unitario di 10.000 m³ km⁻², basato però su un campione assai esiguo di dati sperimentali, per i bacini della British Columbia (Canada). Rickenmann (1997) ha proposto un metodo per la valutazione approssimativa del massimo volume delle colate detritiche in base alla pendenza media del conoide ed alla lunghezza del

collettore fra il possibile punto d'innesco ed il punto inferiore della zona di deposito. I massimi volumi si hanno, a parità di lunghezza percorribile dalla colata, per conoidi con una pendenza media del 15%. Conoidi molto acclivi (pendenza superiore al 15%) risultano associati a bacini piccoli a forte pendenza, con estesi affioramenti rocciosi, che presentano generalmente modesta disponibilità di sedimento. All'estremo opposto, nei bacini con conoidi a pendenza più bassa (inferiore al 15%), la probabilità di maggiori apporti detritici risulta compensata dalle minori pendenze che tendono a favorire la rideposizione del materiale trasportato all'interno del bacino.

Fra i metodi empirici di inviluppo può essere compresa anche la formula di Hampel (1977). Tale formula presenta una notevole sensibilità a variazioni del valore della pendenza del conoide.

IV-16.1.1. Applicazione al bacino del Torrente Inferno

I valori massimi di riferimento per unità di superficie proposti per i bacini Svizzeri (20.000 m³km⁻²) e per i bacini dell'Italia Nord-orientale (70.000 m³ km⁻²) danno luogo, per il Torrente Inferno, a stime pari a, rispettivamente, 37.800 m³ e 132.000 m³. Basso appare il valore risultante dalla relazione proposta da VanDine (1985), pari a soli 18.900 m³. La linea di inviluppo proposta da Rickenmann porta, per una lunghezza dell'asta principale di 2.280 m (Arattano e Marchi, 2001), ad un volume pari a 142.500 m³. Considerando anche il percorso della colata sul conoide (lunghezza asta di 2.500 m), si ottiene un volume di circa 156.000 m³. Dall'applicazione della formula di Hampel (1977) si ottiene un volume pari a 166.700 m³.

Le forti differenze nei risultati si devono al fatto che i metodi sono stati sviluppati in diverse regioni geografiche. In particolare, i valori determinati dalla formula di VanDine (1985) appaiono decisamente bassi per i bacini delle Alpi Italiane.

IV-16.2. Metodi semi-empirici e correlativi

I metodi semi-empirici e correlativi sono basati su procedure di tipo statistico che determinano la forma analitica delle espressioni e, in alcuni casi, stabiliscono quali, fra le variabili relative alle caratteristiche del bacino, sono significative ai fini del calcolo dei volumi delle colate. Fra le numerose espressioni esistenti, sono state impiegate quelle di Takei (1984), Kronfellner-Kraus (1985), D'Agostino et al. (1996), D'Agostino (1996), Tropeano e Turconi (1999) e Bianco (1999).

IV-16.2.1 Applicazione al bacino del Torrente Inferno

Oltre alle variabili morfometriche del bacino e dell'asta torrentizia, alcune delle formule considerate richiedono dei parametri particolari, che sono stati determinati come descritto in Arattano e Marchi (2001). I risultati sono riportati nella tabella IV-9.

Formula	Volume calcolato	Formula	Volume calcolato
Takei (1984)	20.000 m ³	D'Agostino (1996)	44.600 m ³
Kronfellner-Kraus (1985)	47.200 m ³	Tropeano e Turconi (1999)	25.000 m ³
D'Agostino et al. (1996)	51.400	Bianco ⁽¹⁾ (1999)	max 47.000 m ³ medio 28.000 min 8.900

 Tabella IV-9. Risultati dell'applicazione dei metodi semi-empirici e statistici

La formula di Takei (1984) ha prodotto il valore più basso perchè si basa su eventi in parte di carattere non eccezionale, mentre gli altri metodi considerati sono orientati al calcolo dei volumi per eventi di forte intensità.

Basso appare anche il valore ottenuto con l'espressione di Tropeano e Turconi (1999).

Prossimi fra loro, e compresi approssimativamente fra 45.000 e 50.000 m³, sono i valori forniti dalle formule di Kronfellner-Kraus, di D'Agostino ed il valore massimo ottenuto da Bianco (1999).

IV-16.3. Approccio geomorfologico

Una determinazione dei volumi delle colate detritiche, basata su osservazioni dirette di campagna, integrate dall'interpretazione di foto aeree e dall'utilizzo di carte geomorfologiche e dei dissesti, presenta spesso maggiore affidabilità rispetto all'applicazione di formule empiriche e semi-empiriche.

Un metodo che perviene alla valutazione del volume di una colata a partire dal rilievo del sedimento mobilizzabile nel bacino è stato proposto da Hungr et al. (1984) per i torrenti della British

(1) I valori ottenuti con questa formula sono leggermente diversi da quelli pubblicati da Bianco (1999), a causa del diverso valore adottato per l'area del bacino.

Columbia (Canada). Seguendo il metodo di Hungr et al. (1984) la rete idrografica del bacino viene suddivisa in tratti omogenei per caratteristiche di erodibilità per i quali vengono determinati i valori del tasso di erosione unitario che indica il volume erodibile per unità di lunghezza. Il volume complessivo mobilizzabile è quindi dato dalla somma dei contributi dei vari tratti considerati.

Hungr et al. (1984) suggeriscono valori del tasso di erosione unitario per varie situazioni morfologiche. Questi valori appaiono validi, almeno in prima approssimazione, anche nei nostri bacini alpini.

L'approccio geomorfologico in questione ipotizza che tutte le potenziali aree sorgenti di sedimento contribuiscano alla formazione della colata e che non si abbia rideposizione del materiale eroso. Particolari evidenze geomorfologiche rilevate sul campo, come la presenza di tratti d'alveo a bassa pendenza favorevoli alla deposizione del sedimento, possono portare a valutazioni diverse da quelle risultanti dall'applicazione integrale di queste due ipotesi di tipo cautelativo.

Concettualmente simile all'approccio proposto da Hungr et al. (1984), ma operativamente più semplice e meno dettagliata, è la procedura proposta da Scheuringer (1988) sulla base di esperienze maturate in Austria.

Rilievi geomorfologici lungo la rete idrografica sono raccomandati anche da Spreafico et al. (1999), nell'ambito di una comprensiva procedura per la valutazione del materiale mobilizzabile da piene idriche e da colate detritiche nei bacini Svizzeri. Un approccio geomorfologico è stato proposto da Thouret et al. (1995) per definire i volumi potenzialmente mobilizzabili da parte di colate detritiche di grande entità in un bacino delle Alpi Francesi.

IV-16.3.1. Applicazione al bacino del Torrente Inferno

Una valutazione del volume mobilizzabile nel bacino del Torrente Inferno è stata effettuata utilizzando il metodo geomorfologico di Hungr et al. (1984). Tale applicazione si è basata su relazioni, documentazione fotografica e cartografia predisposte dalla Regione Piemonte (Ben et al., 2000). Il calcolo del volume mobilizzabile è stato effettuato per i tratti d'alveo e le parti di versante risultati attivi in occasione della colata detritica dell'8 luglio 1996. La parte superiore della rete idrografica è costituita da strette incisioni torrentizie nelle quali la copertura detritica presenta uno spessore solita-

mente molto limitato. Nella parte medio-superiore del bacino l'asta torrentizia principale lambisce una discarica di cava il cui materiale ha fornito un rilevante apporto alla colata detritica dell'8 luglio 1996 (Chiarle e Luino, 1998). Il tratto di asta torrentizia al piede della discarica della cava è stato attribuito alla classe in cui rientrano normalmente i tratti di rete idrografica con sponde in frana. Il calcolo del volume mobilizzabile è presentato in (Arattano e Marchi, 2001).

Il volume ottenuto (52.000 m³) è prossimo a quello indicato dalla Regione Piemonte (Ben et al., 2000) per il sedimento presente lungo l'alveo a monte del conoide e ritenuto suscettibile di mobilizzazione unitamente al materiale delle discariche di cava.

IV-16.4. Utilizzo di dati storici - relazioni fra volume e frequenza

Dati storici sulle colate detritiche raccolti in diverse parti delle Alpi Italiane (Govi et al., 1992; Arattano et al., 1996) hanno fornito indicazioni sull'entità dei fenomeni e sulla loro frequenza. Tali dati non consentono in generale un'analisi quantitativa delle relazioni fra volumi depositati e frequenza dei fenomeni nei singoli torrenti. Le serie storiche sono infatti caratterizzate da scarsità e discontinuità delle informazioni che rendono particolarmente problematica la determinazione dei volumi corrispondenti a dati periodi di ritorno. Gli studi sulle relazioni fra frequenza e volumi delle colate detritiche sono, proprio per questa ragione, poco numerosi.

Van Steijn (1996) riporta relazioni fra frequenza, espressa come tempo di ritorno delle colate detritiche, e volumi depositati che sono stati ottenuti in diverse regioni europee. Tali relazioni hanno un valore prevalentemente qualitativo. Brochot (1998) ha articolato in due fasi uno studio su alcuni bacini della Savoia. Un'analisi delle caratteristiche morfometriche, geolitologiche e di uso del suolo di tali bacini, gli ha consentito di raggrupparli in classi a comportamento omogeneo. All'interno di ogni classe è stata poi effettuata una regolarizzazione probabilistica dei volumi per unità di superficie con la distribuzione di Gumbel, sopperendo così alla limitatezza delle singole serie storiche disponibili.

Nella stessa regione geografica indagata da Brochot (1998), un'indagine di dettaglio è stata poi condotta su un singolo bacino (Torrent du Poucet) (Brochot et al. 2001).

Un campione di 29 piccoli bacini della regione

di Los Angeles (California, USA) è stato utilizzato da Johnson et al. (1991) per un'analisi delle relazioni fra frequenza e volumi delle colate detritiche. I volumi per unità di superficie corrispondenti a determinati tempi di ritorno sono stati stimati utilizzando la distribuzione log-normale e sono state sviluppate equazioni di regressione che correlano i volumi con alcuni parametri morfometrici dei bacini.

Una elevata frequenza delle colate detritiche si osserva solitamente in bacini nei quali si abbia una abbondante disponibilità di materiale in grado di non esaurirsi a causa di una o più colate (Bovis e Jakob, 1999). I *debris flow* in questi bacini sono condizionati solo dal verificarsi di adeguate situazioni idrologiche. In questi casi è possibile stabilire almeno approssimativamente le relazioni fra entità dei fenomeni e loro frequenza.

Al contrario, bacini con ridotta disponibilità di detrito necessitano di tempi relativamente lunghi perché avvenga una "ricarica" delle aree sorgenti di sedimento. In questi bacini la raccolta di dati storici rivela solitamente una scarsa frequenza degli eventi: ciò rende problematica o impossibile l'analisi probabilistica delle relazioni fra volumi e frequenze e le misure di difesa verranno concepite con riferimento ad un evento di elevata intensità ed associato ad una bassa frequenza, pur nell'impossibilità di definire più esattamente quest'ultima.

V-16.4.1. Considerazioni relative al bacino del Torrente Inferno

Lo studio retrospettivo sugli eventi alluvionali nel bacino del Torrente Inferno è stato presentato in dettaglio in Arattano e Marchi (2001). Come è stato ricordato nel paragrafo dedicato all'acquisizione dei dati, la serie storica dei fenomeni alluvionali del Torrente Inferno riporta pochi eventi e di non sempre univoca interpretazione. Non è pertanto possibile un'analisi statistica delle relazioni fra frequenza e volumi trasportati, e ciò anche per la frequenza relativamente bassa degli eventi stessi. È pertanto impossibile definire degli scenari di maggiore o minore intensità dei fenomeni legati a tempi di ritorno.

Il disporre di un dato quantitativo relativo ad un solo evento, purché di elevata intensità come quello dell'8 luglio, risulta tuttavia utile in vista della definizione di adeguate misure di difesa, se non altro per identificare il possibile ordine di grandezza delle colate detritiche che possono interessare un torrente.

IV-16.5. Sintesi dei risultati

Dall'insieme delle elaborazioni effettuate emerge che per le successive analisi modellistiche si può utilizzare un volume di circa 50.000 m³.

I valori più elevati, risultanti dall'applicazione di alcuni metodi empirici di inviluppo, non sembrano trovare riscontro né in una valutazione del sedimento mobilizzabile basata su informazioni di tipo geologico e geomorfologico, né dall'analisi dei dati storici, dai quali l'evento dell'8 luglio 1996 sembra emergere come il maggiore fra quelli avvenuti negli ultimi 100 anni.

Colate detritiche di volume più elevato potrebbero aversi se si verificassero ingenti crolli di roccia nella zona di testata del bacino. Periodici sopralluoghi dovrebbero consentire di osservare tale evenienza: la stima del volume potrebbe essere conseguentemente aggiornata aggiungendo alla stima proposta il volume di materiale detritico che si fosse eventualmente reso disponibile.

IV-17. VELOCITÀ MEDIA E PROFONDITÀ DI FLUSSO DELL'APICE DEL CONOIDE

In riferimento all'evento del 7-8 luglio 1996, per operare una ricostruzione dei valori di Q_c , della altezza massima, h_{max} e della velocità media, U in corrispondenza all'apice del conoide, si può assumere che la Q_c non sia diminuita tra la sezione di stima della portata e l'apice conoide. Se dunque si ipotizza una Q_c di 760 m³/s, il valore più alto fra quelli stimati (tabella IV-8), ne deriverebbe una portata per unità di larghezza del canale q_c pari a 41 m³/s/m. Tenuto conto di una pendenza media a monte della sezione 1 rilevata dal SPRGMS della Regione Piemonte (Ben et al., 2000), pari a circa 17° è possibile stimare una h_{max} , facendo ricorso al grafico riportato in figura IV-14, che correla la portata per unità di larghezza del canale alla profondità di flusso per fluidi di diverse caratteristiche reologiche.

Ipotizzando un comportamento di tipo laminare, h_{max} risulterebbe prossima a circa 4 m, ipotizzando un comportamento dilatante, h_{max} arriverebbe a 4.6 m.

Appare opportuno tener conto dell'altezza con cui i 750 m³/s sono transitati in corrispondenza alla sezione dove è stata stimata la portata, in quanto maggiormente indicativa del comportamento della colata effettivamente verificatasi nel Torrente Inferno. Così facendo si ottiene una h_{max} di 6.4 m. Nota h_{max} , U risulta pari a 6.5 m/s (Arattano e Marchi, 2001).

I valori così stimati possono essere utilizzati per simulare l'espansione sul conoide di un evento dello stesso ordine di grandezza di quello dell'8 luglio 1996.

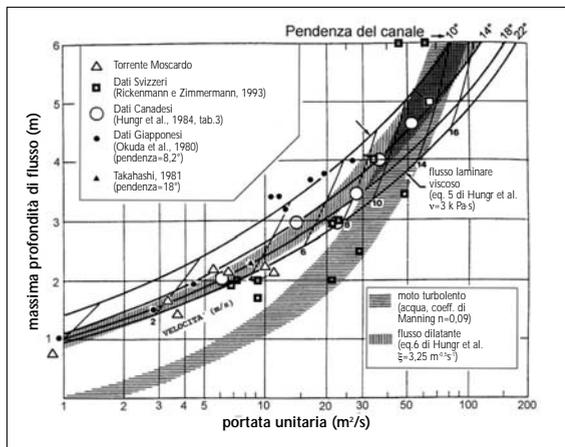


Figura IV-14. Relazione fra portata unitaria e profondità di flusso (modif. da Hungr et al., 1984)

IV-18. STUDIO DEI POSSIBILI INTERVENTI PASSIVI E DEI SISTEMI DI ALLERTAMENTO E CONTROLLO DEL FENOMENO

Le misure per la difesa di infrastrutture ed abitati dalle colate detritiche si possono suddividere in interventi di tipo *attivo* e interventi di tipo *passivo*. Gli interventi di tipo *passivo* sono così chiamati perché non prevedono interventi diretti sul fenomeno pericoloso volti ad arrestarlo, cambiarne il percorso e simili. Gli interventi di tipo *attivo* richiedono invece un diretto intervento sul fenomeno fonte di pericolo, in modo da controllarne e ridurne i possibili danni.

Gli interventi di tipo *passivo* includono la delimitazione e la mappatura delle aree a rischio e la conseguente formulazione di disposizioni pianificatorie che facciano divieto di utilizzare l'area minacciata sia in modo permanente che soltanto in condizioni di pericolo imminente.

I *sistemi di allertamento* non prevedono interventi diretti sul fenomeno che determina il pericolo e possono essere fatti dunque rientrare nella categoria degli interventi di tipo *passivo*.

In molti casi le misure di tipo *attivo* contro le colate detritiche, quali costruzione e manutenzione di bacini di deposito, di briglie, di rivestimenti di sponda ecc., oltre a risultare alquanto onerose, possono non essere in grado di garantire completa sicurezza per gli abitanti dei paesi ubicati sui conoidi e per gli utenti delle infrastrutture viarie che li attraversano. Dunque un loro abbinamento a misure di tipo *passivo* risulta a volte indispensabile per una più efficace e completa azione di prevenzione e difesa.

In alcuni casi, particolarmente per le infrastrutture

di tipo viario, e specialmente per la viabilità secondaria, le misure di tipo *passivo* possono risultare le uniche praticabili nell'immediato, a causa dei ristretti tempi di intervento a seguito di un evento, dell'eccessiva onerosità degli interventi strutturali rispetto al valore dei beni da proteggere ed alla bassa probabilità di danni alle persone.

A loro volta, le misure di tipo *passivo* non sono sempre affidabili; in particolare i falsi allarmi talvolta provocati dai sistemi di allertamento automatico fanno sì che essi siano non di rado malvisti dai responsabili della loro gestione e manutenzione (Hungr. et al., 1987). Ulteriori studi volti a migliorare tali sistemi (Arattano, 1999) appaiono dunque di notevole utilità ed interesse.

Nel seguito saranno brevemente esaminati gli interventi di difesa di tipo *passivo*.

IV-18.1. Delimitazione e mappatura delle aree a rischio

Tra le diverse tipologie di misure di difesa di tipo *passivo* verranno esaminate nel seguito quelle più adatte ad essere eventualmente applicate alla attuale situazione presente sul Torrente Inferno.

Una colata detritica può arrecare danno in tre modi diversi:

1. quando la pendenza è sufficientemente elevata ed il moto è confinato, manufatti ed altri oggetti possono essere distrutti a causa del violento impatto dinamico prodotto dalla colata stessa.
2. nelle parti esterne della zona di deposizione la velocità delle colate è relativamente bassa e tale è anche la forza di impatto che esse possono esercitare, tuttavia grandi volumi di detriti in moto possono seppellire terreni e manufatti.
3. a valle della zona di deposizione sussiste un'area relativamente ampia esposta al pericolo di sovralluvionamento nel caso in cui eventi di piena verificatisi tra una colata e l'altra, oppure successivamente ai fenomeni di colata, dovessero incanalarsi lungo percorsi inattesi.

La mappatura delle aree soggette a rischio, dunque, dovrebbe individuare zone soggette a questi tre tipi di danno potenziale.

A tal fine si dovrebbe in primo luogo delimitare l'area di deposito.

IV-18.1.1. Delimitazione dell'area di deposito

Numerosi metodi, di diversa complessità, sono stati proposti per valutare ubicazione ed estensione

delle aree di deposito delle colate detritiche. Nel seguito si prende in esame un approccio sviluppato da Hungr et al. (1987) nel Canada Occidentale.

Per Hungr et al. (1987) il punto più elevato in corrispondenza al quale la fase di deposizione può iniziare è denominato "*punto di deposizione*". Il "*limite della zona di deposito*" è invece definito come la linea che delimita i confini estremi del possibile percorso della colata.

Il *punto di deposizione* è ubicato in corrispondenza al punto del torrente dove la pendenza scende al di sotto di un limite di 8-12° in presenza di confinamento laterale dell'alveo e 16-20° in assenza di quest'ultimo (Hungr et al., 1987).

Il *limite della zona di deposito* può essere identificato stimando il massimo volume di progetto della colata ed assumendo uno spessore medio per il deposito. L'area di deposito così ottenuta può essere quindi distribuita sul conoide a valle del punto di deposizione, tenendo conto della topografia. Hungr et al. (1987) consigliano un rapporto di 1 (larghezza) a 2 (lunghezza) per tale area. Spessori medi del deposito variabili tra 1.0 e 1.5 m sono ragionevoli per magnitudo delle colate che oscillano tra i 10.000 ed i 50.000 metri cubi (Hungr et al., 1987). I 50.000 m³ di materiale depositato nel luglio 1996 (Arcuri et al., 1998), si sono distribuiti su una superficie di 0.04 km² corrispondenti ad uno spessore medio di 1.25 m.

Per la determinazione della estensione dell'area di deposito è possibile utilizzare anche la formula proposta da Takahashi e Yoshida (1979) e ripresa da Hungr et al. (1984).

IV-18.2. Sistemi di allarme

I sistemi di allarme risultano più adatti a difendere le infrastrutture viarie che i centri abitati, in quanto risulta più semplice impedire in tempo l'utilizzo di una strada ai conducenti in transito su di essa di quanto non lo sia allontanare in tempo gli abitanti di una costruzione in pericolo.

Davies (1997) sottolinea come si renda necessaria un'accurata conoscenza del tempo disponibile dall'eventuale segnalazione d'allarme all'arrivo della colata e del tempo necessario per l'evacuazione per sapere se un sistema di allarme possa o meno costituire un'affidabile e sostenibile strategia di abbattimento del rischio.

In ogni caso è in generale importante affermare con chiarezza che l'uso di sistemi di allarme richiede una accurata educazione della popolazione interessata.

Seguendo le indicazioni di Hungr et al. (1987) i

sistemi di allarme possono essere classificati in tre differenti categorie: sistemi di allertamento anticipato, sistemi di allertamento in corso di evento e sistemi di allertamento post-evento.

I sistemi di allertamento anticipato si propongono di predire il possibile verificarsi di un fenomeno prima che questo avvenga, monitorando le condizioni predisponenti il manifestarsi dello stesso. I più comuni sistemi di questo tipo utilizzano correlazioni tra dati di pioggia ed il verificarsi dei fenomeni (Hungr. et al., 1987; Hall & Davies, 1992; Zhang, 1993; Wilson et al., 1993). Recenti studi hanno tuttavia sottolineato l'estrema difficoltà nell'identificare con precisione attendibili soglie di innesco che derivino da correlazioni tra piogge ed il manifestarsi delle colate (Deganutti et al., 2000). Esperienze maturate nei bacini alpini indicano che i sistemi di allarme basati su misure pluviometriche sono utili per indicare ai responsabili dei servizi di protezione civile il verificarsi di situazioni di preallarme, mentre decisamente minore è la loro affidabilità per la diretta diffusione di allarmi destinati alla popolazione o per l'attivazione automatica di misure di emergenza, quali l'interruzione della circolazione stradale e ferroviaria.

I sistemi di allertamento in corso di evento prevedono il monitoraggio in tempo reale degli eventi e, dunque, individuano il manifestarsi di una colata mentre questa sta già avvenendo, dando l'allarme in modo che le persone interessate possano essere informate.

I sistemi di allertamento post-evento sono invece intesi ad individuare le colate detritiche una volta che queste si siano manifestate, in modo da poter intraprendere appropriate contro-misure successivamente all'evento. Tali sistemi vengono dunque utilizzati in condizioni di limitato rischio per le vite umane, come per esempio lungo reti ferroviarie non intensamente trafficate per informare di intervenute esigenze di manutenzione della linea (Hungr et al., 1987).

Questi tre diversi tipi di sistemi allarme sono stati analizzati in dettaglio da Arattano e Marchi (2001).

IV-19. LINEE PROGRAMMATICHE PER LA DIFESA E L'USO DELLA ZONA DI CONOIDE

Per l'individuazione di corrette procedure di analisi e studio di bacini soggetti a fenomeni di colata detritica e per la difesa della zona di conoide è importante raccogliere una buona base di dati di campagna nell'ambito del territorio regionale interessato. La stima dei massimi volumi mobilizzabili, delle massime velocità e portate solide comporta

ancora oggi un notevole grado di approssimazione. Un passo in avanti potrà essere compiuto a livello locale operando un'attenta ed accurata raccolta di dati a seguito di eventi parossistici.

Le ricerche condotte in bacini appositamente attrezzati (Arattano et al., 1997) costituiscono una fonte insostituibile di dati, fornendo valori sperimentali di parametri quali velocità, portate, volumi defluiti, forze di impatto. La conoscenza di questi parametri può essere utilizzata per lo sviluppo di misure di difesa di tipo attivo (opere di sistemazione) e passivo (sistemi di allarme). Peraltro, l'impegno richiesto dalla loro gestione e la difficoltà di trovare siti idonei limita tali ricerche a pochi casi.

Emerge dunque l'importanza dei rilievi da eseguire immediatamente dopo gli eventi alluvionali. Tali rilievi sono spesso effettuati da istituti di ricerca impegnati nel settore, quali gli Istituti CNR IRPI, e dai servizi tecnici di amministrazioni particolarmente attente. Recentemente, un progetto denominato DOMODIS, promosso dalla International Association of Geomorphologists, si è prefisso l'obiettivo di affinare le procedure per i rilievi in corso di evento e nelle fasi immediatamente successive. Fra i risultati di DOMODIS si segnala un manuale, attualmente in fase di preparazione, che descrive le modalità di esecuzione dei rilievi di campagna in corso di evento e nelle fasi immediatamente successive.

Di particolare importanza risulta la stima del volume di materiale depositato sui conoidi ogni volta che fenomeni di colata interessino il territorio regionale. I metodi per la stima del volume delle colate detritiche esposti in precedenza nel paragrafo 4 devono infatti potersi basare su dati originali raccolti nella regione da esaminare. A tal fine servirebbe poter disporre di una dettagliata descrizione topografica del conoide ante-evento e poter ricorrere a rilievi topografici o tramite GPS successivamente ad un evento e prima della rimozione del materiale. Qualora il dettaglio delle carte topografiche disponibili non fosse sufficiente, cartografie in scala 1:2000 o superiore potranno essere ottenute tramite la restituzione fotogrammetrica di foto aeree ottenute da voli eseguiti a quote sufficientemente basse. Si potrà ricorrere anche al rilievo dei conoidi tramite tecniche aerofotogrammetriche eseguendo un volo ad hoc prima della rimozione del materiale.

Sarebbe inoltre di estrema utilità effettuare, ove possibile, una stima della velocità media e della portata al colmo individuando tratti curvilinei del torrente ove la colata abbia lasciato tracce del suo passaggio. Si può in tal caso ricorrere al metodo di stima di velocità di Johnson e Rodine (1984) basato

sul rilievo topografico del sovrizzo che si verifica in presenza di una curva per effetto della forza centrifuga, come hanno fatto Chiarle e Luino (1998) per il Torrente Inferno. Gli elementi fondamentali del metodo di Johnson e Rodine (1984) per la stima della velocità di una colata detritica basata sul rilievo del sovrizzo in curva sono riportati in Arattano e Marchi (2001).

Disporre di una misura di portata al colmo e di una misura di volume per uno stesso evento consentirebbe una validazione reciproca dei valori ottenuti. Nel tempo si potrebbe giungere alla compilazione, per la regione piemontese, di grafici simili a quelli presentati in Arattano e Marchi (2001) ed ottenuti da VanDine (1996), Hungr et al. (1984), Takahashi (1991), Mizuyama et al. (1992) e Rickenmann e Zimmermann (1993) in Canada, Giappone e Svizzera.

Un metodo per la misura della velocità e del volume certamente più preciso di quello della sopraelevazione è costituito dall'uso di due sensori ad ultrasuoni disposti lungo il torrente ad una distanza nota tra di loro. Tale metodo è stato impiegato da Arattano et al. (1997) per la stima dei volumi defluiti nel Torrente Moscardo, attrezzato dal CNR IRPI per il monitoraggio delle colate detritiche.

Gli elementi fondamentali per il calcolo del volume tramite sensori ad ultrasuoni sono riportati in Arattano e Marchi (2001).

Il principale limite del metodo è il requisito di un torrente che garantisca una frequenza di colate detritiche tale da giustificare il costo delle installazioni di rilevamento.

IV-19.1. Ulteriori osservazioni e misure post-evento in bacini interessati da colate detritiche

Riassumiamo nel seguito le ulteriori osservazioni e misure post-evento che risultano essere utili in bacini interessati da colate detritiche. Vengono segnalati solo i rilievi più importanti: indagini più dettagliate potrebbero risultare di difficile realizzazione poichè la gestione dell'emergenza impone solitamente altre priorità. Quanto rilevato in campagna deve venire riportato su supporti cartografici in scala adeguata. Le varie fasi dei rilievi devono essere anche integrate da un'adeguata documentazione fotografica.

Nella zona di innesco si dovrà procedere all'individuazione delle zone da cui ha avuto inizio il fenomeno e al riconoscimento delle modalità di innesco.

Lungo il canale di deflusso interessato dalla colata devono essere effettuati alcuni rilievi topografici

di sezioni trasversali e del profilo longitudinale dell'asta torrentizia, oltre ai rilievi richiesti per la ricostruzione indiretta della portata di picco. Sempre lungo il canale interessato dalla colata detritica vanno inoltre rilevate le principali aree instabili o in erosione che hanno operato come sorgenti di sedimento in occasione dell'evento alluvionale.

Il rilievo dei depositi terminali, solitamente accumulati sul conoide alluvionale del torrente, è necessario per la valutazione del *runout* della colata (massima estensione longitudinale del deposito) e per la determinazione dei volumi di detrito depositati.

I rilievi di campagna comprendono la delimita-

zione cartografica dell'estensione dei depositi, la valutazione degli spessori sulle varie parti del conoide e l'esecuzione di rilievi granulometrici. La caratterizzazione granulometrica dei depositi è essenziale per una corretta descrizione dei fenomeni.

Inoltre, il riconoscimento di colate a matrice fangosa rispetto a colate di tipo granulare è molto importante per le successive analisi quantitative dei fenomeni.

I rilievi granulometrici della frazione grossolana vengono eseguiti con procedure di tipo numerale sui depositi superficiali, adottando il metodo del quadrillage (Cailleux et Tricart, 1959).

CONTRIBUTO DELL'ISTITUTO SCIENZE DELLA TERRA DEL CANTON TICINO

IV-20. INTRODUZIONE

I flussi di detrito e, più in generale, i pericoli legati all'attività torrentizia in ambiente alpino rappresentano per gli insediamenti e le vie di comunicazione un ingente pericolo, il quale può essere tuttavia sensibilmente ridotto attraverso un'attenta attività pianificatoria e la determinazione delle zone di pericolo. Per la pianificazione territoriale ad ampia scala (livello regionale) si rivelano assai utili carte aventi carattere indicativo dei pericoli e dei rischi presenti; è a questo livello, soprattutto a causa dei costi altrimenti proibitivi dei sopralluoghi, che trovano applicazione modelli matematici semplificati e metodi che fanno uso di grandezze morfologiche e delle proprietà del terreno. A livello comunale devono al contrario essere oggetto di analisi i singoli torrenti e deve essere prodotta una dettagliata carta dei pericoli.

In questo ampio spazio di pianificazione e di verifica di dettaglio trova applicazione, accanto ai sopralluoghi mirati e all'esperienza del geologo, la modellistica matematica dei processi in esame.

È in questo contesto e in quest'ottica che all'interno dell'azione 4 del programma INTERREG di ricerca fra Regione Piemonte e Cantone Ticino si è

inserita una parte specificatamente modellistica, armonizzata e strettamente collegata agli altri punti del programma di ricerca.

IV-21. IL CASO DI STUDIO

Il bacino del Rio Inferno si trova sul versante del Monte Mottarone in destra idrografica del torrente Strona, nel comune di Omegna e presenta un'estensione pari a 1.89 km². L'altitudine massima è di 1435 m s.l.m., quella minima di 269 m s.l.m., con pertanto un'escursione altimetrica di poco inferiore ai 1200 metri. La lunghezza dell'asta principale è di 2288 m.

Il bacino oggetto di studio e in particolare l'evento dell'8 luglio 1996 sono descritti e documentati in dettaglio nella relazione della Direzione dei Servizi tecnici di prevenzione regione Piemonte (Ben et al., 1999) a cui si rimanda per maggiori particolari.

L'evento pluviometrico dell'8 luglio del 1996 ha interessato i versanti del monte Mottarone e del Monte Zeda nelle province di Novara e Verbania. Tra mezzogiorno e la mezzanotte del 7 luglio nella regione erano già piovuti 50 mm. Il giorno 8 sono state misurate in 6 ore precipitazioni cumulate oltre i 150 mm, raggiungendo localmente i 200 mm. L'evento più intenso è stato registrato tra le ore 1:00 e le ore 3:00.

Il flusso di detrito formatosi sul Rio Inferno ha lasciato segni tipici di questo fenomeno, quali cordoni laterali, depositi a granulometria eterogenea e grossi blocchi in conoide. Il totale del materiale depositato sul conoide è stato stimato pari a 50.000 m³, le altezze di deposito hanno raggiunto in alcuni punti gli 8 metri di spessore. Sono stati trasportati a valle blocchi di considerevoli dimensioni con volume fino ad alcuni m³.



Figura IV-15. Il conoide del Rio Inferno dopo l'evento dell'8 luglio 1996

IV-22. METODOLOGIA

Nel campo della modellizzazione delle colate di detrito esistono le più svariate ipotesi, dettate essenzialmente dal grado di accuratezza richiesto dall'analisi.

La complessità del modello è quindi determinata dall'entità dei processi fisici che sono considerati e incorporati nel modello.

Nella tabella IV-10 sono riassunti i principali modelli in diversi tipi di classi, facendo riferimento alla classificazione proposta da Zimmermann et al. (1997) e da Kleemayr (1996).

All'interno dell'Azione 4 sono stati testati sull'area di studio, il bacino del Rio Inferno, due differenti modelli: il primo, *debris*, sviluppato all'Istituto di Scienze della Terra (Pisani, 1996) appartiene alla classe dei modelli reologico-idraulici fisicamente basati; il secondo, *dfwalk* (Gamma, 1999), fa uso di diverse ipotesi di lavoro nella descrizione dei processi e può essere classificato fra i modelli empirico-concettuali.

Tabella IV-10. Classificazione dei principali modelli di simulazione dei flussi di detrito

Classe	Ipotesi di base	Riferimenti
Modelli empirico-statistici	I diversi processi coinvolti sono descritti per mezzo di distribuzioni probabilistiche	Price (1976) Ward (1994) Bathurst et al. (1997)
Linea di energia	Fanno riferimento alla pendenza della zona interessata dal distacco e dalla deposizione di materiale, assumendo tale grandezza come rappresentativa dell'energia posseduta dalla massa in movimento	VAW (1992) Zimmermann et al. (1997) Bathurst et al. (1997) Heinimann et al. (1998)
Modelli reologici e fisico-matematici 1. Modelli "Voellmy" 2. Modelli reologici/idraulici	Ipotesi di Voellmy (1955) originariamente utilizzato per simulazione di valanghe Processo governato dalle leggi idrauliche con parametri derivati da ipotesi sulla reologia del materiale	Perla et al. (1980) Takahashi et al. (1991) O'Brien & Julien (1997) Mizuyama et al. (1984)

IV-22.1. Il modello Debris

Il programma per la simulazione della dinamica di un flusso di detrito messo a punto da Pisani, chiamato *debris*, è descritto in dettaglio nel relativo manuale (Pisani, 1996). Qui vengono brevemente riassunti gli elementi fondamentali.

Il programma è basato sul modello dilatante di Bagnold che meglio descrive il comportamento della miscela dal profilo reologico. Due parti compongono il codice di calcolo: una monodimensionale riguardante l'asta del torrente fino allo sbocco sul conoide e una bidimensionale riguardante il conoide stesso.

a. Il primo modulo calcola portata, velocità e altezza del flusso di detrito attraverso una sezione a partire dall'idrogramma di acqua pura. Questo modulo assume una dinamica monodimensionale e un fondo fisso. Il modello fa uso di un'ipotesi relativamente semplice e, in funzione della pendenza della zona in cui avviene l'innescò della colata, della granulometria, dell'angolo di attrito interno del materiale e della concentrazione del deposito da mobilitare, nonché delle caratteristiche della sezione dell'alveo al punto di fuoriuscita, calcola la concentrazione del flusso di detriti, la sua portata e la sua velocità allo sbocco sul conoide.

b. Un secondo modulo per il calcolo del moto, bidimensionale, su un cono alluvionale, necessita di una topografia iniziale di dettaglio (misure spaziate 10-30 metri con una risoluzione dell'ordine dei 10 centimetri), serve a calcolare la dinamica della miscela sul cono in modo da potere delimitare diverse zone sul territorio in funzione del grado di intensità del fenomeno. Questo modulo tiene conto dei processi di deposizione ed erosione che avvengono nel corso dell'evento. In questa parte viene simulato il comportamento del flusso una volta fuoriuscito dall'alveo, ciò che si suppone avvenga all'apice del conoide dove diminuisce la pendenza e l'alveo è meno inciso. Il conoide viene suddiviso in celle quadrate, per ognuna delle quali deve essere nota la quota iniziale. In base alla concentrazione, alla portata e alla velocità del flusso traccimato vengono calcolate diverse grandezze per ogni singola cella: altezza del deposito, altezze e velocità di scorrimento, pressioni, concentrazione e direzione del flusso, nonché i valori massimi di altezza, velocità di flusso e pressione raggiunti durante la simulazione.

I due moduli non valutano la possibilità di innescò ma simulano il moto una volta che esso si sia

innescato. Per valutare la possibilità di innescò si è fatto ricorso ad un approccio fisico. Questo approccio parte dal calcolo dello sforzo di taglio e dello sforzo resistente per valutare lo spessore di materiale distaccato in funzione dell'altezza d'acqua (che potrà essere valutata con un modello idrologico) e stabilisce la classe di moto in cui si ricade. Occorre stabilire a priori le zone nelle quali si ritiene vi sia materiale sufficiente per alimentare il flusso.

All'interno della classificazione generale dei flussi di detrito (cfr. p.es. Costa, 1984), i fenomeni riscontrati in Ticino ed in Italia settentrionale ricadono nell'intervallo degli *stony debris flows*, per i quali verrà adottato il modello dilatante di Bagnold (Takahashi et al., 1991). Da esperimenti di laboratorio (Bagnold, 1954) è stata dedotta la seguente curva reologica (valida per il range pienamente inerziale, nel quale si ricade per granulometrie medie dell'ordine di qualche millimetro):

$$\tau = a \cdot \sin \alpha \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot d_{30}^2 \cdot \left(\frac{dv}{dz}\right)^2 \quad (1)$$

$$\text{ove: } \lambda = \left(\left(\frac{C}{C_c}\right)^{1/3} - 1\right)^{-1}$$

è la concentrazione lineare della frazione solida nella miscela.

IV-22.1.1. Moto su un cono

Per descrivere il moto della miscela sul cono si è fatto ricorso ad un sistema di equazioni più complesse per tenere conto del fatto che:

- La dinamica è bidimensionale.
- I fenomeni di deposizione diventano rilevanti.
- È importante la fase transitoria nel meccanismo di deposizione.

Poiché le caratteristiche del flusso di detrito sul cono sono molto simili a quelle di un fluido continuo prima dell'arresto è possibile utilizzare un sistema di equazioni che tratti la conservazione della massa e della quantità di moto di un fluido in moto gradualmente variato. Pertanto viene utilizzato il seguente sistema di equazioni:

a. Equazioni per la conservazione della massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \cdot C_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial CM}{\partial x} + \frac{\partial CN}{\partial y} = i \cdot C_s \quad (3)$$

$$i = -\frac{dz}{dt}$$

ove:

$$M = v_x \cdot h$$

$$N = v_y \cdot h$$

C_s = Concentrazione di scambio

i = Termine di erosione (>0) o deposizione (<0)

z = Altezza del fondo

- b. Equazioni per la conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial v_x M}{\partial x} + \beta \frac{\partial v_y M}{\partial y} = g \cdot h \cdot \sin \theta_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial v_x N}{\partial x} + \beta \frac{\partial v_y N}{\partial y} = g \cdot h \cdot \sin \theta_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (5)$$

con:

$$\tau_{bx} = \rho_m \cdot f \cdot h^2 \cdot v_x \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho_m \cdot f \cdot h^2 \cdot v_y \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (7)$$

ove $\beta = 1.25$: fattore correttivo della quantità di moto (1.2 per fluidi newtoniani).

$$\rho_m = C \cdot (\sigma - \rho) + \rho$$

IV-22.1.2. Condizioni al contorno

Al bordo sono previsti tre tipi di condizioni al contorno:

- Bordo impermeabile:** celle per le quali non avviene alcuno scambio attraverso i lati esterni della cella stessa. Questa condizione può essere utilizzata per il bordo a monte del dominio o per i bordi a valle in corrispondenza dei quali vi sia un ostacolo naturale o artificiale.
- Bordo assorbente:** celle per le quali non viene effettuato il calcolo dell'altezza di flusso (che viene sempre assunta pari a zero) e della topografia (che viene assunta sempre pari a quella iniziale), ma verso le quali può avvenire uno scambio da parte delle celle adiacenti. Queste celle sono poste in generale in corrispondenza dei bordi a valle del sistema o di corsi d'acqua sufficientemente grandi che possono ricevere l'apporto di materiale, senza però fornirlo.
- Bordo di immissione:** celle in corrispondenza

delle quali viene immesso un flusso di detrito nel sistema. Per queste celle va specificata la portata di flusso di detrito immessa e la direzione di immissione. Il preprocessore calcola anche la velocità di ingresso del flusso di detrito che servirà come condizione al contorno per le equazioni (4)-(5).

Celle impermeabili e assorbenti possono essere inserite anche all'interno del dominio. Le celle impermeabili possono essere poste in corrispondenza di edifici, mentre quelle assorbenti in corrispondenza di grossi corsi d'acqua.

IV-22.1.3. La topografia

Uno degli elementi critici nell'ambito della simulazione si è rivelata la topografia della zona di conoide. Nel caso presente si disponeva del Modello Altimetrico Digitale Regionale del servizio cartografico della Regione Piemonte. Le altitudini sono date ai nodi di un reticolo formato da maglie quadrate di 50 m di lato. Si tratta di un rilievo fotogrammetrico a partire dalle riprese aeree utilizzate per la costruzione della carta tecnica regionale in scala 1:10.000.

La risoluzione a 50 m è risultata insufficiente; si è perciò proceduto ad una digitalizzazione a schermo della carta 1:5000, sulla quale figurano le isoipse ogni 5 m. L'immagine ottenuta con la digitalizzazione, riportata in figura 16, è risultata di qualità superiore a quella ottenuta dal modello altimetrico digitale regionale, in particolare per quel che concerne l'incisione dell'alveo, elemento importante per la simulazione. Si sono riscontrate piccole differenze tra la griglia di 5 m e di 10 m la cui influenza sui risultati è stata oggetto di verifica.

IV-22.1.4. I dati di Output e la loro utilizzazione

Il livello di vulnerabilità, legato più in generale alla magnitudo del fenomeno, è principalmente connesso alla quantità di materiale che eccede la capacità di trasporto del canale da un lato ed alle velocità con cui la massa si propaga e si deposita dall'altro. Il fenomeno di deposizione non interessa solitamente tutto il conoide, ma si presenza in posizione distale con lobi laterali di varia dimensione (Maraga et al., 1998). Hungr et al. (1987) hanno identificato due livelli di pericolosità: *direct impact zone*, nella zona prossima al torrente, e una *indirect impact zone*, dove la propagazione della colata si esaurisce. Integrando i criteri sopra esposti, il programma *debris* fornisce in uscita, su

sceita dell'utente, una gamma molto ampia di grandezze, adatte alla stima dell'intensità e della pericolosità del fenomeno. Tali grandezze calcolate sono poi state integrate in una classificazione dei livelli di pericolo, riportata di seguito in tabella IV-11.

Tabella IV-11. Classi di intensità relative alla colata di detrito

Tipo di moto	Condizione	Intensità	Codice
Moto fluido	$v \cdot h < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ e $h < 0.5 \text{ m}$	bassa	1
	$0.5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v \cdot h < 2 \text{ m}^2/\text{s}$ e/o $0.5 \text{ m} \leq h < 2 \text{ m}$	media	2
	$2 \text{ m}^2/\text{s} \leq v \cdot h$ e/o $2 \text{ m} \leq h$	alta	3
Flusso di detrito	$P < 30 \text{ kPa}$ e $z < 1 \text{ m}$	bassa	4
	$30 \leq P < 300 \text{ kPa}$ e/o $1 \text{ m} < z < 2 \text{ m}$	media	5
	$300 \text{ kPa} \leq P$ o $2 \text{ m} \leq z$	alta	6

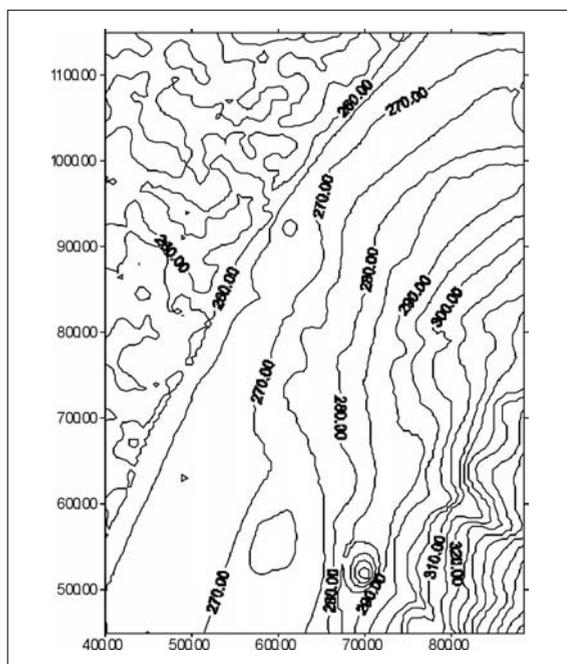


Figura IV-16. Interpolazione dei dati digitalizzati, maglie di 5 m.

IV-22.1.5. I risultati delle simulazioni

I risultati delle prime simulazioni hanno evidenziato come il movimento sotto forma di flusso di detrito si fermi quasi subito, mentre a valle si ha solo moto fluido, mostrando una scarsa corrispondenza con quanto documentato dal rilievo post-evento.

Inoltre le altezze di deposito di materiale che superano 1 m sono limitate a poche celle, in particolare alla zona vicina al punto di fuoriuscita.

Un ulteriore elemento emerso dalle prime simulazioni è la non corrispondenza delle zone alluvionate tra realtà e simulazione, in particolare le prime case in sponda destra risultano poco toccate. Sospettando che queste case nella simulazione potessero rappresentare un ostacolo più importante di quello che sono in realtà, è stata effettuata anche una simulazione senza celle impermeabili in corrispondenza delle case, ottenendo un apprezzabile miglioramento.

Essendo le condizioni di moto (colata di detrito o moto fluido) fortemente influenzate dal diametro medio (d_{50}) utilizzato, si sono effettuate ulteriori simulazioni con un d_{50} prima pari a 100 mm, poi pari a 10 mm. I risultati di quest'ultima simulazione sono riportati in figura IV-17 per quanto riguarda le classi di intensità calcolate in uscita dal modello debris.

Per la simulazione con un d_{50} di 10 mm il fenomeno di flusso di detrito raggiunge il fondo del conoide. Si nota inoltre che l'altezza di deposito di 8 m, riscontrata nell'evento reale, non viene mai raggiunta nelle simulazioni.

IV-22.1.6. Simulazioni con un' Sondazione in più punti

I risultati ottenuti dalle prime simulazioni sono da imputare, come sopra già ricordato, a diverse fonti di incertezza e di errore. Oltre a quelle ricordate è importante analizzarne una in maggior dettaglio. Il modello è in grado di simulare due possibilità:

- Il flusso di detrito abbandona totalmente il letto del torrente in corrispondenza di una precisa sezione.

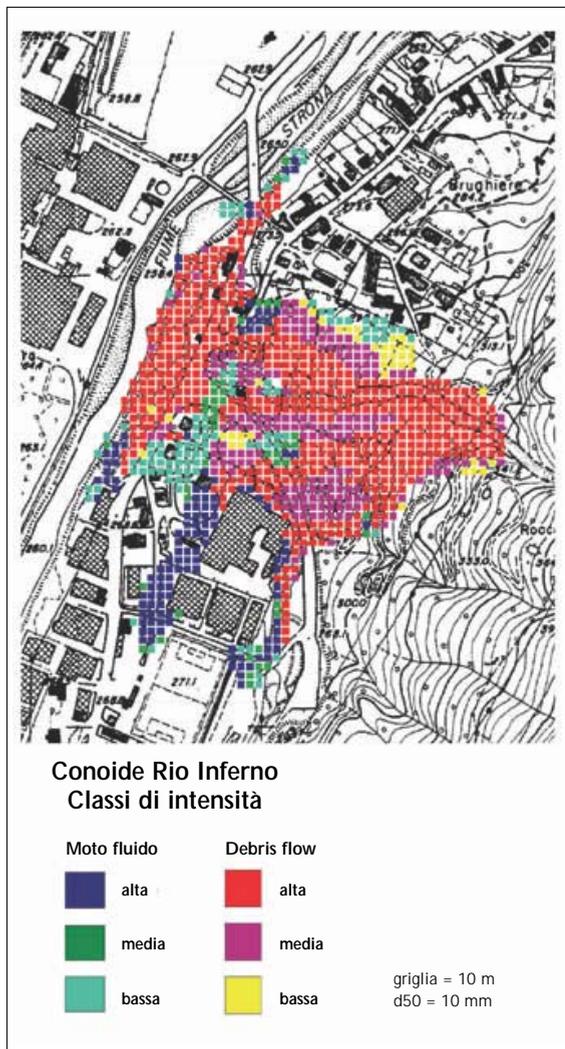


Figura IV-17. Simulazione con un punto di esondazione - modello debris

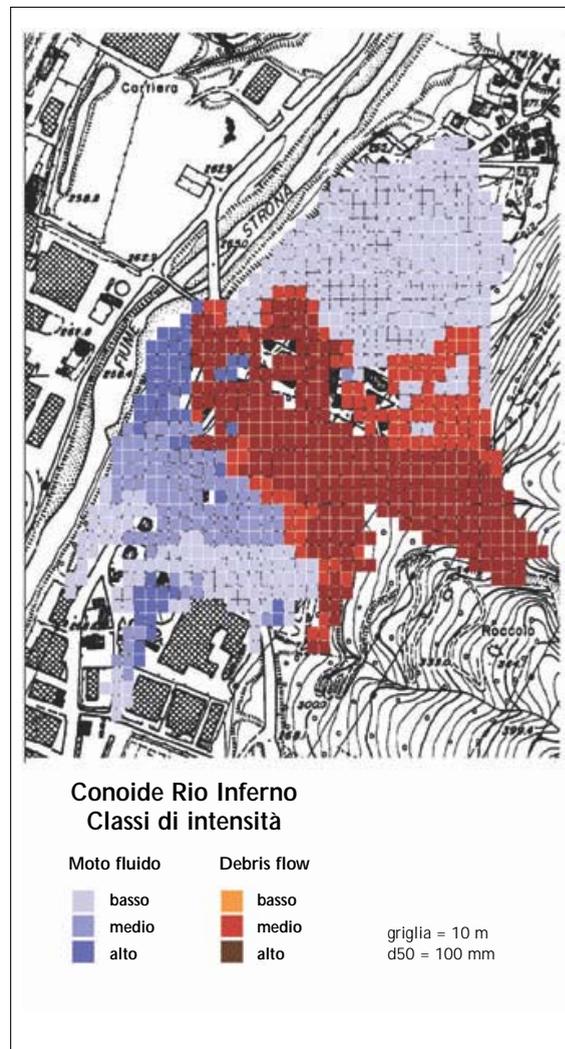


Figura IV-18. Simulazione con più sezioni di esondazione - modello debris

- Il flusso di detrito continua a scorrere nell'alveo e solo una parte, che eccede la capacità di trasporto della sezione, invade il conoide.

In realtà quello che si osserva durante un evento è spesso una situazione intermedia, dove successive esondazioni si accompagnano a un parziale scorrimento della colata nell'alveo del torrente.

Per considerare questo fenomeno il programma *debris* è stato modificato in modo da permettere la fuoriuscita del materiale in più di una cella.

La simulazione condotta in queste condizioni, mantenendo invariati gli altri parametri di riferimento ha fornito risultati senz'altro migliori e molto vicini alla realtà. I risultati della simulazione sono riportati in figura IV-18.

Il flusso di detrito interessa ora tutto il conoide fino alla confluenza nel fiume Strona. La parte toccata dalla deposizione di materiale risulta ancora ridotta rispetto alla realtà in sponda destra, dove il modello simula solamente flusso di acqua e sedimenti. Anche le altezze di deposito raggiunte risultano in questo caso confrontabili con quelle osservate, con un'altezza massima simulata di quasi 9 metri ed osservata di circa 8 metri; i problemi riguardanti l'erosione risultano molto più limitati che precedentemente.

Il calcolo del volume depositato in base all'ultima conformazione del modello indica un valore di 58.900 m³ depositati, non molto discosto dalle stime ottenute dai rilievi in situ effettuati dai Servizi Tecnici della Regione Piemonte, che indicano un

volume mobilizzato di circa 50.000 m³.

L'area interessata complessivamente da deposizione è stimata dal modello pari a circa 5 ha.

È interessante osservare come l'ultima simulazione sia in grado di riprodurre almeno parzialmente l'erosione di fondo osservata durante il rilievo e visibile nel rilievo morfologico post-evento (Ben et al., 1999). Sul lobo destro della colata vi è infatti una zona con altezze di deposizione negative, riportate in figura IV-19, rappresentata in colore verde. Tale osservazione richiede peraltro ulteriori affinamenti e studi al fine di meglio definirne le caratteristiche e l'entità.

IV-22.2. Il modello Dfwalk

Dfwalk è un modello empirico-concettuale per il calcolo delle superfici potenzialmente interessate da un flusso di detrito. Il modello, nello stato attuale di sviluppo, è costituito da una combinazione di diversi modelli e/o approcci, in parte già largamente conosciuti e applicati con successo. Esso fa uso infatti della tecnica *random walk* (cammino casuale) e del metodo di simulazione Montecarlo, del modello di velocità a due parametri (Perla et al., 1980), dell'ipotesi della pendenza media e di un semplice modello per simulare la sedimentazione del flusso di detrito (Scheidegger, 1975).

Le diverse componenti così collegate forniscono un modello relativamente semplice e robusto per la determinazione delle zone di pericolo.

Le simulazioni del modello si basano principalmente su un modello digitale del terreno in formato raster, sulla direzione del flusso derivata da tale modello digitale, sulla definizione e/o conoscenza delle celle di innesco della colata, così come eventualmente sulla conoscenza spaziale delle zone ad alta suscettibilità al rischio, come per esempio insediamenti abitativi, vie di comunicazione, ecc. Dfwalk può essere applicato anche per quelle zone dove non è disponibile

alcuna informazione riguardo la reologia delle colate oppure dove i rilievi topografici dell'alveo risultano scarsi o assenti.

Le diverse tecniche utilizzate dal programma per simulare i processi coinvolti possono essere riassunte nella tabella IV-12 qui di seguito riportata.

L'algoritmo di calcolo può essere suddiviso in 5 passi:

1. Una o più celle di innesco vengono definite, in base all'esperienza di un esperto o utilizzando un modello di predisposizione.
2. A partire da ogni celle definita "di innesco" viene eseguito un *random walk*, nel quale la cella successiva nel percorso viene definita casualmente fra l'insieme delle celle confinanti e a quota inferiore. La possibilità di selezione delle celle è proporzionale alla pendenza locale e tiene conto anche della direzione del flusso fino a quell'istante. Il criterio di interruzione del *random walk* si basa sul criterio della pendenza media (cfr. paragrafo 3.2.1).
3. Il percorso così risultante in corrispondenza di alcuni punti base viene suddiviso in segmenti di uguale lunghezza.
4. Per ogni segmento così definito viene determinata la velocità in base al modello a 2 parametri di Perla (Perla et al., 1980). Il primo segmento in corrispondenza del quale la velocità risulta nulla definisce il raggio d'azione della colata.
5. Utilizzando la funzione di sedimentazione il materiale viene depositato in maniera inversamente proporzionale alla velocità calcolata al punto 4. Il modello digitale del terreno viene modificato in base all'avvenuta deposizione e si procede al calcolo con il successivo *random walk*, fino ad esaurimento del materiale potenzialmente mobilizzabile.

Tabella IV-12. Processi di un flusso di detrito e approccio utilizzato all'interno del modello dfwalk

Componente	Ipotesi	Tipo di approccio
Moto del flusso di detrito	Modello a 2 parametri di Perla et al. (1980)	Fisico
Espansione sul conoide	Random walk, simulazione Montecarlo	Empir.-probabilistico
Sedimentazione	Modello funzione della velocità e della pendenza	Empirico-fisico

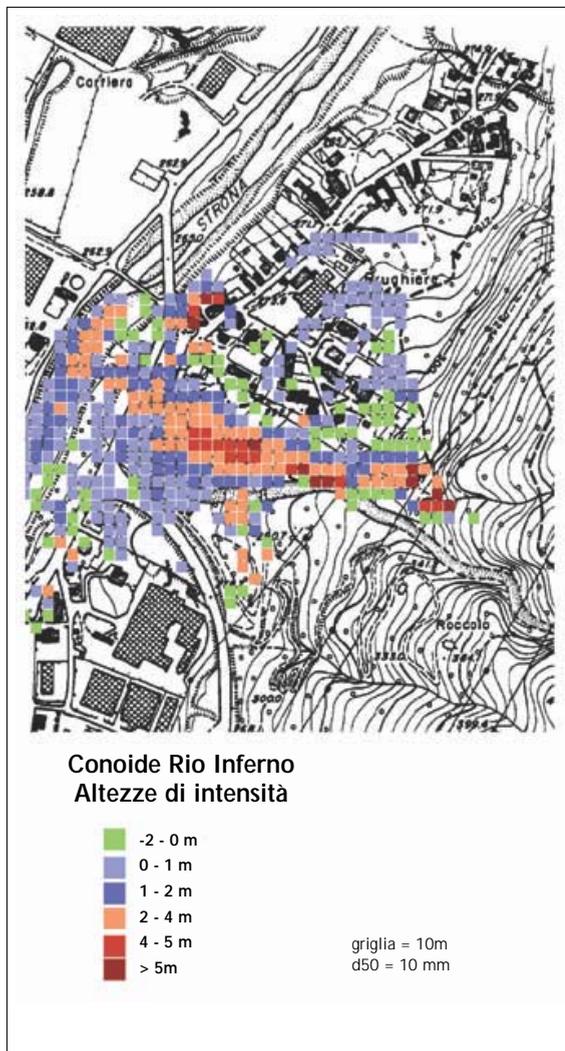


Figura IV-19. Altezze di deposito simulate - modello debris

IV-22.2.1. Modellizzazione della velocità e determinazione del raggio di azione della colata

Come sopra ricordato, il modello di Perla et al. (1980) è un modello sviluppato originariamente per il calcolo della velocità e dell'estensione massima di valanghe. Ipotesi di base rimane quella formulata da Voellmy (1955), ipotesi idraulica cosiddetta *open channel flow*. L'andamento della velocità lungo il percorso è regolato da due parametri di resistenza, μ e ξ . μ è funzione delle proprietà del materiale e della velocità, ξ dipende invece soprattutto dalla geometria della traiettoria.

Il modello di Voellmy venne modificato da Perla et al., introducendo il parametro M/D al posto di ξ ,

dove M rappresenta la massa in movimento e D l'attrito (*mass-to-drag ratio*). La modifica introdotta da Perla consente di svincolarsi dalla problematica della determinazione del punto in corrispondenza del quale la colata comincia a ridurre la sua velocità. Buone indicazioni sull'affidabilità del modello sono state dimostrate da Rickenmann (1990) per la ricostruzione degli eventi accaduti in Svizzera nel 1987, così come durante un ampio confronto di diversi modelli su un bacino naturale altamente strumentato (Rickenmann & Koch, 1997).

IV-22.2.2. Modellizzazione del moto sul cono

Altro aspetto di estrema importanza per la determinazione delle zone di pericolo è rappresentato dal calcolo del moto della colata sul conoide di deiezione. Si intende in questo caso quando la colata abbandona l'alveo naturale e ricopre le superfici limitrofe. Tutte le superfici potenzialmente interessate dal passaggio della colata sono quelle che mostrano una topografia cosiddetta divergente. Tale fenomeno può pertanto essere descritto solamente in funzione di grandezze topografiche, e risulta indipendente dalla velocità e dai volumi della colata (evidentemente la velocità al momento dell'uscita dall'alveo riveste un'importanza nella determinazione del percorso massimo del materiale e, di conseguenza, nella determinazione del volume accumulato).

È in questo punto che la qualità del modello digitale del terreno riveste un ruolo di primaria importanza, come si è già avuto modo di sottolineare a riguardo del modello *Debris*.

IV-22.2.3. Ipotesi utilizzate

Il moto sul cono viene simulato in *dfwalk* tramite l'utilizzo di successive traiettorie casuali (*random walks*), in cui ogni traiettoria differisce dalla precedente tramite piccole modifiche casuali della topografia (Tecnica Montecarlo). Nella sovrapposizione delle differenti traiettorie si ottiene un'immagine complessiva dell'estensione sul conoide. Per la definizione delle differenti traiettorie è necessario definire un criterio per la scelta della cella successiva. Ciò viene eseguito tramite l'utilizzo di numeri casuali. Nel caso il passaggio possa avvenire solo singolarmente da cella a cella si parla di *single flow directions*, nel caso di più celle possibili a valle si usa il termine *multiple flow directions*.

Diversi sono gli algoritmi sviluppati negli ultimi anni e disponibili in letteratura per la determinazione di grandezze relative a modelli distribuiti e in

particolare per la determinazione del percorso di una particella d'acqua sulla base della topografia. Essi si basano principalmente sul metodo della direzione di massima pendenza, anche se presentano differenti caratteristiche e algoritmi di ricerca [Gamma, 1999], di volta in volta più adatti per l'obiettivo specifico della simulazione.

IV-22.2.4. Multiple flow direction for debris flows (mfd)

L'utilizzo di un codice di calcolo del tipo *multiple flow directions* risulta evidentemente necessario nel caso di simulazione di colate di detrito, in quanto l'algoritmo deve essere in grado di fornire, all'interno di un range di pendenze che variano da 0° ad una pendenza limite β_{lim} , una serie di potenziali celle candidate ad essere le celle occupate dal flusso allo step successivo della simulazione. Devono perciò essere soddisfatte alcune condizioni:

- Nell'ambito di pendenze elevate, in prossimità della pendenza β_{lim} i flussi di detrito seguono primariamente la linea di massima pendenza; deviazioni da questo percorso sono ammesse solamente verso celle con pendenza comunque vicina a quella massima.
- Per pendenze di media entità vengono considerate come celle candidate ad accogliere il flusso anche celle con pendenza ridotta; in questo modo viene conferito alla colata la possibilità di espandersi.
- In un terreno piatto o a debole pendenza praticamente tutte le celle possono essere interessate dal flusso, permettendo così un'espansione pressoché illimitata sulla parte terminale del conoide.

La definizione di pendenza elevata o ridotta è effettuata in riferimento alla pendenza β_{lim} . Per pendenze superiori a questo valore è ammessa solo la traiettoria che segue il percorso più ripido.

Un parametro importante di simulazione del modello è pertanto la definizione della pendenza limite β_{lim} .

Tutte le pendenze delle celle adiacenti alla cella in esame vengono riferite a questo valore, tramite un valore di pendenza relativa che permette di svincolare il metodo da una dipendenza locale e ne consente l'applicazione a casi con topografia molto differente.

Per ogni cella adiacente i viene definita la pendenza relativa γ_i come rapporto fra la tangente locale e la tangente relativa alla pendenza limite fissata:

$$\gamma_i = \frac{\tan\beta_i}{\tan\beta_{lim}}, \quad \beta_i \geq 0, i \in N \quad (8)$$

La pendenza relativa massima risulta pertanto:

$$\gamma_{max} = \text{Max}(\gamma_i) \quad (9)$$

Tramite il criterio *mfd* è possibile definire quali celle, oltre a quella di pendenza massima sono le possibili candidate per essere occupate dal flusso di detrito:

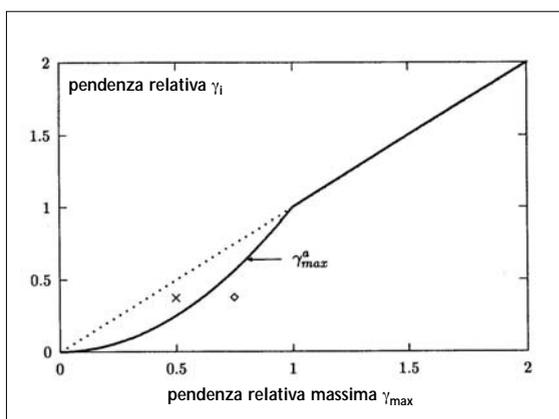
$$\gamma_i \geq (\gamma_{max})^a \quad (0 < \gamma_{max} < 1, a \geq 1) \quad (10)$$

dove a rappresenta il cosiddetto esponente di espansione. Tutte le celle per cui la condizione (10) è soddisfatta sono direzioni consentite di sviluppo della colata. Il numero di celle potenziali risulta pertanto definito:

$$N = \left\{ n_i \left| \begin{cases} \gamma_i \geq (\gamma_{max})^a & \text{se } 0 \leq \gamma_{max} \leq 1 \\ \gamma_i = \gamma_{max} & \text{se } \gamma_{max} > 1 \end{cases} \right. \right\}, i \in N, a \geq 1 \quad (11)$$

Il significato di questo criterio è illustrato graficamente in figura IV-20.

Figura IV-20
Rappresentazione del criterio *mfd* con esponente a pari a 2. Fanno parte delle possibili celle da occupare solo quelle celle adiacenti che, in base alla pendenza limite, sono sufficientemente ripide per soddisfare il criterio *mfd*. La x rappresenta una cella con γ_i pari a 0.375 ($\gamma_{max} = 0.5$) che in questo caso è una delle possibili celle occupabili dal flusso; il segno \diamond mostra una cella con identica pendenza γ_i , ma con un γ_{max} maggiore; poiché il punto si trova al di sotto della funzione limite la cella non può essere invasa dal flusso [da Gamma, 1999]



Sono pertanto possibili percorsi multipli unicamente se la pendenza massima locale è minore della pendenza β_{lim} . Se risulta superiore (cioè $\gamma_{max} > 1$) l'unica traiettoria consentita è quella che segue il percorso di massima pendenza.

Riassumendo questo criterio presenta le seguenti caratteristiche:

- Grazie al valore β_{lim} il criterio *mfd* è calibrabile e utilizzabile per bacini ad elevata pendenza così come per bacini a pendenza ridotta.
- L'ampiezza dell'espansione in zona conoide è controllata tramite il parametro α nel range di pendenze $0-\beta_{lim}$.
- Per valori superiori a β_{lim} non avviene nessuna espansione, vale il criterio *single flow direction*.
- Questo criterio è particolarmente adeguato per l'utilizzo dell'approccio *random walk*, fornendo una lista di possibili celle "candidate" ad essere attraversate dal flusso. In combinazione con un peso associato al valore di pendenza si può così ottenere una tendenza nella direzione di massima pendenza.

Una indicazione sul valore della pendenza limite è fornito dalla ripidezza del conoide da modellizzare. Un conoide rappresenta infatti il risultato integrale della tendenza all'espansione dei precedenti eventi registrati. Perciò la pendenza costituisce il miglior punto di riferimento per la scelta di β_{lim} . Se si impone al modello un valore di β_{lim} alcuni gradi superiore alla pendenza media del conoide, il fenomeno di espansione si comporterà in maniera simile alla realtà.

IV-22.2.5. Modellizzazione della sedimentazione

La zona di conoide rappresenta il principale luogo candidato alla sedimentazione e raccolta di un flusso di detrito. Teoricamente esiste una tendenza alla esondazione in ogni cella del conoide, nel caso il corso d'acqua non sia particolarmente inciso. Esondazioni possono essere causate sia da una successiva deposizione in zone a scarsa pendenza, sia da improvvisi accumuli di materiale e formazione di serre in corrispondenza di strettoie e/o ponti. Per la valutazione del pericolo su un conoide è di fondamentale importanza la stima del comportamento di una colata all'istante di uscita dalla sezione del corso d'acqua.

Il calcolo delle possibili traiettorie della colata, descritto nel paragrafo precedente, non consente evidentemente la simulazione di una fuoriuscita dal corso d'acqua: esso infatti determina le traiettorie in

base alle *flow directions*, definite confrontando le quote della cella con quelle delle celle limitrofe, a quote inferiori. Il meccanismo di ostruzione viene pertanto simulato attraverso un'ipotesi di sedimentazione, ricavata in base a quanto segue.

1. Se la velocità o la pendenza scende sotto un valore limite, vengono depositati sedimenti nelle celle che costituiscono il *random walk*.
2. Esiste una proporzionalità inversa tra velocità e pendenza e il materiale depositato. La deposizione è massima con velocità nulla e raggiunge il valore nullo in corrispondenza della velocità limite di moto, sopra la quale è ancora possibile il moto.
3. Questo principio consente la ricostruzione di una classica "lingua di deposizione", spesso osservata nella realtà, con spessori via via decrescenti verso monte, e la formazione di "argini naturali" che verranno considerati come ostacoli topografici nel corso del successivo *random walk*, essendo il modello digitale del terreno continuamente aggiornato.
4. All'interno e all'esterno del letto del corso d'acqua viene utilizzato lo stesso criterio: questo consente di mantenere semplice il procedimento di deposizione.

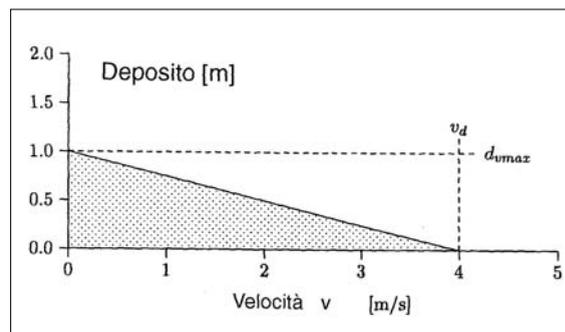


Figura IV-21. Esempio di quantità di deposito sedimentato in funzione della velocità (da Gamma, 1999)

IV-22.2.6. Taratura della velocità

I due parametri di taratura μ e M/D possono essere stimati in maniera ricorsiva per tentativi, valutando graficamente la velocità in funzione della distanza raggiunta dal flusso e la sensibilità dei due parametri di taratura.

Il parametro M/D esercita la sua influenza principalmente sulla velocità nei tratti a pendenza maggiore, al contrario il parametro μ consente di variare

Parametro	Descrizione	Valore finale
μ_{PG}	Pendenza media per la determinazione del raggio di azione	0.1 [-]
μ	Parametro di resistenza al moto del modello di Perla et al.	0.18 [-]
M/D	Mass-to-Drag-Parameter	70 [-]
β_{lim}	Pendenza limite per l'inizio della deposizione	20°
A	Esponente di espansione	2.5 [-]
P	Fattore di persistenza della direzione del flusso	1.5 [-]
F	Numero delle fasi	4 [-]
V_{run}	Volume sedimentato per ogni random walk	100 m ³
V_{max}	Velocità limite per l'inizio della deposizione	7 m/s
$D_{v, max}$	Deposito massimo consentito per velocità nulla	1 m

Tabella IV-13. Valori finali dei parametri utilizzati per la simulazione del Rio Inferno

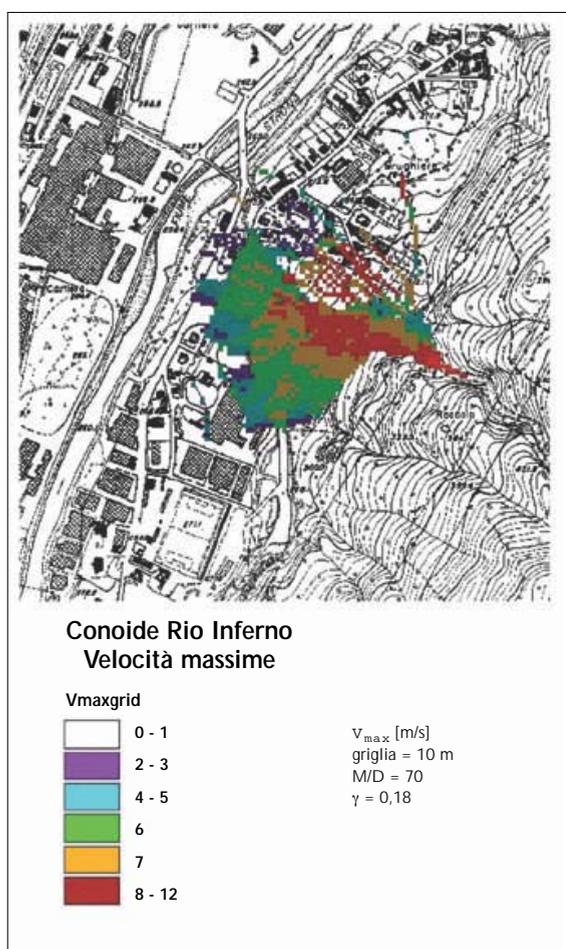


Tabella IV-22. Velocità massime simulate - modello di Perla

la distanza massima percorsa dal flusso di detrito.

La calibrazione per il bacino del Rio Inferno ha fornito un valore di μ pari a 0.18 e un valore per M/D di 70. Questi valori risultano compresi nell'intervallo di variazione ottenuto da Gamma

(1999) analizzando decine di eventi nella Svizzera occidentale e settentrionale e consentono di classificare l'evento che ha interessato il Rio Inferno come un evento da medio-alto ad alto per quanto riguarda la magnitudo del fenomeno.

I valori di tutti i parametri ottenuti al termine del processo di calibrazione sono riportati in tabella IV-13. Con questo set di parametri sono state condotte le simulazioni i cui risultati sono riportati in figura IV-22 e figura IV-23.

IV-23. CONFRONTO DEI RISULTATI

Analizzando più in dettaglio i risultati delle simulazioni si può osservare e commentare i risultati riportati in figura IV-22, dove sono riportate le velocità massime raggiunte dal flusso di detrito durante la simulazione. Nella zona centrale, principalmente lungo l'alveo del torrente Inferno sono simulate velocità tra 8 e 12 m/s, valori decrescenti si osservano nella parte terminale del conoide, prima dello sbocco nel torrente Strona e allo stesso modo lungo il lobo laterale in sinistra orografica. Da notare in sponda destra singole traiettorie con velocità massima simulata superiore a 7 m/s. Questo risultato è in buon accordo con quanto rilevato dopo l'evento; una conferma che la topografia del territorio e vie di scorrimento artificiali quali strade possono contribuire sensibilmente al rischio di alluvionamento in caso di difese idrauliche sottodimensionate in prossimità degli argini.

I dettagli sulla probabilità di invasione delle singole celle sul conoide sono riportati in figura IV-23.

Sulla base di 500 *random walk*, la cartina mostra le celle interessate dal flusso e il numero di attraversamenti registrati. Oltre alla parte superiore del conoide, dove il flusso rimane sostanzialmente

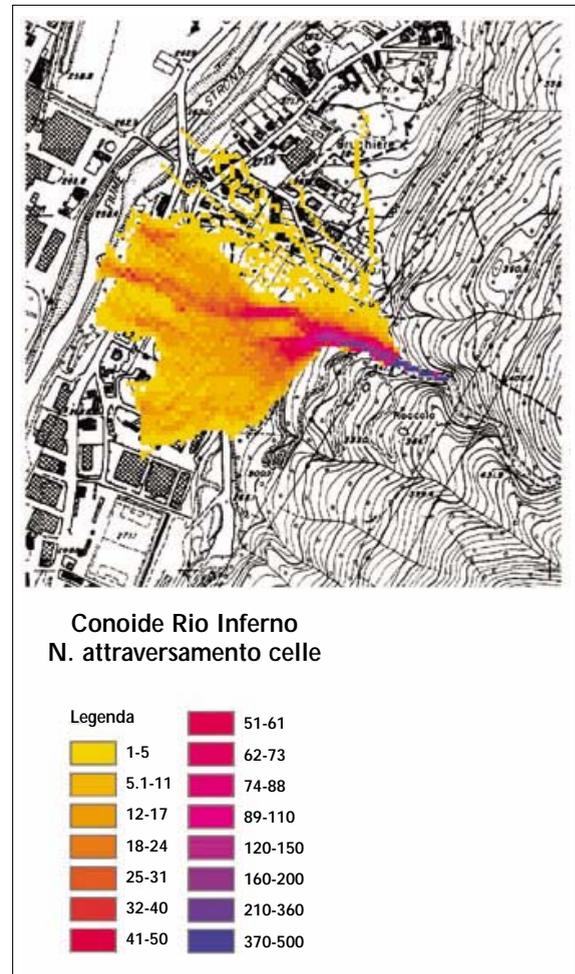
in alveo, si riconoscono due principali direzioni di sviluppo, la prima lungo l'alveo originario, la seconda meno definita e più ampia in sponda sinistra; la sponda destra risulta interessata da un numero di traiettorie limitato, inferiore a 10 (2% dei casi).

Il percorso di massima pendenza, ricavato dall'informazione topografica, mostra come l'alveo del torrente (in blu prima dell'evento) ha subito in seguito alla deposizione uno spostamento verso la sponda sinistra.

La direzione di massima deposizione del materiale ottenuta con il modello *dfwalk* corrisponde sorprendentemente con quella ricavata fisicamente dal modello *Debris*.

Questa può essere considerata un'indicazione importante del progetto: utilizzando la stessa topografia iniziale un modello fisicamente basato (idraulico-reologico) e un modello fisico-empirico-statistico forniscono un risultato molto simile per un evento documentato. Le conseguenze pratiche sull'implementazione e l'utilizzo in parallelo o in alternativa dei due modelli sono riassunte nel paragrafo successivo.

Figura IV-23. Distribuzione delle probabilità assolute di attraversamento delle singole celle in base a 500 *random walks* - modello *dfwalk*



IV-24. CONCLUSIONI

I modelli idraulico-reologici, quale quello sviluppato all'IST e testato sul caso del Rio Inferno nell'ambito del progetto INTERREG II, costituiscono senza dubbio un'utile e necessario strumento per l'interpretazione e la ricostruzione a posteriori di eventi di *debris flows*.

Si è però constatato durante il progetto come, considerata la caratteristica di aleatorietà propria dei processi che inducono un flusso di detrito (processo stocastico di precipitazione, alta variabilità spaziale e temporale del fenomeno, condizioni locali di instabilità dei versanti, eventualità di un'ostruzione della sezione in alveo a seguito di accumulo di legname, ...), la procedura di identificazione e calibrazione dei parametri sia soggetta a notevole incertezza.

Anche nel caso di eventi pregressi, per la calibrazione dei modelli si deve fare riferimento a delle caratteristiche medie del fenomeno, essendo tuttavia ben documentato in letteratura come le colate presentino spesso un comportamento impulsivo:

all'interno di un singolo evento le principali grandezze in gioco come la velocità, la concentrazione dei sedimenti e la granulometria mostrano una variabilità estrema. La stessa traiettoria seguita dal flusso e la successiva deposizione del materiale sul conoide sono soggette ad estrema incertezza.

Si è potuto constatare dalle simulazioni effettuate che, per quanto riguarda l'influenza di ostacoli come edifici ed altre infrastrutture sul moto della colata, è richiesto un ulteriore affinamento della base topografica e la definizione di accurate condizioni al contorno in corrispondenza di questi ostacoli.

In un contesto previsionale, dove l'interesse è maggiormente rivolto alla determinazione delle aree di pericolo e alla conseguente suddivisione del territorio in zone soggette a diversi livelli di pericolosità, i modelli fisicamente basati si rivelano troppo sofisticati e la calibrazione assai esigente. La parametrizzazione di tali modelli richiede, infatti, la conoscenza approfondita della geometria del letto fluviale, un modello digitale del terreno assai dettagliato, soprattutto nella zona di conoide, e indicazioni precise sulla granulometria e la

concentrazione del materiale movimentato; tali informazioni risultano solitamente non disponibili o richiederebbero in ogni caso un investimento finanziario non confrontabile con l'obiettivo.

Per questa ragione in un contesto pianificatorio si rivelano maggiormente appropriati modelli più semplificati del tipo *dfwalk*, che, accanto ad un approccio empirico-concettuale nella descrizione delle condizioni di innesco e delle caratteristiche fisico-idrauliche del moto, fanno uso di un approccio statistico (simulazione Montecarlo) per la determinazione dell'area soggetta a deposizione sul conoide.

L'utilizzo di due modelli diversi (*debris* e *dfwalk*) all'interno di questo programma di ricerca ha permesso di raggiungere una prima conoscenza di

carattere qualitativo e al tempo stesso quantitativo del grado di pericolo a cui può considerarsi soggetto il conoide del Torrente Inferno, con riferimento in particolare all'evento alluvionale del luglio 1996.

Una integrazione delle classi di intensità definite dal programma DEBRIS in termini di flusso di detrito e moto fluido da una parte, e della probabilità di alluvionamento dall'altra calcolata con il modello probabilistico rappresenta un passo successivo, attualmente in fase di implementazione.

L'elaborazione di carte di rischio, legate sia a parametri fisici e misurabili di intensità del fenomeno (come altezza di deposizione e velocità), che ad una informazione probabilistica costituisce infatti uno strumento ormai indispensabile per pianificatori e decisori (*BUWAL*, 1999).

Bibliografia

ARATTANO M., DEGANUTTI A.M. & MARCHI L., (1997), *Debris Flow Monitoring Activities in an Instrumented Watershed of the Italian Alps*. In: C. Chen (ed), *Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*: 506-515. Water Resources Engineering Division/ASCE.

ARATTANO M., CHIARLE M., FIORASO G., MARCHI L., MORTARA G., TURITTO O. & TETAMO G., (1996), *Analysis of recent and past debris flow events in the Italian Alpine Region. European Programme in the field of Environment 1990-94*. CE Contract EV5V CT94 0453. Final Report: 31 pp.

ARATTANO M., (1999), *Recenti avanzamenti nelle misure di protezione di tipo passivo contro le colate detritiche torrentizie*. GEAM - Geoingegneria Ambientale e Mineraria 36(1): 57-64.

ARATTANO M. & MARCHI L., (2001), *Relazione Finale Progetto INTERREG II 1994/1999 Italia - Confederazione Elvetica. Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico. Azione 4: condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati*.

ARCURI G., BARBERO S., BEDONI L.A., BEN G., DRAGO D., LAZZARI A., MAGOSSO P., MARCHISIO C., NEGRO N., PERRONE R., PESCIO R., PONZA M., RUBERTO G., TROISI C., (1996), *Gestione di un evento alluvionale: il caso dell'8 luglio 1996 nel Cusio-Verbanò, Piemonte*. Atti Convegno La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica: Alba 5-7 Novembre 1996, pp. 89-100.

ARMANINI A., (1999), *Previsione e prevenzione del rischio da colata di detriti*. In: Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo: 13-44. Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei, n. 154.

BAGNOLD R.A., (1954), *Experiments on a gravity free dispersion of a large solid spheres in a Newtonian fluid under shear*. Proc. R. Soc. London, A 225: 49-63.

BARBERO S. & MARCHISIO C., (1996), *Le precipitazioni del giorno 8 luglio del 1996 sul monte Mottarone*. Pubblicazione del "Servizio Meteo-idrografico e Reti di Monitoraggio" della Regione Piemonte.

BATHURST J., BURTON A. & WARD T., (1997), *Debris flow run-out and landslide sediment delivery model test*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123(5): 410-419.

BEN G., BEDONI L.A., CONTE R., MAGOSSO P., RUBERTO G., TONANZI P., (1999), *Relazione generale sul bacino del Rio Inferno nel Comune di Omegna (VB)*. INTERREG II; 1994-1999 - Italia Confederazione Elvetica.

BIANCO G., (1999), *Sulla valutazione dei volumi di materiale solido associati a eventi di debris-flow (quale elemento conoscitivo per la scelta delle misure relative al controllo e alla difesa idraulica dei territori e della rete idrografica di fondovalle)*. Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino- Vol. 133, pp.1-28.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Sui volumi di materiale solido associati ad eventi di debris-flow per la progettazione delle piazze di deposito*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - Genova, 12-15 settembre.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Estimation of debris-flow volumes from storm events*. Proc. Second International Conference on Debris Flows Hazard Mitigation, Taipei, Taiwan, 16-18 agosto, 2000.

BIANCO G. & FRANZI L., (2000), *Collegamento delle reti di rilevamento e condivisione delle esperienze e conoscenze per la gestione del rischio idrogeologico in ambiente alpino*. Programma Interreg II Italia-Confederazione Elvetica, Azione 4, Rapporto conclusivo DITIC Politecnico di Torino.

BIANCO G., (2001), *INTERREG II Italia - Francia - Pubblicazione finale - Volet 5 - Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati*.

BOVIS M.J. & JAKOB M., (1999), *The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity*. Earth Surface Landforms and Processes 24: 1039-1054.

BROCHOT S., (1998), *Etude hydraulique de l'arc de Maurienne de Modane a l'Isere - Estimation des apports sédimentaires des torrents affluents*. Cemagref - Département Equipements pour l'eau et l'environnement, Division Erosion torrentielle neige et avalanches - Groupement de Grenoble.

BROCHOT S., (1998), *Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle (apports des versant et production de sédiments)*. Ingénieries-EAT n° 15, septembre 1998, pp. 61 à 78.

BROCHOT S., (2000), *Estimation de la production de sédiments des torrents ; application aux affluents de l'Arc de Maurienne (Savoie, France)*. Internationales symposium Interpraevent 2000, Villach, band3, pp 57-68.

BROCHOT S., MARCHI L. & LANG, M., (2001), *L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie)*. Article proposé au Bulletin de l'AIIGI.

BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, (1999), *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren*, Umwelt Materialien NR. 107/II e II.

CAILLEU A. & TRICART J., (1959), *Initiation à l'étude des sables et des galets*. C.D.U.: Paris, Tome I: 376 pp.

CHIARLE M. & LUINO F., (1996), *Colate detritiche torrentizie sul monte Mottarone innescate dal nubifragio dell'8 luglio 1996 (Lago D'Orta – Piemonte)*. Atti Convegno: La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica - Alba 5-7 Novembre 1996- pp.231-245.

CHEN C.L., (1987), *Comprehensive review of debris flow modeling concept in Japan*. Geol. Sic. Am. Rev. Eng. Geol. Vol. VII: 13-29.

COSTA J. E., (1984), *Physical Geomorphology of Debris Flow*. In J.E. Costa & P.J. Fleisher (ed.). Developments and Applications of Geomorphology, 268-317.

D'AGOSTINO V., (1996), *Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale*. In: Scritti dedicati a Giovanni Tournon: 111-123. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria - Associazione Idrotecnica Italiana.

D'AGOSTINO V., CERATO M. & COALI R., (1996), *Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale*. Internationales Symposium Interpraevent 1996, vol. 1: 377-386.

DAVIES T.R., (1997), *Using hydroscience and hydrotechnical engineering to reduce debris flow hazards*. In: C. Chen (ed), Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: 787-810. Water Resources Engineering Division/ASCE.

DEGANUTTI A.M., MARCHI L. & ARATTANO M., (2000), *Rainfall and debris flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps)*. In G. Wieczorek & N. Naeser (eds), Proceedings, Second International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: 67-72. Rotterdam: Balkema.

FRANZI L., (2000), *Correnti iperconcentrate in ambiente montano: aspetti modellistici*. Ph. Thesis dissertation, XIII Ciclo, Politecnico di Milano, 2000.

FRANZI L. & BIANCO G., (2001), *A statistical method to predict debris-flow volumes deposited on a debris fan*. Journal of Physics, Chemistry and Physics of Earth – Vol. 28. n°9, pp. 683-688, 2001.

GAMMA P., (1999), *Dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Inaugural-dissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

GOVI M., MARCHI L., MORTARA G. & TURITTO O., (1992), *Ricerche sulle colate detritiche torrentizie (debris flow) in ambiente alpino*. 405-420. GNDCl, Rapporto 1990/91 dell'U.O. 1.29.

HALL R.J. & DAVIES T.R., (1992), *Realistic strategies for disaster prevention*. Internationales Symposium Interpraevent 1992, vol. 3: 381-390.

HAMPEL R., (1977), *Geschiebewirtschaft in Wildbächen*. Wildbach und Lawinenverbau 41: 3-34.

HEINIMANN H.R. et al., (1998), *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

HUNGR O., MORGAN G.C. & KELLERHALS R., (1984), *Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures*. Canadian Geotechnical Journal 21: 663-677.

HUNGR O., MORGAN G.C., VAN DINE D.F. & LISFER R.D., (1987), *Debris flow defenses in British Columbia*. In Costa J.E. & Wieczorek (ed.). Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation, Geol. Soc. of America, Rev. In Eng. Geol., Vol. 7: 201-222.

JOHNSON A.M., & RODINE J.R., (1984), *Debris flow*. In: D. Brunsten, & D.B. Prior (eds), *Slope instability*: New York: John Wiley & Sons.

JOHNSON P.A., MC CUEN R.H. & HROMADKA T.V., (1990), *Magnitude and frequency of debris flows*. *Journal of Hydrology* 123: 69-82.

KLEEMAYR K., (1996), *Übersicht über die Lawinenberechnungsmodelle und Bewertung hinsichtlich des Einsatzes in der Gefahrenzonenplanung*. International Symposium Interpraevent 1996: 3-18.

KRONFELLNER-KRAUS G., (1985), *Quantitative estimation of torrent erosion*. International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention: 107-110, Tsukuba, Japan.

MARAGA F., MARCHI L., MORTARA G. & MOSCARIELLO A., (1998), *Colate detritiche torrentizie: aspetti granulometrici e influenza sul territorio*. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, Vol. 53: 75-96.

MARCHI L. & TECCA P.R., (1996), *Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane*. *Geingegneria Ambientale e Mineraria* 33: 79-86.

MARIE R./CEMAGREF GRENOBLE, (1984), *Méthodologie de programmation des actions de Restauration des terrains en montagne. Phase d'élaboration des éléments techniques d'aide à la décision. Le cas de la Maurienne*. CERREP.

MEUNIER M., (1991), *Éléments d'hydraulique torrentielle*. CEMAGREF. Etudes, Série Montagne, n. 1 : 278 p, Gap.

MIZUYAMA T., IKEYA H. & IMAMURA R., (1984), *Methods for zoning debris flow vulnerable areas*. Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, East West Center, Hawaii: 281-287.

MIZUYAMA T., KOBASHI S. & Ou G., (1992), *Prediction of debris flow peak discharge*. Internationales Symposium Interpraevent 1992, vol. 4: 99-108.

O'BRIEN J. & JULIEN P., (1997), *On the importance of mudflow routing*. American Society of Civil Engineers Publ.: 677-686.

PERLA R., CHENG T. & MCCLUNG D., (1980), *A two-parameter model of snow avalanche motion*. *Journal of Glaciology*, 26(4): 197-207.

PISANI S., (1996), *Programma per la simulazione di un flusso di detrito su un cono*. Istituto di scienze della terra, Cadenazzo.

PRICE W.E., (1976), *A Random-Walk Simulation Model of Alluvial-Fan Depositino*. In Merriam D.F. (ed.). *Random Processes in Geology*. New York: Springer-Verlag.

PWRI, (1984), *Basics of planning measures against debris flow; planning countermeasures against debris flow, Design Booklet, Technical Standards for Erosion and Sediment Control*. Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan.

RICKENMANN D., (1990), *Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and sediment transport*. International Association of Hydrological Sciences Publ.: 371-378.

RICKENMANN D., (1997), *Estimation des laves torrentielles*. *Ingénieurs et Architectes Suisses* 19 : 386-392.

RICKENMANN D., ZIMMERMANN M., (1993), *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*. *Geomorphology* 8: 175-189.

RICKENMANN D. & KOCH T., (1997), *Comperison of debris flow modelling approaches*. In Cheng lung Chen (ed.). *Proceedings of First International Conference Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, ASCE: 576-585.

SCHEIDEGGER A., (1975), *Physical aspects of natural catastrophes*. Amsterdam-New-York: Elsevier.

SCHEURINGER E., (1988), *Ermittlung der massgeblichen Geschiebefracht aus Wildbach-Oberlauten*. *Wildbach und Lawinenverbau* 109: 87-95.

SPREAFICO M., LEHMANN Ch. & NAEF O., (1999), *Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents*. 48 pp. plus annexes. Berne: Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle.

TAKAHASHI T., (1978), *Mechanical characteristics of debris flow*, *J. Hydr. Div., ASCE*, 104, pp. 1153-1169.

- TAKAHASHI T. & YOSHIDA H., (1979), *Study on the deposition of debris flows, Part 1 – Deposition due to abrupt change of bed slope*. Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan, 22 B-2.
- TAKAHASHI T., (1980a), *Evaluation of the factors relevant to the initiation of debris flow*. Proc. International symposium on Landslides, New Delhi, pp. 136-140.
- TAKAHASHI T., (1980b), *Debris flow on prismatic open channel*. J. Hydr. Div., ASCE, 106, pp. 381-396.
- TAKAHASHI T., (1981a), *Estimation of potential debris flow and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster*. Journal of Natural Disaster Science, 3, 1, pp. 57-89.
- TAKAHASHI T., (1981b), *Debris flow*. Ann.Rev. Fluid Mechanics, 13, pp. 57-77.
- TAKAHASHI T., (1991), *Debris Flows*. IAHR/AIRH monograph, Rotterdam. Balkema: 165 p.
- TAKEI A., (1984), *Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system*. Internationales Symposium Interpraevent 1984, vol. 2 : 35-48.
- THOURET J.-C., VIVIAN H. & FABRE D., (1995), *Instabilité morphodynamique d'un bassin-versant alpin et simulation d'une crise érosive (L'Eglise-Arc 1800, Tarentaise)*. Bull. Soc. géol. France 166: 587-600.
- TROPEANO D. e TURCONI L., (1999), *Valutazione del potenziale detritico in piccoli bacini delle Alpi Occidentali e Centrali*: 151 pp. Torino - CNR Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano.
- UNIVERSITY OF BERN - INSTITUTE OF GEOGRAPHY, GEO7 GEOSCIENTISTS, (1996), *Debris Flows*. EC Environment Research Program, Contract EV5V-CT94, Final Report: 135 pp.
- VANDINE D.F., (1985), *Debris flow and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera*. Canadian Geotechnical Journal 22: 44-68.
- VANDINE D.F., (1996), *Debris flows control structures for forest engineering*: 68 pp. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work Paop. 22/1996.
- VAN STEIJN H., (1996), *Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe*. Geomorphology 15: 259-273.
- VAW, (1992), *Mürgänge 1987 - Dokumentation und Analyse*. Bericht im Auftrag des Bundesamt für Wasserwirtschaft (non pubblicato). Bericht 97.6, ETH Zürich.
- VOELLMY A., (1955), *Über die Zerstörungskraft von Lawinen*. Schweizerische Bauzeitung, Jahrgang 73(12): 159-162; (15): 212-217; (17): 246-249; (19): 280-285.
- WILSON R.C., MARK R.K. & BARBATO G., (1993), *Operation of a real-time warning system for debris flows in the San Francisco Bay area, California*. In H.W. Shen, S.T. Suand F. Wen (eds.), Hydraulic Engineering '93, vol. 2: 1908-1913.
- WARD T.J., (1994), *Modeling delivery of landslide materials to stream.*, New Mexico Water Resources Research Institute Report, 288, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico.
- ZHANG S., (1993), *A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China*. Natural Hazards, vol. 7, 1-23.
- ZIMMERMANN M., MANI P., GAMMA P. et al., (1997), *Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS basierter Ansatz*, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag Zürich.

Ringraziamenti

Si ringrazia P. Gamma e lo studio Geo7, Berna per aver messo a disposizione il codice dfwalk e le loro conoscenze sulle colate di detrito, risultate assai utili per l'applicazione del modello al caso specifico di studio.