



Paolo Paronuzzi, Alessandro Coccolo, Giovanni Garlatti \*

## EVENTI METEORICI CRITICI E *DEBRIS FLOWS* NEI BACINI MONTANI DEL FRIULI

### Summary

This paper describes the results of a study on the heavy rainfall occurring in the mountain basins of the Friuli alpine area (Northern Italy) for analysing the triggering conditions of debris flow phenomena. The analysed examples, especially the critical case history of the cloud-burst occurred on 21-22 June 1996 in the Fella river basin, show that the critical hydrological conditions in the mountain area of Friuli have been reached more and more frequently in the last time. This fact is due to the considerable increase in the intensity of the rainfall having a duration equal or less than 24 hours. Above all are very critical the rains of 1 to 6 hour duration with an intensity  $I_c$  greater than 45-50 mm/hour. The hydrological study points out the existence of a cyclical nearly sinusoidal trend of the maximum annual of the 24 hours rainfall; the corresponding curve is characterised by maximum stages every 30 years with a clear increasing trend in the last ten years. This fact must be held in adequate consideration for the future analyses: if this climatic worsening will be verified also for other alpine areas, one can expect a progressive increasing in the hydrological hazard of the already very ruined Italian mountain landscape.

### Sommaire

Ce mémoire décrit les résultats d'une étude sur les précipitations intenses pour la prévision des événements météoriques critiques responsables du déclenchement de "débris flows" (cheminement des débris) dans les bassins de la montagne du Frioul. Les exemples analysés et notamment le cas critique qui s'est produit le 21-22 juin 1996 dans le bassin du F. Fella, démontrent qu'au cours de ces dix dernières années, ces conditions critiques ont été atteintes toujours plus fréquemment dans les Alpes du Frioul. Ceci peut être attribué à l'accroissement remarquable de l'intensité des pluies dont la durée est égale ou inférieure à 24 heures. Et tout particulièrement, les précipitations de 1 à 6 heures avec une intensité de pluie  $I_c > 45-50$  mm/h. se sont révélées très critiques. La détermination d'un cours cyclique (environ 30 ans), quasi sinusoidal, des valeurs maximales annuelles des précipitations de 24 heures et caractérisé récemment par une tendance nette vers des pluies plus intenses, s'est révélée très significative. Les analyses futures devront tenir compte de ceci: si l'aggravation climatique sera également confirmée pour d'autres zones, on devra naturellement s'attendre à un accroissement progressif de la vulnérabilité hydrogéologique du territoire de la montagne italienne qui apparaît déjà très déformé.

### Sommario

Questa memoria descrive i risultati di uno studio delle precipitazioni intense per la previsione degli eventi meteorici critici responsabili dell'attivazione di debris flows nei bacini montani del Friuli. Gli esempi analizzati, particolarmente il caso critico avvenuto il 21-22 giugno 1996 nel bacino del F. Fella, dimostrano che nelle Alpi Friulane le condizioni critiche vengono raggiunte sempre più frequentemente nell'ultimo decennio. Questo fatto è imputabile al notevole incremento dell'intensità delle piogge di durata uguale o inferiore alle 24 ore. In modo particolare risultano decisamente critiche le precipitazioni di 1-6 ore con intensità di pioggia  $I_c > 45-50$  mm/h. Piuttosto significativa risulta essere l'individuazione di un andamento ciclico (circa 30 anni), quasi sinusoidale, dei massimi annuali delle precipitazioni di 24 ore e caratterizzato da una netta tendenza recente verso piogge più intense. Questo fatto deve essere tenuto in debita considerazione nelle future analisi: se questo peggioramento climatico risulterà confermato anche per altre aree, è lecito attendersi un progressivo aumento della vulnerabilità idrogeologica del già tanto dissestato territorio montano italiano.

\* Paolo Paronuzzi, Ingegnere, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine; Alessandro Coccolo e Giovanni Garlatti, Collaboratori.



## 1. INTRODUZIONE

Le colate detritiche, internazionalmente note come *debris flows*, sono un fenomeno di flusso di acqua e materiale sedimentario caratterizzato da una notevole potenza distruttiva, dovuta sia all'elevata velocità di propagazione sia alle dimensioni e alla quantità del materiale trasportato. Se tali processi si verificano nei recessi montani, disabitati e privi di infrastrutture, essi si manifestano con una profonda aratura dell'alveo o dei versanti su cui avvengono, alla quale segue il deposito del materiale trasportato che spesso raggiunge lo spessore di diversi metri. La progressiva antropizzazione dell'ambiente montano, riconducibile in particolare alla costruzione di arterie di comunicazione, porta inevitabilmente all'interazione di questo fenomeno naturale con le strutture e le attività umane. La maggior parte delle volte questa interazione si esplica in danni più o meno gravi alle infrastrutture, provocando l'interruzione della viabilità e, non di rado, anche ferimenti e/o perdite di vite umane.

La gravità degli effetti dei *debris flows*, associata alla loro frequenza e al notevole incremento recente del tessuto urbanizzato nei territori montani, ha favorito il rapido sviluppo, soprattutto nell'ultimo ventennio, di una ricerca finalizzata alla loro prevenzione e mitigazione. Sono state in questo modo acquisite nuove fondamentali conoscenze che derivano dall'esperienza maturata da diverse scuole di ricerca, tra le quali spiccano quella giapponese (Takahashi, 1978; 1980 e 1991; Ikeya, 1989) e canadese (Hung et al., 1984; Vandine, 1985).

Alcuni di questi studi propongono diversi modelli matematici dei flussi detritici e sono finalizzati alla modellazione della meccanica dei miscugli granulari. Per questi aspetti si rimanda alla recente sintesi di Seminara e Tubino (1993).

Altri studi utilizzano invece un approccio idrologico per cercare di identificare e quantificare dei valori critici di pioggia intensa, necessari per l'innescò dei fenomeni di dissesto idrogeologico (modelli idrologici) (Cascini e Versace, 1986). Questo tipo di studi idrologici basati sullo studio di dettaglio delle precipitazioni intense, nella loro evoluzione spaziale e temporale, è stato recentemente impiegato per la definizione delle condizioni di attivazione delle colate di detrito e delle frane superficiali a scala regionale (Campbell, 1975; Moser e Hohensinn, 1983; Cancelli e Nova, 1985).

I modelli pluviometrici assumono una certa validità soprattutto se vengono applicati a contesti montani dotati di caratteristiche geo-idrologiche abbastanza omogenee e per bacini di adeguata estensione areale.

Il presente studio espone i principali risultati ottenuti applicando tali modelli idrologici nello studio dei fenomeni di colata e di dissesto idrogeologico che, purtroppo, con grande frequenza colpiscono i bacini montani del Friuli. Infatti in questo settore alpino, particolarmente vulnerabile per i pesanti condizionamenti orografici, geologico-strutturali e sismici, coesistono tutti quei fattori negativi che rappresentano gli elementi determinanti per l'innescò delle colate di detrito. Tra questi vale la pena menzionare: a) il regi-

me pluviometrico contraddistinto da frequenti piogge brevi molto intense; b) le diffuse coperture detritiche entro i bacini montani; c) l'elevata instabilità dei versanti e la diffusa franosità favorita dall'intensa attività sismica regionale.

## 2. LE PRECIPITAZIONI INTENSE NELLE ALPI FRIULANE

Nell'ultimo ventennio numerosi episodi di precipitazione critica hanno interessato i bacini montani delle Alpi Friulane (Paronuzzi, 1993), coinvolgendo con particolare frequenza diversi settori delle Alpi Carniche (Paronuzzi e Vanon, 1995) e Giulie (Arattano et al., 1991; Garlatti, 1997).

Sono stati analizzati in dettaglio gli eventi di precipitazione intensa associati a processi di colata, avvenuti nel periodo 1975-1996. Nell'ambito dello studio idrologico sono stati considerati i dati delle 21 stazioni pluviometriche riportate in Tab. 1, dove figura anche la corrispondente precipitazione media annua (P.M.A.).

Sono stati individuati sei episodi critici principali che hanno determinato l'attivazione di colate di detrito:

- 5, 6, 7, aprile 1975 (bacino del F. Fella) ;
- 11 settembre 1983 (bacino del T. Chiarsò);
- 8 giugno 1985 (bacino del F. Fella) ;
- 25 agosto 1987 (bacino del F. Fella) ;
- 23, 24 settembre 1990 (bacino del F. Fella) ;
- 21, 22 giugno 1996 (bacino del F. Fella) .

Poichè molti eventi critici si sono distribuiti nell'arco di 2 giorni è stata presa in esame la precipitazione cumulata delle due giornate (Fig. 1a), anche se nella realtà il fenomeno intenso ha avuto luogo in un intervallo di tempo più ristretto. I dati pluviometrici sono stati espressi anche in termini percentuali rispetto alla precipitazione media annua (PMA) (Fig. 1b), analogamente a quanto già proposto in altri studi sulla franosità indotta da piogge intense (Govi et al. 1985). Il riferimento alle piogge normalizzate consente di estendere i risultati dell'analisi anche a regioni con diverso regime piovoso.

I dati relativi all'evento del 5-7 aprile 1975, in cui si sono avute piogge intense piuttosto persistenti, sono stati riportati nei grafici considerando separatamente i due giorni 5-6 e 6-7 aprile. Nei diagrammi le stazioni gravitanti su aree in cui si sono verificati episodi di colata sono evidenziate da un apposito simbolo. E' evidente la notevole disomogeneità areale delle precipitazioni durante un singolo evento, con picchi molto accentuati nelle zone in cui sono avvenute le colate. Esempio è il caso dell'evento dell' 11 settembre 1983 in cui all'elevata quantità di pioggia caduta ad Avosacco, Paluzza e Paularo si contrappongono modestissime precipitazioni registrate nelle stazioni limitrofe. In altri casi le precipitazioni risultano consistenti in tutto il bacino, a scapito dei picchi di pioggia che tendono ad abbassarsi, come è accaduto durante l'evento del 25 agosto 1987. La presenza di questi massimi localizzati di precipitazione indica delle piogge molto più intense in alcune zone rispetto alle altre parti del bacino.

Nel grafico di Fig. 1b si nota che le precipitazioni assumono caratteristiche critiche quando raggiungono valori cumulati pari a circa il 9 % della PMA. Allo stesso modo si osserva che le situazioni di maggiore calamità e di dissesto generalizzato sono determinate da altezze pluviometriche cumulate comprese tra il 15% e il 30% della PMA (eventi del 1983, 1990 e 1996).

Il ridotto intervallo temporale caratteristico delle piogge critiche è confermato dallo studio dei massimi annuali di precipitazione delle 24 ore. Ad esempio per il bacino del Fella sono state considerate le due stazioni di Moggio Udinese e Pontebba, dall'inizio del loro funzionamento (Fig. 2). Nel diagramma sono stati evidenziati con un asterisco gli eventi di pioggia intensa che hanno attivato colate di detrito. Gli e-

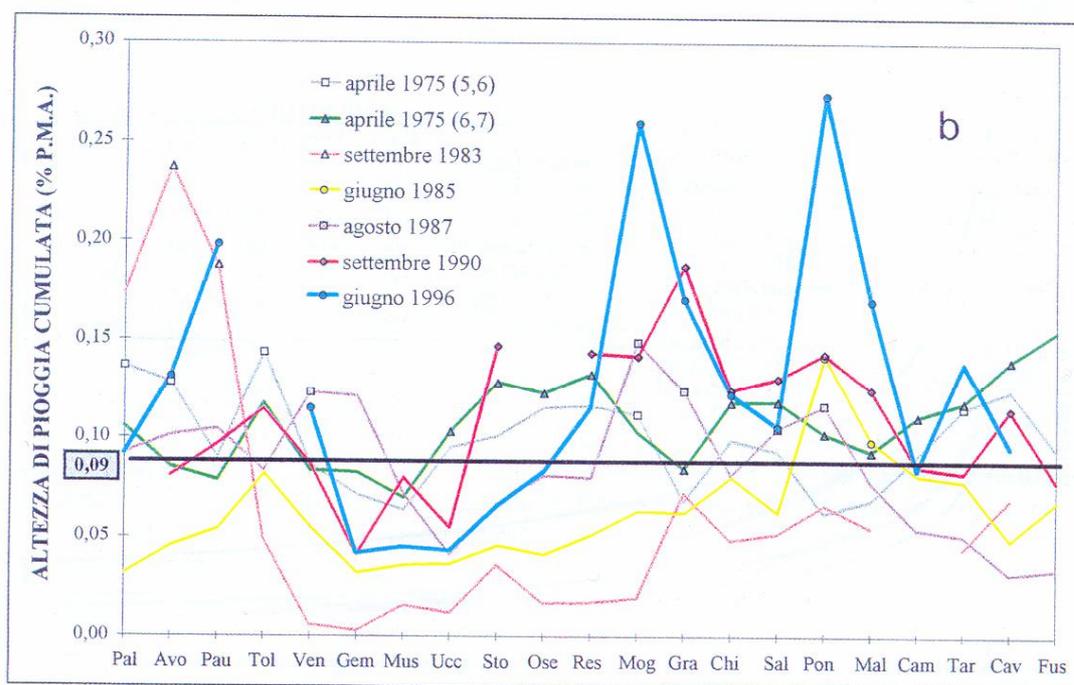
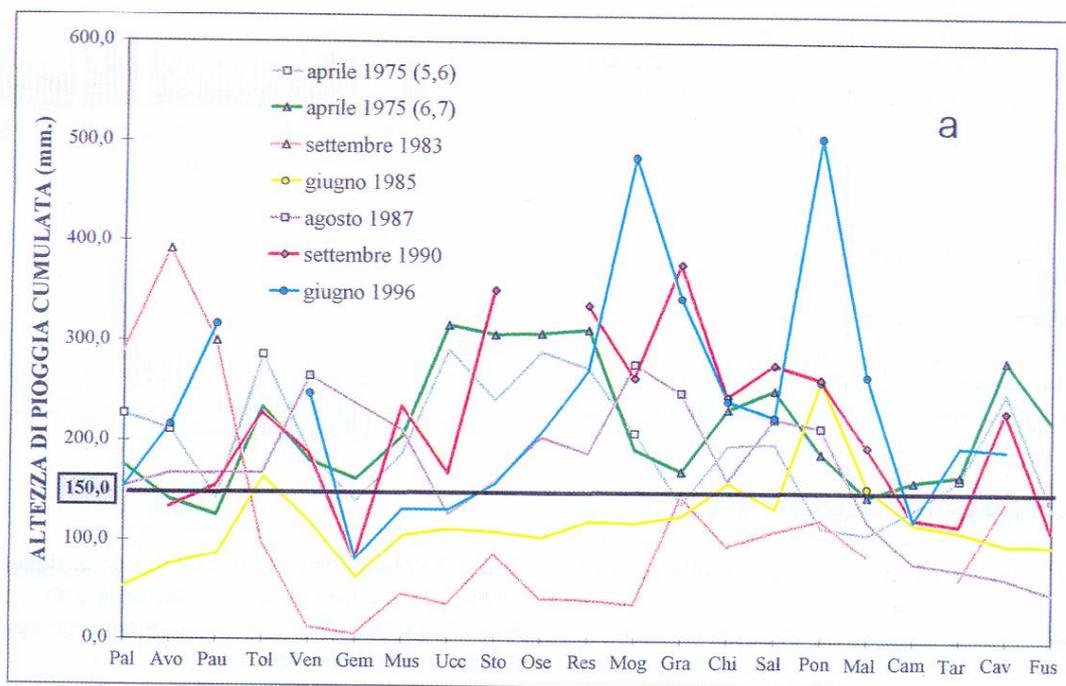


Figura 1 - Precipitazioni cumulate, espresse in mm (1a) e in % della P.M.A. (1b), dei principali episodi di pioggia critica che hanno causato colate di detrito nelle Alpi Friulane (periodo 1975-1996).

venti critici, responsabili di situazioni di dissesto idrogeologico più o meno gravi, sono caratterizzati da piogge cumulate notevoli, con quantità anche superiori al doppio del valore medio (Fig. 2).

### 3. LE CURVE DI PRECIPITAZIONE CRITICA

I dati delle precipitazioni intense orarie, registrati nell'ultimo ventennio, sono stati utilizzati per determinare le combinazioni critiche di intensità-durata, responsabili dell'attivazione delle colate in questo settore alpino del Friuli. Una generica curva di precipitazione critica può essere definita dalla relazione

$$i = a \cdot D_h^b \quad (1)$$

essendo  $i$  l'intensità media (mm/h) e  $D_h$  la durata della precipitazione (ore).

Attraverso l'interpolazione dei dati pluviometrici sono state ottenute le curve critiche di Fig. 3. Le 12 curve di precipitazione critica individuano una soglia minima di intensità-durata, al di sotto della quale non si sono manifestati processi di colata.

Questa curva limite è definita dalla curva inferiore del diagramma di Fig. 3 che corrisponde ai dati registrati dalla stazione di Pontebba durante l'evento di giugno 1985. In questo caso, con riferimento all'equazione (1), si ottiene la relazione

$$i = 47.742 \cdot D_h^{-0.507} \quad (2)$$

Se invece l'altezza di pioggia viene espressa in % della P.M.A. si ha:  $a = 0.026$  e  $b = -0.507$ .

I valori limite dei coefficienti  $a$  e  $b$  possono venire confrontati con quelli desunti dallo studio di piogge intense verificatesi in altre aree dell'arco alpino. Ad esempio se si consi-

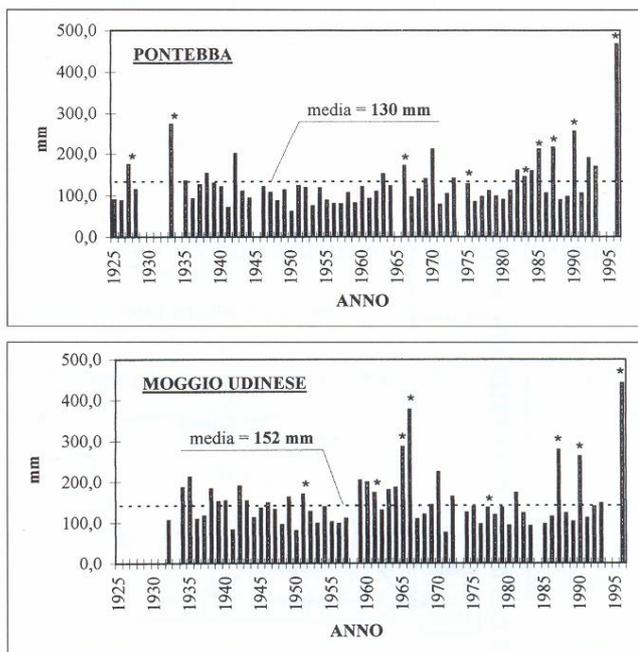


Figura 2 - Massime precipitazioni annue delle 24 ore misurate alle stazioni di Moggio Udinese e Pontebba (Valle del F. Fella, Ud). Gli asterischi indicano gli episodi critici di dissesto idrogeologico.

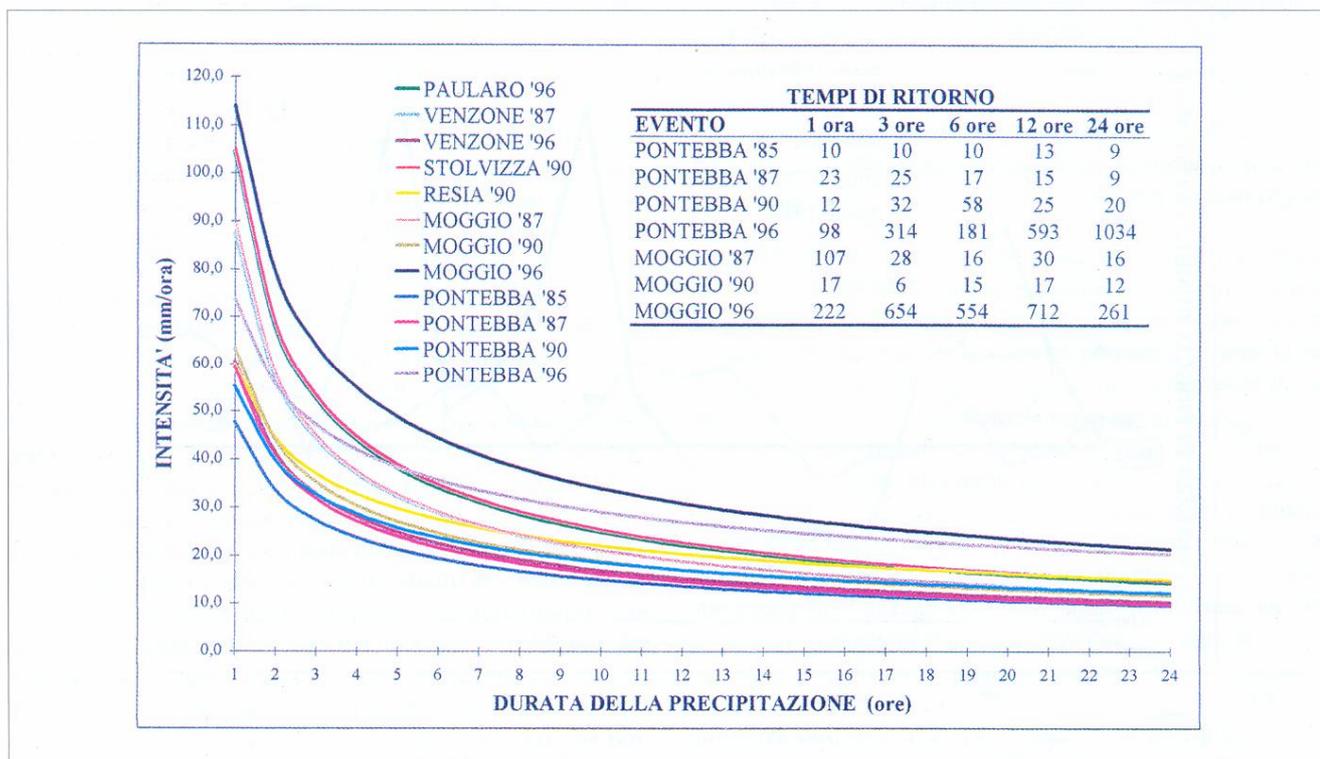


Figura 3 - Curve di precipitazione critica degli eventi di pioggia intensa responsabili dell'attivazione di colate.

dera la relazione  $\log i = 1.65 - 0.78 \cdot \log D_h$  proposta da Cancelli e Nova (1985) per areali montani delle Alpi Austriache e della Valtellina, si ottengono dei valori piuttosto simili. Facendo riferimento sempre ad una relazione tipo la (1), in termini di altezza di pioggia (mm), risulta:

$$a=44.67 \quad b=-0.78.$$

La modesta differenza denota delle condizioni critiche sostanzialmente confrontabili, che si differenziano leggermente per il fatto che le colate del bacino del F. Fella risultano attivate da precipitazioni più intense ( $a=47.742$  e  $b=-0.507$ ). Questa differenza può dipendere sia da diversi valori della permeabilità caratteristica dei terreni superficiali, sia dalle elevate precipitazioni caratteristiche del regime piovoso montano delle Alpi Friulane orientali.

Le diverse curve critiche di precipitazione si distribuiscono, con un andamento abbastanza simile, all'interno di un campo contraddistinto da condizioni di instabilità progressivamente crescenti verso l'alto (Fig. 3). Questo campo di instabilità idrogeologica è limitato inferiormente dalle precipitazioni di Pontebba del 1985 e superiormente da quelle cadute a Moggio nel 1996.

#### 4. IL NUBIFRAGIO DEL 21-22 GIUGNO 1996

Tra la notte del 21 e la mattina del 22 giugno 1996 un violento nubifragio si è abbattuto su un'ampia fascia dell'Alto Friuli colpendo con particolare intensità il bacino imbrifero del F. Fella (Fig. 4), affluente di sinistra del F. Tagliamento. Numerosi corsi d'acqua hanno dato luogo a fenomeni di trasporto solido in massa, producendo notevoli danni ai manufatti, alluvionando diversi centri abitati e interrompendo in molti punti la viabilità principale e secondaria. I Comuni all'interno di questo bacino che hanno registrato il maggior numero di disagi sono stati quelli di Moggio Udinese, di Chiusaforte, di Dogna, di Pontebba e in minor misura quelli di Venzone e Malborghetto.

Le caratteristiche quantitative e la distribuzione areale delle precipitazioni sono stati desunti sulla base dei dati pluviometrici registrati da numerose stazioni, presenti sia entro il bacino del F. Fella (Fig. 4) che in zone limitrofe (Tab. I). La distribuzione areale dell'evento è stata in particolare ricostruita analizzando le altezze di pioggia cumulata caduta nei 2 giorni critici, corrispondenti alle letture delle ore 10.00 dei giorni 22 e 23 giugno.

Le precipitazioni intense si sono protratte sostanzialmente tra le ore 18.00 del giorno 21 e le ore 15.00 del 22 (Fig. 5). L'evento critico ha interessato prevalentemente il bacino del F. Fella, dove si sono registrati anche i maggiori episodi di dissesto sui versanti e negli impluvi torrentizi. In questo settore sono stati registrati anche i maggiori picchi di precipitazione, con piogge intense molto localizzate. Valori di intensità di precipitazione straordinariamente elevati sono stati osservati a Moggio Udinese (441,4 mm nelle 24 ore) e Pontebba (466,6 mm nelle 24 ore) (Tab. I), località in cui si è verificato anche il maggior numero di dissesti idrogeologici e di danni alle infrastrutture.

L'andamento dei pluviogrammi delle diverse stazioni dimo-

stra che le precipitazioni più gravose si sono esaurite in un intervallo di tempo inferiore alle 24 ore, di norma entro le 12 ore (vedi Moggio Udinese, Pontebba e Paularo) (Fig. 5). Le condizioni di precipitazione critica si riferiscono pertanto a piogge di particolare intensità e di breve durata (1-6 ore, per lo più).

I dati delle precipitazioni orarie (Tab. I), hanno permesso di determinare l'intensità della precipitazione critica nelle ore in cui il nubifragio ha raggiunto i massimi di pioggia concentrata. Sulla base di numerose testimonianze dirette è stato individuato con una certa precisione il momento di attivazione dei flussi. In questo modo sono state riconosciute le seguenti 5 fasi critiche: 1) a Moggio, tra le ore 1.00 e le 3.00 del 22 giugno; 2) a Venzone, tra le 3.00 e le 4.00; 3) a Pontebba, la notte tra le ore 4.00 e le 5.00; 4) nuovamente a Pontebba, nella tarda mattinata tra le 10.00 e le 11.00; 5) a Paularo, tra le 10.00 e le 12.00.

I tempi di attivazione delle colate detritiche sono rappresentati in Fig. 5 da cerchi pieni: essi ricadono tutti sui tratti più pendenti delle curve di precipitazione cumulata. Le intensità orarie medie della fase critica dell'evento (tratti a maggiore pendenza) calcolate tra l'inizio della fase più intensa della precipitazione e il manifestarsi dei dissesti, sono state le seguenti: 46.0 mm/h per 2 ore (Venzone); 50.0 mm/h per 2 ore (Pontebba, nella notte); 55.0 mm/h per 2 ore (Pontebba, nella mattina seguente); 58.5 mm/h per 2 ore (Paularo); 72.6 mm/h per 3 ore (Moggio).

I dissesti hanno iniziato a manifestarsi in corrispondenza di intensità orarie critiche superiori a 45 mm/h ( $45 < I_c < 75$  mm/h) e dopo una fase di pioggia intensa inferiore alle 6 ore. Per esempio a Pontebba i movimenti franosi si sono attivati dopo 4÷5 ore dall'inizio delle precipitazioni più intense (Fig. 5).

Molti valori delle altezze di pioggia caduta per 1, 3, 6, 12, 24 ore consecutive, misurati a Moggio Udinese e Pontebba, rappresentano i valori massimi registrati sino ad oggi dalle due stazioni. Per quantificare le caratteristiche di eccezionalità dell'evento meteorico è stato determinato il tempo di ritorno  $T_r$  caratteristico delle diverse piogge orarie consecutive. Il calcolo dei tempi di ritorno è stato effettuato con il tradizionale criterio dei momenti di Gumbel, considerando diverse serie temporali: sino al 1975 (C.N.R., 1986) ( $T_{r1}$ ), sino al 1993 ( $T_{r2}$ ) e sino al 1996, nubifragio di giugno incluso ( $T_{r3}$ ) (Tab. II).

I tempi di ritorno  $T_{r3}$  calcolati sulla base della serie di dati più aggiornati sono notevolmente più bassi dei corrispondenti valori calcolati per i periodi precedenti ( $T_{r1}$  e  $T_{r2}$ ). Considerando infatti l'intero periodo di osservazioni pluviometriche disponibili si ottengono per l'evento del giugno 1996 dei tempi di ritorno che variano da 100 a 1000 anni, a seconda della durata della precipitazione (Tab. II).

#### 5. ATTIVAZIONE E PROPAGAZIONE DELLE COLATE

Il censimento effettuato subito dopo il nubifragio ha consentito di individuare ben 142 episodi di colata nel solo ba-

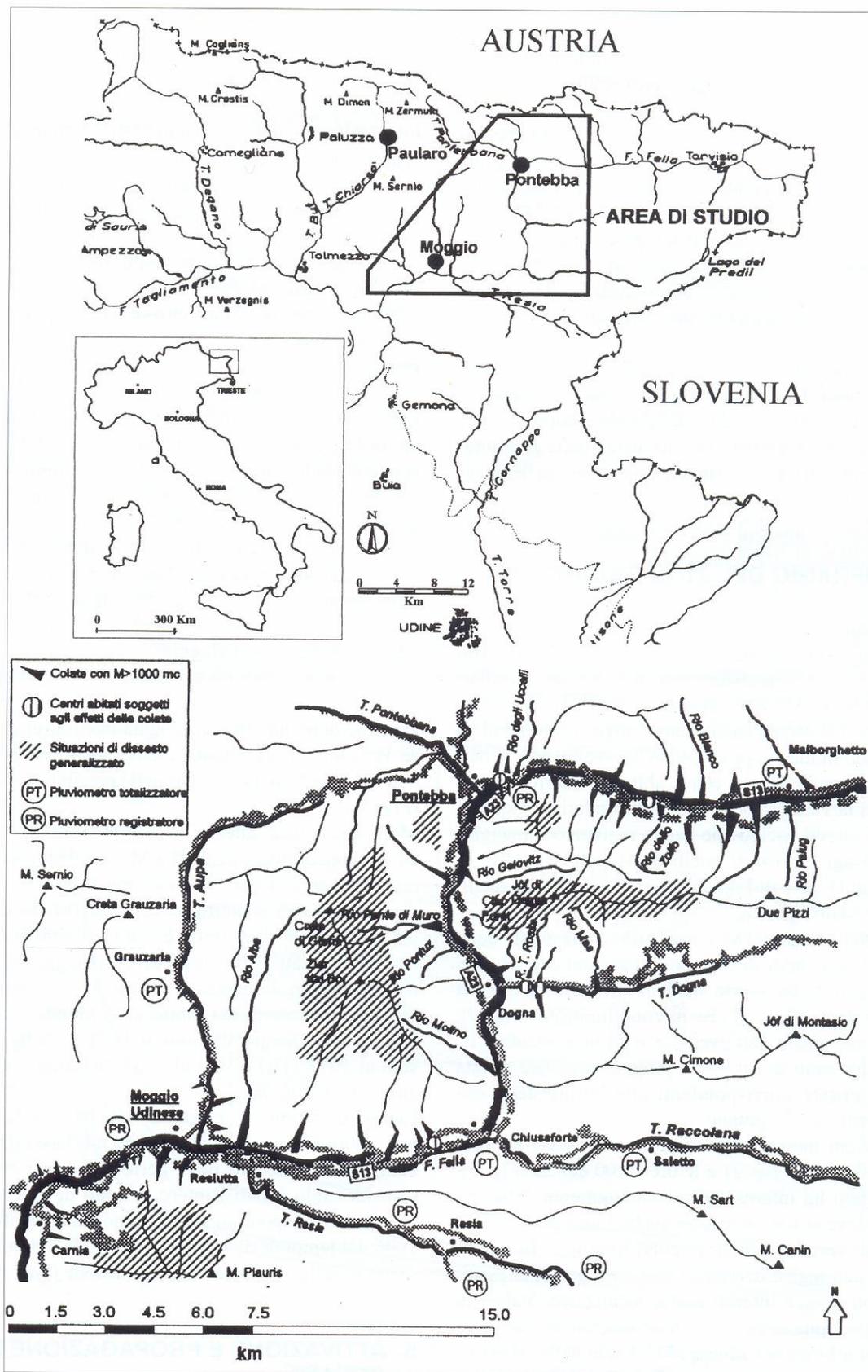


Figura 4 - Inquadramento geografico dei dissesti idrogeologici causati nel bacino del F. Fella dal nubifragio del giugno 1996.

TABELLA I - Stazioni pluviometriche e valori di pioggia caratteristici considerati nell'analisi dell'evento del 21-22 giugno 1996. PMA indica la precipitazione media annua della stazione

Stazione	Tipo	P.M.A. (mm)	Massime orarie e pioggia cumulata nei 2 giorni dell'evento (mm)					
			1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore	giorni 21, 22
Paluzza	P	1665,7	-	-	-	-	-	152,9
Avosacco	Pr	1651,6	41,0	88,0	169,0	189,0	207,2	216,4
Paularo	Pr	1599,8	90,0	175,4	244,4	269,8	295,8	316,8
Tolmezzo	Pr	1999,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Uccea	Pr	3069,8	24,8	38,4	59,2	59,2	72,6	132,0
Musi	Pr	2943,8	30,4	40,8	44,6	72,2	113,2	131,8
Gemona	Pr	1966,1	16,6	22,6	23,8	34,8	55,8	81,6
Venzone	Pr	2160,8	50,0	125,0	143,0	187,8	213,0	248,2
Resia	Pr	2354,8	33,8	72,8	113,0	171,0	228,2	272,0
Stolvizza	Pr	2397,3	19,4	39,0	51,8	71,0	112,0	157,5
Oseacco	Pr	2515,3	43,0	71,2	88,2	114,0	164,0	209,0
Moggio Udinese	Pr	1870,1	100,0	217,8	284,7	402,8	441,4	485,4
Grauzaria	P	2019,7	-	-	-	-	-	344,1
Chiusaforte	P	1982,1	-	-	-	-	-	242,0
Saletto	P	2133,7	-	-	-	-	-	225,8
Pontebba	Pr	1846,6	74,0	145,0	200,0	362,0	466,6	504,8
Malborghetto	P	1572,4	-	-	-	-	-	266,7
Camporosso	P	1455,9	-	-	-	-	-	122,0
Tarvisio	Pr	1419,4	19,0	51,0	78,4	105,4	170,2	196,0
Cave del Predil	Pr	2025,3	16,0	37,8	61,0	82,8	152,4	193,0
Fusine	P	1430,4	-	-	-	-	-	n.d.

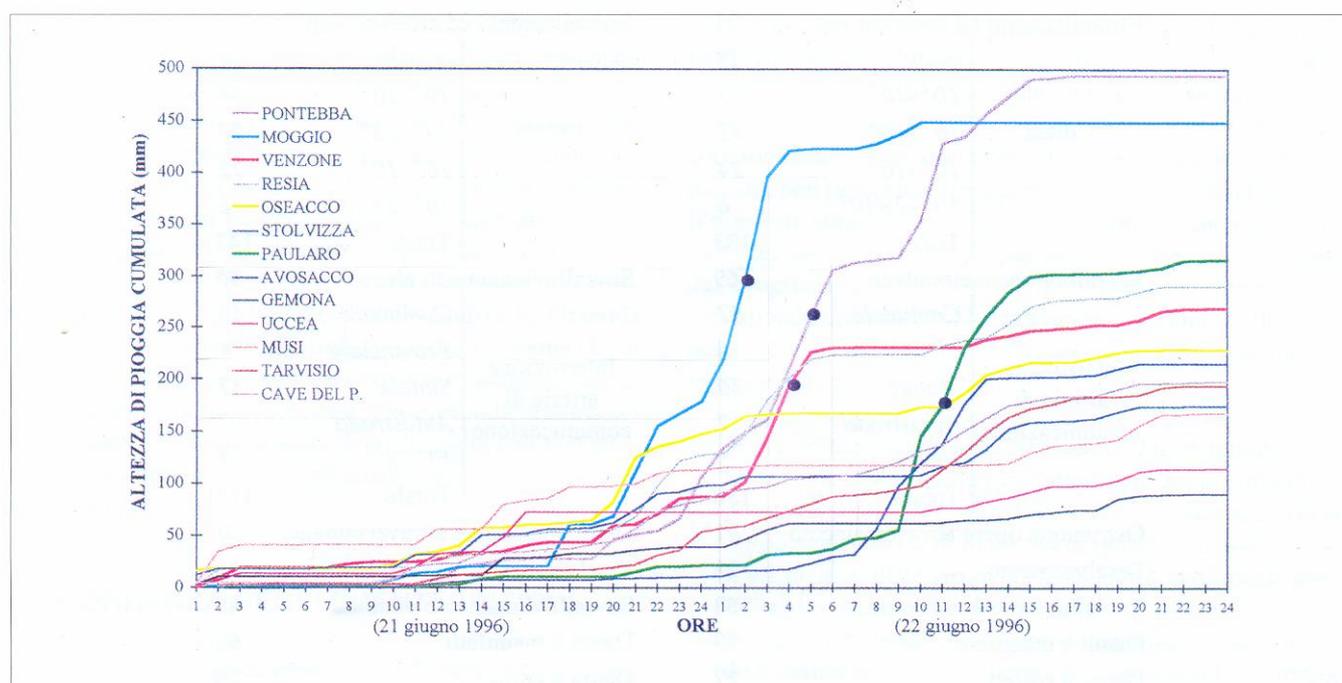


Figura 5 - Andamento delle precipitazioni cumulate registrate durante i giorni critici del 21 e 22 giugno 1996.



cino del F. Fella (Tab. III). I numerosi dati di campagna acquisiti hanno delineato una situazione di dissesto idrogeologico piuttosto articolata e differenziata, in cui ricorrono sia fenomeni di rottura dei versanti (frane s.s.) che mobilitazioni di materiali detritici sotto forma di flussi incanalati in

**TABELLA II - Nubifragio del 21-22 giugno 1996: tempi di ritorno delle piogge intense calcolati sulla base dell'analisi di diverse serie temporali.**

MOGGIO UDINESE				
Ore	mm.	1933-1975	1933-1993	1933-1996
		Tr <sub>1</sub>	Tr <sub>2</sub>	Tr <sub>3</sub>
1	100,0	9285	595	222
3	217,8	6118	5391	654
6	284,7	2966	3640	554
12	402,8	11997	6663	712
24	441,4	521	789	261

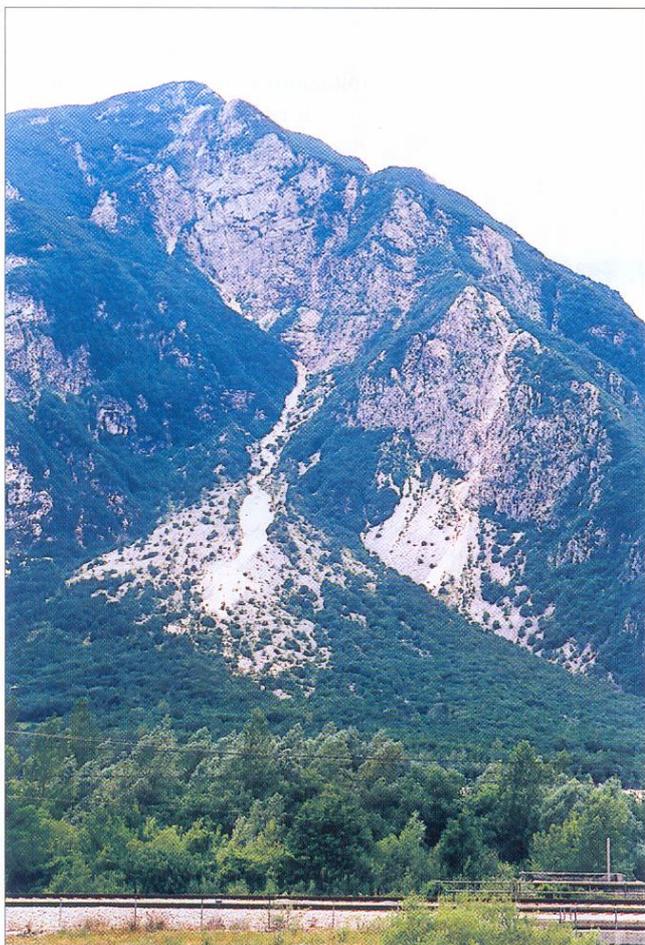
PONTEBBA				
Ore	mm.	1925-1975	1925-1993	1925-1996
		Tr <sub>1</sub>	Tr <sub>2</sub>	Tr <sub>3</sub>
1	74,0	256	166	98
3	145,0	3208	1154	314
6	192,0	932	423	181
12	362,0	14535	4535	593
24	466,6	33449	14281	1034

alveo (*channelised debris flows*) o su pendio aperto (*open slope debris flows*) (Slaymaker, 1988).

Le piogge intense del nubifragio del 21-22 giugno 1996 hanno provocato numerose situazioni di instabilità dei pendii, sia rocciosi che detritici. Sono stati riconosciuti diversi fenomeni di distacco di porzioni rocciose assimilabili a veri e propri crolli di roccia (Fig. 6), di dimensioni variabili. Risultano molto frequenti i piccoli crolli dalle parti sommitali dei versanti, ben individuabili per le piste di discesa rettilinee giallo-rossastre dovute alla mobilitazione dei volumi instabili e del materiale di alterazione superficiale ossidato. Le piogge intense hanno causato anche franamenti e fluidificazioni di materiali detritico-colluviali superficiali (*soil slips*), coinvolgendo soprattutto i pendii tenuti a prato (Pietratagliata). Questa caratteristica tipologia di dissesto ha raggiunto la sua massima diffusione nel territorio di Paularo (bacino del T. Chiarsò). In numerose situazioni le colate detritiche sono state attivate da episodi di franamento dei versanti rocciosi o da collassi degli apici dei conetti detritici (Fig. 7). Nel primo caso la caduta del materiale roccioso dall'alto, che può coinvolgere volumi assai variabili e talora oltremodo rilevanti, provoca una sollecitazione impulsiva sul materiale detritico sottostante che viene di conseguenza mobilitato. Questa condizione di innesco delle colate può essere presente sia sui versanti aperti che entro gli alvei montani (Sassa, 1984). Il fenomeno di fluidificazione per carico impulsivo risulta piuttosto diffuso, analogamente a quanto già messo in evidenza da altri Autori (Sassa, 1984; BOVIS & DAGG, 1992). Se i materiali detritici vengono mo-

**TABELLA III - Dissesti idrogeologici e danni provocati dal nubifragio di giugno 1996 nel territorio montano del Friuli**

Alto Friuli		Bacino del F. Fella	
Scorrimento superficiale	27	Scorrimento superficiale	21
Ruscigliamento ed erosione sup.	21	Ruscigliamento ed erosione sup.	18
	0-10 <sup>2</sup>		24
	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>		63
Colata	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	Colata	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>		27
	10 <sup>5</sup> -2×10 <sup>5</sup>		22
			6
	Totale		Totale
	183		142
Sovralluvionamento alveo	69	Sovralluvionamento alveo	55
	Comunale		66
	Provinciale		4
Interruzione	8	Interruzione	32
arteria di	36	arteria di	7
comunicazione	7	comunicazione	3
	Statale		3
	Autostrada		3
	FF.SS.		3
	Totale		Totale
	136		112
Ostruzione opere attraversamento	91	Ostruzione opere attraversamento	72
Disalveamento	28	Disalveamento	25
Sovralluvionamento conoide	58	Sovralluvionamento conoide	49
Danni a manufatti	79	Danni a manufatti	66
Danni a edifici	27	Danni a edifici	20



**Figura 6 -** Pendici orientali del M.te S. Simeone, di fronte a Stazione per la Carnia (Valle del Tagliamento): isolati fenomeni di colata attivati, nella zona di monte, da piccoli distacchi dalle pareti rocciose sovrastanti.

bilizzati entro modesti impluvi torrentizi di norma inattivi, si formano delle caratteristiche piccole conoidi nella zona di sbocco sul fondovalle (Fig. 8). Questi depositi grossolani sono causati dalla brusca diminuzione di pendenza e dalla improvvisa perdita d'acqua del flusso (colate ghiaioso-ciotolose). Risultano presenti anche flussi di colate canalizzate entro gli alvei, i quali assumono talora proporzioni rovinose (50.000 - 200.000 m<sup>3</sup>) come documentato dagli episodi che hanno interessato alcuni tributari del F. Fella (Rii Alba, Simon, Molino, Ponte di Muro e Gelovitz tra Moggio Udinese e Pontebba; R. degli Uccelli, R. dello Solfo e R. Granuda Grande, tra Pontebba e Malborghetto) e del T. Dogna (R. di Terra Rossa). In questi casi si assiste alla mobilitazione di gran parte del letto detritico, con una profonda aratura nel tratto montano e un consistente deposito sulla conoide alluvionale che caratterizza la confluenza con il sistema fluviale principale (Fig. 9).

## 6. RICORRENZA DEGLI EVENTI CRITICI

Per verificare l'eventuale esistenza di diversi cicli di precipitazione intensa, sono stati determinati i valori della media



**Figura 7 -** Flusso di colata innescato da una frana sul versante sinistro della valle del Fella, tra Moggio Udinese e Stazione per la Carnia (Ud). Nella zona inferiore del versante è ben riconoscibile la diramazione della colata in due flussi principali.

mobile delle massime precipitazioni annue di 24 ore, calcolati per intervalli di 9 anni consecutivi (Fig. 10). Le precipitazioni intense seguono un andamento con notevoli oscillazioni caratterizzato da due massimi molto netti: il primo in corrispondenza degli anni 1965-1966, ed il secondo, molto recente, ben individuabile a partire dagli anni '90 (Fig. 10). Il notevole abbassamento dei tempi di ritorno calcolati sulla base dei dati pluviometrici più recenti (Tab. II) è causato dal progressivo aumento delle precipitazioni intense, cui corrisponde un trend tendenzialmente crescente molto evidente nell'ultimo decennio (Fig. 11). E' importante quindi osservare che:

- le precipitazioni intense, associate a durate uguali o inferiori alle 24 ore, sembrano seguire un andamento di tipo sinusoidale, esibendo dei cicli della durata di circa 30-35 anni: i punti di massimo di questi cicli sono situati all'incirca all'inizio degli anni '30, a metà degli anni '60 e al momento attuale (Fig. 10 e 11);
- le stesse precipitazioni stanno sensibilmente aumentando e quindi le piogge critiche che provocano l'instabilità dei versanti e dei bacini montani si stanno verificando

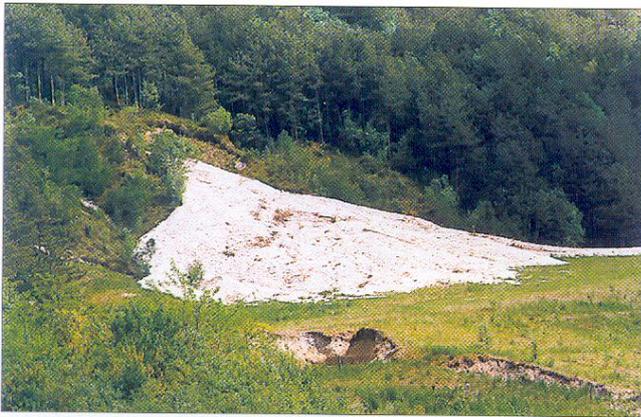


Figura 8 - Piccolo conoide (500-1000 m<sup>3</sup>) formato da una colata ghiaioso-ciottolosa allo sbocco di una modesta incisione torrentizia, di norma inattiva (Val Aupa, Moggio Udinese).



Figura 9 - Potenti depositi di colata messi in posto sulla conoide torrentizia del Rio Molino, prima della confluenza con il F. Fella tra Dogna e Chiusaforte. I detriti hanno ostruito la luce del ponte e sovralluvionato la S.S. 13 Pontebbana.

sempre più frequentemente negli ultimi dieci anni. Ne risulta che in molteplici casi i parametri idraulici di progetto (relativi alle precipitazioni e/o portate) possono riferirsi attualmente a tempi di ritorno inferiori rispetto a quelli indicati dalla normativa, se ricalcolati con dati idrologici aggiornati.

## 7. PREVISIONE E ALLERTAMENTO

Ai fini della previsione degli eventi meteorici critici è opportuno considerare delle precipitazioni di soglia che risultino leggermente inferiori rispetto a quelle critiche. Per poter predisporre un eventuale stato di allertamento è significativo quindi individuare una curva di allertamento che segnali l'insorgenza di una situazione potenzialmente critica. Ad esempio nel caso specifico del bacino del F. Fella si può fare riferimento alla curva di precipitazione critica della stazione di Pontebba, caratterizzata da un tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni. La sua equazione risulta essere:

$$i = 39.0094 \cdot D_h^{-0.51063} \quad (3)$$

Con riferimento al regime di piovosità è opportuno indicare la (3) anche in forma normalizzata. L'equazione che così si ottiene è:

$$i = 0.02112 \cdot D_h^{-0.51063} \quad (4)$$

essendo  $i$  l'intensità critica espressa come percentuale della precipitazione media annua (P.M.A.) (Fig. 12).

L'efficacia della previsione attraverso le relazioni (3) e (4), e del conseguente allertamento, è subordinata all'esistenza di una rete di pluviometri registratori disposti nell'area da difendere, integrati da un sistema di raccolta, registrazione e trasmissione, in tempo reale, delle misure effettuate ai

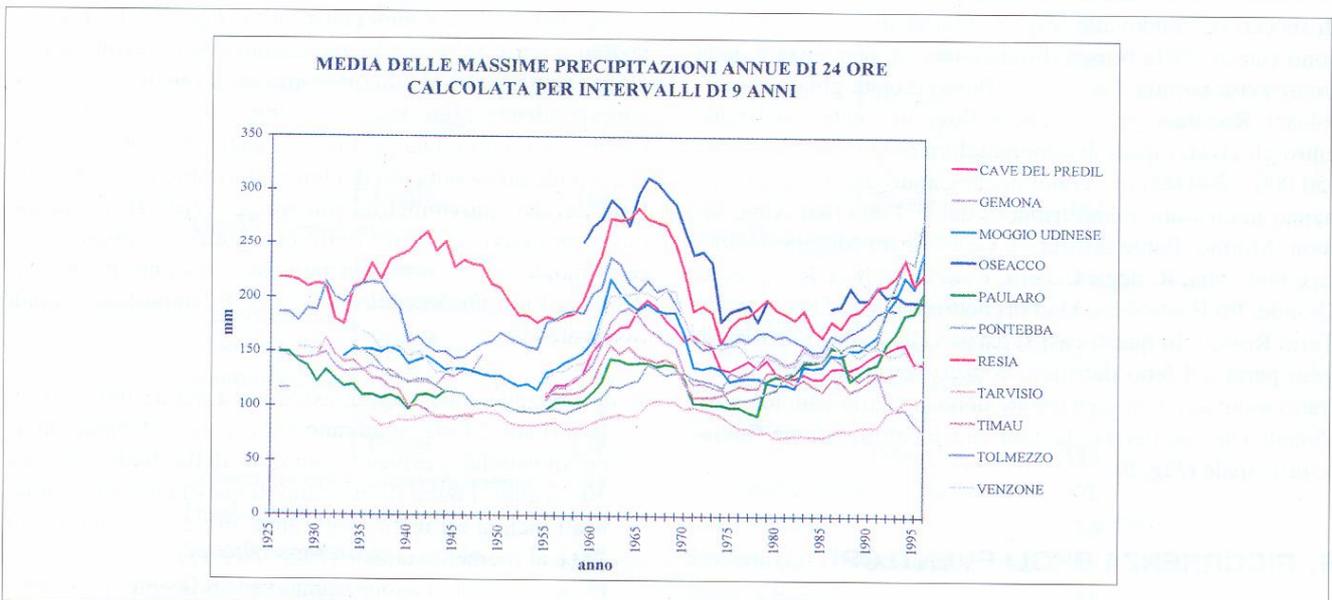
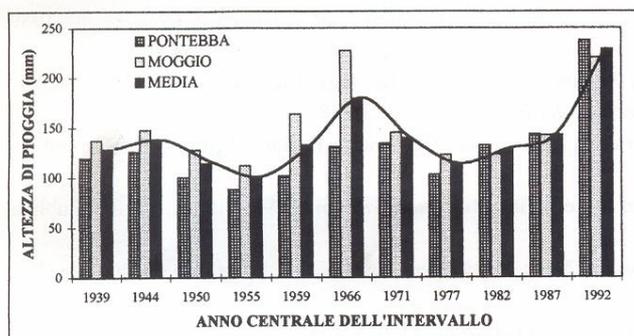
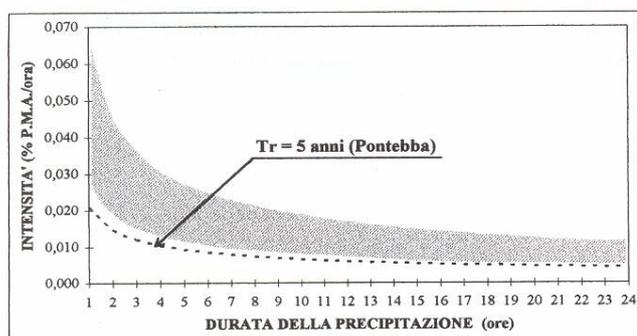


Figura 10 - Andamento della media mobile (9 anni) delle massime precipitazioni annue di 24 ore registrate nelle Alpi Friulane a partire dal 1925.



**Figura 11 - Medie delle massime precipitazioni annue di 24 ore calcolate per periodi di 5 anni consecutivi: stazioni di Moggiò Udinese e Pontealba (bacino del F. Fella).**



**Figura 12 - Curva di allertamento determinata per la stazione di Pontealba, espressa in % P.M.A. Tempo caratteristico di ritorno:  $T_r = 5$  anni. La campitura in grigio indica il campo delle precipitazioni critiche (vedi Fig. 3).**

competenti organi di Protezione Civile. Nuove stazioni pluviometriche dovrebbero venire posizionate soprattutto nei settori montani che rappresentano le zone più vulnerabili per l'attivazione delle colate. In quest'ottica l'attuale distribuzione delle stazioni pluviometriche sui fondovalle dei bacini risulta nettamente inadeguata, anche perché i nubifragi

che causano i dissesti più gravi sono caratterizzati proprio da celle di precipitazione intensa aventi limitata diffusione areale. Sistemi d'allarme funzionanti secondo i principi appena esposti sono invece attivi da più di un decennio, e con successo, in Giappone (Yano, 1984).

## 8. CONCLUSIONI

Gli studi idrologici sulle piogge intense che, con notevole ricorrenza, interessano il territorio montano del Friuli dimostrano l'esistenza di valori soglia caratteristici delle precipitazioni critiche responsabili dell'attivazione di debris flows. Questo tipo di approccio, basato sullo studio integrato dei dati pluviometrici e dei fenomeni di flusso detritico, si rivela particolarmente utile per la caratterizzazione di una soglia d'instabilità regionale che corrisponde all'insorgenza di processi critici per la stabilità dei versanti e degli alvei.

Gli esempi analizzati, particolarmente il caso critico avvenuto il 21-22 giugno 1996 nel bacino del F. Fella, dimostrano che nelle Alpi Friulane le condizioni critiche vengono raggiunte sempre più frequentemente nell'ultimo decennio. Questo fatto è imputabile al notevole incremento dell'intensità delle piogge di durata uguale o inferiore alle 24 ore. In modo particolare risultano decisamente critiche le precipitazioni di 1-6 ore (piogge brevi) con intensità di pioggia  $I_c > 45-50$  mm/h.

Piuttosto significativa risulta essere l'individuazione di un andamento ciclico, quasi sinusoidale, dei massimi delle precipitazioni brevi (30-35 anni) caratterizzato da una netta tendenza recente verso piogge più intense. Questo fatto deve essere tenuto in debita considerazione nelle future analisi: se questo peggioramento climatico risulterà confermato anche per altre aree, è lecito attendersi un progressivo aumento della vulnerabilità idrogeologica del già tanto dissestato territorio montano italiano.

## BIBLIOGRAFIA

- Arattano M., Deganutti A., Godone F., Marchi L., Tropeano D., «L'evento di piena del 23-24 settembre 1990 nel bacino del Fella (Alpi Giulie)», *Boll Associazione Mineraria Subalpina*, Anno XXVIII, n.4, dicembre 1991, 627-673.
- Bovis, M. J., Dagg, B. R., «Debris flow triggering by impulsive loading: mechanical modelling and case studies», *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 1992, 345-352.
- Campbell, R. H., «Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California», *U.S. Geological Survey, Professional Paper 851*, 1975, 51 pp.
- Cancelli A., Nova R., «Landslides in Soil Debris Cover Triggered by Rainstorms in Valtellina (Central Alps - Italy)», *Proc. IV Int. Conf. and Field Workshop on Landslides*, Tokyo, 1985, 267-272.
- Cascini L., Versace P., «Eventi pluviometrici e movimenti franosi», in *Atti del XVI Convegno Nazionale di Geotecnica*, Ass. Geotec. Italiana, Bologna, 14-16 maggio 1986, vol. III, 1986, 171-184.
- C.N.R., Regione Veneto, «Distribuzione spazio temporale delle piogge intense nel Triveneto - Elaborazioni», Progetto strategico del C.N.R. «Difesa dal rischio geologico» - Sottoprogetto «Rischio di inondazione», 1986, 99 pp.
- Garlatti G., «Le colate detritiche del 21,22 giugno 1996 nel bacino del F. Fella: condizioni di innesco, evoluzione del fenomeno, criteri di previsione e mitigazione», Università degli Studi di Udine, Facoltà di Ingegneria, tesi di laurea, A.A. 1996-97, Udine, 1997, 162 pp.
- Govi M., Mortara G., Sorzana P.F., «Eventi idrologici e frane», *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Vol. XX, Parte II, 1985, 359-375.
- Hungr O., Morgan G.C., Kellerhals R., «Quantitative analysis of debris torrents hazards for design of remedial measures», *Canadian Geotechnical Journal*, 21 (4), 1984, 663-677.



- Ikeya H., «Debris flow and its countermeasures in Japan.», *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 40, 1989, 15-33.
- Moser M., Hohensinn F., «Geotechnical Aspects of Soil Slips in Alpine Regions», *Engineering Geology*, 19, 1983, 185-211.
- Paronuzzi P., «Il rischio idro-geologico nei ricorsi storici», *Rassegna Tecnica del F.V.G.*, 6, 1993, 31-38.
- Paronuzzi P., Vanon R., «Eventi pluviometrici critici e dissesti: studio della franosità del Comune di Paularo (Friuli - Alpi Carniche)», *Boll. Geingegneria Ambientale e Mineraria*, 85, aprile 1995, 21-31.
- Sassa K., «The mechanism to initiate debris flows as undrained shear of loose sediments», *Interpraevent 1984*, Villach, Tagungspublikation, Band 2, 1984, 73-87.
- Seminara G., Tubino M., *Debris Flows: meccanica, controllo, previsione*, C.N.R., Unità operativa G.N.D.C.I., Istituto di Idraulica, Università di Genova, giugno 1993, 284 pp.
- Slaymaker O., «The distinctive attributes of debris torrents», *Hydrological Sciences Journal*, 33, 6, 12/ 1988, 567-573.
- Takahashi T., «Mechanical Characteristics of Debris Flows», *Journal of the Hydraulics Division*, vol.104, HY8, n°8, August, 1978, 1153-1169.
- Takahashi T., «Debris Flow on Prismatic Open Channel», *Journal of the Hydraulics Division*, vol.106, HY3, n°3, March 1980, 381-395.
- Takahashi T., «Debris Flows», *IAHR/AIRH monograph*, Rotterdam, A.A. Balkema, 1991, 165pp.
- Vandine D.F., «Debris Flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera», *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 1985, 44-68.
- Yano K., «Development of a warning and evacuation system against debris flows», *International Symposium*, Interpraevent 1984, Villach, 1984, 167-180.