

Frane di crollo indotte da piogge intense: la casistica del Friuli - Venezia Giulia (Italia NE)

Paolo Paronuzzi^{1*}, Daniele Gnech²

^{1*}Autore corrispondente: Dipartimento di Georisorse e Territorio, via Cotonificio 114 - 33100 Udine (Italy). Email: paronuzzi@dgt.uniud.it

²Dipartimento di Georisorse e Territorio, via Cotonificio 114 - 33100 Udine (Italy). Email: daniele.gnech@uniud.it

Rock falls triggered by heavy rainfalls: case histories from Friuli - Venezia Giulia region (NE Italy)

ABSTRACT: The characteristics of the rain fallen during the 30 days preceding the slope rupture have been analyzed for 69 rock falls that occurred in Friuli - Venezia Giulia region from 1923 to 2004. The phenomenon taken into study prevalingly regards rock collapses of limited extent (falling blocks and small rock falls) demonstrating that 10 mm of precipitation in a day may be considered critical to activate a rock fall. The frequency peak of the critical precipitations occurs two days prior to the rock fall event or during the same day of the rock slope failure depending on the specific hydro-geological situations of the mountain side. The critical daily precipitation may assume a wide range of values, from a minimum of 10-30 mm/day (rather frequent intense rainfalls) up to maximums of 150-500 mm/day (violent autumn storms), with average values ranging between 40 and 50 mm/day.

Key terms: Landslide inventory, Rockfall, Critical rainfall, Friuli-Venezia Giulia

Termini chiave: Archivio di frana, Crollo di roccia, Pioggia critica, Friuli-Venezia Giulia

Riassunto

Sono state analizzate le caratteristiche delle piogge cadute nei 30 giorni antecedenti la rottura per 69 casi di crollo avvenuti nel Friuli - Venezia Giulia durante il periodo 1923-2004. I fenomeni indagati, riguardanti prevalentemente situazioni di rottura di limitata entità (caduta massi e piccoli crolli), mostrano che una precipitazione giornaliera pari a 10 mm può essere considerata critica ai fini dell'innesco di un crollo. Il picco di frequenza delle precipitazioni critiche si verifica nei due giorni precedenti il crollo oppure si registra proprio in concomitanza del giorno del crollo, dipendendo dalla specifica situazione idrogeologica del versante. Le precipitazioni critiche giornaliere possono assumere valori molto variabili, da minimi di 10-30 mm/giorno (piogge intense abbastanza frequenti) a massimi di 150-500 mm/giorno (violenti nubifragi autunnali), con valori medi compresi tra 40 e 50 mm/giorno.

Introduzione

Come ormai ampiamente documentato, molte frane superficiali vengono attivate da piogge intense e/o prolungate che determinano significative variazioni delle pressioni neutre e tali da provocare il franamento (Johnson & Sitar, 1990). Negli ultimi 25 anni particolare attenzione è stata data alla identificazione di "valori soglia" regionali di piovosità (Caine, 1980; Cancelli & Nova, 1985; Aleotti, 2004) sia in rapporto all'evento intenso che alle piogge

antecedenti. Questi studi cercano di individuare quei valori limite di precipitazione (soglie critiche) al di sopra dei quali si può verificare il raggiungimento della condizione di rottura del versante (Crosta, 1998; Crosta & Frattini, 2001).

Nella quasi totalità dei casi tali modelli idrologici definiscono soglie empiriche riferite alle piogge critiche che innescano franamenti superficiali in materiali detritici, prevalentemente colluviali, a tipologia di colata o di scorrimento-colata (*soil slips*) (Campbell, 1974; Ellen & Fleming, 1987; Anderson & Sitar, 1995; Fuchu *et Al.*, 1999). Assai meno indagate risultano essere invece le relazioni tra piogge e crolli in roccia (Aleotti, 2004), nonostante la piovosità venga comunemente ritenuta uno dei principali fattori di innesco anche nel caso delle rotture che coinvolgono gli ammassi rocciosi alterati (Wieczorek, 1996).

I crolli di roccia sono frequentemente attivati da eventi piovosi intensi, da periodi di piogge persistenti o da cicli di gelo/disgelo con fluttuazioni della temperatura intorno allo zero termico (Sandersen *et Al.*, 1996). Secondo Mccauley *et Al.* (1985) le piogge risultano la causa più frequente (30%) dei crolli, come risulta dall'elaborazione effettuata su di un campione di 308 eventi accaduti in California. Inoltre, secondo la medesima statistica, i fattori di innesco legati, direttamente o indirettamente, all'azione dell'acqua sono individuabili nel 68% dei casi analizzati (Mccauley *et Al.*, 1985). Tutto ciò conferma la stretta relazione esistente tra il regime climatico di un certo territorio (particolarmente i

periodi più piovosi e quelli contraddistinti da cicli di gelo-digelo) e la distribuzione temporale degli episodi di crollo (Peckover, 1975; Peckover & Kerr, 1977).

Nonostante il frequente riferimento alle precipitazioni e all'azione dell'acqua come causa innescante degli eventi di crollo, gli studi sulle precipitazioni critiche nei riguardi di tale tipologia di frana sono praticamente assenti, fatta eccezione per qualche sporadico riferimento fatto recentemente e relativo al comune di Locana in Piemonte (Sesenna *et Al.*, 2002). Questo sebbene le piogge vengano sovente considerate il fattore principale nell'innescare dei crolli di roccia, unitamente al gelo/disgelo, alle caratteristiche geologico-strutturali dell'ammasso roccioso ed agli eventi sismici (Wyllie & Norrish, 1996). Allo stesso modo non sono mai stati verificati gli intervalli di tempo che possono intercorrere tra gli eventi di pioggia intensa ed il momento della rottura del versante.

Per cercare di colmare questa lacuna e per fornire una prima indicazione sull'entità delle precipitazioni che possono attivare i crolli di roccia sono state analizzate le piogge cadute nei 30 giorni antecedenti la rottura per diversi eventi dei quali era nota con precisione la data. La ricerca è stata condotta su di un campione di crolli (N=69) avvenuti nel Friuli - Venezia Giulia durante il periodo 1923-2004. Una simile indagine ha consentito anche di ricostruire la diversa ricorrenza stagionale dei processi di crollo, in relazione alle principali caratteristiche di piovosità del territorio montano del Friuli.

Approccio metodologico

La procedura impiegata per analizzare la natura e l'influenza delle precipitazioni sulla rottura delle scarpate rocciose consiste delle seguenti fasi operative:

- 1) identificazione, localizzazione topografica e caratterizzazione geo-meccanica di crolli di data nota, già catalogati in specifici inventari di frana;
- 2) individuazione delle stazioni pluviometriche più vicine al sito interessato dal crollo;
- 3) acquisizione ed elaborazione dei dati di precipitazione relativi al giorno del crollo ed ai 30 giorni precedenti, utilizzando i parametri pluviometrici disponibili (piogge giornaliere, piogge orarie, piogge 24 ore, ecc.) che variano in funzione del tipo di strumento impiegato (pluviometro, pluviografo);
- 4) elaborazione dei dati pluviometrici per la ricostruzione della piovosità nel periodo antecedente il crollo, con particolare attenzione alle piogge concentrate (massimi giornalieri e massimi orari), alle piogge medie giornaliere e alle piogge cumulate;
- 5) analisi della distribuzione temporale delle piogge e caratterizzazione di eventuali valori soglia (piogge critiche) nei riguardi di rotture superficiali degli ammassi rocciosi.

Gli archivi degli eventi di crollo

L'archivio principale (archivio DGT) conservato presso il

Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università degli Studi di Udine comprende i casi di crollo (N=28) avvenuti nella regione Friuli - Venezia Giulia durante il periodo 1981-2004 (Tab. 1).

Questo archivio include 6 episodi che hanno comportato conseguenze gravi a persone (morti e/o feriti), mentre 11 casi riguardano eventi che hanno causato danni materiali, a volte anche ingenti, alla viabilità oppure a strutture e infrastrutture. Le notizie che documentano gli eventi sono state ricavate dai quotidiani regionali e riguardano fenomeni che hanno minacciato in maniera più o meno grave l'incolumità di cose e/o persone.

Nell'archivio DGT sono contenuti i principali dati riguardanti il crollo quali la località, i dati volumetrici, le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso ed i principali danni arrecati. In tutti i casi di crollo considerati risultano noti con sicurezza il giorno e, talvolta, anche l'ora del collasso della scarpata rocciosa. I 28 crolli censiti nell'archivio DGT riguardano prevalentemente piccole rotture di scarpate rocciose, variabili da fenomeni di caduta massi (1-10 m³) a crolli che raramente superano i 200-500 m³. In genere si tratta di situazioni di rottura localizzate e superficiali (profondità: 0.3-3 m) che seguono periodi piovosi o periodi particolarmente freddi nei mesi invernali.

Allo scopo di ampliare il campione statistico, sono stati individuati ulteriori eventi di crollo, con data nota, avvenuti in Friuli e censiti nell'archivio del Progetto AVI (Aree Vulnerate Italiane: Cnr-Gndci, 1998) realizzato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche. I crolli regionali documentati dall'archivio AVI sono più numerosi (N=41) e riguardano un periodo più ampio (1923-1996).

L'archivio AVI, a struttura nazionale, contiene soprattutto i dati riguardanti gli eventi di frana principali e conseguenti a situazioni di grave dissesto idrogeologico mentre gli eventi minori, di piccole dimensioni, sono in genere poco rappresentati. Si tratta quindi in genere di crolli più rilevanti dal punto di vista volumetrico (100-5000 m³) e associati a precipitazioni molto intense che hanno talora provocato diversi crolli attribuibili allo stesso evento critico. Nelle situazioni più gravose (eventi del 1966, 1996 e 2003) le precipitazioni intense possono provocare, durante lo stesso evento, diverse tipologie di franamenti superficiali ed i fenomeni di crollo risultano associati a colate di detrito (Paronuzzi *et Al.*, 1998) e *soil slips*. Dato lo scopo del presente lavoro non sono stati considerati i numerosi crolli di innesco sismico censiti nell'archivio AVI e causati dalle scosse principali del 1976 (eventi del 6 maggio, 11 e 15 settembre 1976) (Govi & Sorzana, 1977) e del 16 settembre 1977.

Per tenere conto della diversità sostanziale dei due archivi, l'analisi degli eventi è stata effettuata anche in maniera separata, differenziando i risultati ottenuti per gli eventi catalogati nell'archivio DGT da quelli ricavati dall'inventario di frana AVI. L'intervallo temporale complessivo che include i fenomeni analizzati è di circa 80

Tab. 1 – Dati principali degli eventi crollo considerati nell’archivio DGT (N=28: 1981-2004). I dati comprendono: data, ubicazione, pioggia massima giornaliera, pioggia critica giornaliera, pioggia cumulata precedente all’evento critico, pioggia totale caduta nei 30 giorni antecedenti il crollo.

Tab. 1 – Main data of rock fall events considered in the DGT inventory (N=28: 1981-2004). Data include: rock fall date, location, maximum daily rainfall, critical daily rainfall, cumulative rainfall prior to the critical event, total rain fallen during 30 days before the rock fall.

**EVENTI DI CROLLO FVG
DGT (N°=28) 1981-2004**

Codice	Data crollo	Località	Pioggia massima (mm)	Pioggia critica (mm)	Giorno di pioggia critica	Data della pioggia critica	Cumulata precedente la pioggia critica (mm)	Pioggia totale (mm)
DGT 4	06/05/81	Str. Costiera: Sistiana (TS)	25.4	25.4	2	05/05/81	72.8	99.4
DGT 5	02/04/87	Val d'Aupa (UD)	75.2	75.2	5	29/03/87	34.8	113.4
DGT 9	05/09/89	Forni Avoltri: Cjolos (UD)	32.2	14.8	3	03/09/89	101.4	117.6
DGT 11	01/05/90	Val Cellina: vecchia diga (PN)	62.4	17.2	11	21/04/90	139.8	182.4
DGT 12	03/06/90	Val Cellina: vecchia diga (PN)	13.4	13.4	16	19/05/90	7.1	58.1
DGT 13	15/06/90	Pulfero: Rodda Alta (UD)	49.8	12.8	3	13/06/90	310.8	335.4
DGT 14	11/07/90	Ovaro: Val Degano (UD)	37.4	34.6	2	10/07/90	204.4	273.6
DGT 15	03/10/90	Montereale-Barcis (PN)	50.0	50.0	10	24/09/90	23.6	88.0
DGT 16	20/05/91	Paularo: Salino (UD)	30.6	17.2	9	12/05/91	166.6	185.0
DGT 17	09/01/94	Villa Santina - Ovaro (UD)	95.6	95.6	2	08/01/94	169.3	282.7
DGT 18	12/01/94	Str. Costiera: Sistiana (TS)	20.2	17.8	8	05/01/94	96.4	132.6
DGT 19	02/01/95	Bornass (PN)	28.8	28.8	13	21/12/94	25.6	58.6
DGT 20	24/01/95	Vito D'Asio: Loc. Chiamp (PN)	18.0	18.0	3	22/01/95	22.0	46.8
DGT 21	19/08/95	Str. Costiera: Sistiana (TS)	12.6	12.6	11	09/08/95	9.0	46.0
DGT 22	07/04/96	SS di Tanamea: Alta Val Torre (UD)	53.5	53.5	5	03/04/96	57.9	115.1
DGT 23	04/08/96	Parete Jôf Fuart, Tarvisio (UD)	35.3	26.2	1	04/08/96	98.2	124.4
DGT 24	12/08/96	Parete Jôf Fuart, Tarvisio (UD)	45.2	34.0	0	13/08/96	94.6	128.6
DGT 53	26/01/99	Barcis: galleria Glescana (PN)	99.8	99.8	14	13/01/99	4.4	111.8
DGT 57	17/09/01	Casso: M.te Pul (PN)	59.0	59.0	3	15/09/01	108.0	173.8
DGT 35	22/05/03	Maniago-Frisanco (PN)	30.8	13.2	2	21/05/03	81.6	100.0
DGT 36	27/05/03	Taipana: SP del Cornappo (UD)	36.6	25.6	1	27/05/03	106.6	132.6
DGT 37	19/06/03	Tarcento: diga di Crosis (UD)	36.6	24.0	1	19/06/03	145.0	169.0
DGT 45	01/07/03	Cavazzo Carnico (UD)	94.8	94.8	0	02/07/03	92.0	186.8
DGT 38	31/08/03	Taipana: SP del Cornappo (UD)	41.0	13.6	0	01/09/03	169.4	183.0
DGT 39	13/09/03	Val Cimoliana (PN)	30.2	14.2	4	10/09/03	134.6	154.4
DGT 44	02/11/03	Rigolato: ponte sul Degano (UD)	119.8	50.2	1	02/11/03	272.2	322.4
DGT 47	03/11/03	Ovaro: rio Miozza (UD)	163.8	46.6	2	02/11/03	300.6	347.4
DGT 60	08/02/04	Salandri di Attimis (UD)	19.6	19.6	22	18/01/04	18.2	56.2
		Medie	50.6	36.0			109.5	154.5

anni (1923-2004, N=69): 1923-1996 (N=41) per gli eventi AVI e 1981-2004 (N=28) per gli eventi DGT.

La maggior parte dei crolli catalogati nei due archivi (DGT e AVI) interessa ammassi rocciosi calcarei e calcareo-dolomitici che sono ampiamente diffusi nel territorio montano regionale, dalle Alpi Carniche all’arco prealpino e sino all’estremo SE del Carso Triestino (Fig. 1). Molti crolli interessano aree ristrette a causa della presenza di estese pareti rocciose soggette a instabilità diffusa che sovrastano le vie di comunicazione più importanti,

essenziali per la viabilità e per i collegamenti tra i centri abitati delle zone montane.

L’analisi della distribuzione temporale degli episodi catalogati (N=69) ha consentito di analizzare la frequenza percentuale dei crolli nei diversi mesi dell’anno. I crolli possono avvenire in qualunque mese ma sono presenti due evidenti massimi (Fig. 2) corrispondenti al periodo autunnale (settembre-novembre: 24 eventi pari al 35%) e alla stagione primaverile - inizio estate (aprile-giugno: 23 eventi pari al 33%) che nel Friuli sono i periodi caratterizza-

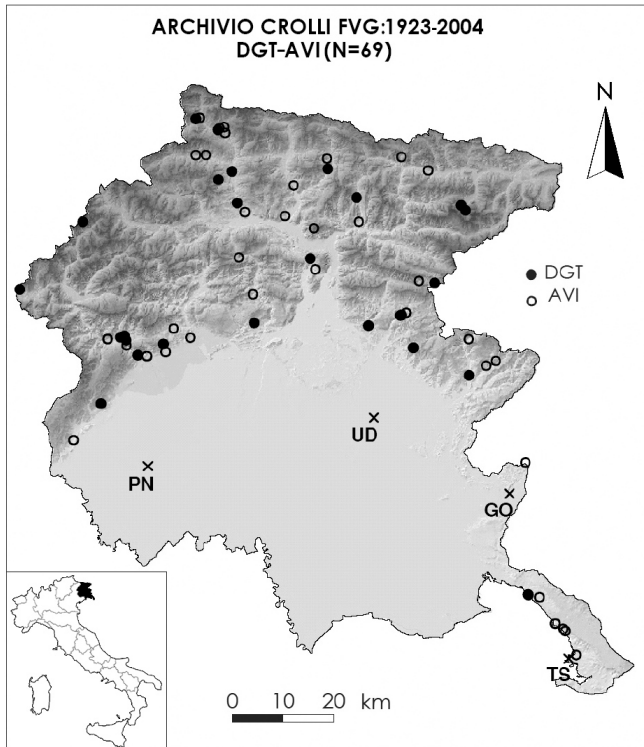


Fig.1 - Ubicazione dei crolli del Friuli – Venezia Giulia analizzati nell’articolo (1923-2004: N=69). Per i simboli: cerchio pieno = archivio DGT, cerchio vuoto = archivio AVI.
 Location of the Friuli - Venezia Giulia rock falls analysed in the paper (1923-2004: N=69). Symbols: filled circle = DGT rock fall archive, empty circle = AVI rock fall archive.

ti dalla maggiore piovosità (Polli, 1971) (Fig. 2) e dagli eventi più intensi (Paronuzzi & Vanon, 1995). I crolli riscontrati nei mesi invernali (particolarmente in gennaio) sono invece quasi sempre legati all’instabilità indotta da cicli di gelo e disgelo. I crolli invernali costituiscono comunque una frazione limitata degli eventi osservati (13%) mentre la maggior parte dei crolli risulta distribuita nei mesi che solitamente non presentano basse temperature (87%).

Le piogge antecedenti i crolli

A partire dalla data del crollo (giorno “0”) sono stati analizzati la piovosità media giornaliera ed i massimi giornalieri di pioggia, per verificare la loro distribuzione temporale nei 30 giorni precedenti il collasso.

La precipitazione media giornaliera mostra un andamento molto simile per entrambi gli archivi con un massimo di piovosità presente nei giorni immediatamente antecedenti la rottura: negli eventi DGT il massimo, di circa 15 mm/giorno, figura in corrispondenza del 3° giorno precedente il crollo, mentre negli eventi AVI tale massimo raggiunge circa 54 mm/giorno e contraddistingue il giorno immediatamente antecedente la rottura (Fig. 3). Un secondo picco di precipitazione, molto meno accentuato, risulta localizzato in corrispondenza della seconda settimana (7°-14° giorno) ma i valori di pioggia sono sensibilmente inferiori rispetto ai tre giorni che precedono il crollo (Fig. 3). Questo primo dato è molto indicativo e conferma il ruolo determinante delle piogge cadute nello stesso giorno del crollo (giorno 0) e nei giorni immediatamente antecedenti la rottura (1-3 giorni) anche se gli effetti delle piogge possono farsi sentire anche nelle 2-3 settimane successive.

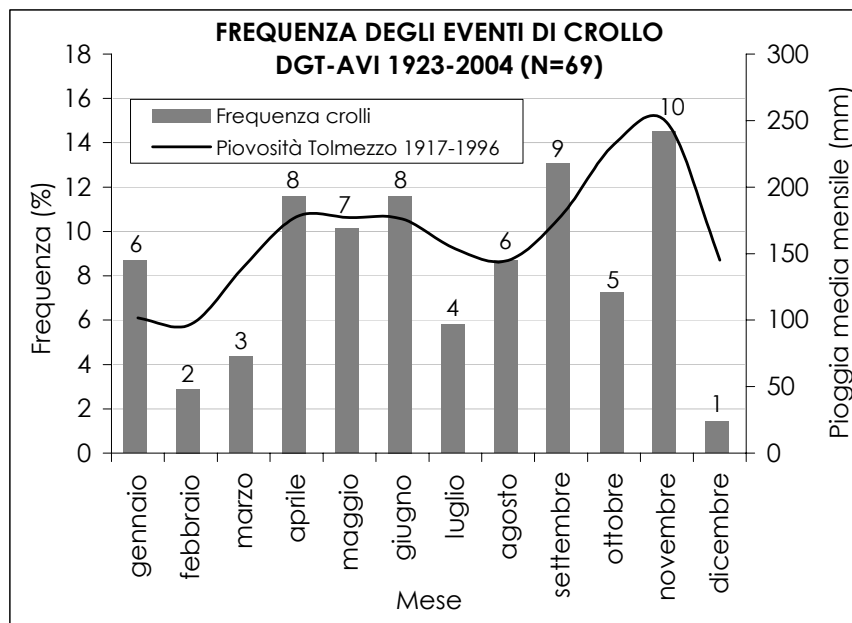


Fig.2 - Frequenza mensile degli eventi di crollo (1923-2004) e piovosità media della stazione di Tolmezzo (1955-1994).
 Monthly frequency of rock fall events (1923-2004) and average monthly rainfall measured at the Tolmezzo rain gauge (1955-1994).

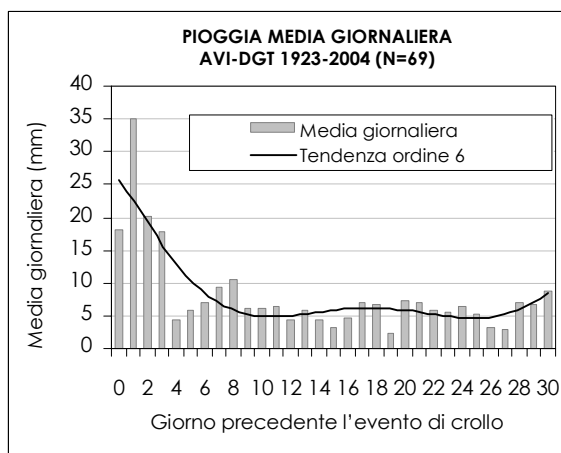
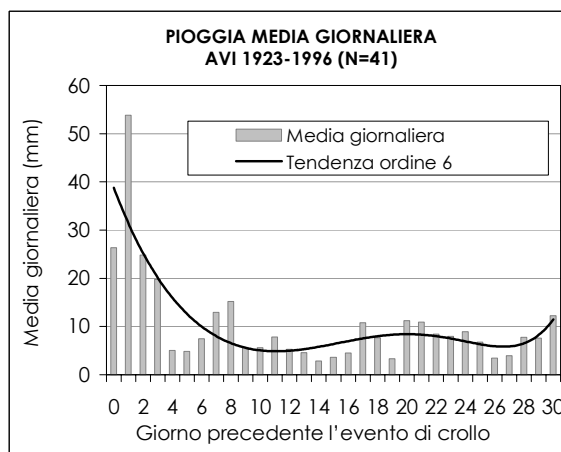
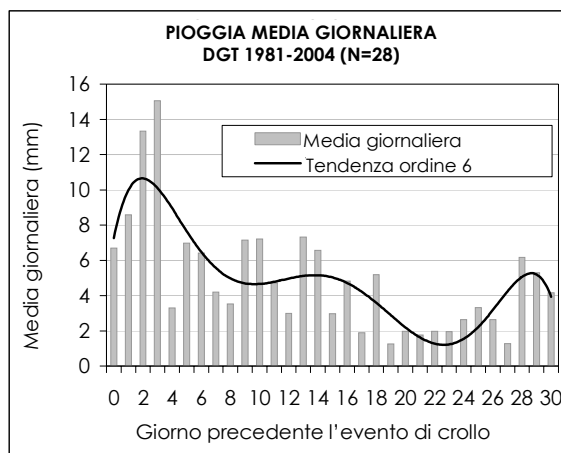


Fig.3 - Andamento della pioggia media giornaliera durante i 30 giorni precedenti il crollo.
Trend of the average daily rainfall during the 30 days prior to the rock fall.

Oltre alla piovosità media riscontrata nel periodo precedente il crollo, altrettanto significativo risulta l'andamento delle massime precipitazioni giornaliere che

consente di accertare la presenza e la distribuzione degli eventi meteorologici più gravosi in rapporto al momento della rottura del versante. I grafici ottenuti, sia per i singoli archivi che per il campione totale, mostrano una notevole concentrazione dei massimi pluviometrici giornalieri nei tre giorni che precedono il crollo (Fig. 4), analogamente a quanto indicato dalle medie giornaliere. Le maggiori frequenze dei massimi giornalieri si riscontrano il terzo giorno (DGT: 18% circa) e il giorno immediatamente antecedente il crollo (AVI: 17% circa). Considerando il campione totale di crolli (archivi DGT + AVI) oltre il 30 % dei massimi giornalieri di pioggia si è verificato nei tre giorni precedenti o nel giorno stesso del collasso (Fig. 4). Altre concentrazioni significative (4-6%) di massimi piovosi si ritrovano tra 7° e 14° giorno e alla fine della terza settimana precedente il crollo (giorni 20-21, 6%). L'andamento medio dei massimi giornalieri mostra che le piogge più rilevanti avvengono quasi sempre nella settimana che precede il crollo (Fig. 5). Questo risultato conferma il ruolo chiave delle precipitazioni verificatesi nei 7 giorni antecedenti il collasso delle porzioni rocciose.

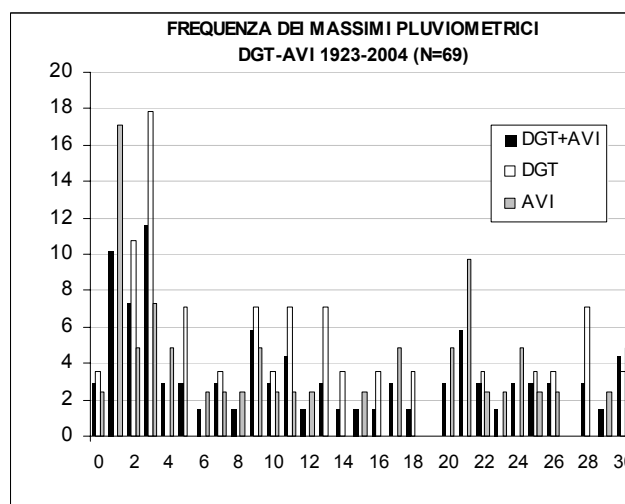


Fig.4 - Frequenza dei massimi valori di pioggia giornaliera registrati nei 30 giorni precedenti il crollo.
Frequency of maximum values of daily rainfall recorded during 30 days prior to the rock fall.

Per valutare l'influenza del regime climatico stagionale sull'entità delle precipitazioni, i massimi giornalieri sono stati differenziati come eventi primaverili (marzo-maggio), estivi (giugno-agosto), autunnali (settembre-novembre) ed invernali (dicembre-febbraio). I valori più elevati di precipitazione giornaliera (100-500 mm) si verificano quasi sempre nel periodo autunnale e risultano concentrati nella settimana precedente il crollo (Fig. 6). Un simile risultato è del tutto coerente con l'andamento stagionale dei crolli: i due picchi di frequenza riscontrati sono dovuti proprio alle piogge intense e/o prolungate che in Friuli si verificano tipicamente nel periodo autunnale o tardo primaverile (Fig. 2).

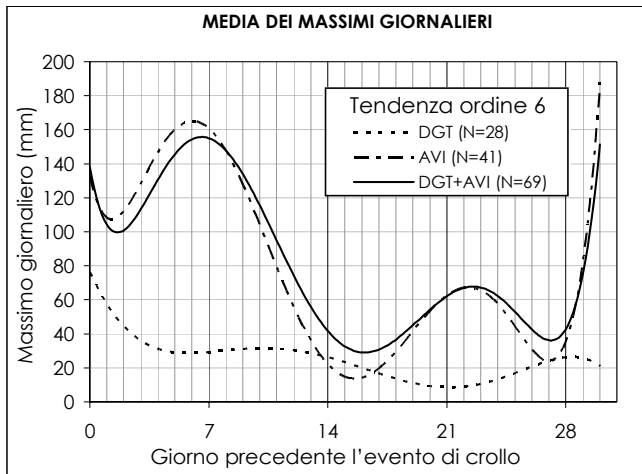


Fig.5 - Valori medi e andamento dei massimi giornalieri di pioggia misurati nei 30 giorni prima del crollo.
Average values and trend of maximum values of daily rainfall measured during 30 days prior to the rock fall.

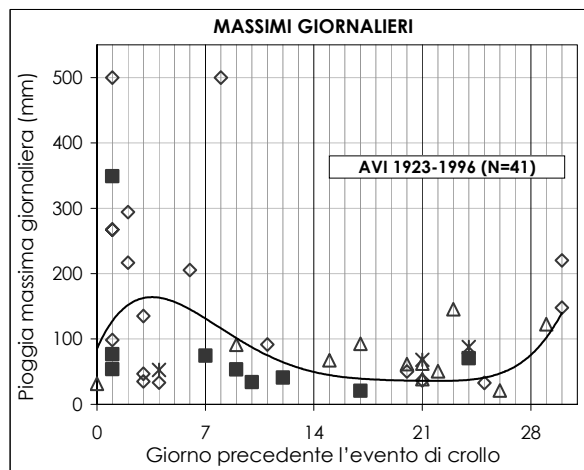
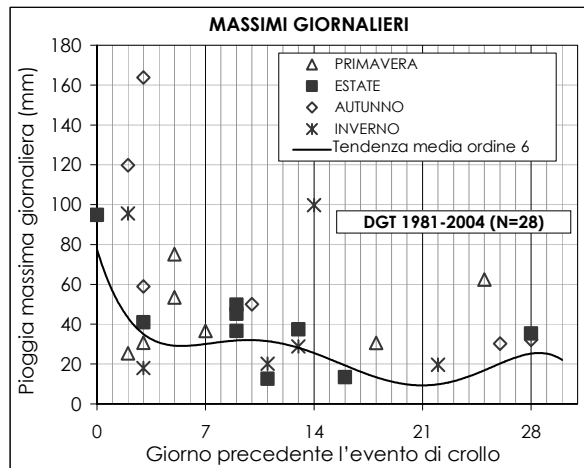


Fig.6 - Entità e caratteristiche stagionali dei massimi giornalieri di pioggia registrati nei 30 giorni antecedenti il crollo.
Entity and seasonal characteristics of maximum values of daily rainfall recorded during 30 days prior to the rock fall.

Gli eventi più rilevanti (100-500 mm/giorno), tra i quali spicca il massimo di 500 mm registrato a Barcis (PN) il 2 settembre 1965, precedono sempre di pochi giorni (1-3 in genere e al massimo 8) la rottura del versante (Fig. 6). I valori più bassi (10-30 mm/giorno) riguardano gli eventi estivi o invernali e sono caratteristici dei periodi meno piovosi dell'anno. La maggior parte degli eventi estivi risulta concentrata soprattutto nelle due settimane che precedono il crollo (giorni 0-14). Bisogna inoltre considerare che nel caso dei crolli invernali l'effetto delle precipitazioni può assumere un ruolo secondario rispetto ai fenomeni di gelo e disgelo, tipici dei mesi più freddi e con maggiore escursione termica (gennaio-febbraio).

Valori soglia e piogge critiche

L'analisi dei massimi giornalieri (Fig. 6) evidenzia situazioni di rottura dei versanti rocciosi che sono state precedute da piogge moderate con valori di poco superiori a 10-15 mm/giorno. Valori simili si osservano anche se si fa riferimento alla piovosità media giornaliera, particolarmente nel caso degli eventi censiti nell'archivio DGT i cui picchi si aggirano intorno ai 13-15 mm/giorno (Fig. 3). Questi dati mostrano che anche le piogge non particolarmente intense o prolungate possono essere causa di rotture localizzate delle scarpate rocciose. Quindi per molti crolli è possibile riconoscere una soglia minima di precipitazione critica valutabile attorno ai 10 mm giornalieri, valore che trova buona corrispondenza con il valore minimo di precipitazione (10 mm all'incirca) segnalato per alcuni crolli che hanno interessato il comune di Locana in Piemonte (Sesenna *et Al.*, 2002). Naturalmente eventi più gravosi di precipitazione (P=100-500 mm/giorno), corrispondenti ai violenti nubifragi autunnali o estivi, possono causare più fenomeni di crollo o innescare franamenti di maggiori dimensioni.

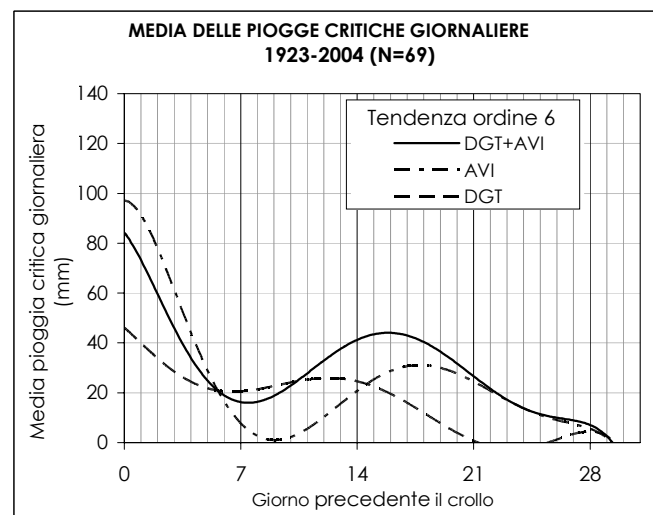


Fig.7 - Andamento medio delle piogge critiche giornaliera (P≥10 mm).
Average trend of critical daily rainfall (P≥10 mm).

Una simile osservazione suggerisce di analizzare la serie storica delle precipitazioni antecedenti il franamento, individuando in particolare gli eventi di pioggia giornaliera con valori superiori a 10 mm, i quali possono essere ritenuti "critici" ai fini dell'innesco dei crolli. Le precipitazioni critiche ($P \geq 10$ mm/giorno) sono state confrontate con i massimi giornalieri registrati nei 30 giorni precedenti e in molti casi questi due tipi di evento coincidono (Tab. 1).

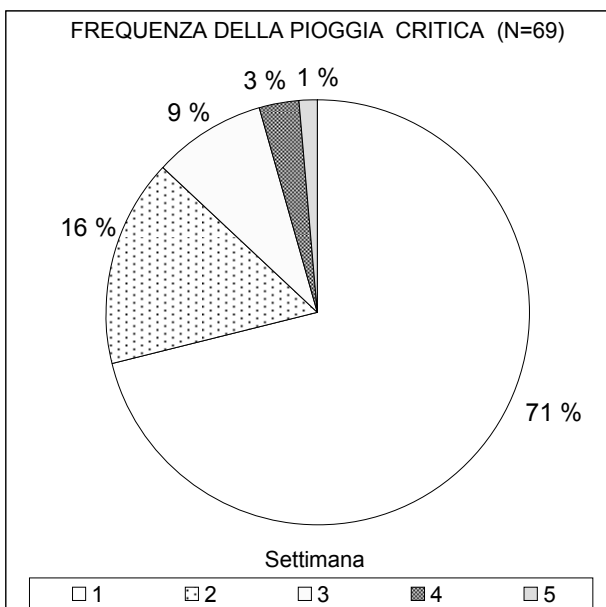
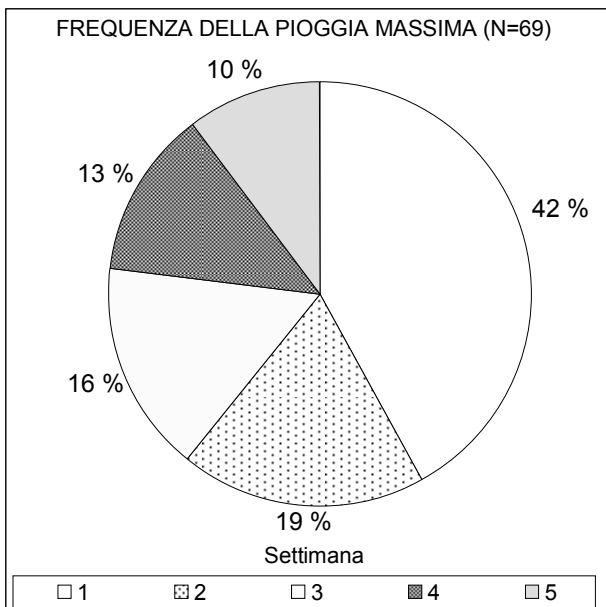


Fig.8 - Diagrammi a torta che illustrano la frequenza relative dei massimi giornalieri (sopra) e delle piogge critiche (sotto) nelle cinque settimane che precedono il crollo.
Pie charts illustrating the relative frequency of maximum daily rainfall (above) and critical rainfall (below) over five weeks preceding the rock fall.

Analogamente ai massimi giornalieri, la curva di tendenza delle precipitazioni critiche mostra un massimo principale nei 3 giorni che precedono gli eventi di crollo e un massimo secondario tra la seconda e la terza settimana (Fig. 7).

Il riferimento alle piogge critiche è importante perchè permette di individuare eventi pluviometrici anche modesti che sono avvenuti nei giorni precedenti il crollo e che possono essere stati determinanti nel processo di rottura del pendio. Adottando tale criterio, la frequenza dei fenomeni meteorici avvenuti diverso tempo prima del crollo (quarta e quinta settimana) e ritenuti responsabili della rottura, risulta decisamente ridimensionata passando da valori del 23% a valori molto modesti (4%). Analogamente la frequenza delle precipitazioni critiche nei 7 giorni precedenti il crollo raggiunge il 71% rispetto al 42% dei massimi giornalieri (Fig. 8).

La distribuzione di frequenza delle piogge critiche indica una netta prevalenza nei primi 3-4 giorni (Fig. 9), analogamente ai massimi giornalieri ma con un sensibile incremento di frequenza (oltre il 62% nei primi 4 giorni) rispetto ai precedenti. In particolare nello stesso giorno del crollo sono documentati molti episodi di pioggia critica, con un massimo del 23% calcolato sull'intero archivio, mentre per il giorno precedente la frequenza si attesta attorno al 19% (Fig. 9).

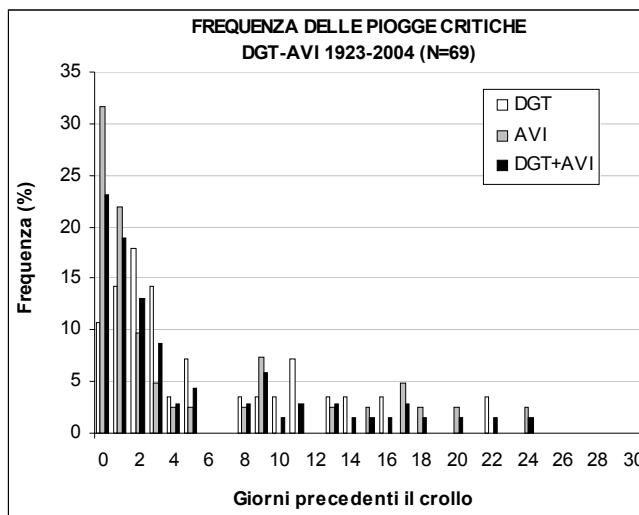


Fig.9 - Frequenza delle piogge critiche giornaliere ($P \geq 10$ mm) nei 30 giorni antecedenti il crollo.
Frequency of the daily critical rainfall ($P \geq 10$ mm) during 30 days prior to the rock fall.

Le precipitazioni critiche di entità superiore ai 60 mm sono rappresentate soprattutto dagli eventi autunnali o da qualche nubifragio estivo mentre gli eventi più moderati sono tipicamente quelli primaverili ed estivi. Il valore medio delle piogge critiche riferite agli eventi accertati nella prima settimana è di circa 45 mm (44.5 mm) (Fig. 10), a conferma che le piogge di moderata entità (10-100 mm)

rappresentano la principale causa di attivazione dei crolli. Le precipitazioni critiche avvenute durante il periodo estivo risultano al di sotto della media, con valori compresi prevalentemente tra 10 e 40 mm e con piogge cumulate cadute nelle tre settimane precedenti variabili da 100 a 200 mm. Negli episodi autunnali si riscontrano invece precipitazioni critiche superiori alla media, con valori spesso distribuiti nell'intervallo 45-100 mm. In questo caso anche l'entità delle piogge cumulate precedenti è generalmente più elevata (180-380 mm) (Fig. 10).

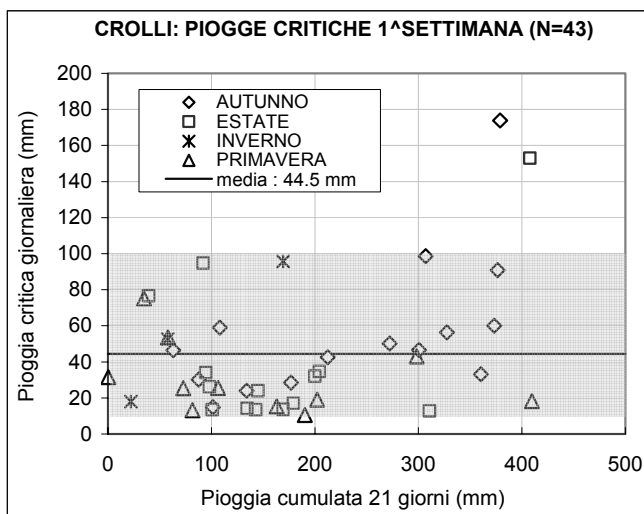


Fig.10 - Pioggia critica e precipitazioni cumulate cadute nei 21 giorni precedenti il crollo. Dati riferiti agli eventi critici accertati nella prima settimana (N=43).

Critical rainfall and cumulative precipitations fallen in the 21 days preceding the rock fall. Data refers to the critical events identified in the first week (N=43).

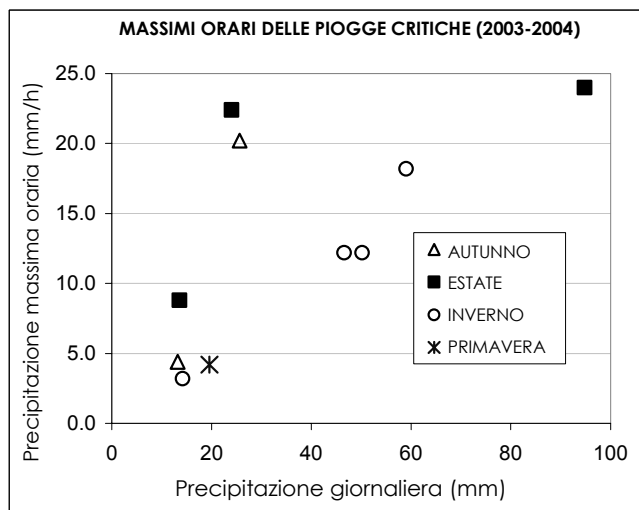


Fig.11 - Massima pioggia oraria e pioggia giornaliera registrate prima di 10 episodi di crollo avvenuti nel periodo 2003-2004. *Maximum hourly rainfall and daily rainfall recorded before 10 rock fall episodes which took place in 2003-2004.*

Per alcuni eventi recenti dell'archivio DGT (anni 2001-2004: N=9), quando i dati erano disponibili, è stato analizzato l'andamento delle piogge orarie che hanno preceduto il crollo. In nessuno dei casi analizzati, anche se il campione non può avere un significato statistico a causa della ridotta dimensione, l'intensità oraria massima supera i 25 mm/ora e in due casi le precipitazioni hanno avuto una durata massima di un'ora raggiungendo intensità di 20-25 mm/ora (Fig. 11). Simili valori di intensità oraria possono essere efficacemente confrontati con le massime intensità di pioggia, variabili tra 5 e 30 mm/ora all'incirca, segnalate per quattro casi di crollo avvenuti in Piemonte tra 1951 e 1994 (Sesenna *et Al.*, 2002).

Per alcuni eventi di crollo di cui era nota l'ora del collasso e per i quali si disponeva di una registrazione pluviometrica oraria, è stata analizzata anche la pioggia cumulata caduta nel periodo di tempo compreso tra l'inizio dell'evento critico e il momento della rottura del versante. Le piogge cumulate così calcolate, fino al momento del crollo, risultano essere in genere di entità modesta (50-60 mm) ma possono raggiungere anche i 400-425 mm, con intensità orarie essenzialmente comprese tra 10 e 25 mm/h (Fig. 12).

Precipitazioni e flusso nei giunti

I risultati ottenuti indicano che molti crolli, soprattutto quelli di dimensioni contenute ed i fenomeni di caduta massi, possono essere innescati anche da eventi piovosi di scarsa entità (10-60 mm/giorno), corrispondenti a piogge di limitata durata e di moderata intensità (5-25 mm/ora), qualora questi interessino parti di ammassi rocciosi che si trovano già in condizioni limite di stabilità.

I bassi valori di precipitazione che possono innescare i crolli trovano spiegazione nel ridotto volume di acqua necessario, in genere, per saturare il sistema di giunti che delimita il volume roccioso instabile. Infatti i giunti più critici nei riguardi della circolazione dell'acqua all'interno dell'ammasso roccioso sono rappresentati quasi sempre dalle discontinuità aperte (giunti beanti), talvolta con parziale riempimento, che presentano aperture sull'ordine di 1-3 mm per lo più. Molto più rari risultano essere i giunti con aperture ragguardevoli (1-10 cm) e, in questo caso, tendono ad essere occupati da materiali di riempimento.

Nel caso di crolli superficiali, come quelli analizzati, il volume d'acqua necessario per permettere la saturazione del sistema di giunti è modesto (da 10-20 a 200-400 litri, per lo più), dipendendo fondamentalmente da: superficie complessiva dei giunti alimentati dall'acqua di infiltrazione, apertura dei giunti, presenza di riempimenti o cementazioni e grado di saturazione preesistente dei riempimenti.

L'intervallo di tempo che intercorre tra la precipitazione critica e il momento della rottura è invece influenzato dalle condizioni di alimentazione del sistema e dalle caratteristiche dei sistemi di giunti presenti nello spessore più superficiale dell'ammasso roccioso.

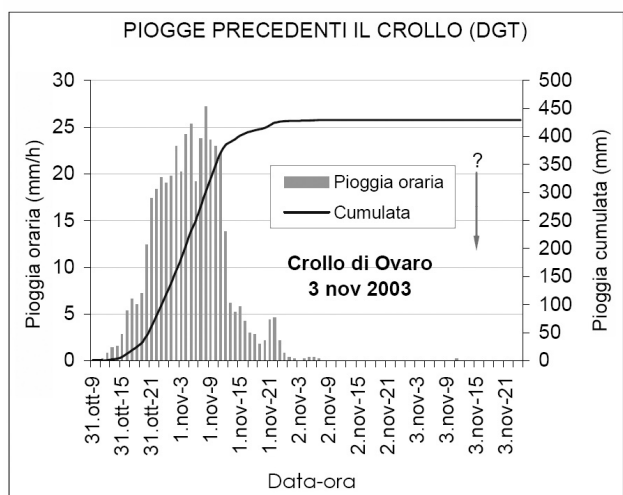
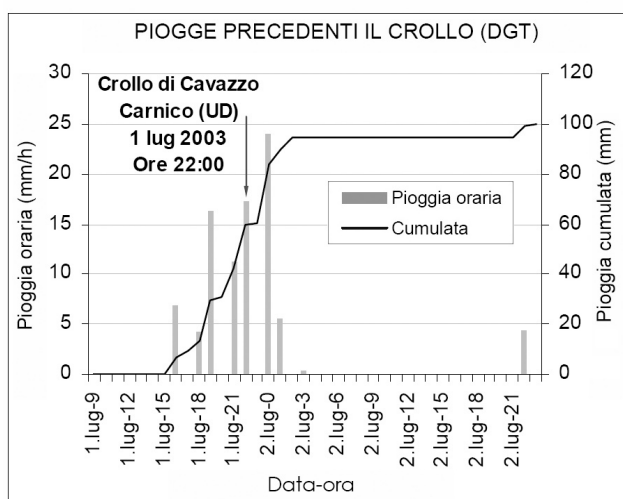
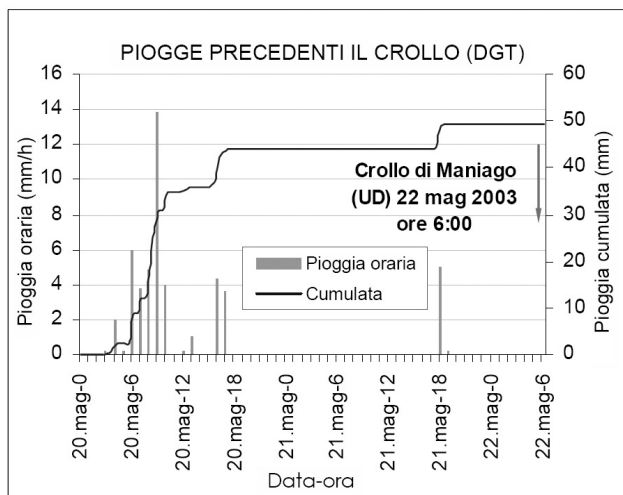


Fig.12 - Piogge orarie e piogge cumulate che mostrano le caratteristiche principali dell'evento meteorologico critico per tre casi di crollo per i quali era nota l'ora del collasso (freccia).
Hourly rainfall and cumulative rainfall showing the main characteristics of the critical meteorological event for three rock fall cases for which the collapse time (arrow) was known.

Se l'acqua si infiltra a partire da piccoli ripiani presenti sulla scarpata e se i giunti superficiali sono aperti, ben sviluppati e con buona connessione idraulica, allora l'alimentazione del sistema è rapida e la rottura avviene a poche ore di distanza se non addirittura durante l'evento critico. Al contrario se il volume roccioso instabile dista maggiormente dalla zona di alimentazione (piccolo terrazzo o cengia detritica) oppure se i giunti risultano più chiusi o con una più articolata connessione idraulica, il riempimento dei giunti da parte dell'acqua avviene con maggiore lentezza, richiedendo alcuni giorni (1-3) se non addirittura alcune settimane.

In entrambi i casi, indipendentemente dal tempo necessario per l'alimentazione idraulica del sistema, esiste un chiaro rapporto di causa-effetto tra le precipitazioni antecedenti e la condizione di rottura manifestata dal crollo. Naturalmente la grande varietà di situazioni presenti sulle scarpate rocciose reali condiziona fortemente l'evoluzione temporale del processo di infiltrazione ed il tempo necessario per il manifestarsi delle sovra-pressioni che sono responsabili della rottura finale.

Conclusioni

Per verificare le relazioni intercorrenti tra crolli e precipitazioni è stato analizzato un campione di 69 eventi di franamento avvenuti nella regione Friuli - Venezia Giulia durante il periodo 1923-2004 e censiti in due distinti archivi di frana (DGT e AVI). L'andamento delle piogge nel periodo antecedente la rottura mostra un evidente legame tra le precipitazioni cadute nei giorni immediatamente precedenti (1-3) e l'innescò dei crolli. L'indagine evidenzia anche che le precipitazioni giornaliere superiori ai 10 mm possono essere considerate critiche per la stabilità di volumi di roccia di dimensioni contenute (10-500 m³) che si trovano spesso già in una condizione prossima alla rottura. In questo caso il collasso è provocato dalla pressione esercitata dall'acqua di infiltrazione meteorica all'interno dei giunti, che raggiunge un'entità tale da determinare la rottura dei ponti di roccia ancora presenti tra blocco instabile e ammasso roccioso circostante.

Gli eventi di pioggia critica ($P \geq 10$ mm/giorno) presentano una frequenza piuttosto elevata soprattutto nei 5 giorni precedenti la rottura del versante e corrispondono spesso ad episodi con piogge cumulate non particolarmente rilevanti (10-100 mm) e con moderata intensità oraria (5-25 mm/h). Nel settore montano del Friuli eventi piovosi con simili caratteristiche corrispondono a massimi annuali, sia per quanto riguarda gli eventi giornalieri ($P = 50$ mm/giorno: $T_r = 1$ anno) che le intensità orarie ($P = 10$ mm/ora: $T_r = 1$ anno) e questo spiega la notevole frequenza nel territorio regionale delle frane di crollo innescate dalle precipitazioni. A conferma di ciò, nel Friuli - Venezia Giulia durante il triennio 2003-2005 sono stati documentati ben 8 eventi di crollo ogni anno, con una periodicità annua davvero notevole per costanza e frequenza, che hanno causato danni

alle infrastrutture, interruzioni della viabilità e/o ferimento di persone.

Rispetto alle altre tipologie di franamento (colate, scivolamenti, *soil slips*, ecc.) le frane di crollo risultano innescate da precipitazioni più modeste (minore pioggia cumulata, minore intensità) e pertanto non sembrano applicabili le curve di precipitazione critica ricavate per altre rotture superficiali. Con riferimento alla relazione esponenziale proposta recentemente da Aleotti (2004), la curva di precipitazione critica (intensità oraria I - durata D) riferita ai crolli del Friuli sembra meglio espressa da una relazione del tipo $I = 10D^{-0.50}$ essendo I (mm/ora) l'intensità oraria media e D la durata dell'evento di precipitazione in ore.

Il valore medio delle piogge critiche giornaliere riferite agli eventi accertati nella prima settimana è di circa 45 mm/giorno (44.5 mm), a conferma che le piogge di moderata entità (10-100 mm) rappresentano la principale causa di attivazione dei crolli. Le piogge critiche che

avvengono nel periodo autunnale (settembre-novembre) presentano i valori più elevati rispetto a quelle estive o invernali e questo riflette l'andamento del regime climatico stagionale, particolarmente dei periodi maggiormente piovosi dell'anno che sono anche quelli contraddistinti dagli episodi più intensi.

Nel caso di crolli superficiali, come quelli analizzati, il volume d'acqua necessario per permettere la saturazione del sistema di giunti è modesto (da 10-20 a 200-400 litri, per lo più), dipendendo fondamentalmente da: superficie complessiva dei giunti alimentati dall'acqua di infiltrazione, apertura dei giunti, presenza di riempimenti o cementazioni e grado di saturazione preesistente dei riempimenti. L'intervallo di tempo che intercorre tra la precipitazione critica e il momento della rottura varia invece a seconda delle condizioni di alimentazione del sistema e delle caratteristiche dei sistemi di giunti presenti nello spessore più superficiale dell'ammasso roccioso.

Bibliografia

- Aleotti P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73, 247-265.
- Anderson S.A., Sitar N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 121(7), 544-552.
- Caine N. (1980). The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flow. *Geogr. Ann.* 62 (1-2), 23-27.
- Campbell R.H. (1974). Debris flows originating from soil slips during rainstorms in southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 7, 339-349.
- Cancelli A., Nova R. (1985). Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (central Alps, Italy). In: Sassa K., ed., *Proceedings 4th Int. Conference and Field Workshop on Landslides*, Tokio, Japan, the Japanese Landslide Soc., 267-272.
- Cnr-Gndci / Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (1998). Progetto AVI (Aree Vulnerate Italiane), Catalogo delle informazioni sulle località italiane colpite da frane e da inondazioni. CNR-GNDICI. Pubbl. n. 1799, (1998) Vol. I, pp. 404 e Vol. II, pp. 380.
- Crosta G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology* 35(2-3), 131-145.
- Crosta G., Frattini P. (2001). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flows. *Proc. of EGS 2nd Plinius Conference 2000, Mediterranean Storms*, Siena, 463-488.
- Ellen S.D., Fleming R.W. (1987). Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. *Reviews In Engineering Geology*, vol. VII-debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation, J.E. Costa and G.F. Wieczorek, eds., Geological Society of America, Boulder, Colorado 7, 31-40.
- Fuchu D., Lee C.F. & Sijing W. (1999). Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology* 51, 279-290.
- Govi M., Sorzana P.F. (1977). Effetti geologici del terremoto: frane. In Martinis B. "Studio geologico dell'area maggiormente colpita dal terremoto friulano del 1976". *Rivista Italiana di Paleontologia* 83 (2), 329-367.
- Johnson K.A., Sitar N. (1990). Hydrologic conditions leading to debris flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal* 27 (6), 789-801.
- Mccauley M.L., Works B.W. & Naramore S.A. (1985). Rockfall Mitigation. Report FHWA/CA/TL-85/12. FHWA, U.S. Department of Transportation, California, pp. 147.
- Paronuzzi P., Cocolo A. & Garlatti G. (1998). Eventi meteorici critici e debris flows nei bacini montani del Friuli. *L'Acqua*, Ass. Idrotecnica Italiana, Roma 6/98, 39-50.
- Paronuzzi P., Vanon R. (1995). Eventi pluviometrici critici e dissesti: studio della franosità del Comune di Paularo (Friuli - Alpi Carniche). *GEAM - Geingegneria Ambientale e Mineraria*, aprile 1995 n.1, Ass. Georisorse e Ambiente, Torino 85, 21-31.
- Peckover F.L. (1975). Treatment of rock falls on railway lines. *Bulletin* 653. American Railway Engineering Association, Washington D.C., 471-503.
- Peckover F.L. & Kerr J.W.G. (1977). Treatment and maintenance of rock falls on transportation routes. *Canadian Geotechnical Journal* 14(4), 487-507.
- Polli S. (1971). Il clima della regione. In "Enciclopedia Monografica del Friuli - Venezia Giulia", Vol. 1, 443-488.
- Sandersen F., Bakkeoi S., Hestnes E. & Lied K. (1996). The influence of meteorological factors on initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rock mass stability. *Proc. of the VII International Symposium on Landslides*, Trondheim, vol. 1, Balkema, Rotterdam, 97-114.
- Sesenna R., Bottino G. & Rosso M. (2002). Analisi e modellazione dei fenomeni franosi nel territorio comunale di Locana (Valle Orco). *GEAM - Geingegneria Ambientale e Mineraria*, Dicembre 2002 n. 4, Ass. Georisorse e Ambiente, Torino 107, 43-56.
- Wieczorek G.F. (1996). Landslide Triggering Mechanisms. In *Special Report 247: Landslides Investigation and Mitigation*, (A.K. Turner and R.L. Schuster Eds). TRB Transp. Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 76-90.
- Wyllie D.C. & Norrish N.I. (1996). Stabilization of Rock Slopes. In *Special Report 247: Landslides Investigation and Mitigation*, (A.K. Turner and R.L. Schuster Eds). TRB Transp. Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 474-504.