



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

Controllo idro-meteorologico sull'innescò di colate detritiche e frane in Trentino

Relatore:

Prof. Marco Borga

Correlatore:

Dott. Francesco Marra

Laureando: Davide Parisi

Matricola n. 1005941

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Indice

Riassunto	3
Abstract.....	5
1. Introduzione.....	7
1.1 Le colate detritiche.....	8
1.2 Le frane	13
1.3 Il rischio idrogeologico e metodi di gestione del rischio.....	16
1.4 Significato delle soglie pluviometriche	17
2. Le soglie pluviometriche per l'innescò di colate detritiche e frane.....	19
2.1 Studi pregressi.....	19
2.2 Metodologie di stima delle relazioni Intensità-Durata	27
3. Il caso di studio.....	31
3.1 Area di studio: Provincia Autonoma di Trento.....	31
3.2 Analisi degli eventi di collasso in archivio.....	34
3.3 Distribuzione spaziale degli eventi	40
3.4 Distribuzione stagionale degli eventi.....	41
3.5 Analisi del controllo topografico	42
4. Soglie pluviometriche.....	43
4.1 Analisi del database pluviometrico.....	43
4.2 Correlazione fra precipitazioni ed eventi di frana e colata detritica	45
4.3 Curve di soglia pluviometrica proposte	51
5. Conclusioni.....	53
Bibliografia.....	55
Sitografia	59

Riassunto

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la definizione di curve di soglia pluviometrica per l'innesco di frane e colate detritiche per il territorio della Provincia Autonoma di Trento.

L'identificazione delle soglie si avvale dello sviluppo di un archivio di cospicua numerosità relativo a fenomeni di dissesto ottenuto sulla base di diversi archivi elementari provenienti da diversi Dipartimenti e Servizi della Provincia stessa. L'arco temporale esaminato va dal 1990 al 2010.

Si sono filtrati tra gli eventi precipitativi innescanti ciascun evento di dissesto, solamente quelli caratterizzati da sufficiente informazione pluviometrica, determinando, per ognuno di essi, durata (D) ed intensità media di precipitazione (I).

Per le curve di soglia pluviometrica per l'innesco di frane e colate detritiche sono state utilizzate relazioni di potenza del tipo $I = \alpha \cdot D^{-\beta}$. Si sono ottenuti i parametri α e β di tale relazione sia per l'intera Provincia sia per le 4 zone amministrative in cui la Provincia è suddivisa.

I dati empirici sono stati rappresentati in un grafico log-log e la distribuzione delle condizioni pluviometriche $\log(I)$ vs. $\log(D)$ che hanno portato a dissesti è stata interpolata con una regressione lineare ai minimi quadrati del tipo: $\log(I) = A + B \cdot \log(D)$

I parametri ottenuti risultano in ottimo accordo con gli studi pregressi (Guzzetti *et al.* (2008)), con l'eccezione della Zona 1: il numero ridotto di eventi disponibili ha influito negativamente sulla stima.

Abstract

Aim of this thesis is the identification of rainfall threshold lines for the triggering of landslides and debris flows in Provincia Autonoma di Trento region, in the eastern Italian Alps.

The Identification of such thresholds relies on the development of an archive, characterized by a conspicuous abundance of data about the instability phenomena, obtained from several elementary archives given by different Departments and Services of Provincia Autonoma di Trento. The examined period goes from 1990 to 2010.

Every precipitation event triggering debris flows or landslides has been examined in order to exclude all the events with insufficient rainfall information and to determine the rainfall duration (D) and the average rain rate (I).

Following the most recent works about this particular problem we chose power law threshold lines: $I = \alpha \cdot D^{-\beta}$ obtaining α and β parameters for i) the whole Province and ii) the 4 administrative zones the Province is divided into.

Empirical data are plotted in log-log scale, in this way the distribution of the pluviometric condition $\log(I)$ vs. $\log(D)$ that led to landslide can be approximated with a simple linear regression (least square method): $\log(I) = A + B \cdot \log(D)$.

The obtained parameters show a very good agreement with the previous studies (Guzzetti *et al.* (2008)), with only one exception: Zone 1 where the very low number of available events may affect negatively the accuracy of the estimate.

1. Introduzione

Il controllo idrologico sull'accadimento di colate detritiche e frane concerne soprattutto i processi di formazione di correnti superficiali nei corsi d'acqua oppure di instaurazione di elevate pressioni neutrali nei suoli dei versanti esposti a possibile instabilizzazione. Da un punto di vista idrologico, questi processi sono oggetto di ricerca da lungo periodo, soprattutto in bacini sperimentali in zona montana. Il quadro fenomenologico è quindi, almeno per alcune condizioni morfoclimatiche, relativamente ben compreso da un punto di vista concettuale.



Figura 1.1: Val Molinara, frazione Campolongo (TN) – 14-15 agosto 2010.

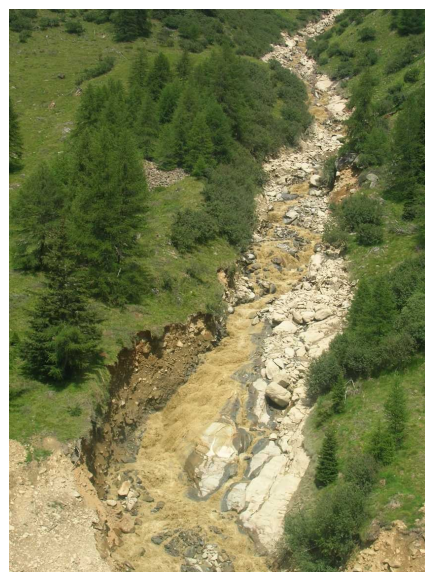


Figura 1.2: Il 27 luglio 2006 si è verificata una colata detritica innescata da un forte temporale nella parte alta del bacino del Rio Val Vegaia (TN)

La possibilità di predire con accuratezza sia i deflussi che le pressioni del suolo nelle condizioni tipiche di innesco delle colate detritiche è tuttavia ben lungi dall'essere conseguita, sia per mancanza di una consolidata rappresentazione analitica dei processi (equazioni del moto), che per la mancanza di informazioni locali relative alle proprietà idrauliche dei messi porosi (parametri).

Il quadro è reso ancora più incerto da due circostanze essenziali:

- i) il controllo idrologico è solo uno dei diversi processi che influenzano l'innescamento di colate detritiche;
- ii) i fenomeni di interesse sono contraddistinti da una cronica mancanza di dati, sia per quanto riguarda i volumi e le intensità dell'apporto meteorico, sia per quanto attiene agli stati idrici nei corsi d'acqua ed ai fenomeni di collasso dei versanti.

1.1 Le colate detritiche

Le colate detritiche sono fenomeni parossistici a metà fra i movimenti gravitativi e le piene torrentizie con ingente trasporto solido: possono essere definiti come rapidi movimenti di massa di solidi granulari saturati di acqua, non plastici, che si propagano in alvei ben incisi, caratterizzati da forti pendenze. La miscela è costituita da una certa frazione di acqua e da una parte solida formata da sabbia, ghiaia, ciottoli, sino ad arrivare a massi di grandi dimensioni, con la presenza di materiale organico (tronchi, ceppi, arbusti), immersi in una matrice fine composta da argilla e limo.

Le colate detritiche rappresentano una minaccia continua per gli ambienti montani italiani che, a causa della forte antropizzazione, subiscono numerose perdite sia in termini di vite umane che di danni economici (lesioni o distruzioni di infrastrutture private e produttive, di vie di comunicazione, ecc.). I costi diretti, inoltre, possono essere molto sostenuti anche nel caso di eventi di media intensità.

Alcune colate detritiche accadute recentemente in Trentino:

- Frana nel comune di Daone (14/04/2008): alle ore 8 del mattino si è verificato un crollo roccioso dalle pareti (formazione delle Arenarie di Val Gardena - Permiano superiore) che sovrastano la strada provinciale, nel Comune di Daone in località Gagioi. Il crollo ha interessato una massa



Figura 1.3: Frana nel Comune di Daone

rocciosa fratturata delle dimensioni di circa 600 - 700 metri cubi che si è disgregata producendo una rilevante quantità di materiale detritico lungo il canale di scorrimento della frana (Vedi Figura 1.3).

- Frana nel Comune di Spiazzo (20/07/2003): alle ore 20.15 in seguito ad un violento temporale abbattutosi sulla zona della Val Rendena, nel Comune di Spiazzo in località

Mortaso si è verificato il distacco di una colata detritica che ha interessato alcune abitazioni (vedi Figura 1.4).



Figura 1.4: Frana nel Comune di Spiazzo

- Colata detritica in Val Vegaia (05/08/2003): circa 30 mila metri cubi di materiale roccioso si sono riversati in località Fontanino travolgendo due fienili disabitati. Si è trattato di una colata detritica che è stata innescata dall'intensa pioggia che si è riversata in pochi minuti sulla zona e che ha aggravato un equilibrio già compromesso dalle portate eccezionali dovute alle alte temperature registrate nel corso degli ultimi giorni che hanno causato un rapido scioglimento dei ghiacciai presenti in quota.
- Colata detritica in Val Molinara (14.15/08/2010): il susseguirsi di violenti temporali ha imbibito tutti i terreni provocando abbondanti e anomale venute d'acqua. Il materiale detritico è stato valutato in 40.000 m³ complessivi e si è depositato sul conoide in impulsi successivi (vedi Figura 1.1).

Le colate detritiche presentano le seguenti caratteristiche:

- a) s'innescano solitamente in zone isolate ed impervie;
- b) si manifestano durante o poco dopo violenti scrosci temporaleschi;
- c) sono fenomeni episodici ed inaspettati;
- d) avvengono rapidamente, innescandosi ed esaurendosi, solitamente, in un arco di tempo che va da una decina di minuti ad un'ora.

La capacità distruttiva delle colate detritiche è sovente sottovalutata in quanto essi si originano lungo torrenti di modeste dimensioni che drenano aree di non molti chilometri quadrati, caratterizzati da portate ordinarie il più delle volte pari a qualche decina di litri/sec

per la maggior parte dell'anno. Le condizioni-chiave che si debbono presentare contemporaneamente affinché si manifesti il fenomeno sono essenzialmente:

- piogge di elevata intensità, in grado di saturare gran parte dei materiali sciolti presenti entro l'incisione torrentizia;
- adeguata pendenza del fondo;
- presenza di materiale detritico mobilizzabile.



Figura 1.5: Colata detritica in Val di Rabbi il 29 giugno 2008. Il materiale, trasportato dal Rio Salech dalla cima della montagna a valle, ha invaso la strada comunale che da Pracorno porta alla località Pozze, sfiorando una casa.

Un ruolo preminente è assunto dalla quantità di materiale solido mobilizzato dal torrente in piena. Si tratta di un “trasporto in massa” (Govi *et al.*, 1985) durante il quale vengono presi in carico i materiali alluvionali e detritici di ogni granulometria presenti in alveo, talvolta fino al completo svuotamento dell'asta torrentizia.

Soprattutto nei bacini caratterizzati da estesi e diffusi movimenti gravitativi si possono rilevare imponenti accumuli di materiale a disposizione per i processi torrentizi. Essi, infatti, rappresentano una cospicua fonte di alimentazione di sedimento, soprattutto se ubicati in prossimità dell'asta torrentizia. Non va dimenticato che il materiale solido in movimento può provocare il temporaneo sbarramento del corso d'acqua e la conseguente formazione di un invaso: il collasso dello sbarramento per erosione o tracimazione può generare colate detritiche di grandi proporzioni.

Più raramente, vi è la possibilità che si manifestino colate fangoso-detritiche torrentizie, come diretta conseguenza di improvvisi svuotamenti di invasi lacustri proglaciali, epiglaciali o endoglaciali (Chiarle *et al.*, 2006).

La miscela solido-liquida si muove come un fluido viscoso (Varnes, 1978): essa è composta per buona parte da acqua ed aria, mentre la parte solida può essere composta da materiale fine (argilla, limo, sabbia) che costituisce la matrice, sino a giungere a massi litoidi di grandi dimensioni, fino ad alcune centinaia di metri cubi.

Le velocità di traslazione della miscela sono comprese generalmente tra 1 e 26 m/s (Sassa, 1987). La miscela solido-liquida, iniziato il movimento, scende rapidamente verso valle, in ciò facilitata dal rotolio dei materiali di fondo (Dragogna, 1975) e dalla diminuzione degli attriti interni, poiché in condizioni dinamiche l'angolo d'attrito risulta inferiore a quello misurabile in condizioni statiche (Govi, 1979).

La colata si muove lungo l'impluvio con una densità variabile da 1,4 ton/m³ (Okuda *et al.*, 1977) sino a 2,5 ton/m³ (Curry, 1966) e trascina spesso verso valle tronchi d'albero sradicati che ne aumentano il volume complessivo, raggiungendo in alveo altezze considerevoli, soprattutto nel settore frontale. In tale settore le massime altezze raggiungibili sono rilevanti, fino a 4-5 volte maggiori rispetto a quelle prevedibili in base alle procedure di calcolo per le massime piene caratterizzate da soli deflussi liquidi.

Le colate detritiche sono in grado di trasportare massi di grandi dimensioni: Takahashi (1981) ricorda che in Giappone un masso di circa 3.000 tonnellate venne trasportato da una colata detritica per diversi chilometri.

I tempi di sviluppo, a partire dall'inizio della precipitazione, possono dipendere dall'intensità di quest'ultima. Con piogge brevi ed intense le probabilità di accadimento delle colate detritiche aumentano considerevolmente: in tal caso la risposta del bacino può essere molto rapida. Superata una certa soglia pluviometrica, differente da zona a zona in funzione del clima (circa il 10-15% della precipitazione media annua della zona) e delle condizioni geomorfologiche, i processi d'instabilità sui versanti seguono una sequenza d'innescio abbastanza precisa che vede originarsi rapidamente proprio frane di saturazione e fluidificazione sui ripidi versanti e colate detritiche nei bacini di piccole dimensioni (Luino, 2005).

Le colate detritiche possiedono un enorme forza d'impatto, in grado di abbattere nel giro di qualche minuto strutture e/o infrastrutture localizzate lungo la linea di deflusso (Jakob, 2005). Okuda *et al.* (1977) misurarono forze sino a 60 kN su un'area di appena 15 cm². Allargandosi sul conoide, la colata solitamente perde molto della sua forza d'impatto che è funzione proporzionale del prodotto della velocità per la massa.

Le colate detritiche non si manifestano e non si esauriscono in un'unica ondata: solitamente sono caratterizzate da una serie di pulsazioni che avanzano con un fronte piuttosto ripido, a causa della maggiore concentrazione di clasti grossolani, ed uno spessore maggiore rispetto alla rimanente parte retrostante della colata.

Queste pulsazioni possono talora costituirsi anche grazie alla momentanea ostruzione del canale da parte di frane per erosione al piede del versante, frane superficiali, persino blocchi di grandi dimensioni, e alla successiva rottura dello sbarramento. Il fronte più denso delle colate detritiche è seguito da una fase più liquida e turbolenta, detta "coda", caratterizzata da un'alta concentrazione di sedimento in sospensione e pochi massi lapidei.



Figura 1.6: Colata detritica nel Comune di Panchià (TN) La frana, ascrivibile al tipo colata detritica, si è verificata verso le ore 19,30 del 02/09/2005 a seguito di precipitazioni temporalesche estremamente intense e violente.

Numerosi sono gli studi sulle caratteristiche geomorfologiche dei fenomeni di colate detritiche e correnti iper-concentrate in Italia, soprattutto riferiti ad eventi eccezionali avvenuti in ambiente Alpino (es: Mortara *et al.*, 1986; Marchi *et al.*, 1990). La descrizione delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche delle aree generatrici delle colate, delle proprietà reologiche dei depositi, dei danni generati dalle colate stesse, nonché delle dimensioni e morfometrie dei bacini e conoidi interessati dai fenomeni e delle informazioni di eventi passati, contribuiscono all'accrescimento delle conoscenze sulla natura e la distribuzione dei

fenomeni di colata nei territori montani italiani (Govi, 1979; Govi et al., 1992). In particolare, dalla collezione ed analisi di dati storici riguardanti 159 eventi di colata detritica, Govi (1979) ha desunto le seguenti considerazioni:

- il 66 % delle colate detritiche hanno luogo tra Luglio e Settembre;
- tali fenomeni si manifestano in bacini caratterizzati da regimi pluviometrici continentali, con abbondanti precipitazioni estive, tipiche dell'area Alpina più interna.

Dall'analisi dei più severi eventi di colata degli ultimi 50 anni, Govi et al., 1984 hanno concluso che:

- l'85% dei bacini in cui si sono verificate le colate hanno dimensioni comprese tra 0.5 e 13 Km²;
- il 55% dei canali interessati dal passaggio di colate hanno pendenze comprese tra 11 ed 22°, con il 37% dei canali con pendenza pari a 35°;
- l'alimentazione di detriti solidi è fornita nel 45% dei casi da frane di versante nelle testate dei bacini e, nel 43% dei casi, da rotture di opere trasversali in alveo o mobilitazione di depositi sedimentari in alveo;
- nel 42% dei casi le colate detritiche si manifestano nello stesso sito con ricorrenza uguale o superiore a 50 anni, mentre solo nel 6% dei casi il fenomeno si ripresenta con ricorrenza compresa tra 5 e 15 anni. In generale comunque ciò che appare più interessante, soprattutto nell'ottica della pianificazione territoriale e della gestione del rischio, è che tali eventi hanno una ricorrenza approssimativamente cinquantennale, e che quindi il rischio potrebbe non essere fortemente percepito da una comunità potenzialmente soggetta allo stesso.

1.2 Le frane

Sono fenomeni d'instabilità che si originano sia nel periodo estivo per precipitazioni di breve durata ed elevata intensità, anche nei periodi primaverile/autunnale a seguito di precipitazioni prolungate. Questi movimenti gravitativi assumono un interesse particolare per la diffusione areale e la loro imprevedibilità.

Si tratta in genere di frane di piccole dimensioni e di modesto spessore (fra 30 cm e 1-2 m), che si generano in numero anche molto elevato, corrispondentemente a zone prative o comunque prive di un'efficiente copertura forestale con pendenze solitamente comprese fra 16° e 45°. I tempi di sviluppo, a partire dall'inizio della pioggia, sono molto brevi ed unico

indizio per riconoscere potenziali instabilità di questo tipo è fornito talora dalla presenza di tracce di franamenti analoghi avvenuti in passato nella medesima area.



Figura 1.7: Il giorno 27/11/2003 alle ore 20.30 circa si è verificata una frana in seguito a persistenti precipitazioni, in località Mollaro nel Comune di Taio (TN) che ha coinvolto la linea ferroviaria Trento-Malè.

Il materiale altamente fluidificato, assimilabile ad una miscela solido-liquida, si muove verso il fondovalle con velocità notevoli, direttamente condizionate dalla pendenza del versante, dalla quantità d'acqua accumulata e dalla scabrezza della superficie sulla quale scivola la massa. L'esame di strutture e infrastrutture investite da tale massa evidenzia la notevolissima forza d'urto. I muri perimetrali degli edifici possono essere sfondati e in alcuni casi le abitazioni essere rase al suolo, in quanto la velocità di propagazione della miscela può raggiungere valori di diversi m/s (Govi *et al.*, 1985).

La pericolosità di tali fenomeni è determinata dalla rapidità di sviluppo, dal non poterne prevedere il preciso punto d'innesco, e dall'elevata densità di distribuzione delle singole frane le cui traiettorie di discesa sul pendio hanno perciò una notevole probabilità d'intercettare aree urbanizzate.

Le frane risultano molto diffuse in tutto il mondo, in quanto segnalate in differenti contesti geomorfologici, caratterizzati da climi anche molto diversi (mediterraneo, tropicale, continentale). L'elemento predisponente fondamentale è la presenza di una coltre di copertura

eluvio-colluviale poggiante su un substrato roccioso, indipendentemente dalle caratteristiche di quest'ultimo (Campbell, 1975; Govi & Sorzana, 1980).



Figura 1.8: Frana superficiale nel Comune di Sporminore (TN)

Fattori morfologici predisponenti risultano essere la presenza di una netta differenziazione dei valori di permeabilità e resistenza fra la coltre superficiale e il substrato così come la presenza di concavità longitudinali e/o trasversali del versante, rotture del pendio ed avvallamenti.

Un altro fattore importante è costituito dal regime delle pressioni neutre nelle fasi antecedenti quella parossistica, le cui caratteristiche a loro volta risultano strettamente connesse con quelle pluviometriche.

La granulometria può variare da limo argilloso a ghiaia con sabbia, più raramente ciottoli con ghiaia. La frazione fine, quando presente, è caratterizzata da un indice di plasticità che, secondo Morgenstern & Dematos (1975) non supera il 34%.

Nel territorio alpino il campo di variazione relativo alla precipitazione cumulata media annua varia tra 700 e 2250 mm: ciò pone in evidenza la marcata variabilità delle condizioni idrauliche iniziali in grado di determinare l'innescio di frane. Molto variabili si dimostrano, a livello mondiale, i caratteri tipici degli eventi pluviometrici innescanti: nei casi esaminati la

pioggia cumulata dell'evento ha avuto un minimo di 45 mm (Johnson & Sitar, 1990) sino ad un massimo di 416 mm (Brand, 1984).

Anche l'intensità media della precipitazione presenta un campo di variazione compreso fra 2 e 80 mm/h, con durate dell'evento da mezz'ora a 120 ore.

1.3 Il rischio idrogeologico e metodi di gestione del rischio

Ogni anno in diverse parti della nostra penisola, ed in particolare nel settore alpino, si manifestano eventi meteorologici, differenti per durata ed intensità, in grado d'innescare processi naturali quali frane superficiali e profonde sui versanti o colate fangoso-detritiche lungo aste torrentizie o piene con esondazioni sui fondovalle principali.

Parte dell'opinione pubblica e anche della comunità scientifica ritiene che il numero degli eventi pluviometrici e dei conseguenti fenomeni d'instabilità siano in aumento, ma le statistiche, frutto di approfondite indagini storiche, mostrano che in passato i fenomeni si sono manifestati più o meno con la medesima frequenza.

Oggi quello che è realmente in aumento è l'entità dei danni provocati da tali processi naturali, entità legata all'ampliamento delle zone urbanizzate. Le più recenti urbanizzazioni si sono sviluppate talvolta in aree a rischio, le stesse lasciate libere dai nostri predecessori per ovvii motivi di "buon senso". Via via sono stati sottratti spazi naturali alla rete idrografica, "costringendo" sia i corsi d'acqua principali sui fondovalle, sia molti tributari in conoide, in anguste sezioni sovente insufficienti per lo smaltimento di portate straordinarie, soprattutto se arricchite da materiale lapideo.

Negli ultimi decenni, i continui miglioramenti in campo tecnologico hanno consentito di indirizzare una nuova politica di gestione del rischio che vede nella previsione e nella prevenzione due misure strutturali tese alla sua mitigazione. Si sono moltiplicate le iniziative volte alla creazione di efficaci sistemi di sorveglianza dei fenomeni d'instabilità attesi nell'ottica di una pianificazione d'emergenza pronta a rispondere e a coordinare in modo efficace le azioni delle istituzioni in caso di emergenza.

In termini analitici, il rischio idrogeologico è espresso da una formula che lega tre parametri: pericolosità, vulnerabilità e valore esposto.

$$\text{Rischio} = \text{pericolosità} \cdot \text{vulnerabilità} \cdot \text{valore esposto}$$

Questi tre parametri esprimono rispettivamente: la probabilità che in una zona si verifichi un evento in relazione alla sua frequenza; la predisposizione di un'area ad essere soggetta a tali fenomeni; l'entità degli elementi di valore, che rappresentano i beni a rischio in caso di evento.

Tale formula permette d'inquadrare in uno schema razionale le azioni di protezione civile, ed in particolare di comprendere meglio il significato delle azioni di previsione e prevenzione.

La previsione risulta, infatti, finalizzata ad individuare, per un'assegnata tipologia di rischio, le aree vulnerabili, e, all'interno di queste, gli elementi a rischio e la loro vulnerabilità in modo da pervenire, nota la pericolosità dell'evento, ad una stima del rischio su un prefissato orizzonte temporale. La previsione è quindi un'azione di tipo conoscitivo che deve fornire un quadro generale obiettivo delle aree vulnerabili e del rischio al quale sono sottoposte le persone ed i beni in esse presenti.

Le misure di prevenzione, invece, sono indirizzate alla diminuzione del rischio nelle aree vulnerabili e si concretizzano attraverso interventi strutturali per ridurre la probabilità che accada un evento ed interventi non strutturali per ridurre il danno.

1.4 Significato delle soglie pluviometriche

Con il termine “soglia pluviometrica” si suole indicare un valore minimo o massimo di pioggia necessaria per innescare un processo naturale d'instabilità; quella “minima” è da considerare il livello inferiore al di sotto del quale il processo non s'innesci, quella “massima” rappresenta il livello oltre il quale il processo si manifesta sempre (Crozier, 1996).

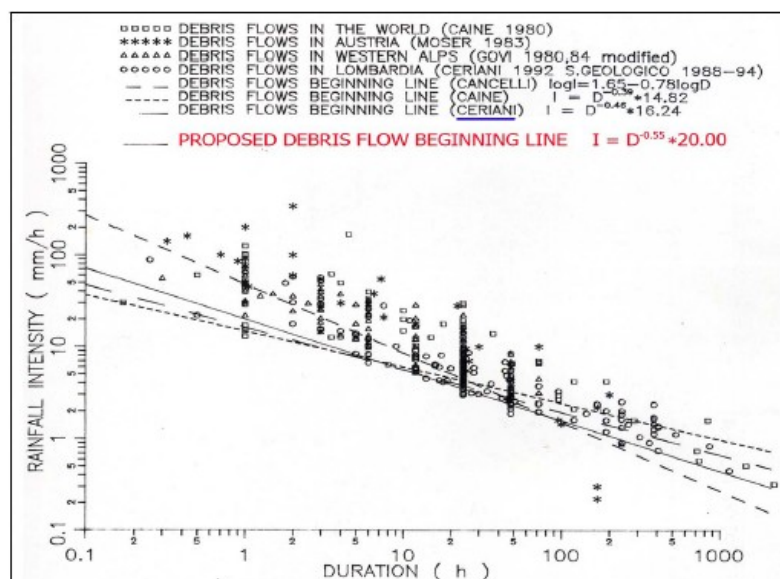


Figura 1.9: Grafico durata/intensità di pioggia per l'innescio di colate proposto da Ceriani *et al.* (1994)

La Figura 1.9 riporta alcune delle soglie pluviometriche espresse come relazione fra intensità e durata di pioggia. Generalmente queste relazioni sono determinate tramite indagini di tipo statistico sulla base di dati relativi agli eventi pregressi nella zona in esame. Per lo svolgimento di analisi di questo tipo è necessario disporre di un'ampia base di dati, relativi sia alle precipitazioni che agli eventi nella zona esaminata; occorre inoltre porre particolare attenzione alla validità spaziale delle soglie ricavate. Al fine di superare i fondamentali problemi di campionamento delle piogge che affliggono l'accuratezza delle soglie di innesco, alcuni autori hanno proposto l'uso di sensori remoti per l'osservazione dei campi di pioggia di interesse.

2. Le soglie pluviometriche per l'innescò di colate detritiche e frane

2.1 Studi pregressi

Le colate detritiche sono fenomeni che si producono solitamente in seguito a precipitazioni brevi ed intense tipiche (ma non esclusive) della stagione estiva: tali piogge hanno caratteristiche spiccatamente localizzate e, nei bacini alpini, la loro dinamica evolutiva è fortemente condizionata dall'orografia, dalla quota, dall'esposizione dei versanti, dal vento e dal gradiente termico.

È stato più volte riscontrato che la distribuzione delle piogge estive assume caratteristiche marcatamente differenziate in bacini limitrofi (versanti destro e sinistro oppure zona di testata e fondovalle/conoide). Per caratterizzare qualitativamente e quantitativamente le precipitazioni che cadono in un bacino, sarebbe auspicabile posizionare stazioni meteorologiche in posizione baricentrica e non solamente alla chiusura dei sottobacini, come spesso accade: ciò potrebbe fornire un valido strumento di monitoraggio delle piogge responsabili dell'attivazione di frane e colate detritiche.

Gli studi che si sono prefissi l'obiettivo d'individuare la correlazione tra precipitazioni e movimenti di massa sono classificabili principalmente in due tipologie:

- studi basati sulla modellazione fisica del pendio esaminato, dell'infiltrazione e del deflusso lungo il pendio stesso (modello idrologico). Analisi di questo tipo sono in genere svolte su una porzione di versante limitata o, al massimo, a scala di bacino, spesso con l'ausilio di tecnologie GIS: necessitano infatti di numerosi parametri che sono soggetti ad elevata variabilità spaziale;
- studi volti all'individuazione di soglie pluviometriche per l'innescò di frane, valide a scala locale o regionale, determinate su indagini di tipo statistico in base ai dati relativi agli eventi pregressi nella zona in esame. Per lo svolgimento di analisi di questo tipo è necessario disporre di un'ampia base di dati, relativi sia alle precipitazioni che alle frane nella zona esaminata; occorre inoltre porre particolare attenzione alla validità spaziale delle soglie ricavate.

I numerosi studi, relativi a soglie d'innescò, presenti in letteratura si differenziano soprattutto in base a:

- tipi di fenomeni d'instabilità esaminati (colate detritiche, frane ecc.);
- parametri pluviometrici considerati (intensità della precipitazione, durata dell'evento, precipitazione media annua, precipitazione cumulata antecedente l'evento, ecc.);

- dimensione e localizzazione dell'area di studio.

Trattandosi di un approccio fondamentalmente statistico, l'affidabilità dei risultati è legata alla disponibilità di dati di base, sia pluviometrici, sia relativi ai fenomeni considerati.

Facendo riferimento agli studi più noti, o che si sono concentrati in particolare sull'arco alpino, sono descritti sinteticamente gli approcci utilizzati, i risultati conseguiti e le difficoltà riscontrate.

Caine (1980) propose una soglia pluviometrica per l'innescò di frane e colate detritiche, determinata utilizzando i dati relativi ad una settantina di fenomeni avvenuti in diverse zone del mondo, caratterizzate da differenti condizioni geologiche, morfologiche e climatiche. Secondo questa relazione, il verificarsi o meno di una colata, dipende essenzialmente dall'intensità media I e dalla durata D dell'evento pluviometrico che colpisce l'area:

$$I = \alpha \cdot D^{-\beta}$$

La relazione risulta applicabile per eventi di durata compresa tra i 10 minuti e i 10 giorni.

Uno studio di Govi & Sorzana (1980), fu condotto esaminando gli eventi pluviometrici che avevano colpito diversi bacini piemontesi provocando l'innescò di numerose frane superficiali: fu possibile stabilire che l'innescò di fenomeni di colata detritica era legato ad un valore soglia, funzione della precipitazione media annua (PMA). All'interno di ogni area caratterizzata da simili condizioni climatiche, la precipitazione necessaria per innescare frane variava in un range ristretto, dipendente principalmente dall'intensità della precipitazione e dalla pioggia cumulata nel periodo precedente l'evento. Il manifestarsi di SS risultò fortemente influenzato dal tipo di suolo e dalla pendenza dei versanti, mentre risultava essere meno importante la litologia.

In uno studio successivo Govi *et al.* (1985), esaminarono nuovamente la relazione tra altezza di precipitazione e frane. In particolare, per quanto riguarda le frane superficiali di fluidificazione del suolo, furono esaminati 22 eventi meteorici, conteggiando la precipitazione cumulata relativa all'evento e la pioggia registrata in un periodo compreso tra i 30 ed i 60 giorni precedenti (espressa come % PMA). Fu osservato che:

- nello stadio iniziale (in cui si sviluppano da 3 a 15 frane/km²) le altezze critiche di precipitazione cumulata variano in un campo di valori piuttosto ampio, in funzione dell'intensità media oraria della precipitazione e delle condizioni stagionali;
- superata la soglia critica iniziale, gli stadi successivi (intermedio, con concentrazione di frane tra 15 e 30 al km² e catastrofico, se le frane sono più di 30/km²), vengono

rapidamente raggiunti, durante le piogge intense, anche per incrementi relativamente modesti dei valori percentuali di PMA;

- elevate intensità orarie compensano insufficienti valori critici di pioggia cumulata e viceversa;
- l'intensità oraria delle precipitazioni influisce sull'intervallo di tempo entro il quale si verifica la maggior parte delle frane: durante eventi estivi ed autunnali (elevata intensità) i fenomeni di dissesto (fino a $100/\text{km}^2$) iniziano e si esauriscono in genere in 2-4 ore. Nel corso di eventi primaverili o invernali (basse intensità orarie) l'intervallo varia tra 10 e 24 ore.

La relazione tra fase iniziale della franosità in terreni superficiali e parametri idrologici è indicata da due linee che definiscono i valori soglia di precipitazione al di sopra dei quali, in base alla stagione, s'innescano le prime frane nell'area considerata. Le due linee soglia sono rispettivamente valide per eventi invernali primaverili e per eventi estivi-autunnali (vedi Figura 2.1) ed indicano la relazione tra intensità oraria e precipitazione cumulata dell'evento (espressa in % della PMA).

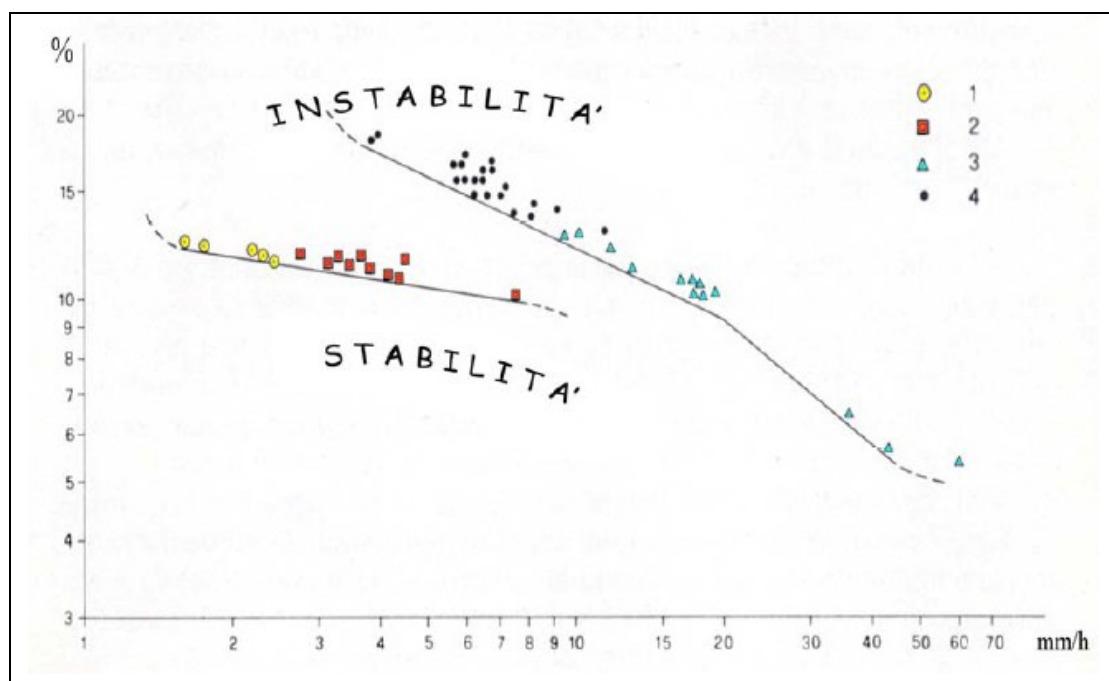


Figura 2.1: Relazione fra fase iniziale della franosità in terreni superficiali e parametri idrologici, proposta nel 1985 da Govi *et al.* per il Bacino Padano occidentale. Nel grafico in ascissa è rappresentata l'intensità oraria e in ordinata la precipitazione cumulata dell'evento, espressa in % della precipitazione media annua (PMA): 1: eventi invernali, 2: eventi primaverili; 3: eventi estivi; 4: eventi autunnali.

La nota relazione determinata da Wieczorek (1987), che esaminò un'area di circa 10 km² nella zona delle Santa Cruz Mountains (California), mette in relazione intensità media e durata degli eventi meteorici, definendo una soglia superata la quale è molto alta la probabilità che si verifichino MDF. In questo caso furono esaminati 22 eventi meteorici, 10 dei quali provocarono l'innescamento di colate di detrito. Nei casi esaminati assume un importante ruolo anche la precipitazione antecedente l'evento innescante, registrata in un periodo compreso tra i 7 giorni ed i 2 mesi: in tutti i casi in cui si sono innescate colate detritiche, nel periodo precedente sono caduti almeno 28 mm di pioggia. La soglia individuata risulta più restrittiva rispetto a quella individuata da Caine.

Ceriani *et al.* (1992) hanno verificato la validità delle soglie determinate da Govi *et al.* (1985) nella zona delle Alpi Centrali colpita dall'alluvione del luglio 1987. Sono stati raccolti i dati relativi agli eventi meteorici registrati presso le stazioni pluviometriche di Bormio e Lanzada ed i fenomeni d'instabilità verificatisi nel raggio di 5 km. Oltre alle colate detritiche in senso stretto, vennero presi in esame anche colate detritiche ricche in materiale organico e frane. I punti relativi ai vari eventi, rappresentati sul diagramma intensità-precipitazione cumulata, evidenziano l'impossibilità di applicare le soglie stagionali proposte da Govi *et al.* (1985) per l'area esaminata. Fu quindi proposta una diversa "curva di instabilità", valida per fenomeni d'instabilità in generale. Tale soglia correla l'intensità media della precipitazione (mm/h), la durata (h) dell'evento e la precipitazione media annua PMA (%). La curva risulta avere differente espressione a seconda che l'intensità della precipitazione sia minore o maggiore di 2 mm/h, per cui si ha:

$$- PMA\% = -3.65 \cdot \log(I) + 13.59 \text{ con } I > 2\text{mm/h}$$

$$- PMA\% = -23.51 \cdot \log(I) + 27.56 \text{ con } I < 2\text{mm/h}$$

Sulla base degli stessi dati è stata ottenuta una curva per "l'inizio dell'innescamento delle colate detritiche" rappresentata dall'espressione:

$$I = 16.24 \cdot D^{-0.46}$$

simile a quella proposta da Caine (1980).

Tale curva è stata affinata in seguito, tenendo conto dei dati relativi agli eventi meteorici che hanno colpito la zona nel corso dell'estate del 1992 e nell'autunno del 1993, ottenendo due differenti formulazioni (Ceriani *et al.*, 1994) (vedi Figura 1.9), a seconda che in ordinata sia considerata l'intensità (mm/h) o l'intensità normalizzata (% della PMA):

$$I = 20.0 \cdot D^{-0.55}$$

$$In\% = 2.01 \cdot D^{-0.55}$$

Bottino *et al.* (1996) hanno esaminato i dati relativi ai fenomeni d'instabilità avvenuti nell'anfiteatro morenico di Ivrea durante i primi giorni del novembre 1994. I fenomeni analizzati sono scivolamenti e/o crolli, evolutisi in colamenti incanalati all'interno di incisioni torrentizie. Le soglie individuate sono da ritenersi valide per la zona in esame, avente caratteristiche omogenee, nella quale si sono verificati gli eventi considerati per costruirle. Le curve sono ricavate sulla base di eventi registrati in un periodo di oltre 30 anni, hanno una forma simile a quella proposta da Caine (1980), che considera come grandezze discriminanti per l'innescò di colate detritiche l'intensità media e la durata dell'evento meteorico.

Tuttavia, in questo caso, gli autori ricavano due curve, applicabili a seconda dell'entità della pioggia cumulata nei 30 giorni precedenti la data del fenomeno: è infatti ritenuto fondamentale anche il ruolo delle precipitazioni antecedenti l'evento per l'innescò della frana, e nel caso in cui queste superino il 14% della PMA locale, la soglia risulta essere più bassa.

Bertolo & Bottino (2006) propongono un altro studio per la definizione di soglie d'innescò, valide per quattro vallate dell'arco alpino occidentale (Valli Chisone-Germanasca, media-bassa Valle di Susa, Valle Stura di Lanzo, Valle Orco).

L'analisi è svolta sulla base di eventi pluviometrici avvenuti dal 1950 al 2000, escludendo eventi molto localizzati (che hanno coinvolto solo bacini con $S < 2 \text{ km}^2$), allo scopo di ottenere soglie valide per un settore omogeneo non troppo ristretto, trascurando forti condizionamenti locali.

Per le misure di precipitazione, si è fatto riferimento ad una stazione pluviometrica rappresentativa per ogni valle, con una serie storica di dati sufficientemente completa, ma sono stati analizzati anche i dati relativi ad altri pluviometri presenti nelle valli in esame. Nel lavoro sono stati presi in considerazione tutti i fenomeni direttamente connessi con precipitazioni intense: colate detritiche, colamenti superficiali, scivolamenti rotazionali, fenomeni di carattere torrentizio con elevato trasporto solido. Per ogni vallata sono state individuate due tipi di soglie pluviometriche:

1. d'innescò: mettono in relazione la precipitazione massima giornaliera durante l'evento (mm/g) e la precipitazione totale durante l'evento (mm);
2. in base alla stagionalità degli eventi: sono considerate la precipitazione massima giornaliera durante l'evento (mm/g) e la precipitazione durante l'evento+15 giorni precedenti (mm).

Per il territorio esaminato sono stati stabiliti dei valori soglia:

- per precipitazione cumulata dell'evento < 100 mm è altamente improbabile l'innesco di fenomeni di instabilità;
- precipitazione giornaliera "critica": 50-55 mm/day (Valli Susa e Chisone- Germanasca); 75-80 mm/day (Valli Orco e Stura); tali valori sono compresi tra il 5,5% ed il 6,7% della PMA.

Nella definizione delle soglie pluviometriche in base alla stagionalità è considerato l'effetto delle precipitazioni precedenti l'evento, mettendo in relazione la precipitazione massima giornaliera durante l'evento con la precipitazione cumulata durante l'evento a cui è sommata la precipitazione dei 15 giorni antecedenti. I valori di precipitazione richiesti per l'innesco di fenomeni differiscono da vallata a vallata, ma in ogni caso sono inferiori nel periodo primaverile rispetto a quello autunnale, con una differenza tra i due valori pari a circa il 5% della PMA.

Le soglie individuate per le diverse vallate sono caratterizzate da valori differenti (legati alle diverse condizioni geomorfologiche e climatiche e quindi alle diverse risposte nei confronti degli eventi meteorologici estremi). I valori di soglia tendono invece ad omogeneizzarsi considerando i valori come percentuali della PMA. Tuttavia, secondo gli autori, le indicazioni fornite dai modelli sono da ritenersi affidabili solo nel caso in cui questi siano elaborati e tarati in base a dati riferiti a zone omogenee ed arealmente non molto estese.

Tali osservazioni confermano quelle di Bacchini & Zannoni (2003), a seguito dello studio svolto a scala di bacino, in un'area delle Dolomiti frequentemente soggetta a fenomeni di colate detritiche. L'area di studio è stata attrezzata con un sistema di monitoraggio, con l'intento di creare un sistema di allerta per la salvaguardia degli abitanti e delle infrastrutture della zona. L'analisi si basa sui dati registrati da tre pluviometri, localizzati all'interno o nei pressi dell'area di studio, nel corso di 5 eventi recenti.

Analizzando le precipitazioni (intensità media delle precipitazioni, durata e PMA) e le relazioni con l'innesco delle colate fangoso-detritiche torrentizie, Bacchini & Zannoni (2003) osservano che per il bacino in esame:

- 1) le precipitazioni necessarie per l'innesco sono pari a 20-30 mm in 1-2 h, di breve durata ed intensità medio-alta;

- 2) dal confronto con le soglie proposte da altri autori, risulta che le soglie normalizzate rispetto alla PMA risultano adatte per analisi regionali, ma non idonee per studi su aree più ampie;
- 3) sono state ricavate soglie inferiori a quelle proposte da Govi e Ceriani *et al.*, poiché nella loro definizione influiscono in modo particolare le dimensioni del bacino, le condizioni climatiche, l'estensione dell'area di studio considerata, le caratteristiche del meccanismo d'innescio.

Gli autori osservano che per migliorare l'affidabilità delle soglie sono necessari dati relativi a molti eventi, derivanti da una fitta rete di strumenti, installati nelle zone soggette a colate detritiche. Per il momento le soglie possono avere funzione di allarme ad uso dei tecnici che gestiscono il sistema di monitoraggio ed allertamento ai fini della protezione civile, ma non valore previsionale, per il quale sarebbe necessario l'utilizzo di sofisticati modelli, basati sulla previsione delle precipitazioni.

Uno studio relativo ad un'ampia area del territorio piemontese, interessato in particolare nel corso degli ultimi 15 anni, da numerosi eventi meteorici particolarmente intensi, è stato condotto da Aleotti (2004). Sono stati analizzati i 5 principali eventi recenti, che hanno coinvolto aree differenti: in primo luogo è stata valutata la correlazione tra precipitazioni antecedenti l'evento (7, 10 e 15 giorni) e precipitazione critica: per gli eventi in esame, non risultano evidenti correlazioni tra le due grandezze. È stato ricavato il tempo di ritorno di ciascun evento considerato, ricavato dai dati misurati negli strumenti prescelti: nella maggior parte dei casi le precipitazioni risultano avere tempo di ritorno superiore ai 50 anni, ma per tutti gli eventi si ha tempo di ritorno di almeno 10 anni. Le curve di possibilità pluviometrica con diverso tempo di ritorno (10 o 50 anni), calcolate per le stazioni di riferimento, possono quindi essere considerate un primo approssimativo tipo di soglia pluviometrica, che segnalano rispettivamente eventi che provocano l'innescio di poche ($Tr=10$ anni) o numerose frane ($Tr=50$ anni). Una soglia del tipo intensità-durata della precipitazione, più accurata delle precedenti, è ricavata in modo tale che il 90% dei punti del grafico (rappresentanti diversi "inneschi di frane") siano inclusi nel semipiano rappresentante le condizioni di instabilità.

Tale soglia, rappresentata dall'equazione

$$I = 19 \cdot D^{-0.5}$$

risulta molto simile alla curva individuata da Ceriani *et al.* (1994) per le Alpi centrali e alla soglia proposta da Caine (1980). Sulla base dei dati disponibili sono state ricavate anche le

soglie d'innescò considerando l'intensità normalizzata, sia rispetto alla PMA che rispetto alla pioggia critica normalizzata (NCR).

Aleotti presenta un esempio di applicazione delle soglie individuate in sistemi di allertamento, proponendone una sperimentazione allo scopo di calibrare ed affinare le soglie in vista di tale utilizzo.

Egli pone una particolare attenzione alla tipologia ed alla qualità dei dati utilizzati nell'identificazione delle soglie. Sottolinea l'importanza nella definizione dell'inizio dell'evento critico e dell'ora d'innescò della frana e della scelta dello strumento di cui considerare le misure da associare a ciascun fenomeno di instabilità. Inoltre è fondamentale la compilazione di una banca dati, relativa a ciascun evento, contenente accurate informazioni riguardanti:

1. identificazione dell'evento,
2. data e durata dell'evento,
3. area coinvolta dall'evento,
4. identificazione degli strumenti di misura (pluviografi) da considerare per l'evento.

Inoltre per ciascuno strumento è necessario acquisire:

1. coordinate geografiche;
2. precipitazioni giornaliere antecedenti l'evento per un periodo di almeno 15 giorni;
3. precipitazioni orarie relative all'intero evento;
4. curve di possibilità pluviometrica per diversi tempi di ritorno (quindi serie storiche di dati sufficientemente lunghe).

Uno studio di Giannecchini (2006) riguarda un'area più ampia, compresa nella zona delle Alpi Apuane meridionali, coinvolta, tra il 1984 ed il 2000, da almeno 6 eventi alluvionali che hanno provocato l'innescò di numerosi fenomeni di instabilità. Si tratta in genere di frane rapide e superficiali, estremamente veloci, che interessano il materiale superficiale (1-2 m) su versanti con pendenza 35-40° e coinvolgono spesso la rete idrografica. Sono analizzati 152 eventi meteorici importanti (di durata 1-2 h ed intensità elevata 20-30 mm/h oppure di durata 40-50 h ed intensità ridotta 2-4 mm/h) avvenuti tra il 1975 ed il 2002, considerando i dati registrati in una stazione baricentrica rispetto all'area in esame.

Per ogni evento sono considerate: la precipitazione d'evento (mm), la durata (h), l'intensità media (mm/h) ed è condotta un'analisi per individuare gli effetti al suolo, in base ai quali gli eventi sono classificati in 3 tipologie (A = eventi che hanno causato numerose frane

superficiali, B = eventi che hanno causato alcune frane superficiali e C = eventi per i quali non si hanno informazioni riguardo a fenomeni di instabilità indotti).

Sono individuate le linee indicanti le soglie pluviometriche sul diagramma Intensità- Durata: due curve dividono il piano in 3 parti (eventi di tipo A, B e C), per eventi con $D \leq 12$ ore e con durata qualsiasi. Dal confronto con altre soglie, i valori individuati risultano particolarmente alti, come ci si poteva aspettare, considerando la PMA decisamente elevata della zona in esame. La validità delle soglie è comunque soggetta a verifica: a questo scopo sono state installate due stazioni di monitoraggio dotate di pluviografi. Inoltre ulteriori studi sono previsti per la definizione di un modello di infiltrazione e la valutazione del ruolo delle precipitazioni antecedenti l'evento, nell'innescò di frane superficiali.

2.2 Metodologie di stima delle relazioni Intensità-Durata

Le soglie definite in questo lavoro sono state ottenute mediante tecniche di inferenza statistica che hanno permesso di filtrare criteri soggettivi di valutazione. A tal fine sono state considerate due tecniche statistiche. La prima tecnica sfrutta l'inferenza Bayesiana (Guzzetti *et al.* 2007, 2008), mentre la seconda tecnica usa la distribuzione degli eventi osservati. Le due tecniche evitano l'uso di criteri soggettivi, comuni in molti dei lavori pubblicati, nella determinazione delle soglie di innescò di frane (Guzzetti *et al.* 2007, 2008).

La revisione bibliografica (Guzzetti *et al.* 2007, 2008) mostra che per la maggior parte delle soglie pluviometriche empiriche di innescò di frana pubblicate, i criteri matematici e statistici usati nella determinazione non è sufficientemente specificato o è vincolato in modo poco solido. Come mostrato da Guzzetti *et al.* (2007, 2008) è necessario definire e validare metodi per il calcolo di soglie pluviometriche di innescò frana oggettive (i.e. riproducibili). In questa sezione descriviamo due metodi statistici per la definizione di soglie ID oggettive. Il primo metodo si basa sulla inferenza Bayesiana e il secondo metodo su un approccio frequentistico. Entrambi i metodi assumono curve di soglia nella forma:

$$I = \alpha \cdot D^{-\beta}$$

ossia una semplice legge di potenza dove I è l'intensità di precipitazione media (mm/h) e D la durata dell'evento precipitativo (h). α è una costante di scala e β è il parametro di forma che definisce la pendenza della legge di potenza. è utile far notare che la scelta di una legge di potenza come curva di soglia è indipendente da qualunque criterio fisico (geologico,

geomorfologico, idrologico, meteorologico) (Reichenbach *et al.*, 1998) e che diverse forme della curva di soglia possono essere scelte (Crosta and Frattini, 2001).

Metodo di inferenza Bayesiana

Guzzetti *et al.* (2007) sono stati i primi a proporre il metodo di inferenza Bayesiana e lo hanno utilizzato per determinare soglie ID di innesco di frane minime e normalizzate per l'Europa centrale e meridionale. Guzzetti *et al.* (2008) hanno adottato lo stesso metodo per stabilire soglie ID di innesco di frane e colate detritiche minime e normalizzate su scala globale. Con questo metodo si stimano la scala e la forma della legge di potenza per mezzo di un approccio probabilistico basato su misure di intensità di precipitazione e durata che hanno condotto a dissesti. Questo si ottiene definendo la probabilità di Bernoulli ($0 \leq p \leq 1$, $p \in \mathbb{R}^+$) di un punto con intensità di precipitazione I e durata D come

$$P(I, D) \approx dbern[\mu(I, D)]$$

con:

$$\mu(I, D) = \{(1 - \delta)\Theta[z(I, D)] + \delta\}exp[-\eta|z(I, D)|]$$

Nell'equazione Θ è la funzione a gradino di Heaviside (Abramowitz and Stegun, 1972), δ e η rappresentano la dispersione dei punti nello spazio D-I e attraverso la soglia individuata lungo $z(I, D) = 1 - \alpha D^{-\beta}/I$. Nel modello, la sperimentazione è necessaria per definire valori di tolleranza accettabili δ e η , più comunemente $\delta = 0,5$ e $\eta = 0,1$ e range accettabili per le distribuzioni di probabilità a priori di α e β , comunemente $1/\alpha \sim \text{dunif}[0.001, 100]$ e $1/\beta \sim \text{dunif}[0.1, 2]$.

Infine, le stime di α e β , ottenute mediante inferenza Bayesiana della loro distribuzione di probabilità a posteriori dato il modello e i dati empirici, sono utilizzati per definire la curva di soglia ID minima.

Metodo Frequentistico

Il secondo metodo segue un approccio di frequenza per determinare l'intercetta e la pendenza della curva di potenza scelta per rappresentare le soglie pluviometriche. Il metodo si basa sull'analisi di frequenza delle condizioni pluviometriche registrate che si sa essere risultate in dissesti. I dati empirici sono trasformati in scala logaritmica per evitare problemi dovuti ai diversi ordini di grandezza in gioco (ad esempio il metodo dei minimi quadrati darebbe

risultati inattendibili). I dati empirici sono rappresentati in un grafico log-log e la distribuzione delle condizioni pluviometriche $\log(I)$ vs. $\log(D)$ che hanno portato a dissesti viene interpolata con una regressione lineare ai minimi quadrati del tipo:

$$\log(I) = A + B \cdot \log(D)$$

che è equivalente alla relazione di potenza che si va cercando. A questo punto per ogni evento si calcola la differenza $\delta(D)$ tra il logaritmo dell'intensità dell'evento $\log(I(D))$ e il valore della regressione in corrispondenza di $D = \log(I_f(D))$:

$$\delta(D) = \log(I(D)) - \log(I_f(D))$$

La densità di probabilità (pdf) della distribuzione di $\delta(D)$ è determinata per mezzo della Kernel Density Estimation (Silverman, 1986; Scott, 1992; Venables and Ripley, 2002), e il risultato è interpolato con una gaussiana col metodo dei minimi quadrati:

$$f(x) = a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$$

dove $a > 0$, $c > 0$, e a , b , c sono reali.

Le soglie di innesco sono quindi individuate sulla base della distribuzione di $\delta(D)$.

3. Il caso di studio

3.1 Area di studio: Provincia Autonoma di Trento

La provincia di Trento si estende nelle Alpi Retiche meridionali e ha una superficie pari a circa 6208 km². Confina a nord con la provincia di Bolzano, a est e a sud con le province venete di Belluno, Vicenza e Verona, e a ovest con le province lombarde di Brescia e Sondrio. Più del 70% del territorio trentino ha un'altitudine superiore ai 1000 metri e il contesto geografico è caratterizzato dalla presenza di numerosi fiumi, laghi, foreste e complessi montuosi alpini che comprendono una parte delle Dolomiti. I numerosi solchi vallivi costituiscono la trama per la rete dei collegamenti e per la distribuzione degli insediamenti. La valle principale è quella dell'Adige, che attraversa il territorio provinciale in posizione centrale lungo la direttrice nord - sud.

Il territorio della Provincia autonoma di Trento presenta una rete idrografica ben articolata, i cui corsi d'acqua principali sono il fiume Adige, Brenta, Chiese, Noce, Avisio e Sarca. Sul territorio sono presenti 347 laghi che occupano una superficie complessiva di 47 km². La maggior parte di questi laghi si trova fra i 1500 e i 3100 metri d'altitudine e, come tali, consistono in beni di estremo interesse ambientale e paesaggistico.

Geologia

Il territorio della Provincia autonoma di Trento è caratterizzato dal punto di vista geologico dalla presenza di due grandi unità strutturali della catena Alpina: le Alpi calcaree meridionali (Sudalpino) e l'Austroalpino. Il confine tra queste due unità è costituito dal Lineamento Periadriatico detto anche Linea Insubrica. Il Sudalpino si trova a sud del Lineamento Periadriatico ed è caratterizzato da rocce sedimentarie calcareo-dolomitiche e marnoso-arenacee seguite, in ordine di abbondanza, da formazioni vulcaniche, rocce metamorfiche e rocce intrusive (graniti, granodioriti, monzoniti, ecc.). L'Austroalpino si estende a nord del Lineamento Periadriatico ed è caratterizzato da una netta prevalenza di rocce scistosocristalline.

Uso del suolo

I dati relativi all'uso del suolo della provincia di Trento, sono disponibili sul Geoportale provinciale (Figura 3.1) e la Tabella 3.1 mostra la classificazione dell'uso del suolo sulla base di tali dati. Le aree naturali rivestono un ruolo primario nella strutturazione del territorio trentino: su un totale di 620.822 ettari di superficie dell'intera provincia, il territorio montano,

comprendente il bosco, i pascoli e gli improduttivi in quota, costituisce l'80% circa, pari a 502.054 ettari; la superficie occupata dalla vegetazione arborea, con 325.072 ettari, copre il 52% del totale.

Lo strumento normativo del vincolo idrogeologico, al quale è assoggettato più del 90% del territorio provinciale, ha la precisa finalità di assicurare, attraverso un idoneo uso dei terreni e dei boschi, la stabilità dei versanti, la corretta regimazione delle acque e la conservazione dei popolamenti forestali.

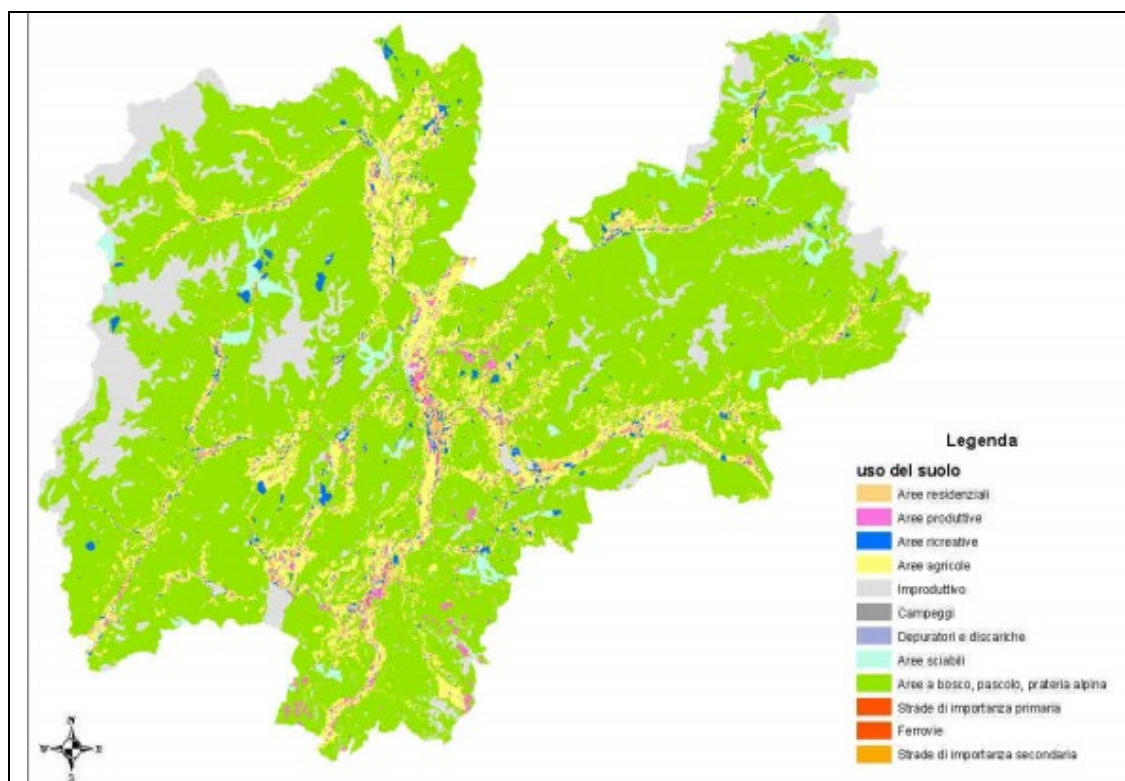


Figura 3.1: uso del suolo provinciale: elaborazione da Geodatabase provinciale

<i>Classe</i>	<i>Area (km²)</i>	<i>Percentuale</i>
Aree residenziali	119,9	1,93%
Aree produttive	65,2	1,05%
Aree ricreative	90,8	1,46%
Aree agricole	636,9	10,26%
Improduttivo	666,4	10,73%
Campeggi	2,9	0,05%
Depuratori e discariche	4,9	0,08%
Aree sciabili	129,8	2,09%
Aree a bosco, pascolo e prateria alpina	4354,1	70,13%
Strade di importanza primaria	11,8	0,19%
Ferrovie	3,7	0,06%
Strade di importanza secondaria	39,3	0,63%
Aree esondabili	82,4	1,33%
TOTALE	6208,2	100,00%

Tabella 3.1: uso del suolo provinciale: elaborazione da Geoportale provinciale

Clima

Il clima del Trentino è di difficile classificazione a causa della complessa morfologia, si può comunque suddividere in tre zone climatiche principali in funzione dell'andamento termico:

- le zone più basse come la piana dell'Alto Garda e la val d'Adige hanno inverni relativamente freddi e abbastanza nevosi ed estati calde e temporalesche, spesso afose di giorno, con l'eccezione dell'alto Garda dove i pomeriggi estivi sono rinfrescati dalla "Ora" del Garda, la brezza pomeridiana che apporta l'aria più fresca stazionante sopra il lago verso la terraferma spingendosi oltre la fine della valle del Sarca sino in val d'Adige a nord di Trento (Gardolo, Lavis);
- le valli laterali, come la val di Non e la Valsugana, hanno un clima con temperature più moderate d'estate e leggermente più fredde d'inverno;
- le conche fredde e gli avvallamenti posti fra 500 e 1000 m come il Bleggio e il fondovalle della Val di Fiemme offrono estati miti e inverni più rigidi;
- le zone di montagna più alte oltre i 1300-1600 m, con il tipico clima montano caratterizzato da estati fresche/miti e piovose con frequenti temporali, ed inverni freddi e alquanto nevosi.

Per quanto riguarda le precipitazioni si possono osservare differenze notevoli tra le varie zone: le aree più piovose sono quelle meridionali e sudoccidentali, che sono quelle più esposte ai flussi umidi da sud e alle perturbazioni provenienti generalmente da ovest e sudovest; le zone invece più "chiuse" o comunque meno esposte ai flussi da sud, come le valli di Fiemme e Fassa, ricevono mediamente meno precipitazioni. Importanti differenze si notano anche nel regime pluviometrico che nelle zone più vicine alle Prealpi (val d'Adige, valle del Chiese, alto Garda e Valsugana) hanno un regime pluviometrico annuale caratterizzato da due massimi di precipitazione in primavera e autunno e due minimi in estate e soprattutto in inverno. Le zone invece più lontane dalla pianura Padana e alle quote più elevate mostrano invece un regime più "alpino" con un massimo di precipitazione stagionale piuttosto evidente in estate dovuto ai frequenti eventi temporaleschi.

Dal punto di vista amministrativo la Provincia Autonoma di Trento è suddivisa in 4 Zone Amministrative, numerate da 1 a 4, individuate in base a comuni caratteristiche geografiche, geomorfologiche, geologiche ed idrologiche. La Figura 3.2 e la Tabella 3.2 mostrano le 4 Zone Amministrative.

Zona 1:	bacini del fiume Sarca e del fiume Chiese;
Zona 2:	bacini del torrente Noce, del fiume Adige settentrionale, dei Consorzi di bonifica e dell'intera asta dell'Adige,
Zona 3:	bacini del torrente Avisio e del fiume Adige meridionale (esclusi i Consorzi di bonifica e l'asta dell'Adige);
Zona 4:	bacini del fiume Brenta e dei torrenti Fersina, Astico e Cordevole.

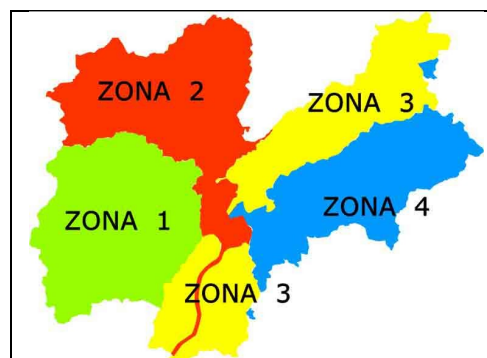


Figura 3.2: zone di suddivisione

Tabella 3.2: zone di suddivisione della Provincia

3.2 Analisi degli eventi di collasso in archivio

Le principali fonti consultate per la creazione dell'archivio dati sono tre: ARCA (Archivio Eventi Calamitosi della Provincia Autonoma di Trento), IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), SBM (Servizio Bacini Montani). Altre fonti (archivi comunali, relazioni tecniche, ecc.) hanno contribuito alla raccolta dati anche se con importanza quantitativa minore.

Progetto ARCA

Obiettivo del progetto è il censimento sistematico, la raccolta e l'archiviazione di documenti e informazioni di vario tipo che segnalano eventi calamitosi verificatisi nel passato sul territorio della Provincia Autonoma di Trento. Per evento calamitoso è intesa la singola manifestazione di fenomeni naturali quali frane, alluvioni, terremoti, fulmini ecc. che ha prodotto danni misurabili a persone, animali e beni o che, pur non avendo causato danni, ha una intensità tale che avrebbe potuto eventualmente causarlo. Le fonti di informazione che segnalano e descrivono l'evento sono piuttosto articolate e riguardano fonti cronachistiche, pubblicazioni, relazioni, elenchi ed archivi tecnicoamministrativi ecc.

I documenti raccolti che riportano le notizie sono inseriti in un apposito data base (archivio documenti) che li cataloga e li gestisce per la ricerca, la visualizzazione e la stampa. Dall'analisi dei documenti si individuano i singoli eventi calamitosi; al riguardo occorre far notare che un documento potrebbe riportare informazioni di più eventi (ad es. un articolo di giornale potrebbe segnalare frane in diverse località del territorio) oppure un evento potrebbe essere descritto in più documenti (ad es. più articoli di giornale possono descrivere una

singola frana). Gli eventi così analizzati sono inseriti in un apposito data base (archivio eventi).

IFFI: Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia

Il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) è stato avviato come progetto nazionale e prosegue attualmente come progetto provinciale. Lo scopo è quello di costruire un quadro della distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale e di offrire uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità da frana, per la programmazione degli eventi di difesa del suolo e la pianificazione territoriale.

Il Progetto IFFI ha lo scopo di:

- fornire un quadro completo ed aggiornato sulla distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale secondo procedure standardizzate;
- realizzare un Sistema Informativo Territoriale Nazionale contenente tutti i dati sulle frane censite in Italia;
- offrire uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale.

La metodologia adottata per realizzare l'inventario si basa sulla raccolta dei dati storici e d'archivio, sull'aerofotointerpretazione e sui rilievi sul terreno.

Il progetto IFFI ha censito ad oggi oltre 460.000 frane e costituisce il primo inventario omogeneo ed aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale.

SBM: Servizio Bacini Montani

Il Servizio Bacini montani della Provincia Autonoma di Trento programma, progetta e realizza interventi di sistemazione idraulica ed idraulico-forestale nei bacini montani, torrenti, fiumi e fosse di bonifica di competenza provinciale, secondo una strategia di difesa del territorio che si ispira a criteri di sostenibilità. Essa si basa infatti sulla ricerca dell'equilibrio fra tre fattori principali: sicurezza della popolazione, protezione dell'ambiente, contenimento dei costi.

I lavori consistono in una pluralità di interventi ed opere volti alla difesa del suolo, alla correzione dei corsi d'acqua ed alla stabilizzazione dei versanti. Essi comprendono sia la realizzazione di nuove opere, sia la costante manutenzione di quelle costruite in passato ed i lavori necessari a garantire la funzionalità degli alvei.

Il Servizio amministra e gestisce il demanio idrico provinciale e la relativa polizia idraulica e collabora con le strutture competenti alla vigilanza e al contenzioso.

Inoltre:

- redige la cartografia provinciale relativa ai pericoli idrogeologici connessi ai processi torrentizi e fluviali;
- svolge attività di prevenzione ed al pronto intervento per calamità pubbliche;
- cura l'informazione ai cittadini in merito ai pericoli derivanti dagli eventi alluvionali, alle strategie provinciali per la gestione del rischio ed alla propria attività.

Primo filtro: informazioni disponibili

L'archivio dati è composto di 3486 eventi. La Tabella. 3.3 riassume l'abbondanza degli eventi in base alla tipologia. Sul totale degli eventi abbiamo isolato gli eventi catalogati come *colata detritica, frana, scivolamento rotazionale, scivolamento traslativo e piena iperconcentrata* ottenendo un dataset di 2284 eventi. La Figura 3.3 mostra la localizzazione degli eventi così individuati.

<i>Tipologia</i>	<i>n°</i>
Colata detritica	1159
Frana	1100
Piena liquida	738
Piena liquida con trasporto solido	276
Allagamento	98
Alluvione	85
Piena iperconcentrata	19
Scivolamento traslativo	5
Nubifragio	3
Valanga	2
Scivolamento rotazionale	1
<i>TOTALE</i>	3486
	2284

Tabella 3.3: abbondanza degli eventi in archivio per tipologia

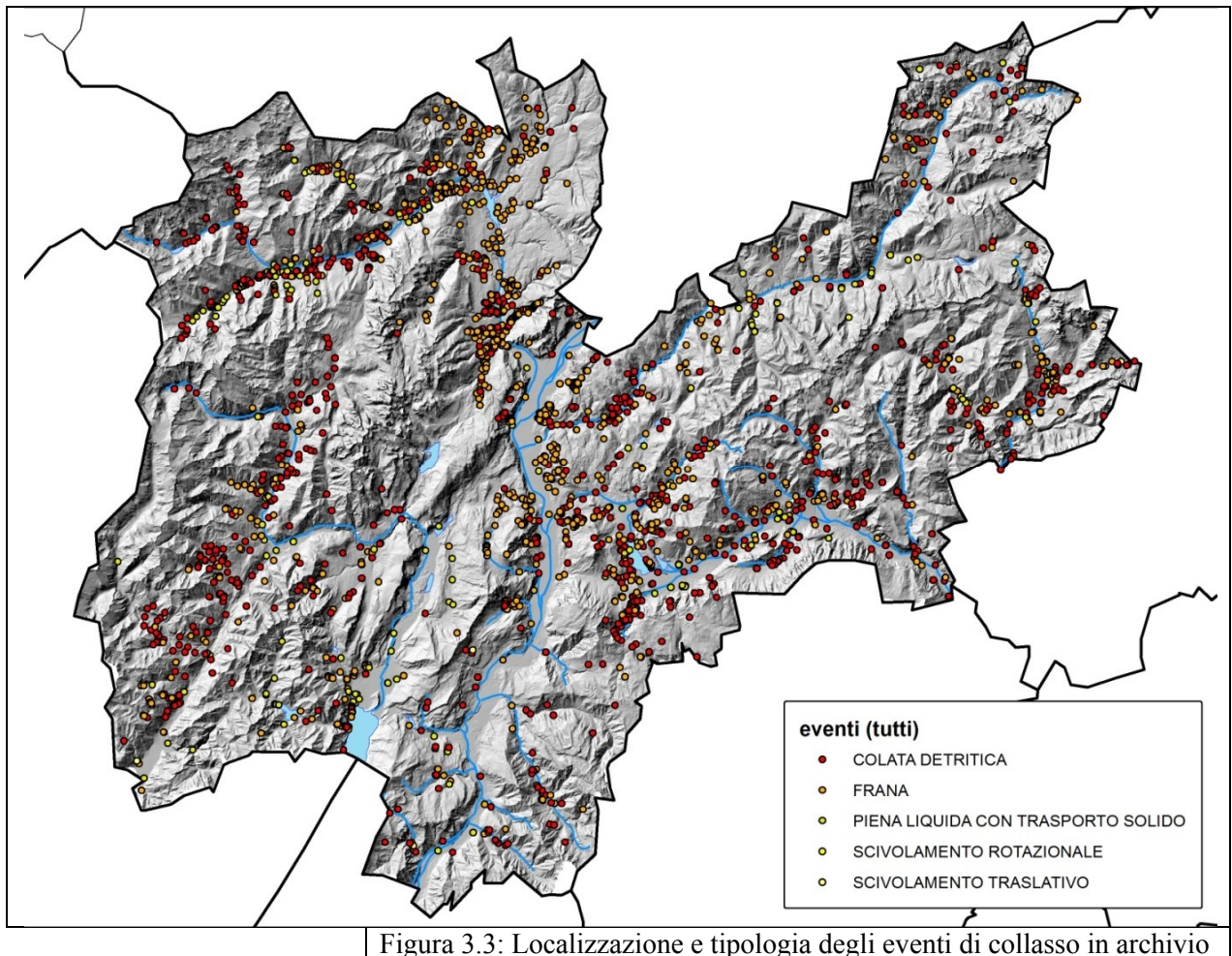


Figura 3.3: Localizzazione e tipologia degli eventi di collasso in archivio

Gli eventi identificati come *colata detritica*, *frana*, *scivolamento rotazionale*, *scivolamento traslativo* o *piena iperconcentrata* sono stati filtrati in modo da escludere:

- eventi con data *incerta*;
- eventi antecedenti al 1990;
- eventi successivi al 2009;
- eventi per i quali è noto solamente l'anno o il mese di accadimento;

Secondo filtro: evento meteorico innescante

Per ogni evento sin qui isolato si determina la serie temporale oraria di precipitazione dell'evento meteorico che l'ha determinata. Definiamo evento meteorico una precipitazione caratterizzata da iati non più lunghi di D_0 (Vedi Tabella 3.4). L'evento meteorico innescante (EMI) viene definito come l'evento a massima cumulata verificatosi sul punto di innesco in corrispondenza del giorno indicato.

La precipitazione sul punto di innesco viene calcolata ora per ora per tutto l'EMI tramite interpolazione IDW (inverse distance weighted) dei dati pluviometrici disponibili. In base a questa vengono calcolati:

- precipitazione cumulata C [mm];
- intensità di precipitazione media I [mm/h];
- durata dell'evento D [h].
- quota dello zero termico durante l'evento;

Si sono a questo punto esclusi dall'analisi:

- eventi innescati da EMI con precipitazione cumulata inferiore a C_{min} (Tabella 3.4);
- eventi innescati da EMI di durata inferiore a D_{min} (Tabella 3.4);
- eventi innescati da precipitazione solida (quota dell'isoterma T_0 (Tabella 3.4) inferiore alla quota dell'evento per almeno il 10% dell'EMI);
- eventi localizzate a una distanza superiore a d_{max} (Tabella 3.4) dalla stazione pluviometrica più vicina;

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
D_0	12 h
D_{min}	6 h
C_{min}	20 mm
d_{max}	4 km
T_0	1°C

Tabella 3.4: parametri utilizzati per le analisi

Si è ottenuto un campione di 215 eventi di dissesto, rappresentati in Figura 3.7, innescati da 46 eventi meteorici distinti.

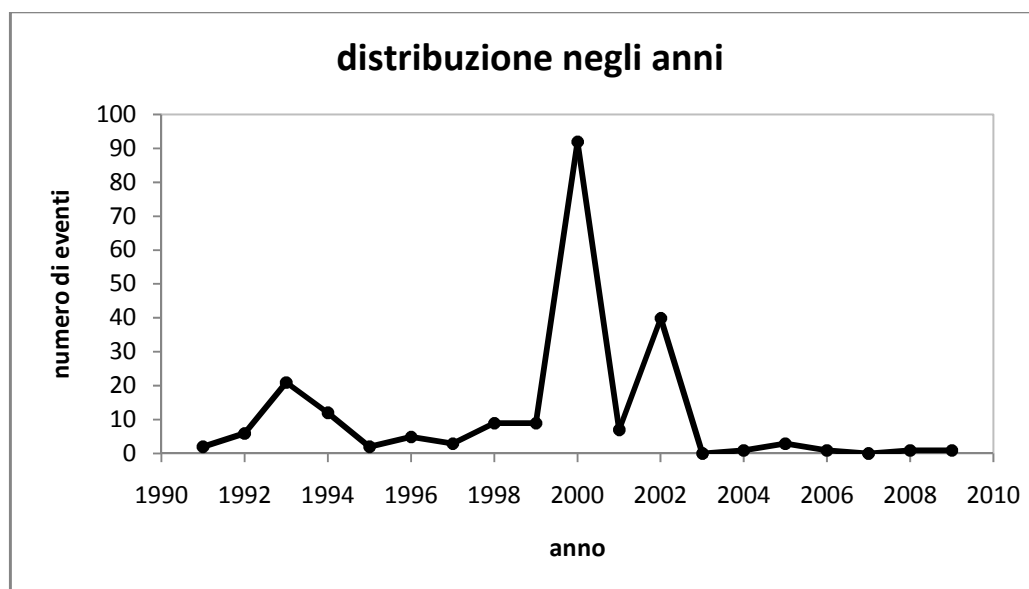


Figura 3.4: grafico della distribuzione negli anni degli eventi

<i>Anno</i>	<i>eventi</i>
1991	2
1992	6
1993	21
1994	12
1995	2
1996	5
1997	3
1998	9
1999	9
2000	92
2001	7
2002	40
2003	0
2004	1
2005	3
2006	1
2007	0
2008	1
2009	1
TOT:	215

Tabella 3.5: distribuzione degli eventi dal 1991 al 2009

Dalla Figura 3.4 si evince che gli eventi catastrofici avvenuti negli anni 2000 e 2002 incidano nettamente sulla distribuzione; in questi due anni sono avvenuti oltre il 60% del totale degli eventi archiviati (132 sui 215 totali).

La metà degli eventi analizzati ha una precipitazione cumulata che è inferiore ai 100mm fino ad arrivare ad un massimo di circa 300mm (Figura 3.5) con una durata che nell'80% dei casi risulta non superare le 80 ore (Figura 3.6).

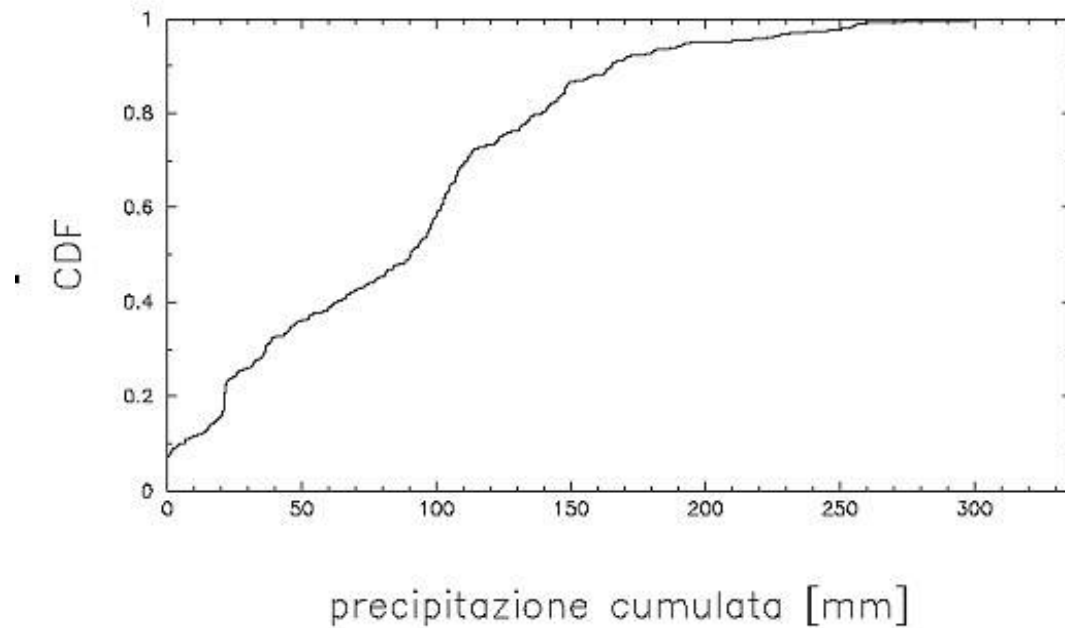


Figura 3.5: distribuzione delle precipitazioni cumulate durante gli eventi meteorici innescenti

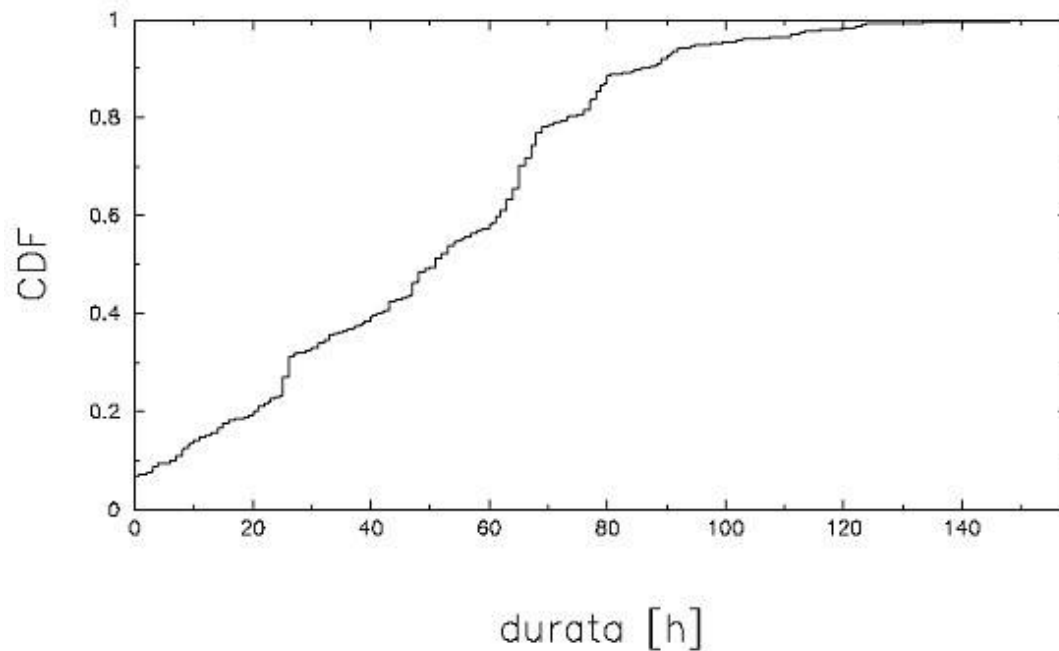


Figura 3.6: distribuzione delle durate degli eventi meteorici innescenti

3.3 Distribuzione spaziale degli eventi

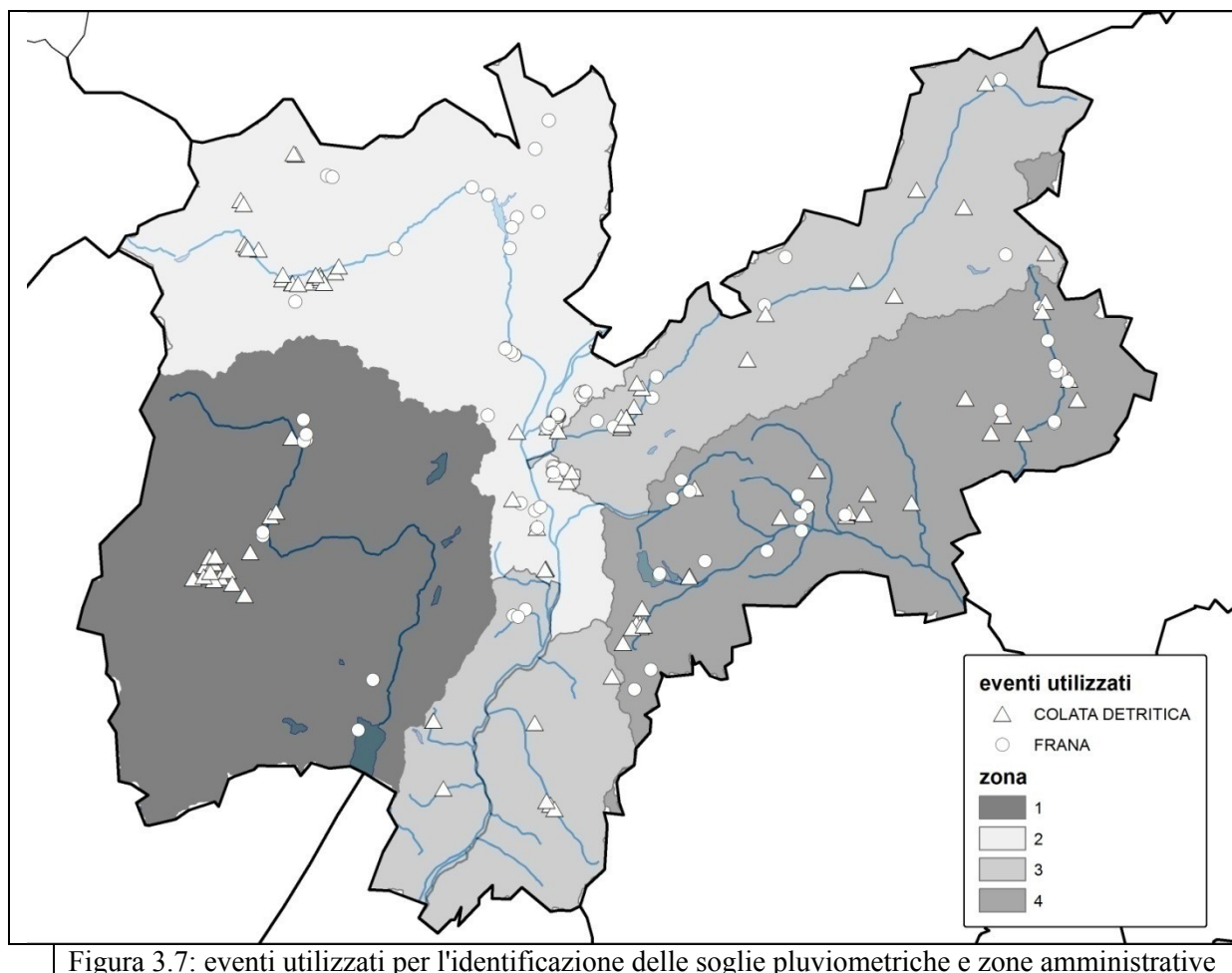


Figura 3.7: eventi utilizzati per l'identificazione delle soglie pluviometriche e zone amministrative

<i>Zona eventi</i>	
1	24
2	101
3	37
4	53

Tabella 3.6: abbondanza di eventi per zona

La Zona 2 ha avuto il maggior numero di dissesti negli ultimi 20 anni (101); la Zona comprende il bacini del torrente Noce e del fiume Adige settentrionale.

La Zona 1 dispone di pochi eventi e tutti concentrati in una piccola regione vicina alle Valli Giudicarie (Vedi Figura 3.7). Le soglie che si otterranno saranno sensibilmente meno attendibili rispetto alle altre tre.

Le altre due zone dispongono di un numero sufficiente di eventi e omogeneamente distribuiti per avere delle soglie attendibili.

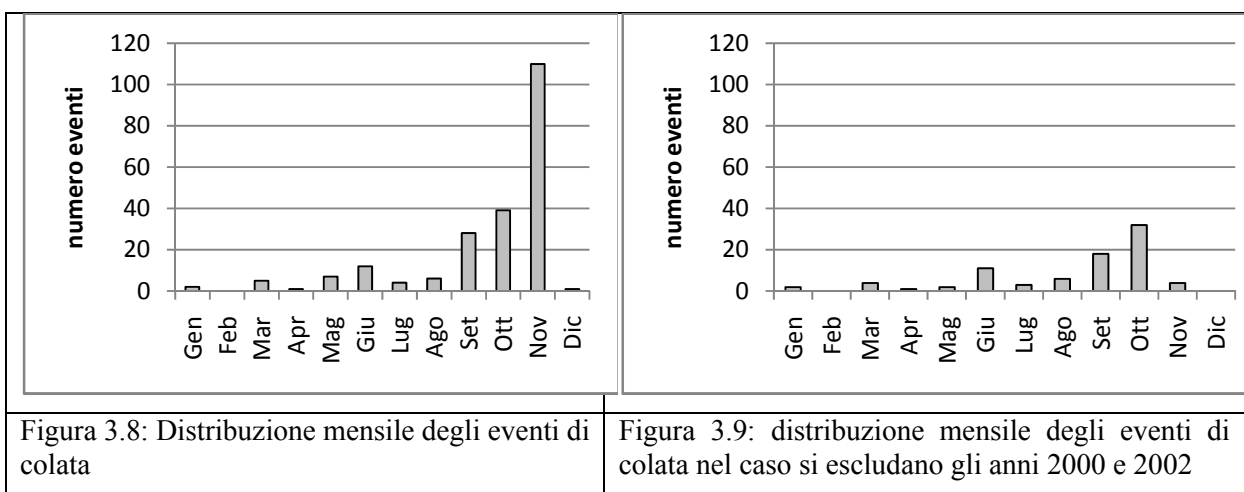
3.4 Distribuzione stagionale degli eventi

Gli eventi sono concentrati nel mese di novembre; questo è dovuto all'incremento delle precipitazioni nel periodo autunnale e all'elevata influenza dei fenomeni avvenuti nel 2000 e nel 2002.

Gen	2
Feb	0
Mar	5
Apr	1
Mag	7
Giu	12
Lug	4
Ago	6
Set	18
Oct	39
Nov	110
Dic	1
TOT	215

Tabella 3.7: eventi per ogni mese

Nella distribuzione mensile (Figura 3.8) è evidenziato nettamente un picco nel mese di novembre in cui sono avvenuti oltre 100 eventi. Anche i mesi di settembre e ottobre sono stati molto ricchi di colate detritiche e frane negli ultimi 20 anni senza però superare le 40 unità; negli altri mesi, invece, si registra un brusco calo.



Sono riportate in Figura 3.9 la distribuzione mensile degli eventi ottenuta nel caso si escludano dal computo gli anni 2000 e 2002. Il mese più “attivo” dal punto di vista degli eventi è cambiato: da novembre è diventato ottobre con poco più di 30 eventi. Queste due annate influiscono notevolmente, questo può essere imputabile a campagne di rilievo particolarmente accurate in seguito a eventi o periodi piovosi di notevole intensità e durata.

3.5 Analisi del controllo topografico

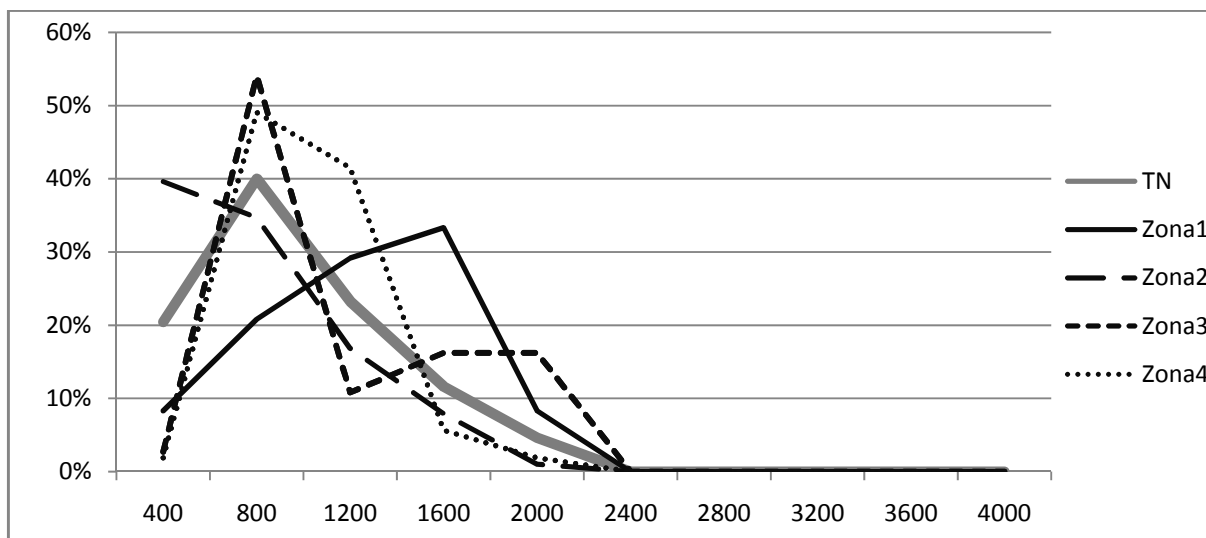


Figura 3.10: distribuzione in quota degli eventi di dissesto per l'intera provincia e per le 4 zone amministrative

Nelle quattro zone risulta esserci una distribuzione abbastanza simile degli eventi in base alla quota; l'unica eccezione è data dalla Zona 2 che ha generato il maggior numero di eventi a circa 400m di quota. Le altre 3 Zone presentano un punto di massimo attorno agli 800m, successivamente decrescono fino ad arrivare a 2400m in cui si azzerano gli eventi riscontrati.

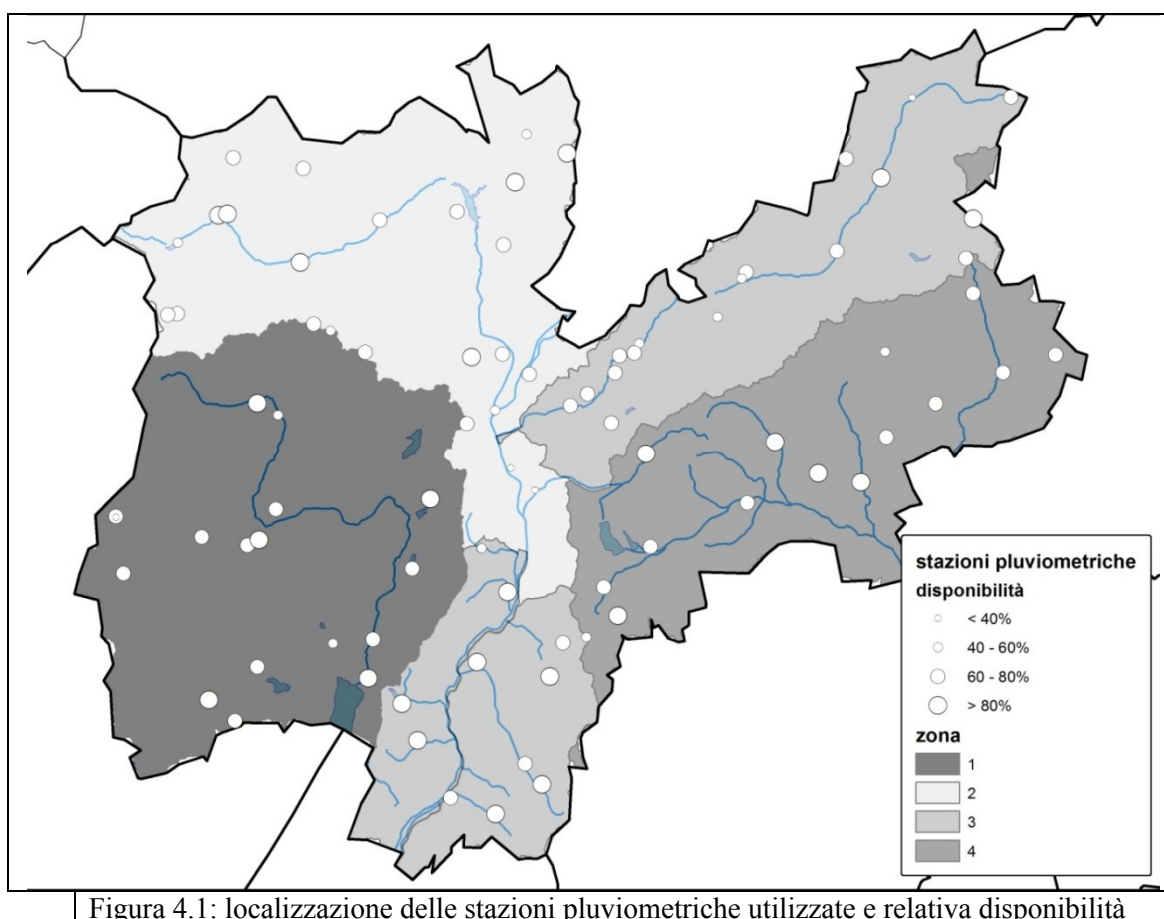
In generale, considerando tutto il Trentino si può dire che c'è un incremento di eventi salendo di quota fino a circa 800m; dopo questa quota la percentuale diminuisce.

4. Soglie pluviometriche

4.1 Analisi del database pluviometrico

I dati di precipitazione sono costituiti da misure pluviometriche e coprono la Provincia Autonoma di Trento dal 1990 al 2009 (20 anni in totale). Nella Figura 4.1 si può vedere come le stazioni pluviometriche siano distribuite abbastanza omogeneamente per coprire tutto il territorio facendo in modo che gli eventi archiviati siano localizzati in prossimità delle stazioni. Sono stati esclusi quelli che si sono sviluppati a più di 4km dalla stazione pluviometrica più vicina.

Come mostrato in Figura 4.2, le stazioni pluviometriche disponibili durante il periodo considerato variano tra le circa 10-15 di inizio anni '90 e le quasi 80 dei primi anni 2000.



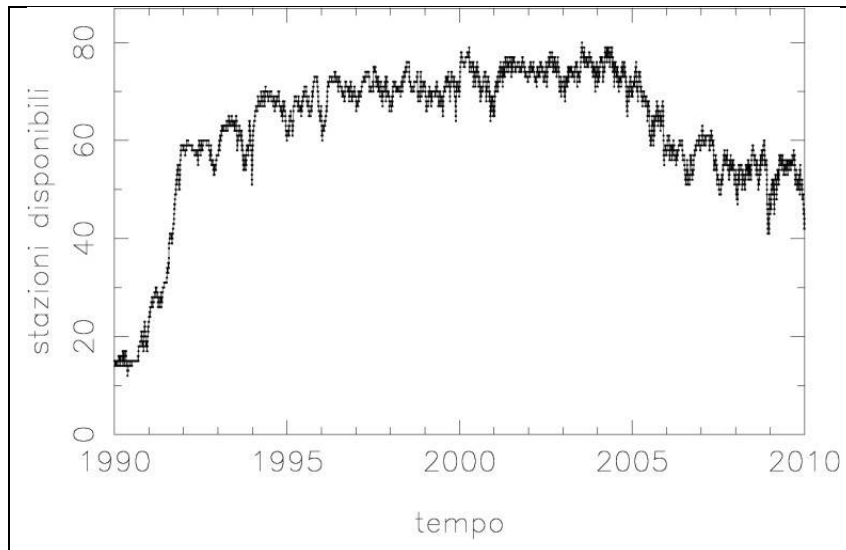


Figura 4.2: numero di stazioni pluviometriche disponibili durante il periodo di studio

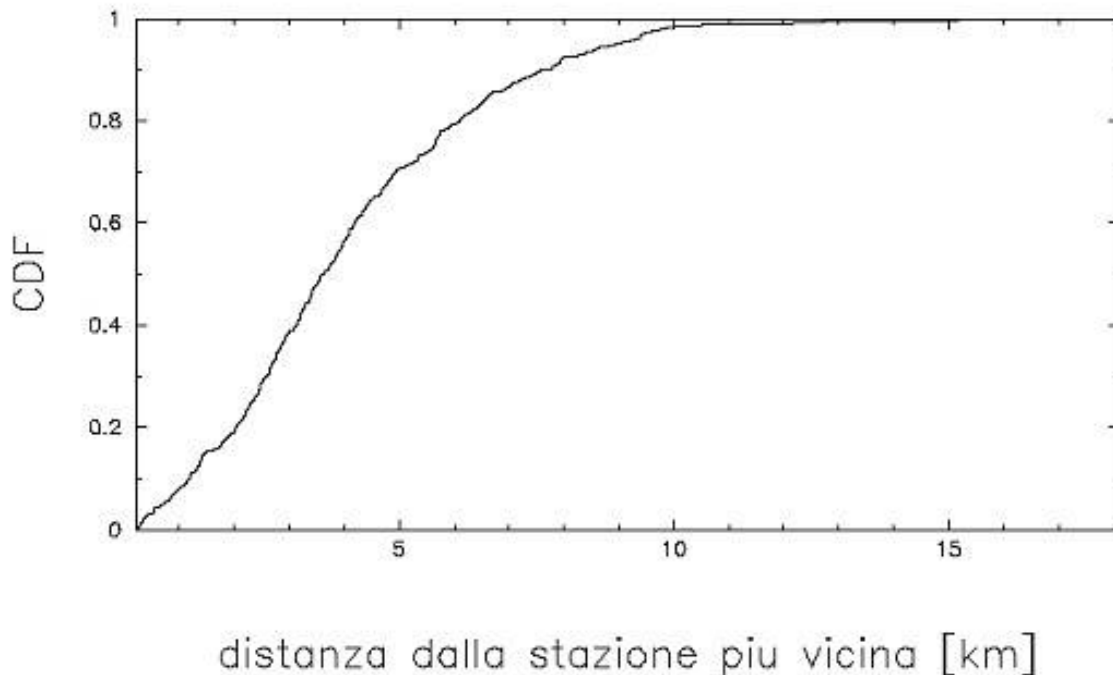
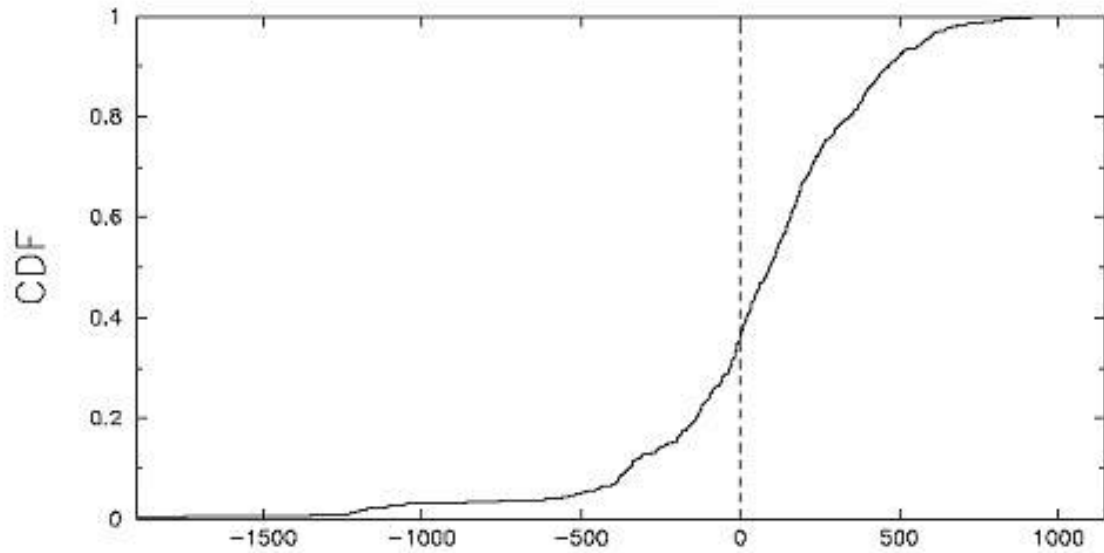


Figura 4.3: distribuzione della distanze dalla stazione pluviometrica più vicina

Confrontando la distanza dalla stazione più vicina si può vedere che quella media risulta essere inferiore ai 4km quindi con una buona sicurezza si può affermare che i dati raccolti dalla stazione pluviometrica sono affidabili (Figura 4.3). Dopo quest'analisi è stato applicato un filtro che ha rimosso tutti gli eventi che si sono sviluppati oltre i 4km di distanza dalla stazione più vicina. In tal modo si intende evitare quanto più possibile i problemi di campionamento pluviometrico, specialmente per i temporali estivi, che in zona risultano avere dimensioni di scala tipiche assai ridotte (Marra, 2012; Marra *et al.*, 2013).

Nel grafico di Figura 4.4 è rappresentata la distribuzione delle differenze di quota tra eventi di dissesto e stazioni pluviometriche più vicine. Nel 60% dei casi gli eventi sono situati a quote superiori rispetto alle stazioni pluviometriche di riferimento; quasi tutti questi casi rientrano in un range di 500m.



differenza di quota tra evento e stazione piu vicina [m]

Figura 4.4: distribuzione delle differenze di quota tra eventi di dissesto e stazioni pluviometriche più vicine

4.2 Correlazione fra precipitazioni ed eventi di frana e colata detritica

Per ogni fenomeno considerato i parametri di durata e intensità media di precipitazione sono stati proiettati in grafici a scala doppio logaritmica, oltre che lineare. Per la determinazione delle curve di soglia si sono esclusi gli eventi che avessero:

- durata superiore alle 72 ore (D);
- intensità media inferiore a 1 mm/h (I).

Gli eventi utilizzati per tracciare le curve di soglia sono 138 sui 215 totali.

Si è calcolata la retta di regressione (linea sottile) per i punti in scala log-log:

$$\log(I) = A + B \cdot \log(D)$$

Si è trovata la curva di soglia mantenendo costante la pendenza e variando l'intercetta fino ad escludere solo il 5% degli eventi; le curve di soglia così ottenute sono rappresentate nelle figure con una linea marcata.

Relazione durata D e intensità media di precipitazione I per tutta la Provincia di Trento:

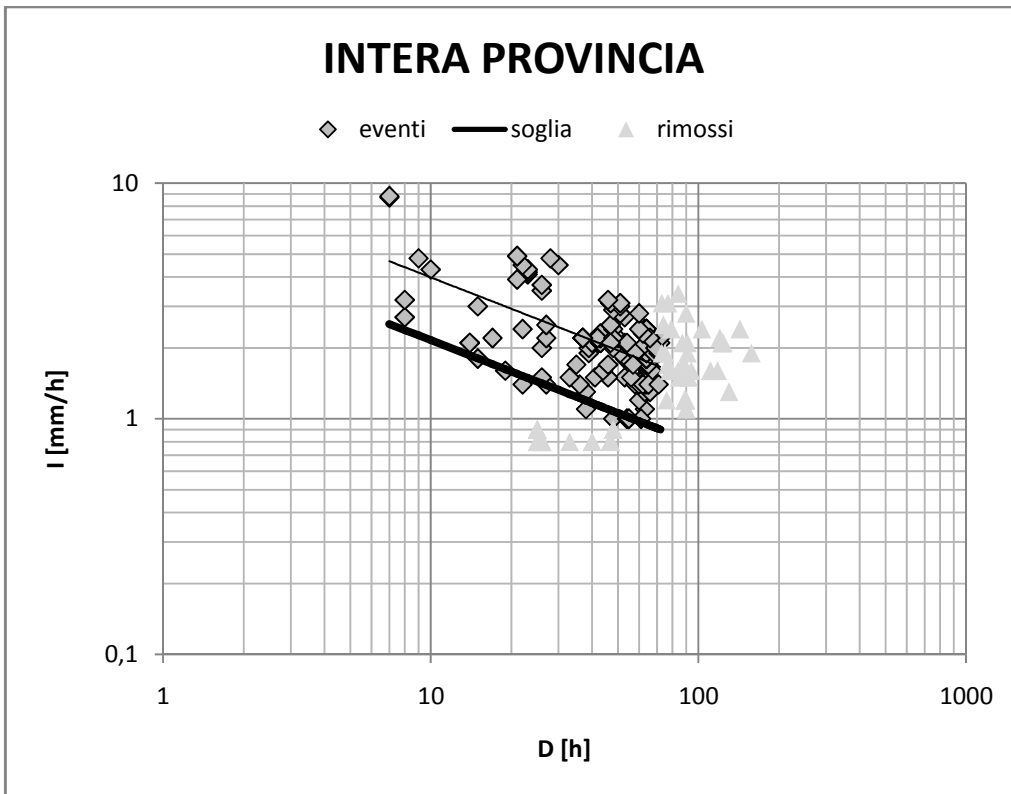


Figura 4.5: curve di innesco per l'intera Provincia, in scala doppio logaritmica

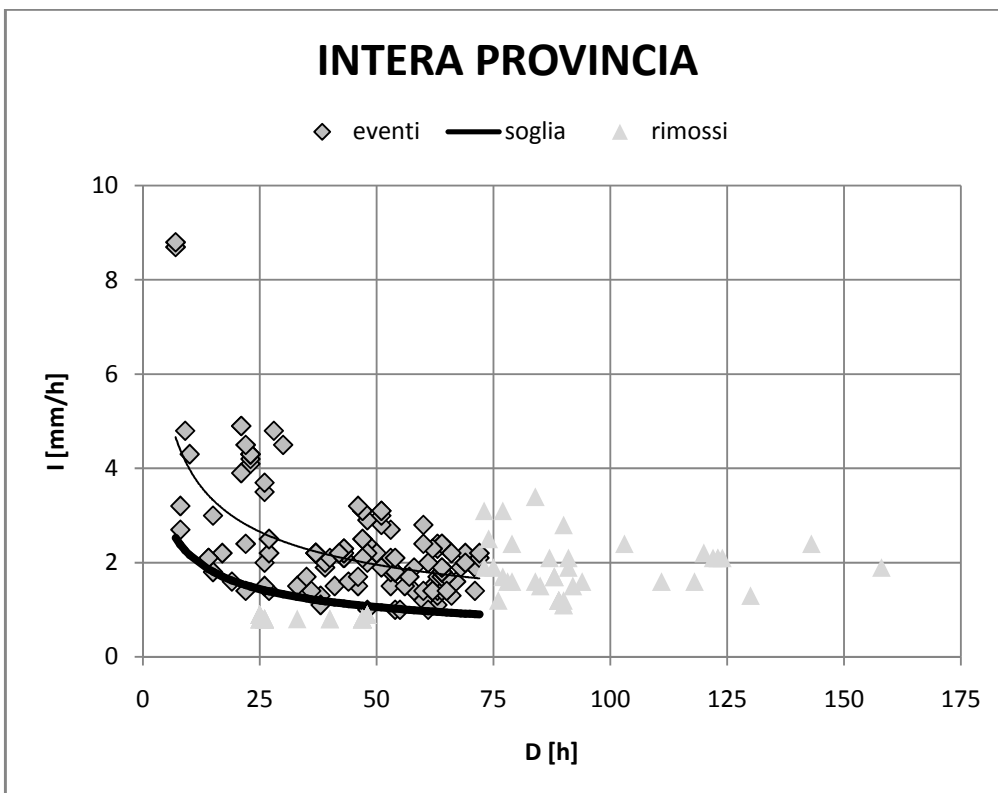


Figura 4.6: curve di innesco per l'intera Provincia, in scala lineare

Relazione durata D e intensità media di precipitazione I per la Zona 1:

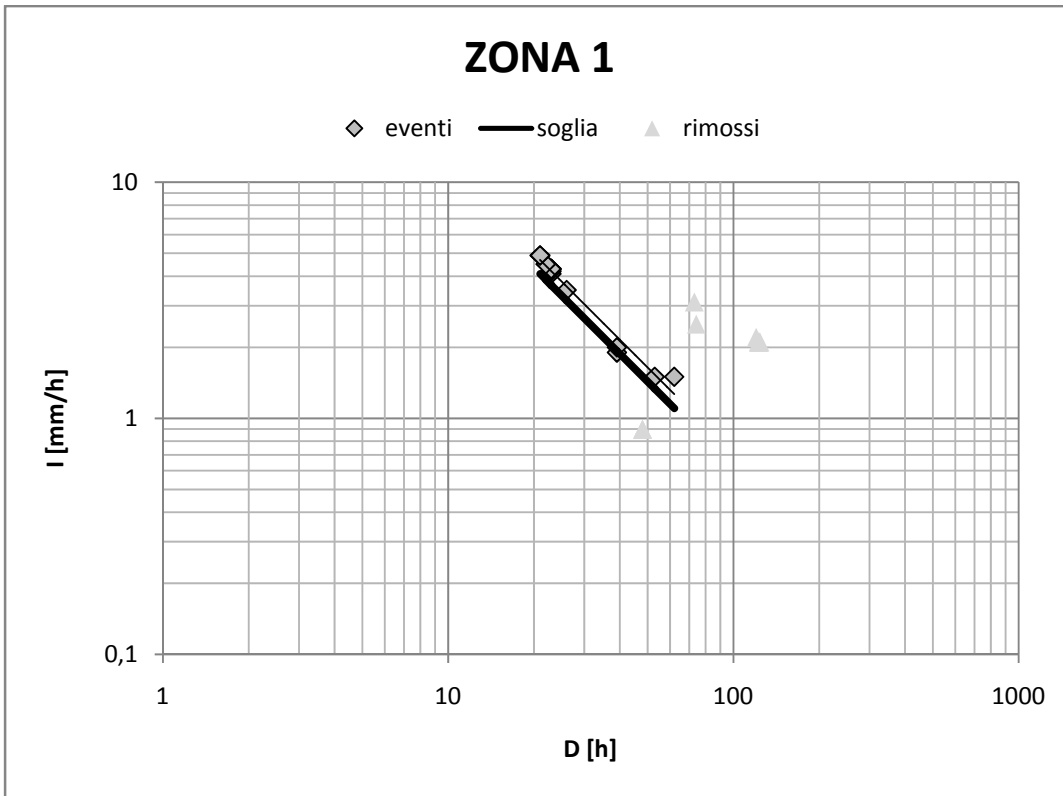


Figura 4.7: curve di innesco per la Zona 1, in scala doppio logaritmica

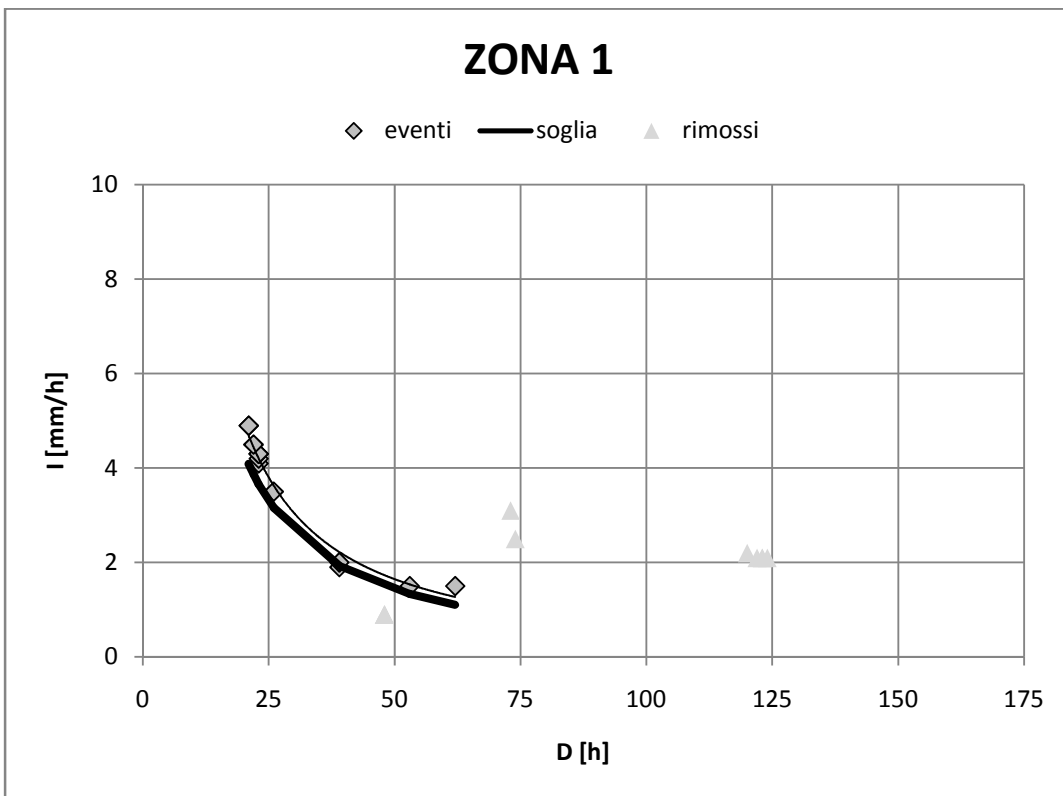


Figura 4.8: curve di innesco per la Zona 1, in scala lineare

Relazione durata D e intensità media di precipitazione I per la Zona 2:

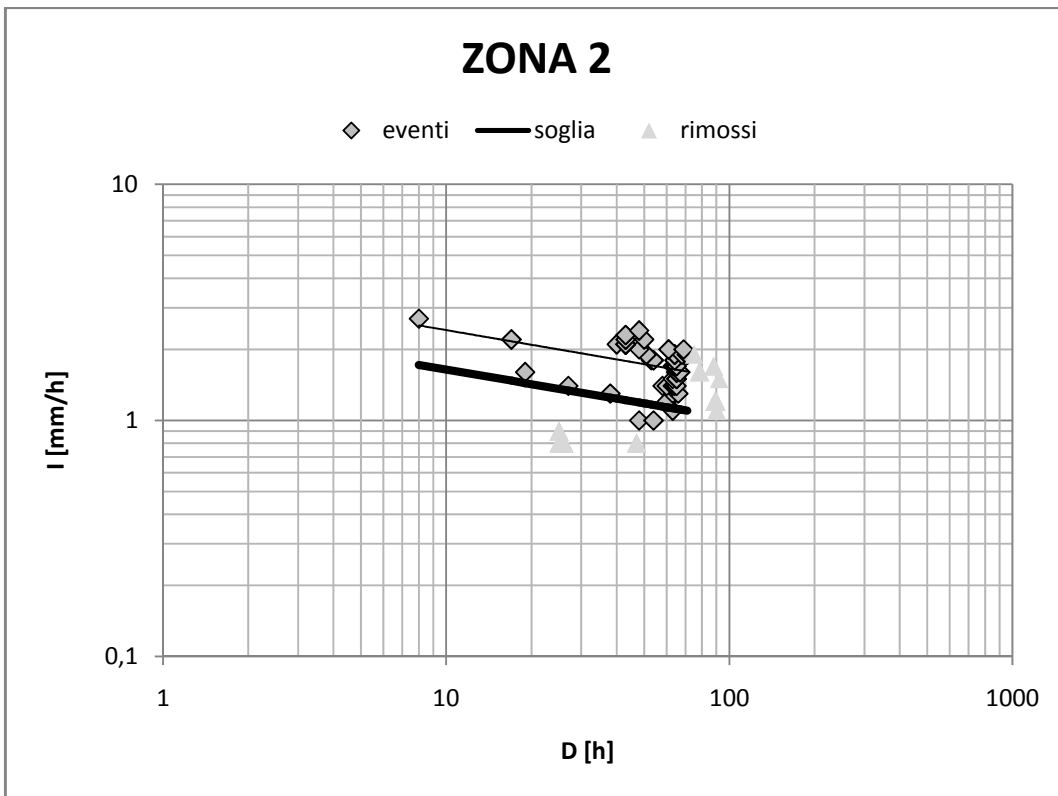


Figura 4.9: curve di innesco per la Zona 2, in scala doppio logaritmica

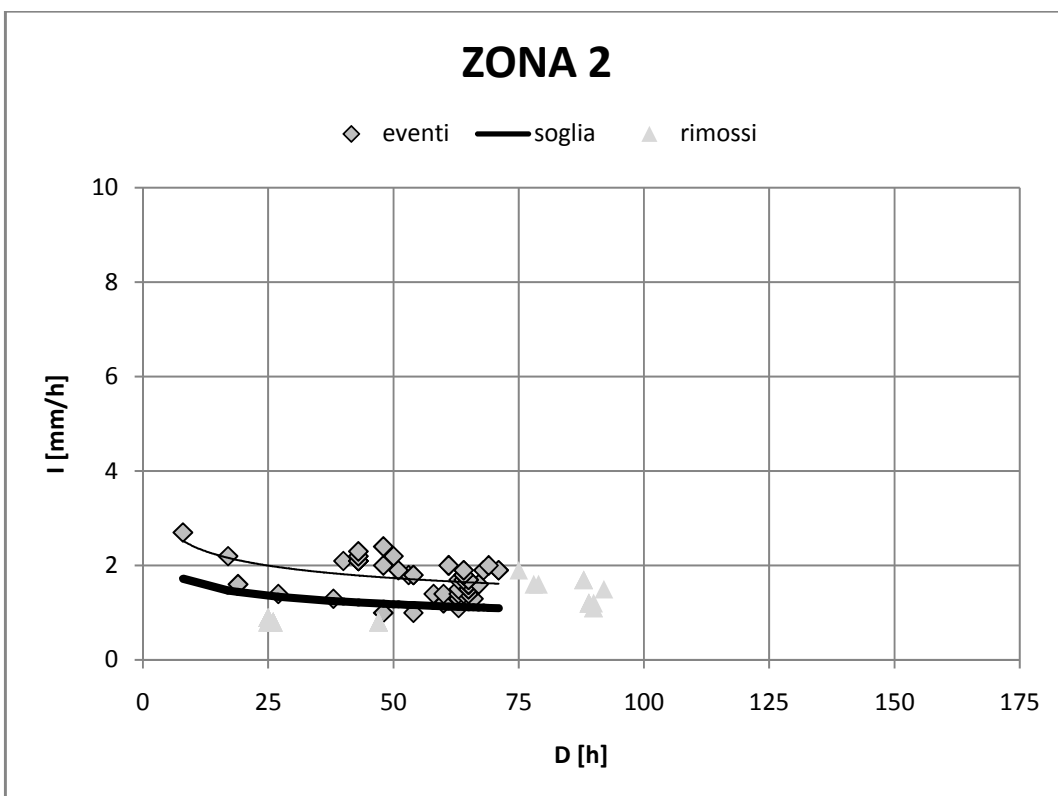


Figura 4.10: curve di innesco per la Zona 2, in scala lineare

Relazione durata D e intensità media di precipitazione I per la Zona 3:

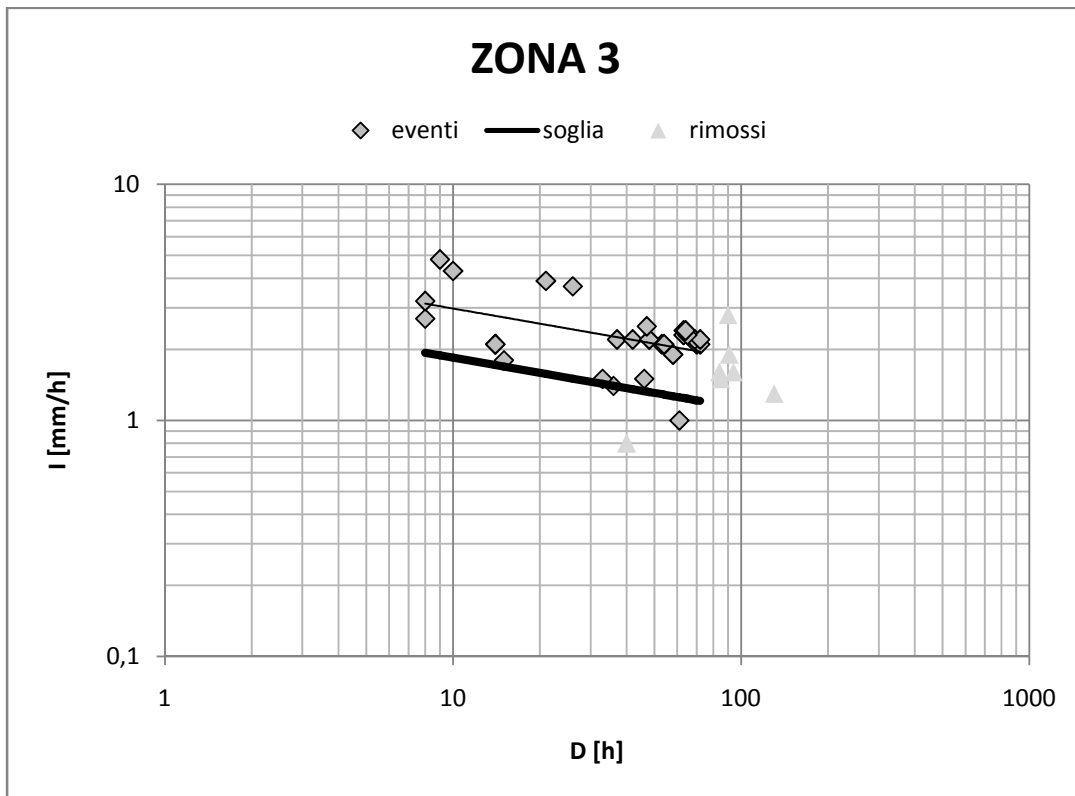


Figura 4.11: curve di innesco per la Zona 3, in scala doppio logaritmica

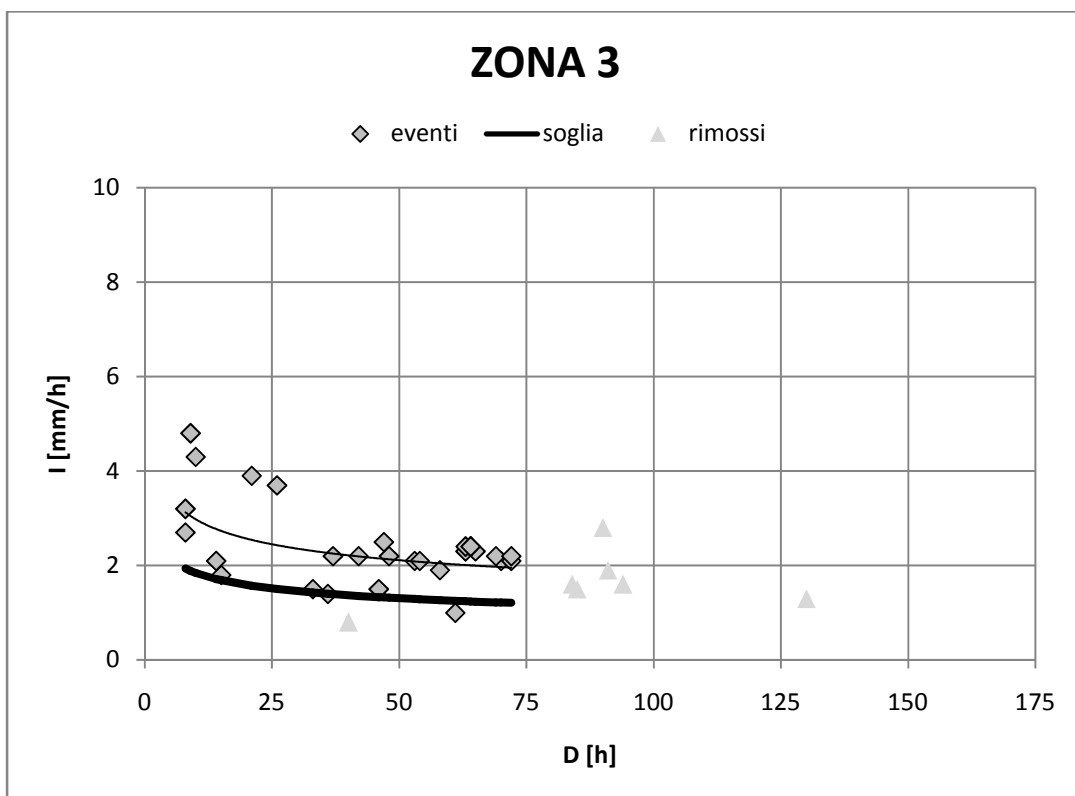


Figura 4.12: curve di innesco per la Zona 3, in scala lineare

Relazione durata D e intensità media di precipitazione I per la Zona 4:

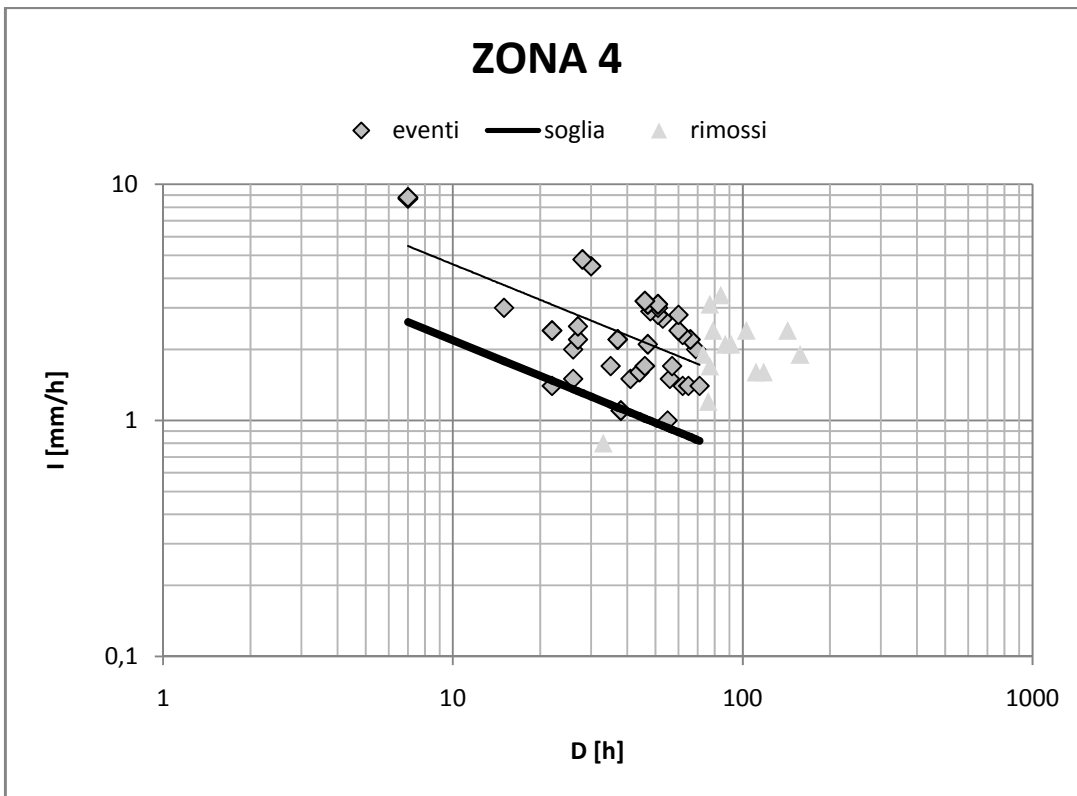


Figura 4.13: curve di innesco per la Zona 4, in scala doppio logaritmica

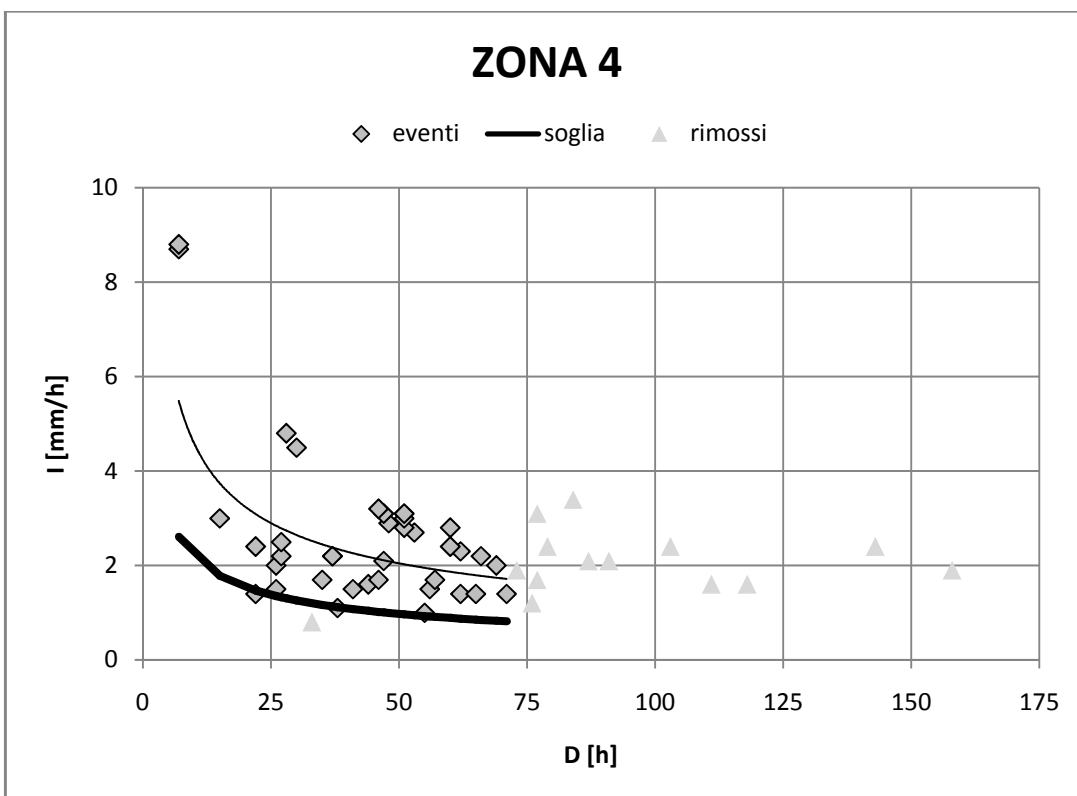


Figura 4.14: curve di innesco per la Zona 4, in scala lineare

L'utilizzo di una scala doppio logaritmica permette di confrontare adeguatamente ordini di grandezza differenti, è utile però far notare come la scelta di una determinata relazione tra le variabili I e D sia indipendente da criteri geologici, geomorfologici o meteorologici (Crosta and Frattini, 2001). La scelta di una relazione di potenza è quindi comoda poiché si traduce in una relazione lineare quando osservata in scala doppio logaritmica.

La curva di soglia pluviometrica, posta in modo da escludere il 5% degli eventi, risulta una retta parallela alla retta di regressione e quindi avrà la stessa pendenza.

Se le rette fossero orizzontali significherebbe che al variare della durata, l'intensità media di precipitazione sarebbe costante. Invece, se le rette fossero verticali, la durata sarebbe costante per ogni valore di intensità media di precipitazione.

Come atteso si sono ottenute delle rette con pendenza negativa; questo significa che all'aumentare della durata dell'evento, diminuisce l'intensità media della precipitazione in mm/h. Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori delle pendenze (B) di tutte le quattro zone e della Provincia in generale.

	TN	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
B	-0,44	-1,21	-0,20	-0,23	-0,50

Tabella 4.1: valori della pendenza (parametro B)

Per la Zona 1 la retta risulta più pendente rispetto alle altre zone, bisogna però ricordare che il numero di eventi disponibili per questa Zona è molto scarso (Vedi Tabella 3.6) e le curve ottenute sono quindi meno attendibili.

Le Zone 2 e 3 mostrano pendenze delle curve di soglia simili, mentre la Zona 4 ha una pendenza leggermente superiore.

4.3 Curve di soglia pluviometrica proposte

Abbiamo assunto come curva di soglia la legge di potenza

$$I = \alpha \cdot D^{-\beta}$$

dove I è l'intensità di precipitazione media (mm/h) e D la durata dell'evento precipitativo (h). α è una costante di scala e β è il parametro di forma che definisce la pendenza della legge di potenza.

I grafici in scala logaritmica dei dati raccolti sono stati interpolati tramite relazioni lineari del tipo:

$$\log(I) = A + B \cdot \log(D)$$

Da queste, tramite le proprietà dei logaritmi, possiamo ricavare i parametri delle relazioni di potenza $\alpha = 10^A$ e $\beta = -B$.

I dati del Trentino e delle quattro zone analizzati hanno fornito i valori di α e β riportati in Tabella 4.2.

	α	β
Trentino	5.98	0.44
Zona 1	162.2	1.21
Zona 2	2.63	0.20
Zona 3	3.02	0.21
Zona 4	6.92	0.50

Tabella 4.2: soglie di innesco individuate

Possiamo ora confrontare i valori ottenuti in questo lavoro con quelli riassunti da Guzzetti *et al.* 2008 (Vedi Tabella 4.3).

<i>Autore</i>	<i>Curva di soglia</i>
Caine 1980	$I=14.82 D^{-0.39}$
Innes 1983	$I=4.93 D^{-0.50}$
Clarizia et al. 1996 (solo frane)	$I=10 D^{-0.77}$
Crosta and Frattini 2001	$I=0.48+7.2 D^{-1.00}$
Cannon and Gartner 2005	$I=7.00 D^{-0.60}$
Guzzetti et al. 2008	$I=2.20 D^{-0.44}$
Guzzetti et al. 2008	$I=2.28 D^{-0.20}$
Guzzetti et al. 2008	$I=0.48 D^{-0.11}$

Tabella 4.3: curve di soglia in letteratura (da Guzzetti *et al.* 2008)

In Tabella 4.3 sono riportati diversi parametri di curve di soglia pluviometrica relative a frane e colate detritiche reperibili in letteratura (Guzzetti *et al.* (2008)). I parametri variano all'interno del range seguente:

$$0.48 \leq \alpha \leq 14.82 \quad 0.11 \leq \beta \leq 1$$

I valori di α e β ottenuti per il Trentino sono ottimamente compatibili con quelli in letteratura con l'eccezione della Zona 1, della quale però avevamo pochi dati (Vedi Tabella 4.2).

5. Conclusioni

Obiettivo principale del presente lavoro di tesi è la definizione di curve di soglia pluviometrica per l'innescò di frane e colate detritiche per il territorio della Provincia Autonoma di Trento. Le curve di soglia pluviometrica per l'innescò di frane e colate detritiche più frequentemente utilizzate nella letteratura recente sono relazioni di potenza del tipo $I = \alpha \cdot D^{-\beta}$. Si è quindi mirato ad ottenere i parametri di tale relazione sia per l'intera Provincia sia per le 4 zone amministrative in cui la provincia è suddivisa.

Si sono sintetizzate le informazioni sugli eventi di dissesto registrati in diversi archivi ottenendo un database uniforme di eventi di frana e colata detritica per il periodo 1990-2009.

Si sono quindi individuati gli eventi precipitativi innescanti ciascun evento di dissesto, e si sono isolati quelli che fossero caratterizzati da sufficiente informazione pluviometrica, determinando, per ognuno di essi, durata ed intensità media di precipitazione.

Si sono quindi determinati i parametri della curve di soglia per la Provincia Autonoma di Trento e , separatamente, per le 4 zone amministrative in cui è suddivisa la Provincia utilizzando un approccio di tipo frequentistico.

I parametri ottenuti risultano in ottimo accordo con la letteratura, con l'eccezione della Zona 1; ricordiamo però il numero di eventi a disposizione per questa zona è estremamente ridotto: questo va ad influire negativamente sulla precisione della stima.

Le curve di soglia pluviometrica prodotte nell'ambito di questo lavoro di tesi sono state fornite alla Provincia Autonoma di Trento tramite rapporto tecnico.

Bibliografia

- Aleotti, P.: A warning system for rainfall-induced shallow failures, in "Engineering Geology", 73, pp. 247-265, 2004.
- Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (Eds.): Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 10th edn., National Bureau of Standards, John Wiley and Sons, 1972.
- Bacchini, M., Zannoni, A.: Relation between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy), in "Natural Hazards and Earth Sciences (2003)", EGU, 2003, 3, pp.71-79, 2003.
- Bertolo, P. and Bottino, G: Individuazione delle soglie pluviometriche d'innescio di fenomeni franosi superficiali in funzione delle condizioni idrologiche locali – Analisi di alcune situazioni rappresentative nell'arco alpino occidentale, in "GEAM-Geoingegneria Ambientale e Mineraria", 1-2, marzo-giugno 2006, pp. 45-57, 2006.
- Bottino, G., Crivellari, R. and Mandrone, G.: Eventi pluviometrici critici e dissesti: individuazione delle soglie d'innescio di colate detritiche nell'Anfiteatro morenico di Ivrea, in: Luino F. (Ed.), La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica, Alba, 5-7 novembre 1996, vol. 2, n. pubbl. GNDCI 1600, pp. 201-210, 1996.
- Brand, E.W.: Landslides in Southeast Asia: a state-of-the-art report, in Proceeding of the 4th International Symposium On Landslides, Toronto, pp. 17-59, 1984.
- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., and Guzzetti, F.: Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2010.
- Caine, N.: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geogr. Ann. 62: 23-27, 1980.
- Campbell, R.H.: Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. In: US Geological Survey Professional Paper 851. Washington DC: U.S. Government Printing Office, 51 pp, 1975.

- Cannon, S.H. and Gartner, J. E.: Wildfire- related debris flows from a hazards perspective. In: Jakob, M. Hungr, O. (eds) Debris flows hazards and related phenomena. Springer, Berlin, pp 363-385, 2005.
- Ceriani M., Lauzi S. and Padovan N.: Rainfalls and landslides in the alpine area of Lombardia Region, Central Alps, Italy, in Proceedings of the International Symposium “Intrapraevent 1992”, Bern, pp.9-20, 1992.
- Ceriani M., Lauzi S. and Padovan N.: Rainfall thresholds triggering debris-flow in the alpine area of Lombardia Region, central Alps – Italy, in Proceedings of “Man and Mountain”, I Convegno Internazionale per la Protezione e lo Sviluppo dell’ambiente montano, Ponte di Legno (BS), pp. 123-139, 1994.
- Chiarle M., Iannotti S., Mortara G. and Deline P.: Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps, in “Global and Planetary Change”, 56, pp. 123-136, 2006.
- Clarizia, M., Gullà, G., Sorbino, G.: Sui meccanismi di innesco dei soil slip. International conference Prevention of hydrogeological hazards: the role of scientific research. 1:585-597 (in Italian), 1996.
- Crosta, G. B. and Frattini, P.: Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow, in: Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms, edited by: Mugnai, A., Guzzetti, F., and Roth, G., Siena, Italy, 463–487, 16–18 October 2001.
- Crozier, M. J.: Magnitude/frequency issues in landslide hazard assessment. In: Mausbacher, R. and Schulte, A. (Eds) Beitrage zur Physiogeographie. Barsch F estschrift, Heidelberger Geographische Arbeiten. Heft 104, p. 221-236, 1996.
- Curry, R.R.: Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, Central Colorado, in “Geological Society of America Bulletin”, 77, pp. 771-776, 1966.
- Dip. Territorio Ambiente Foreste, Rapporto ambientale 2012
- Dragogna, G.: Trasporto di massa e briglie selettive. Interpraevent, Innsbruck, 75-89, 1975.
- Giannecchini, R.: Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy), in “Natural Hazards and Earth System Sciences”, EGU, 6, pp. 357-364, 2006.

- Govi, M.: L'assetto geomorfologico nella valutazione dei rischi connessi ad eventi idrologici estremi, in Atti del Seminario "La pianificazione di bacino", Genova, pp. 5-38, 1979.
- Govi M. and Sorzana P.F.:, Landslide susceptibility as a function of critical rainfall amount in Piedmont basin (Northwestern Italy), in "Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica", Krakow, 14, pp.43-61, 1980.
- Govi, M., Mortara, G., Sorzana, P.F.: Crues et laves torrentielles avec des consequences humaines graves ou catastrophiques dans les Alpes Italiennes, 25th Congr. Int. Geographie "Les Alpes", Parigi, Francia, 31-39, 1984.
- Govi, M., Mortara, G., Sorzana, P.: Eventi idrologici e frane. *Geologia Applicata & Ingegneria* 20(2): 359-375, 1985.
- Govi, M., Marchi, L., Mortara, G., Turitto, O.: Ricerche sulle colate detritiche torrentizie (debris flow) in ambiente alpino, Rapporto 1990/91, CNR-GNDICI, Roma, 405-420, 1992.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P.: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2007.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P.: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides*, 2008.
- Innes, J. L.: Debris flows. *Prog. Phys. Geogr.* 7:469-501, 1983.
- Jakob, M.: A size classification for debris flows, in "Engineering Geology", 79, pp. 151-161, 2005.
- Johnson K.A. and Sitar N.: Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation, in "Canadian Geotechnical Journal", 27, pp. 789-901, 1990.
- Luino, F.: Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the northern Italy, in "Geomorphology", 66, pp. 13-39, 2005.
- Marchi, L., Pasuto, A., Silvano, S., Tecca, P.R.: Nota su alcuni eventi alluvionali verificatisi durante il 1989 nell'Italia Nord-orientale, *Bollettino dell'Associazione Mineraria Subalpina*, 27(1-2), 205-228, 1990.

- Marra, F.: Procedura integrata di analisi e correzione delle osservazioni radar per la stima di precipitazioni intense in ambiente alpino. PhD thesis, Università degli Studi di Padova, 2012.
- Marra, F., Borga, M., Creutin, J.D.: Precipitation thresholds and debris flow warning: comparing gauge versus weather radar detection. European Geosci. Union (EGU) General Assembly 2013, Wien (A), April 2013
- Morgenstern N.R. and De Matos M.M.: Stability of slopes in residual soils, in Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, pp. 367-383, 1975.
- Mortara, G., Sorzana, P.F., Villi, V.: L'evento alluvionale del 6 agosto 1985 nella valle del fiume Inarco tra Fortezza ed il passo del Brennero (Alto Adige), Memorie di Scienze Geologiche, 38, 427-457, 1986.
- Okuda S., Suwa H., Okunishi K., Nakano M. and Yokoyama K.: Synthetic observation on debris flow, Part 3, observation at Valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1976, in "Disaster Prevention Research Institute Annuals", Kyoto University, 20B-1, pp. 237-263, 1977.
- Rapelli, F.: Definizione delle soglie pluviometriche d'innescio di frane superficiali e colate torrentizie: accorpamento per aree omogenee, 2008.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., and Guzzetti, F.: Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy), Environm. Geol., 35(2-3), 146-159, 1998.
- Sassa, K.: The mechanism starting liquefield landslides and debris flow, Proc. Int. Symp. Landslides, Toronto, Canada, 2, 349-354, 1984.
- Scott, D. W.: Multivariate Density Estimation, in: Theory, Practice and Visualization, Wiley, New York, 1992.
- Silverman, B.W.: Density Estimation, Chapman and Hall, London, 1986.
- Takahashi, T.: Debris flow, in "Annual Review Fluid Mechanics", 13, pp. 57-77, 1981.

Varnes, D. J.: Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33, 1978.

Venables, W. N. and Ripley, B. D.: Modern Applied Statistics with S, Springer, New York, 2002.

Wieczorek G.F.: Effect of rainfall intensity and duration on debris flow in central Santa Cruz mountains, California, in Debris Flow/Avalanches: process, recognition and migration. Reviews in Engineering Geology, Volume VII, Geological Society of America, Boulder, Colorado, 1987.

Sitografia

<http://www.protezionecivile.fvg.it>

<http://edit.protezionecivile.tn.it/>

Ringraziamenti

Il mio primo pensiero va a ringraziare il professor Borga e il dott. Marra per tutta la disponibilità mostrata in questi mesi di lavoro e per il prezioso aiuto fornito nella stesura della presente tesi.

Un sentito ringraziamento è dovuto poi alla mia famiglia che mi ha permesso di proseguire gli studi e che tutt'ora mi mantiene: grazie mamma e papà che mi sostenete in tutto ciò che faccio e mi avete insegnato a lavorare sodo per ottenere dei risultati. Ringrazio la Sorella per essermi stata sempre vicina e per aver rappresentato un punto certo per tutta la mia vita: quante *beghe* e *pache* ma sotto sotto con tanto amore.

Come non ringraziare anche Lia, la mia fidanzata nonché compagna di tanti momenti, che con estrema pazienza mi ha sopportato e mi sopporterà in ogni periodo difficile della vita.

Ripercorrendo la mia strada, non posso fare a meno di pensare a quanti hanno condiviso parte della vita con me. Un grazie speciale va alla brigata *Extreme bikers* temuta dai peggiori campeggi di tutt'Europa, con loro ho potuto vivere momenti belli ma anche molti momenti duri: fisicamente e non solo! Dopo aver superato Monaco 2010, Corsica 2011 e Bregenz 2012 mi ritengo immortale. Christian (*StivoMan*), Elia (colui che non si ferma mai), Gatti (il passista), Simoncelli (*el Sic*) e Giordi (lo sciatore *brentegano*): per fortuna ci siete voi, altrimenti bisognerebbe inventarvi.

Come non ringraziare tutti coloro che hanno condiviso questo periodo universitario: grazie a tutti i miei compagni con cui ho trascorso molte giornate di studio e non: esami preparati in garage al fresco, sui Colli Euganei, all'IKEA, nei centri commerciali,...ogni posto era buono per "studiare"! Grazie Lollo, Corra per tutti i momenti condivisi, grazie anche a Mattia da Bovolone per l'ospizio all'Interno 3: quell'appartamento le ha viste proprio tutte: dalle calate in corda doppia alle discese in snowboard.

Un grazie va anche ai colleghi universitari un po' strani: come non citare Lucio (*Loza*), secondo solo a Bear Grylls in quanto a catture di insetti; Baggia, ragazzo di Piscine (frazione di Sover) rimasto traumatizzato fin da giovane per la tecnologia sviluppata in fondovalle; Oss, Torre e Mattia da Volano grandi compagni di feste e serate. Una breve ma importante comparsa è stata fatta anche dal "gruppo Pejo", da molto tempo dati per dispersi. Siete stati tutti fondamentali per trascorrere questi 3 anni in terra veneta: un gran bel gruppo di Trentini in quel di Padova! Ora basta solo convincervi a continuare anche per i prossimi due anni.

Grazie anche all'amico abruzzese Isma con cui ho trascorso tutto il primo anno ma dopo, per forze maggiori, ti ho perso per la Spagna. Fai un fischio quando torni! Grazie anche a Daniel, vicino di casa durante il secondo anno e compagno di qualche allenamento in terra padovana.

Grazie alla squadra *Zip ai Tordi* capitanata da Vale che dopo averci conosciuti meglio ha deciso di fare veterinaria in quel di Legnaro: finalmente qualcuno che potrà curarci. Come non citare la coppia d'attacco Enrico e Daniele sempre insieme, un po' come il gatto e la volpe. Grazie anche a Balde, l'informatico della situazione, che mi ha riparato il PC. Grazie per averci prestato la tenda un paio di anni fa, non ti preoccupare... gli ultimi pezzi arriveranno a breve!

Grazie al gruppo di atletica con il saggio coach Pedri; Silvano, compagno di qualche allenamento e capace di sparire dalle ciclabili per mesi per poi ripresentarsi come niente fosse; poi come non citare i "Fratelli Lumière" Ezio ed Efrem che appena l'orologio scocca le 19:00 appoggiano chiavi inglesi, cacciaviti e martello per indossare la divisa del CRUS e sfrecciare di corsa.

Infine ringrazio i vigili del fuoco di Villa Lagarina: un grande gruppo in cui ho dato ed appreso molto in questi ultimi 5 anni... finalmente è arrivata la botte!