# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione del parametro scabrezza per analisi speditive nella modellazione del fenomeno di caduta massi



## Relatore

Prof.ssa Monica Barbero

Prof.ssa Marta Castelli

Ing. Gianmarco Vallero

Ing. Giulia Torsello

**Candidato** Marco Migioia

# INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1	
1. IL FENOMENO DELLA CADUTA MASSI	
1.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO CADUTA MASSI	
1.2 Fase di Innesco	
1.3 FASE DI EVOLUZIONE E ARRESTO	
1.3.1 IL RUOLO DI PROTEZIONE DELLE FORESTE NEI CONFRONTI DELLA CAD	UTA MASSI15
1.3.2 RUOLO DEGLI OSTACOLI SUL VERSANTE	
1.4 SCALE DI OSSERVAZIONE E ANALISI	
1.4.1 METODI SPEDITIVI A PICCOLA SCALA	
1.5 CENNI AL CALCOLO DI PERICOLOSITA' E RISCHIO	
CAPITOLO 2	20
2. METODI DI ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL FENOMENO	20
2.1 MODELLI ANALITICI	
Coefficiente di restituzione (E)	
2.1.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE ROCKYFOR3D	24
Le traiettorie di caduta	
Forma dei blocchi	
Caduta con moto parabolico	
La dissipazione di energia	34
Calcolo della velocità di caduta	
Precisione dei valori di scabrezza della superficie in RockyFOR3D	
2.2 MODELLI GEOMORFOLOFICI	
2.3 QPROTO	
DATI DI INPUT	
DATI DI OUTPUT	
2.3.1 FUNZIONAMENTO DELL'ALGORITMO	
2.4 DISCUSSIONE SUL PROBLEMA DEI PARAMETRI DI QPROTO	
CAPITOLO 3	
3. ANALISI PARAMETRICHE SULL'INFLUENZA DELLA SCABREZZA DEL VERSANTE	SULL'ANGOLO DI ENERGY LINE
	/0
Creazione file raster di innut ner RockyEOR2D	
4. DEFINIZIONE STATISTICA DELLA SCABREZZA SUPERFICIALE DEL VERSANTE	59
4.1 VALORI DEI COEFFICIENTI DELLA CURVA REPERIBILI IN LETTERATURA	
4.1.1 ANALISI DI FREQUENZA PER LA CADUTA MASSI	
4.1.2 CICA I RICI SULLE PARE II ROCCIOSE	
4.1.3 VALUKI CUEFFICIENTI SECUNDU DIVEKSI AUTUKI	
4.1.4 DETERMINAZIONE LEGGE VOLUME-FREQUENZA PER IL CASO DI NOSU	GGIU (VC)
4.2 CUNSIDERAZIONI SUI CUEFFICIENTI DELLA CUKVA	

CAPITOLO	) 5	82
5. APPI	LICAZIONE AL CASO STUDIO DI NOSUGGIO (VC)	82
5.1	INDIVIDUAZIONE PENDENZA VERSANTE	
5.1	PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ANALISI	
5.2	CONFRONTO ANALISI CON ROCKYFOR-3D E QPROTO E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	
5.3	CONFRONTO ENERGIE	
6. CON	CLUSIONI	92

## **INDICE DELLE FIGURE**

Figura 1: Esempi di fenomeni di caduta massi che hanno interessato un tratto di strada	10
Figura 5: Foreste che fungono da elementi protettivi per la caduta massi	15
Figura 6: Masso arrestato sul versante (ostacolo)	16
Figura 7: Sintesi dei modelli sviluppati per la modellazione della caduta massi e alcune loro principali	
caratteristiche (modificato da Volkwein et al. 2011)	21
Figura 2: Valori di coefficiente di restituzione E (Mazzalai, Vuillermin, 1995)	22
Figura 3: Coefficienti di restituzione normale e tangenziale (Piteau e Clayton, 1976)	23
Figura 4: Coefficienti di restituzione normale e tangenziale (Hoek, 1987)	23
Figura 8: Interfaccia grafica di RockyFOR-3D (Berger e Dorren, 2007)	24
Figura 9: Descrizione generale degli 8 tipi di suolo previsti dal software RockyFOR-3D (Dorren et al.,	
2014)	26
Figura 10: Schematizzazione dell'interpretazione dell'indice MOH: definizione delle altezze degli osta	coli
a seconda della loro frequenza del 70%, 20% e 10% di distribuzione sul versante (Dorren et al., 2014)	. 27
Figura 11: Esempio di log file (Dorren et al., 2014)	31
Figura 12: Angoli di deviazione delle traiettorie rispetto alla linea di massima pendenza in relazione a	lle
velocità di caduta del masso (Dorren et al., 2006)	33
Figura 13: Valori RG proposti da RockyFOR-3D (Dorren et al., 2014)	35
Figura 14: Zone caratteristiche di un versante	37
Figura 15: Definizioni alternative dello shadow angle	37
Figura 16 : Stima degli angoli per diversi autori	38
Figura 17:Schematizzazione dell' Energy line angle	39
Figura 18: Rappresentazione 3D del Cone Method (Castelli et al., 2020)	40
Figura 19: Sezione 2D del modello del Cone Method (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)	41
Figura 20: Generica sezione di calcolo dell'algoritmo di QPROTO (Castelli et al., 2020)	44
Figura 21: Zone nascoste durante analisi di visibilità (Castelli et al., 2020)	45
Figura 22: Rappresentazioni grafiche schematiche delle elaborazioni condotte da QPROTO (Manuale	di
QPROTO, ver.1.4)	46
Figura 23: Angoli di energy line $\phi_p$ per diversi autori (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)	47
Figura 24: Creazione di pendio virtuale a 45° per RockyFOR-3D (creato su "AutoCAD")	50
Figura 25: RG10-φ <sub>p</sub> (volume 1m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	52
Figura 26: RG20-φ <sub>p</sub> (volume 1m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	52
Figura 27: RG70-φ <sub>p</sub> (volume 1m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	53
Figura 28: RG10-φ <sub>p</sub> (volume 2m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	53

Figura 29: RG20-φ <sub>p</sub> (volume 2m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	. 54
Figura 30: RG70-φ <sub>p</sub> (volume 2m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	. 54
Figura 31: RG10-φ <sub>p</sub> (volume 5m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	. 55
Figura 32: RG20-φ <sub>p</sub> (volume 5m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	. 55
Figura 33: RG70-φ <sub>p</sub> (volume 5m <sup>3</sup> ) – BLOCCO CUBICO+SFERICO	. 56
Figura 34: Esempio di distribuzione cumulativa delle frequenze per i volumi di caduta massi delle gole	
superiori dell'Arly, Francia in seguito a 59 eventi registrati su 2.2 km tra il 1954 e il 1976 (C. Dussauge-	-
Peisser et al., 2002)	. 62
Figura 35 Esempio di cicatrice di caduta massi (Corominas et al., 2017)	. 63
Figura 36: Esponenti sulla legge di potenza hanno adattato le distribuzioni ottenute per i diversi	
inventari di caduta massi (Hungr et al.,1999)	. 65
Figura 37: Nosuggio (VC), 2014. Caduta massi: 1 m <sup>3</sup> -5m <sup>3</sup>	. 66
Figura 38: Aree Nosuggio interessate dal fenomeno di caduta massi (Barbero et al., 2019)	. 67
Figura 39: Classi di volumi e CDP Nosuggio (Barbero et al., 2019)	. 68
Figura 40: Rappresentazione curva volume-frequenza Nosuggio (Barbero et al., 2019)	. 68
Figura 41: Rappresentazione della legge di potenza che lega volume a frequenza (assi logaritmici) (De	
Biagi et al., 2017)	. 70
Figura 42: Rappresentazione volumi al piede sito Nosuggio (VC)	. 71
Figura 43: Rappresentazione altezze ostacoli sul versante sito Nosuggio (VC)	. 71
Figura 44: Determinazione di RG10, RG20, RG70 sulla base della distribuzione dei volumi al piede	. 73
Figura 45: Rappresentazione RG-a (b=2.831)	. 74
Figura 46: Rappresentazione RG-b (a=0.003)	. 74
Figura 47: Valori di $\phi_p$ per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=5m <sup>3</sup> , 100% densità di vegetazio	ne)
	. 77
Figura 48: Valori di $\phi_p$ per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=5m <sup>3</sup> , no alberi)	. 77
Figura 49: Valori di $\phi_p$ per pendio a 45°, blocco cubico, volume blocco=1m <sup>3</sup> , no alberi)	. 77
Figura 50: Valori di $\phi_p$ per pendio a 45°, blocco cubico, volume blocco=5m <sup>3</sup> , no alberi)	. 78
Figura 51: Valori di $\phi_p$ per pendio a 60°, blocco cubico, volume blocco=1m <sup>3</sup> , no alberi)	. 78
Figura 52: Valori di $\varphi_p$ per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=1m <sup>3</sup> , no alberi)	. 78
Figura 53: Superfice interpolata 3D di φp per pendio a 30°	. 79
Figura 54: Superfice interpolata 3D di φp per pendio a 30° a colori	. 79
Figura 55: Superfice interpolata 3D di op per pendio a 45°	. 80
Figura 56: Superfice interpolata 3D di ωp per pendio a 45° a colori	. 80
Figura 57: Superfice interpolata 3D di $\omega p$ per pendio a 60°	. 81
Figura 58: Superfice interpolata 3D di $\omega p$ per pendio a 60° a colori	. 81
Figura 59: Ortofoto Nosuggio (Fanni, 2019)	82
Figura 60: Profilo di massima pendenza Nosuggio (VC)	83
Figura 61: Profilo medio delle pendenze Nosuggio (VC)	83
Figura 62: Edificio colpito da blocco durante evento franciso del 2014 (Fanni, 2019)	. 84
Figura 63: valore $\omega_{\rm e}$ ricavato da abaco	85
Figura 64: Area di invasione ricavata con RockyEOR-3D per blocco cubico (5m <sup>3</sup> ) - RG ricavato da	. 05
annroccio Canitolo 4	86
Figura 65: Area di invasione ricavata con RockyEOR-3D per blocco rettangolare (5.3m <sup>3</sup> ) - RG ricavato d	la
approccio Capitolo 4	. 86
Figura 66: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco cubico (5m <sup>3</sup> ) - RG ricavato da rilievo	) in
sito	. 87
Figura 67: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco rettangolare (5.3m <sup>3</sup> ) - RG ricavato d	la la
rilievo in sito	. 87

Figura 68: valori di $\phi_{ extsf{p}}$ in funzione di pendenza del versante, densità di alberi, volume del blocco e form	าล
del blocco (Castelli et al., 2020)	89
Figura 69: Area di invasione ricavata con il plugin di QPROTO per blocco cubico (5m <sup>3</sup> ) - RG ricavato da	
approccio Capitolo 4	90
Figura 70: Area di invasione ricavata con il plugin di QPROTO per blocco rettangolare (5.3m <sup>3</sup> ) - RG	
ricavato da approccio Capitolo 4	90
Figura 71: Energie medie lungo tratto di strada di Nosuggio (VC)	91

## **INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 1: Valori di $\phi_{ m p}$ per blocchi cubici	58
Tabella 2: Valori di $\phi_{ extsf{p}}$ per blocchi sferici	58
Tabella 3: coefficienti a e b per Nosuggio (VC)	72

## **INTRODUZIONE**

La caduta massi è un fenomeno naturale rapido, molto pericoloso e di difficile previsione, che può avere un grande impatto sull'ambiente antropico; in generale può causare gravi danni a strutture, infrastrutture e, nella peggiore delle ipotesi, perdite di vite umane. Per cercare di ridurre questo impatto, è necessario definire tutti i fattori che lo governano e calcolarli in maniera quantitativa. Risulta quindi necessario condurre un'analisi di rischio, cioè la probabilità di avere un danno di una certa entità in un certo periodo di tempo. L'identificazione delle aree colpite dalla caduta massi dipende da un gran numero di variabili stocastiche che influenzano sia le fasi di innesco sia di propagazione. Pertanto, la valutazione del rischio presenta enormi incertezze legate alle varie scale di analisi. Per le analisi a piccola scala (ad esempio scala di valle), è necessaria una rapida valutazione delle zone di rischio di caduta di massi per evidenziare le situazioni più critiche in cui dovrebbero essere effettuate analisi più dettagliate. Il metodo dei Coni (Jaboyedoff e Labiouse, 2011), recentemente implementato da Castelli et al. (2020) nel plugin QPROTO per QGIS, permette di raggiungere questo obiettivo sulla base di considerazioni geometriche e di un modello meccanico semplificato. Esso, attraverso analisi speditive e preliminari, permette di identificare l'area di invasione di un crollo di roccia e di calcolare al suo interno (in modo semplificato) velocità, energia, suscettibilità e pericolosità. Per avviare le analisi con QPROTO sono necessari un DTM, uno shape file che contiene l'area di distacco (con alcuni attributi associati allo scenario che si intende analizzare), l'angolo di dispersione laterale  $\alpha$  e l'angolo di energy line  $\varphi_p$  (oggetto di questo lavoro di tesi).  $\varphi_p$  viene misurato in gradi (°) e rappresenta le perdite di energia subite da un masso lungo la traiettoria del moto e assume quindi il significato di angolo di attrito equivalente masso-pendio (Jaboyedff e Labiouse, 2011); a indica la dispersione laterale dell'area di propagazione rispetto alla direzione di massima pendenza del versante ed è anch'esso misurato in gradi (°);

Il punto di forza del plugin (oltre alla speditività), è quindi il fatto di basarsi su pochi parametri. I problemi principali nel suo utilizzo sono la stima dei parametri (in particolar modo l'energy line angle), in quanto è necessario tenere conto di tutti i fattori che influenzano il fenomeno. Essi sono molteplici e riguardano le caratteristiche del pendio (ovvero la geometria del versante, la densità di vegetazione e la scabrezza intesa come ostacoli presenti lungo il pendio) e le caratteristiche del blocco in caduta (ovvero la sua forma, il suo volume ecc.). In particolare, questa tesi è dedicata allo studio dell'influenza del parametro scabrezza, introducendo inizialmente analisi parametriche di dettaglio con il software RockyFOR-3D (il quale richiede una dettagliata conoscenza dei parametri che influenzano il fenomeno di caduta massi) e attraverso l'analisi di pendii virtuali (i

quali servono a ridurre il più possibile le incertezze dovute alle irregolarità della superficie), con varie assunzioni semplificative di base.

Nel software di dettaglio RockyFOR-3D (Dorren et al., 2014), la scabrezza è esplicitata attraverso i parametri RG10, RG20, RG70, ovvero l'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo che il masso incontra durante il tragitto di caduta nel 10%, 20% e 70% dei casi.

Nella tesi vengono utilizzate due diverse metodologie per la determinazione della scabrezza:

- Analisi parametriche al variare dei parametri RG10, RG20, RG70 (considerati uniformi su tutta la zona di transito del pendio) per osservare l'influenza di ogni valore di RG (considerato indipendentemente dagli altri) su φ<sub>p</sub>.
- 2. Definizione delle altezze degli ostacoli tramite una legge di potenza negativa (Barbero et al., 2019), nella generica forma  $y=a \cdot x^{-b}$  e con molte assunzioni di base, ovvero:
- Si considerano per semplicità blocchi cubici e si calcola l'altezza degli ostacoli come : h (m) =  $\sqrt[3]{V}$ ;
- La distribuzione delle altezze è uguale alla distribuzione dei volumi (si trascura il fatto che i blocchi potrebbero essere affondati nel terreno o circondati da altri blocchi, con riduzione dell'altezza degli ostacoli).

In questo caso le analisi di potenza sono riferite ai parametri a e b della legge di potenza, i quali sono considerati "sito-specifici". In questa tesi si è fatto riferimento all'evento franoso avvenuto nel giugno del 2014 nel sito di Nosuggio.

La tesi è organizzata nei seguenti capitoli:

- Nel primo capitolo viene effettuata una breve descrizione del fenomeno di caduta massi, facendo riferimento alle fasi di innesco, arresto ed evoluzione del fenomeno. Successivamente si fa un confronto tra le scale di osservazione e analisi (scala di dettaglio e scala di valle) e un cenno al calcolo della pericolosità e del rischio.
- Nel secondo capitolo vengono descritti i software di calcolo utilizzati in questo elaborato (RockyFOR-3D e QPROTO).

- Nel terzo capitolo, si riportano le analisi parametriche di dettaglio effettuate con il software RockyFOR-3D, mettendo in relazione i parametri utilizzati per la rappresentazione della scabrezza del versante con  $\varphi_{p.}$
- Nel quarto capitolo, vengono definite le altezze degli ostacoli (mediante l'approccio 2) a
  partire da una distribuzione di volumi (Barbero et al., 2019) ricavata da un rilievo avvenuto
  sul sito di Nosuggio (VC); interessato periodicamente da fenomeni di caduta massi.
- Nel quinto capitolo vengono infine testati i risultati delle analisi parametriche di dettaglio condotte sui versanti virtuali sulla base di una back analysis di un evento avvenuto nel sito di Nosuggio nel giugno 2014, condotta tramite il plugin QPROTO.

## **CAPITOLO 1**

## 1. IL FENOMENO DELLA CADUTA MASSI

## 1.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO CADUTA MASSI



Figura 1: Esempi di fenomeni di caduta massi che hanno interessato un tratto di strada

La caduta massi è un fenomeno naturale molto pericoloso, diffuso e di difficile previsione, in quanto non si riesce a dare una quantificazione diretta ai parametri rappresentativi del fenomeno, i quali spesso variano nel tempo (ad es. le condizioni del pendio o la stabilità dei blocchi).

Il fenomeno ha origine con il distacco di un singolo blocco o di un ammasso roccioso e può essere caratterizzato da grandi volumi, diverse forme del blocco e alte velocità (Rochet, 1987). I blocchi, durante il loro moto di discesa verso valle, possono seguire diversi tipi di movimento come scorrimento, rotolamento, rimbalzo e caduta libera (Varnes, 1978).

La complessità di un'analisi di caduta massi può essere riassunta in due questioni principali:

- incertezze nella stima delle relazioni tra le cause di un evento franoso e i suoi effetti (probabilità di occorrenza per diversi scenari di caduta massi);
- incertezze nella modellazione della fase di deposito in termini di aree interessate e intensità del fenomeno.

Nel corso degli anni, un numero considerevole di metodologie, correlazioni e software sono stati sviluppati al fine di fornire procedure affidabili per la stima del rischio su scale diverse.

Inoltre, utilizzando metodologie qualitative o quantitative, è possibile valutare la vulnerabilità degli elementi a rischio all'interno di aree soggette a cadute di massi per fornire una stima del livello di rischio, nelle componenti spaziali e temporali (Fell et al., 2005).

Le cause predisponenti riguardanti un fenomeno di caduta massi sono i fattori intrinseci di instabilità legati, essenzialmente, alle caratteristiche litologiche, strutturali e di giacitura dei materiali che costituiscono il versante; le cause scatenanti, invece, sono i fattori che innescano il movimento franoso (intense precipitazioni, attività sismica, cicli di gelo e disgelo ecc.).

Esiste una netta distinzione tra caduta massi e crolli di roccia. Con il termine caduta massi si intendono i fenomeni caratterizzati dal distacco, da pareti rocciose, di blocchi isolati non interagenti e con volumetria maggiore di 100 m<sup>3</sup> (ma genericamente risulta essere inferiore a 10 m<sup>3</sup>), mentre per crolli di roccia si intende l'evoluzione del fenomeno come massa di blocchi interagenti tra loro (valanga di roccia).

Per lo studio del fenomeno di caduta massi occorre definire le due diverse fasi del fenomeno:

- fase di innesco, dove vengono definiti il punto di distacco, il volume e la velocità iniziale del blocco;
- fase di evoluzione e arresto, dove viene definita l'area di invasione.

## **1.2** FASE DI INNESCO

La fase di innesco ha origine con un'analisi cinematica preliminare all'analisi di stabilità del versante, attraverso la quale è possibile risalire alle possibili nicchie o aree di distacco e alla forma e volume del blocco. I principali cinematismi che causano il distacco del blocco possono essere lo scivolamento planare, lo scivolamento di un cuneo e il ribaltamento.

Un altro importante fattore (che influenza la fase di innesco) è la velocità iniziale del blocco, la quale è legata alle cause scatenanti del fenomeno (azione dell'acqua, cicli di gelo e disgelo, attività sismica ecc.).

Tutti questi elementi (forma, volume e velocità iniziale del blocco) presentano grandi incertezze, pertanto risulta necessario ricorrere a metodi probabilistici per tener conto della variabilità intrinseca degli stessi. Il fenomeno di caduta massi presenta anch'esso notevoli incertezze a causa di:

- Complessità di comportamento dell'ammasso in movimento;
- Elevato numero di variabili coinvolte;
- Elevata variabilità intrinseca dei parametri che influenzano il processo (variabilità aleatoria);
- Difficoltà nel reperire le informazioni ed i dati necessari (incertezza epistemica).

A causa di questa estrema variabilità nei fattori che governano il fenomeno, risulta necessario un approccio probabilistico.

Il distacco non avviene genericamente in maniera puntuale, ma può coinvolgere diverse zone (e questo rende la fase altamente variabile). Di conseguenza, non conoscendo il punto esatto di distacco, non è possibile determinare la velocità iniziale del blocco (intensità e direzione) in maniera deterministica.

## **1.3** FASE DI EVOLUZIONE E ARRESTO

In seguito al distacco del blocco dalla nicchia/area di distacco, sono presenti diverse fasi del moto:

## Moto del blocco in aria,

attraverso il quale si possono avere due differenti tipi di cinematismo:

- a gittata (il blocco possiede una velocità iniziale diversa da zero);
- a caduta libera (la velocità iniziale del blocco è nulla e agisce solamente la gravità).

## Interazione blocco/pendio:

- scivolamento;
- rotolamento;
- impatto;
- frammentazione del blocco (ovvero la suddivisione del blocco di roccia in frammenti più
  piccoli con diverse direzioni e velocità (in seguito all'impatto al suolo o contro un
  ostacolo). La difficoltà di previsione di questi fattori ha portato molti autori a trascurare
  l'effetto della frammentazione nei software di calcolo (tra cui RockyFOR-3D),
  mantenendo il volume del blocco costante dal punto di distacco fino al punto di arresto.

Nella fase di interazione tra il blocco e il versante risulta fondamentale tenere conto di:

- massa del blocco;
- forma del blocco;
- topografia del versante;
- caratteristiche meccaniche dei materiali che costituiscono il versante.

### Moto del blocco lungo il versante:

in seguito all'impatto, il blocco può presentare diverse situazioni in funzione dell'energia che è stata dissipata durante l'impatto:

- il masso presenta sufficiente energia e rimbalza nuovamente sul versante (assumendo una nuova velocità iniziale e seguendo una nuova traiettoria parabolica);
- il blocco non presenta sufficiente energia residua per rimbalzare e inizia a scivolare lungo il pendio (se il materiale costituente il terreno è a basso coefficiente di attrito) o rotolare (se incontra un ostacolo durante il moto) oppure può rototraslare;
- il blocco non ha più energia residua e si arresta.

## Arresto del blocco:

è la fase conclusiva del fenomeno di caduta massi e dipende da molti parametri:

- Forma, volume e massa del blocco, legati ai fenomeni dissipativi nell'impatto;
- Velocità del blocco, facendo riferimento alla distanza percorsa dal masso in funzione dell'energia accumulata (una maggiore velocità e una maggiore energia porterà il blocco ad arrestarsi più lontano);
- Pendenza del versante, (più il versante è ripido e maggiore sarà la velocità del blocco e quindi la sua energia cinetica);
- Densità di vegetazione, la quale può modificare la traiettoria di un blocco (può deviare, rallentare o anche arrestare);
- Scabrezza del versante, la quale può essere intesa come microrugosità superficiale (variazioni locali della pendenza) oppure come ostacoli presenti sul versante.

In particolare, è necessario soffermarsi sul ruolo della densità di vegetazione e della scabrezza, intesa come ostacoli presenti lungo il versante e oggetto di questo lavoro di tesi.

#### 1.3.1 IL RUOLO DI PROTEZIONE DELLE FORESTE NEI CONFRONTI DELLA CADUTA MASSI



Figura 2: Foreste che fungono da elementi protettivi per la caduta massi

Le foreste possono offrire effetti sia favorevoli sia sfavorevoli nell'eventualità del verificarsi di un fenomeno di caduta massi. In particolare:

- offrono protezione nei confronti del fenomeno, andando a rallentare, deviare o addirittura arrestare i blocchi. Le radici possono trattenere i blocchi e ridurre la loro probabilità di distacco;
- Le radici di grossi alberi potrebbero indurre azioni statiche sui blocchi (entrare all'interno delle discontinuità), provocandone il distacco o il ribaltamento.

Molte foreste hanno un duplice ruolo protettivo (Ott et al., 1997): svolgono una protezione indiretta del pendio nei confronti dell'erosione diffusa o incanalata, in aggiunta a una protezione diretta nei confronti di fenomeni naturali come valanghe, colate detritiche e caduta massi.

Si può far riferimento a quattro diversi effetti svolti dalla foresta sulle dinamiche di caduta dei massi: la dissipazione di energia cinetica attraverso l'impatto diretto tra masso e tronco (Stoffel et al., 2006; Lundström et al., 2007; Lundström et al., 2009); la dissipazione di energia cinetica attraverso le interazioni tra roccia e vegetazione arbustiva; l'aumento della scabrezza del pendio e la conseguente riduzione del coefficiente di restituzione (Jones et al., 2000); l'effetto positivo della vegetazione forestale sulle caratteristiche geotecniche del suolo (Pfeiffer e Bowen, 1989).

Perret et al. (2004) indicano che l'effetto netto tra i fenomeni sopra citati è strettamente dipendente dalle condizioni del sito. Le foreste possono quindi fungere da elementi protettivi arrivando ad assorbire fino all'ottanta percento dell'energia cinetica posseduta dai massi in funzione del numero d'impatti che avvengono e dell'energia cinetica dissipata da ogni singolo impatto. (Michelini, 2016).

#### 1.3.2 RUOLO DEGLI OSTACOLI SUL VERSANTE



Figura 3: Masso arrestato sul versante (ostacolo).

La conformazione topografica, in termini di curvature locali e pendenza, condiziona fortemente la dinamica di rimbalzo dei massi che cadono lungo un pendio. In particolare, l'influenza della scabrezza del versante è descritta solitamente dal rapporto tra la dimensione del blocco e la dimensione media delle asperità del versante, o dal diametro medio del sedimento che forma il pendio (Kirkby e Statham, 1975; Statham e Francis, 1986). Quando la dimensione del blocco è superiore della dimensione media delle particelle del versante, il masso è in grado di superare la scabrezza del versante e propagarsi ulteriormente. Invece, quando la dimensione del blocco è minore (o al più paragonabile) alla dimensione delle asperità, esso rimane intrappolato dalla rugosità del pendio e si arresta velocemente (Ritchie, 1963; Kirkby e Statham, 1975; Bozzolo e Pamini, 1986; Statham e Francis, 1986; Giani, 1992; Evans e Hungr, 1993).

La scabrezza del versante influisce sulla dissipazione di energia in seguito a un impatto, modificando la velocità del blocco in uscita e il tipo di cinematismo a valle.

Durante lo scorrimento verso valle del blocco, vengono a crearsi degli sforzi tangenziali che ne rallentano il movimento. Le velocità in gioco diminuiscono con l'aumentare della scabrezza (Hollaus et al., 2011).

La scabrezza può essere considerata in vari modi da diversi autori e per i diversi software di caduta massi. Alcuni autori (Ferrari et al., 2016) introducono la scabrezza in termini di tortuosità o rugosità superficiale (descritta come variazione locale dell'angolo di pendenza e delle irregolarità della superficie.

Essa è un parametro a scala variante (può assumere diverse dimensioni), pertanto è necessario modellarla in funzione delle informazioni morfologiche e topografiche del caso studio. Possiamo classificare la scabrezza in diversi modi:

- scabrezza superficiale, ovvero definita entro pochi decimetri dal suolo (copertura erbosa) e quindi su piccola scala.
- La scabrezza a media scala è definita come la quota che spazia dai decimetri a qualche metro di irregolarità del terreno (in genere comprende bassa vegetazione, arbusti e massi presenti sul versante).
- Infine, per la scabrezza a grande scala diventano rilevanti la topografia e la morfologia del terreno e si va da qualche metro fino a centinaia di metri (Jutzi et al., 2005).

Per la media e grande scala, essa viene quindi considerata come altezza degli ostacoli presenti lungo versante, i quali andranno a influenzare in maniera significativa la resistenza totale del processo gravitativo.

Il lavoro di questa tesi è dedicato allo studio di questo parametro, inteso come altezza degli ostacoli lungo il versante. Questo perché il software di dettaglio utilizzato RockyFOR-3D considera la scabrezza attraverso i parametri RG10, RG20, RG70, ovvero le altezze degli ostacoli in metri che un masso in caduta può incontrare nel 10%, 20% e 70% dei casi.

## 1.4 SCALE DI OSSERVAZIONE E ANALISI

Nell'analisi del fenomeno di caduta massi, la procedura di calcolo della pericolosità risulta fortemente influenzata dalle finalità delle analisi da effettuare e dalla scala di riferimento adottata.

I metodi di analisi che si utilizzano sono differenti, in quanto la quantità e la qualità dei dati che si possono rilevare è decisamente diversa. In particolare, esistono due diversi tipi di scale:

Scala di dettaglio (grande scala): è la porzione limitata circoscritta a un evento avvenuto o
potenziale. Le finalità sono la progettazione di opere di protezione, la back analysis e studi
di dettaglio. Essa riguarda le analisi di rischio più approfondite ed è necessario che
l'affidabilità del calcolo sia elevata. Bisogna inoltre raccogliere una notevole quantità di
dati, caratterizzare ogni parametro con una distribuzione statistica e condurre analisi
probabilistiche anche avanzate per gestire l'aleatorietà.

Scala comunale, di valle o regionale: riguarda una porzione di territorio più vasta (un comune, una valle alpina o una comunità montana). Le finalità sono la pianificazione urbanistica e territoriale e gli studi preliminari. Con questa scala non si riesce a raccogliere ragionevolmente dati sufficienti per caratterizzare i parametri con distribuzioni statistiche affidabili, per cui si ha un'incertezza legata alla scarsa conoscenza del dato (incertezza epistemica). I metodi di analisi che si possono usare sono molto semplificati e richiedono una quantità inferiore di dati, spesso di tipo "equivalente", che naturalmente produrranno un risultato meno affidabile.

Il problema è particolarmente importante quando si parla di fenomeni franosi diffusi su aree vaste.

Sia i metodi di analisi, sia i dati di input devono essere calibrati sulla scala di indagine, a causa della grande aleatorietà dei fattori che governano il fenomeno.

#### 1.4.1 METODI SPEDITIVI A PICCOLA SCALA

Nell'ambito di un'analisi a piccola-media scala, la valutazione della pericolosità non può essere basata su rilievi di terreno dettagliati, i quali sarebbero estremamente onerosi. Si ricorre perciò generalmente a metodi semplificati e speditivi per:

- Individuare le aree sorgente;
- Caratterizzare le aree sorgente dal punto di vista dei potenziali volumi di distacco;
- Stimare le aree di invasione;
- Stimare l'intensità del fenomeno;
- Stimare la pericolosità dell'area in termini relativi.

I primi due punti fanno riferimento alla definizione del pericolo (scenario), mentre gli ultimi tre si riferiscono alla stima della pericolosità.

I risultati delle analisi saranno da intendersi come preliminari e relativi (spaziali), utili a definire le zone più critiche di un'ampia area, su cui si dovrà in seguito concentrare l'attenzione con analisi di maggior dettaglio.

## 1.5 CENNI AL CALCOLO DI PERICOLOSITA' E RISCHIO

L'incertezza nell'analisi del fenomeno di caduta massi è elevatissima, in quanto i fattori che lo governano sono molteplici, estremamente variabili e combinati tra di loro.

Per cercare di ridurre al minimo il grande impatto che le frane possono avere sull'ambiente antropico (con effetti anche distruttivi), è necessario condurre un'analisi di rischio, ovvero studiare, definire e calcolare quantitativamente tutti i fattori che lo governano.

Il rischio è la probabilità di avere un certo danno di una certa entità in un certo intervallo di tempo e dipende da:

- caratteristiche e l'evoluzione del fenomeno potenzialmente pericoloso;
- caratteristiche dell'elemento esposto;
- interazione tra il fenomeno e gli elementi esposti.

Con pericolosità, invece, si intende la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di una certa intensità, si verifichi in un certo periodo di tempo in una certa area. Combina quindi la probabilità che la frana si distacchi dal versante con la probabilità che raggiunga il punto del pendio con una certa intensità.

Preliminare all'analisi, è necessario effettuare una caratterizzazione del pericolo (fenomeno potenzialmente distruttivo, come ad esempio il distacco di un blocco di roccia di un certo volume da una zona del versante), che porta alla definizione di scenari di analisi.

L'analisi di pericolosità deve essere condotta per ciascun scenario identificato e fornisce:

- area di invasione con indicazione eventuale della probabilità spaziale di invasione); essa serve per il censimento degli elementi a rischio.
- Intensità del fenomeno (in termini di velocità o energia) per la valutazione della vulnerabilità.
- Probabilità temporale di accadimento (di distacco di un blocco).

## **CAPITOLO 2**

## 2. METODI DI ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL FENOMENO

Si possono definire in maniera generale due tipi di modelli:

- Modelli analitici, i quali calcolano la traiettoria con le leggi della balistica;
- Modelli geomorfologici, i quali usano leggi empiriche o modelli meccanici semplificati.

## 2.1 MODELLI ANALITICI

I modelli analitici, attraverso la risoluzione di equazioni che simulano i diversi moti dei blocchi e le loro interazioni col versante, analizzano il fenomeno della caduta massi (Dorren, 2003).

Questo richiede l'introduzione dei parametri che caratterizzano le caratteristiche del blocco e del versante, solitamente tarati con una back analysis. I metodi di simulazione sono in genere basati su metodo probabilistici (per compensare le grandi incertezze dei parametri) attraverso un elevato numero di simulazioni.

In termini di coordinate spaziali, possiamo distinguere:

- Modelli Bidimensionali (2D);
- Modelli Quasi Tridimensionali (quasi 3D);
- Modelli Tridimensionali (3D).

In riferimento alla rappresentazione del blocco possiamo invece distinguere:

- Modelli Lumped Mass;
- Modelli Rigid Body;
- Modelli Ibridi.

In letteratura sono definiti numerosi modelli previsionali che si dividono in base alle caratteristiche appena citate (Figura 7):

NOME MODELLO	RIFERIMENTO (in Volkwein et al. 2011)	DIMENSIONI SPAZIALI	APPROCCIO	PROBABILISTICO	FORESTA
-	(Ritchie, 1963)	2D (slope profile)	Lumped-mass	no	no
Discrete Element Method	(Cundall, 1971)	2D (slope profile)	Rigid body	no	no
Computer Rockfall Model	(Piteau e Clayton, 1976)	2D (slope profile)	Lumped-mass	parzialmente	no
	(Azimi et al., 1982)	2D (slope profile)	Lumped-mass	si	no
	(Falcetta, 1985)	2D (slope profile)	Rigid body	00	no
ROCKSIM	(Wu, 1985)	2D (slope profile)	Lumped-mass	si	no
SASS	(Bozzolo e Pamini, 1986)	2D (slope profile)	Hybrid	sì	no
EBOUL-LMR	(Descoeudres e Zimmermann, 1987) (Labiouse et al., 2001)	3D (x, y, z)	Rigid body	no	no
PROPAG/CETE Lyon	(Rochet, 1987a)	2D (slope profile)	Lumped-mass	no	no
	(Hungr e Evans, 1988)	2D (slope profile)	Lumped-mass	no	no
CRSP (4.0)	(Pfeiffer e Bowen, 1989) (Jones et al., 2000)	2D (slope profile)	Hybrid	si	no
	(Van Dijke e van Westen, 1990)	2D (x, y)	Lumped-mass	no	no
	(Kobayashi et al., 1990)	2D (slope profile)	Rigid body	no	no
Rotomap	(Scioldo, 1991)	3D (x, y, z)	Lumped-mass	si	no
CADMA	(Azzoni et al., 1995)	2D (slope profile)	Hybrid	si	no
Rockfall (Dr. Spang)	(Spang e Sönser, 1995)	2D (slope profile)	Rigid body	si	si
ROFMOD 4.1	(Zinggeler et al., 1990) (Krummenacher e Keusen, 1996)	2D (slope profile)	Hybrid	si	si
3D-GEOTEST-Zinggeler	(Krummenacher et al., 2008)	3D (x, y, z)	Hybrid	si	si
RocFall	(Stevens, 1998)	2D (slope profile)	Lumped-mass	si	no
Sturzgeschwindigkeit	(Meissl, 1998)	2D (x, y)	Lumped-mass	no	no
STONE	(Guzzetti et al., 2002)	3D (x, y, z)	Lumped-mass	si	no
STAR3D	(Dimnet, 2002) {Le Hir et al., 2006)	3D (x, y, z)	Rigid body	no	si
Rocky3	(Dorren e Seijmonsbergen, 2003)	2.5D (x, y and slope profile)	Hybrid	si	si
HY-STONE	(Crosta et al., 2004) (Frattini et al., 2008) (Agliardi et al., 2009)	3D (x, y, z)	Hybrid	si	si
RockyFor	(Dorren et al., 2004) (Dorren et al., 2006)	3D (x, y, z)	Hybrid	si	si
RAMMS: Rockfall	(Christen et al., 2007)	3D (x, y, z)	Rigid body	si	si
Rockfall Analyst	(Lan et al., 2007)	3D (x, y, z)	Lumped-mass	parzialmente	no
PICUS-ROCKnROLL	(Woltjer et al., 2008) (Rammer et al., 2007)	3D (x, y, z)	Lumped-mass	si	si

Figura 4: Sintesi dei modelli sviluppati per la modellazione della caduta massi e alcune loro principali caratteristiche (modificato da Volkwein et al. 2011)

#### **Coefficiente di restituzione (E)**

Il coefficiente di restituzione viene utilizzato nella modellazione del fenomeno di caduta massi ed è definito come il rapporto fra la velocità del masso dopo e prima dell'urto con il terreno  $(V_1 / V_0 \text{ dove } V_1 \text{ è la velocità dopo l'urto, } V_0 \text{ prima dell'urto})$ . Esso è uguale a zero nel caso di urto completamente anelastico (tutta l'energia cinetica del blocco che impatta viene dissipata sotto forma di calore e la velocità del masso dopo l'urto sarà uguale a zero), uguale a uno nel caso di urto completamente elastico ( $V_1=V_0$ , ovvero tutta l'energia cinetica viene conservata ed il masso avrà una velocità dopo l'impatto uguale a quella precedente l'urto) e compreso fra 0 e 1 nel caso di urto parzialmente elastico (parte dell'energia cinetica viene conservata e parte dissipata); la velocità finale del masso sarà data da  $V_1=E \times V_0$ ). Esistono diversi valori presenti in letteratura. Alcuni autori propongono di assumere indicativamente valori di E compresi fra 0.75 e 0.8 per impatti su roccia o detrito di grossa pezzatura e tra 0.2 e 0.35 per impatti su materiale terroso. Altri Autori (Mazzalai, Vuillermin, 1995) propongono invece valori indicativi:

Tipo substrato	E
apice di conoide detritico	0,05 - 0,10
bosco con sottobosco sviluppato, prato	0,05 - 0,15
copertura detritica con vegetazione folta	0,10 - 0,15
copertura detritica con vegetazione rada	0,20 - 0,30
detrito eluviale di spessore ridotto	0,30 - 0,40
strutture rigide e strade	0,40 - 0,60
roccia affiorante fratturata	0,60 - 0,70
roccia affiorante integra	0,75 - 0,85

Figura 5: Valori di coefficiente di restituzione E (Mazzalai, Vuillermin, 1995)

Volendo distinguere le componenti normale e tangenziale della velocità del blocco in caduta, si possono definire i parametri  $E_y$  e  $E_x$  (coefficienti di restituzione normale e tangenziale) come segue:

 $E_y = V_{1n} / V_{0n}$  [V<sub>1n</sub> = velocità normale (perpendicolare alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V<sub>0n</sub> = velocità normale del masso prima dell'urto];

 $E_x = V_{1t} / V_{0t}$  [V<sub>1t</sub> = velocità tangenziale (parallela alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V<sub>0t</sub> = velocità tangenziale del masso prima dell'urto].

Per i valori indicativi di E<sub>y</sub> e E<sub>x</sub> si presentano quelli proposti da Piteau e Clayton (1976) e da Hoek (1987).

#### Piteau e Clayton

Tipo substrato	E <sub>v</sub>	Ex
Roccia compatta	0,8 - 0,9	0,65-0,75
Detrito misto a grossi massi	0,5 - 0,8	0,45-0,65
Detrito compatto con piccoli massi	0,4 - 0,5	0,35-0,45
Scarpate ricoperte da vegetazione	0,2 - 0,4	0,2 - 0,3

Figura 6: Coefficienti di restituzione normale e tangenziale (Piteau e Clayton, 1976)

#### Hoek

Tipo substrato	E <sub>v</sub>	Ex
Roccia compatta e pulita	0,53	0,99
Strada asfaltata	0,40	0,90
Roccia coperta con grossi massi	0,35	0,85
Conoidi di detrito	0,32	0,82
Conoidi di detrito con vegetazione	0,32	0,80
Suolo soffice	0,30	0,80

Figura 7: Coefficienti di restituzione normale e tangenziale (Hoek, 1987)

#### 2.1.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE ROCKYFOR3D

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato il software di dettaglio traiettografico RockyFOR-3D (Dorren et al., 2014), il quale verrà descritto in maniera dettagliata nel seguente paragrafo.

orking directory C:/local_data/Testfile		Browse	and a second		About Rocky for 3
Simulation settings		Concession of the local division of the loca	ALC: No. 10, N		
Number of simulations 100 🔅 Variation of ro	ck volume (%) 0 💌	1 00/00/00/0	_		
Additional initial failheight (m)	DF file (optional)	(1) USE 5	-22		
Using input rations     O Rand automatic simulation		A 100	-		10
e and the same of		A. 182	-		1000
Black definition	Protective measures	12,000	42	et. 1 -	
Rock density (kg/m3) rockdensity asc 💌	Simulation using forest	A DESCRIPTION OF	-		100
Block dmemsions (n) 💮 d1.eec, d2.eec, d3.eec	treefile.txt 🔻	1.50000.255			
🥶 custom 0.4 0 0.4 0 0.5 0	Simulation using nets	A 180 199 10		10	
Block shape bl_shape.asc •	No nets	/ . Phase 200	ALC: N		
		Contrast and	- Alt		
eset Settings Run Simulation		E MARKED	25		A CONTRACTOR OF
Messages		N EDUCTIVES	-		Contraction of the local division of the loc
E_50, asc saved!	6	10110-201			Aug. 100 (1970)
E_95.asc saved		ALC: UP NO.	ALC: NO		1000
E_98.asc saved E_99.asc saved		10424.000	Seren -		III BELLEVILLE
Ph_50.asc saved! Ph_90.asc saved!					1005
Ph_95.asc paved!		ara des latins is dans unu cas alot s	dana mollar didi the	estant point in the sh-	100 s
Ph_99.asc saved		nd point then click "Plot"	supe protect and are	c static poerie in the date	the window, or by the mouse to ane
energy_nstunc saved	-	First point (x,y):	0 0	0 0	
Output data saved to C:/local_data/Temp/Beatenbucht/30sims-Fore	t-x_m3/	Consultantial for which			Plot
The program can now be closed.		Second point (K,V)	0		

Figura 8: Interfaccia grafica di RockyFOR-3D (Berger e Dorren, 2007)

RockyFOR-3D è un modello probabilistico tridimensionale che simula le traiettorie di caduta massi e integra l'effetto "barriera" offerto dagli alberi. Esso rientra nella categoria dei software rigid body.

Il modello si basa sulla combinazione di approcci stocastici con algoritmi deterministici; è quindi un modello fisicamente basato (in merito alla descrizione dei processi di caduta massi) e probabilistico, in quanto i parametri sono determinati in maniera stocastica e variano in un intervallo di valori plausibili, date le varie incertezze per la loro determinazione. RockyFOR-3D può essere utilizzato per simulazioni di caduta di massi su scala regionale, locale e di versante. (Dorren et al., 2014). Sono presenti tre moduli. Il primo caratterizza il DTM (modello digitale del terreno) e calcola la traiettoria di caduta dei massi in base alla topografia del versante. Il secondo si riferisce alla diminuzione di energia dovuta agli urti contro alberi. Il terzo modulo calcola la velocità del blocco in caduta successivamente a un rimbalzo sulla superficie del versante. Il coefficiente di restituzione tangenziale, il quale è funzione delle dimensioni e della composizione del materiale che copre la superficie oltre che del raggio del masso in caduta (Kirkby e Statham,

1975), è il parametro che controlla la diminuzione di velocità dopo il rimbalzo. In altre parole, esso fissa l'energia cinetica traslazionale persa durante un rimbalzo (a causa della scabrezza del terreno).

RockyFOR3D si basa su analisi del DTM, completati da una serie di ulteriori raster in grado di descrivere la micro-topografia nel dettaglio.

I dati di input del modello fanno riferimento alle caratteristiche del sito, della foresta e del blocco, costituiti da 10 mappe raster di uguale estensione e risoluzione, in formato ESRI ASCII Grid.

I file di output presentano la stessa risoluzione, dimensione e formato dei file di input e si riferiscono alla simulazione della traiettoria, alla velocità (traslazionale e rotazionale) del blocco e alla perdita di energia successivamente a un rimbalzo sul pendio o all'impatto contro un albero.

Gli effetti dovuti alla presenza della vegetazione sono implementati all'interno del programma (Berger e Dorren, 2007). Per quanto riguarda la componente arborea, l'effetto degli alberi lungo la superficie di scorrimento viene descritta all'interno del programma, mentre per la vegetazione arbustiva, la modifica del coefficiente di scabrezza è il metodo consigliato per analizzare il fenomeno nella fase di scorrimento e arresto.

#### **FILES DI INPUT**

Le 10 mappe raster di input sono le seguenti:

#### 1. dem.asc :

mappa raster del DEM che descrive la topografia del versante. Viene impiegato per l'analisi di pendenza ed esposizione del pendio.

#### 2. soiltype.asc :

mappa raster che definisce il tipo di sottosuolo del versante. Ha l'obiettivo di fornire informazioni sull'elasticità del terreno  $(R_n)$  rilevabile durante l'impatto al suolo dei blocchi. Rockyfor3D prevede 8 modelli di sottosuolo (Figura 9):

suolo	descrizione generale del suolo	valori medi R <sub>n</sub>	range R"
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0.00	0.00
1	Materiale fine (spessore > ~1.0 m)	0.23	0.21 - 0.25
2	Materiale fine fluviale (spessore < ~1.0 cm) o sabbia/ghiaia mista	0.28	0.25 - 0.31
3	Detrito di falda (Ø < ~0.1 m), o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0.33	0.30 - 0.36
4	Detrito di versante (Ø > ~0.1 m), o suolo compatto con grandi massi	0.38	0.34 - 0.42
5	Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica	0.43	0.39 - 0.47
6	Substrato roccioso	0.53	0.48 - 0.58
7	Strade asfaltate	0.35	0.32 - 0.39

Figura 9: Descrizione generale degli 8 tipi di suolo previsti dal software RockyFOR-3D (Dorren et al., 2014)

#### 3. rg70.asc rg20.asc rg10.asc:

Mappe raster relative alla scabrezza della superficie del versante.

L'indice MOH è stato concepito per descrivere la microtopografia della superficie del versante, ossia il suo grado di scabrezza e, di conseguenza, la probabilità che un blocco in caduta libera impatti contro una delle discontinuità presenti. Esso viene misurato in campo e definisce l'altezza media (in metri) del materiale di origine rocciosa (esclusa la lettiera e la componente organica del terreno) distribuito lungo l'orizzonte del pendio e raggruppato in tre classi dimensionali, le quali sono mappate in funzione della loro frequenza di ripartizione sul terreno e secondo i diametri medi che rivestono la superficie (Figura 10): MOH 10, rappresenta l'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo che un masso incontra nel 10% dei casi durante un rimbalzo nel poligono mappato; MOH 20, altezza media del 20% degli ostacoli al suolo; MOH 70, altezza media del 70% degli ostacoli al suolo; essi sono considerati distribuiti lungo il versante in maniera omogenea. L'algoritmo di calcolo sceglie quindi la MOH sulla base delle tre classi di copertura nel poligono, usando un numero casuale. Ognuna di queste classi è rappresentata da una mappa raster. Rt deriva da tale mappa e viene inserito nelle formule con variazioni di ±10% (scelte casualmente dal modello) al fine di rappresentare nel miglior modo possibile le naturali discontinuità del terreno. R<sub>n</sub> è funzione dall'elasticità del terreno e quindi dipende dal tipo di suolo. RockyFOR-3D differenzia 8 diversi tipi di suolo, riassunti in Figura 9.



Figura 10: Schematizzazione dell'interpretazione dell'indice MOH: definizione delle altezze degli ostacoli a seconda della loro frequenza del 70%, 20% e 10% di distribuzione sul versante (Dorren et al., 2014).

#### 4. rockdensity.asc:

mappa raster che contiene la densità dei blocchi in ogni cella sorgente. Ogni cella può assumere valori > 0 fino a 3300 kg/m<sup>3</sup>. Per le nostre simulazioni utilizzeremo un valore di densità rispettivamente di 2500 kg/m<sup>3</sup>. Serve per individuare le zone sorgenti o i punti di rilascio dei blocchi.

#### 5. d1.asc d2.asc d3.asc

Mappe raster che rappresentano le tre dimensioni dei blocchi, ovvero altezza (d1), larghezza (d2) e lunghezza (d3) rilevati sulle singole celle sorgenti. Nelle simulazioni tali valori possono assumere casualmente variazioni volumetriche tra  $\pm 0\%$  e  $\pm 50\%$ .

6. blshape.asc

Block shape (forma del blocco). Mappa raster che definisce la forma del masso per ogni cella sorgente. Rockyfor3D prevede 5 soluzioni:

- 0-nessuna forma/dato mancante;
- $1 blocco rettangolare (d1 \neq d2 \neq d3);$
- 2 blocco ellissoidale (d1 $\neq$ d2 $\neq$ d3);
- 3 blocco sferico (d1=d2=d3);
- 4 blocco discoidale (con  $d_{min} = 1/3$  di  $d_x, d_y \in d_x \cong d_y$ ).

La cella sorgente con valore 0 viene gestita come blocco ellissoidale o sferico, sulla base dei raster d1-d2-d3.asc.

A questi file si aggiungono, nel caso di presenza di vegetazione:

## 7. treefile.txt :

mappa raster contenente il censimento forestale, la quale deriva da un rilievo in campo o da analisi satellitare Laserscanning (Metodo 1), ricostituita in maniera automatica dal software in assenza di dati puntuali (Metodo 2).

- Metodo 1: Contiene le coordinate x e y di ogni albero e il relativo DBH.

- Metodo 2: Posizione e dettaglio delle piante vengono estesi in maniera random sulla mappa raster secondo i files prodotti:

- nrtrees.asc: densità forestale (N/ha);
- dbhmean.asc: DBH medio;
- dbhstd.asc: deviazione standard del DBH;

## 8. conif\_percentuale.asc

valore % della quantità di conifere in grado di aumentare o abbassare la resistenza media del popolamento forestale sul crollo di roccia.

Infine, nel caso di presenza di opere di difesa, quali reti paramassi, è necessario introdurre i seguenti ulteriori file:

9. net\_number.asc : Numero di reti paramassi.

10. net\_energy.asc : Capacità di assorbimento dell'energia da parte della rete.(kJ)

11. net\_height.asc : Altezza della rete.

#### **FILES DI OUTPUT**

I files di output sono i seguenti:

#### 1. E\_mean.asc:

media dei valori massimi di energia cinetica di tutti i blocchi passati attraverso la cella e misurata in kJ.

#### 2. E\_50.asc/E\_90.asc/ E\_95.asc/E\_98.asc/ E\_99.asc/:

valore dei percentili (mediana, 90esimo, 95esimo, 98esimo, 99esimo) delle energie cinetiche per ogni cella, suddivisi in classi di energia nelle mappe raster risultanti e misurati in kJ.

3. E\_95CI.asc :

valore corrispondente al 95esimo percentile di tutti i valori massimi di energia cinetica del livello di confidenza, registrati in ciascuna cella. Calcolato a partire da E\_mean e deviazione standard, rappresenta i valori di energia massima assoluta dei massi in movimento. E' anch'esso misurato in kJ.

#### 4. Ph\_mean.asc :

è il valore medio delle altezze massime di passaggio che raggiungono i blocchi (espresso in metri).

#### 5. Ph\_50.asc/Ph\_90.asc/ Ph\_95.asc/ Ph\_98.asc/ Ph\_99.asc/:

valore dei percentili (mediana, 90esimo, 95esimo, 98esimo, 99esimo) delle altezze di passaggio per ogni cella, suddivisi in classi di altezza nelle mappe raster risultanti (misurato in metri).

#### 6. Ph\_95CI.asc :

valore corrispondente al 95esimo percentile di tutti i valori massimi di energia cinetica del livello di confidenza, registrati in ciascuna cella. Calcolato a partire da Ph\_mean e deviazione standard, rappresenta i valori di altezza massima assoluta di passaggio dei blocchi in movimento ed è misurato in metri.

7. Nr\_passages.asc :

è il numero di passaggi dei blocchi su singola cella.

8. Nr\_surcecells.asc :

è il numero di celle sorgenti che sono coinvolte nel passaggio dei blocchi in una determinata cella.

9. Reach\_probability.asc :

% di probabilità che una data cella possa essere coinvolta nel passaggio di un blocco. Il suo valore è calcolato come:

 $REACH PROBABILITY = \frac{Nrpassages \times 100}{Nr_{surcecells} \times Nr_{simulazioni}}$ 

10. Nr\_deposited.asc :

è il numero dei massi arrestati su di una determinata cella.

11. Rvol\_deposit.asc :

volume del masso più grande che si è depositato (m<sup>3</sup>).

12. EL\_angles.asc :

angolo minimo (misurato in gradi) della linea di energia prodotta dal masso a partire dal suo distacco fino al suo punto di arresto.

13. Traj\_time.asc:

è il tempo minimo impiegato da un masso a partire dalla cella sorgente per raggiungere la cella di arresto (misurato in secondi).

14. V\_max.asc :

velocità massima raggiunta dal blocco in caduta libera (m/s).

15. Nr\_tree\_impacts.asc :

è il numero di impatti rilevati per singola cella tra masso e albero.

16. Tree\_impact\_heights.asc :

altezza massima di impatto in metri raggiunta dal masso sulla pianta.

Al termine di ogni simulazione, il software crea un log file che contiene le seguenti informazioni (Figura 11):

```
Rockyfor3D v5.0 - Simulations completed on Tue Jan 24 15:12:39 2012
simulation started on Tue Jan 24 15:12:33 2012
simulation settings:
- rock volume variation = +/- 0
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2382
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and with nets
Overall simulated block volumes:
- min = 0.100000 m3
- mean = 0.100000 m3
- \max = 0.100000 \text{ m}3
Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 323.900000 kj
- maximum energy value = 462.100000 kj
Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:
EL angle[°] frequency[-] frequency[%]
      24.00
                  1.00
                             0.04
List with output rasters
REMARKS
```

Figura 11: Esempio di log file (Dorren et al., 2014)

#### ALGORITMI DI CALCOLO

Al fine di simulare al meglio il fenomeno di caduta massi, il software interpreta i dati in possesso, le possibili deviazioni delle traiettorie in seguito ad impatti al suolo e urti contro ostacoli (generalmente alberi o massi di vario tipo e varia natura) e la conseguente diminuzioni di velocità in seguito alla dissipazione di energia del masso.

#### Le traiettorie di caduta

La traiettoria viene considerata come un succedersi di rimbalzi e parabole; la simulazione considera il rotolamento del masso come una successione di rimbalzi a brevissima distanza (pari al raggio del masso e non inferiori a 0.2 metri). Poiché nel caso dello scorrimento, questa approssimazione risulta totalmente errata (Dorren, 2014), non viene considerato nel modello. Ogni singola traiettoria ha inizio con l'innesco del movimento del masso, correlato direttamente alla forza di gravità che grava su di esso e questo è individuato per pendenze maggiori a 40°-50°; a prescindere dagli eventi atmosferici agenti sul sito, tale inclinazione è di norma superiore alla forza di attrito che permette al masso di restare in sede. La scelta dei punti di innesco è di particolare importanza in quanto la loro altezza rispetto al piano del suolo e la lontananza da possibili ostacoli (depressioni, popolamenti forestali, infrastrutture, blocchi di roccia), producono un sostanziale aumento dell'energia cinetica del masso (Michelini, 2016).

Lungo le traiettorie che vengono simulate dal software (comprese variazioni del percorso post-rimbalzo ed eventuali deviazioni), il percorso del blocco di roccia risente delle condizioni di acclività del terreno e dalla presenza di eventuali ostacoli e si conclude con l'esaurimento dell'energia cinetica del blocco, raggiunta per cause naturali (diminuzione delle pendenze) o dissipazioni in seguito a collisioni contro ostacoli.

Le variazioni di traiettoria post-rimbalzo si basano su:

a) velocità in entrata del blocco e direzione;

b) microtopografia dell'area (pendenza);

c) range di possibili deviazioni del percorso originale (0°-60°);

d) probabilità di accadimento (stabilita dalla velocità di pre-rimbalzo).

In relazione alla velocità posseduta dal masso, successivamente al rimbalzo la traiettoria subisce una deviazione pari all'angolo maggiormente rappresentativo delle condizioni di acclività delle celle confinanti; generalmente questo si manifesta con il compimento di una traiettoria che privilegia la linea di massima pendenza (Zevenbergen e Thorne, 1987). Tale comportamento presenta però una componente casuale, scelta sulla base di un range di angoli tra 0° e 60°, in grado di produrre ulteriori traiettorie, deviate rispetto all'originale in pre-rimbalzo in funzione della velocità posseduta dal masso derivate da sperimentazioni in campo a scala reale da Dorren et al. (2006; Figura 12).

	Angolo di deviazione (°)										
	0-5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	35 - 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55
V < 10 m s <sup>-1</sup>	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
10 m s⁻¹ ≤V <15 m s⁻¹	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
V ≥15 m s-1	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Figura 12: Angoli di deviazione delle traiettorie rispetto alla linea di massima pendenza in relazione alle velocità di caduta del masso (Dorren et al., 2006)

#### Forma dei blocchi

Mediante l'utilizzo di RockyFOR-3D, come input di simulazione si possono scegliere differenti forme di blocco: sferica, parallelepipeda, ellissoidale o discoidale. Con la forma del blocco si riesce a determinare volume e di conseguenza la massa attraverso i tre parametri d1, d2, d3 definiti nel software. Il software utilizza sempre una forma sferica per calcolare la posizione del blocco, il rimbalzo sulla superficie del pendio e l'impatto contro alberi. Essa, a seconda del processo, può assumere due differenti diametri; in particolare:

1. per calcolare se il masso colpisce un albero, si assume il più piccolo tra i tre diametri definiti;

2. per valutare le perdite di energia durante l'impatto (ovvero il rapporto tra la scabrezza della superficie e raggio del perimetro di impatto maggiore), viene assunto il diametro maggiore, calcolato come media tra i due diametri maggiori.

#### Caduta con moto parabolico

I movimenti delle traiettorie previsti dal software sono di tipo parabolico con moto uniformemente accelerato, in modo da determinare velocemente posizione e velocità del masso all'intersezione con la topografia del pendio rappresentata dal DEM. RockyFOR-3D descrive una traiettoria tridimensionale mediante l'evoluzione della posizione nei 3 assi x, y, z. L'asse x è la direzione Est-Ovest, y la direzione Nord-Sud e z si riferisce alla direzione verticale. Sulla base delle coordinate x e y, la traiettoria 3D è collegata alle mappe raster di input e output. Attraverso la conoscenza delle caratteristiche del versante, definite dalla mappa raster di input (a una data posizione e velocità iniziale in ingresso) e dalle caratteristiche della superficie del pendio, il calcolo dei rimbalzi può essere facilmente inizializzato.

#### La dissipazione di energia

I coefficienti di restituzione del terreno sono i parametro che mi quantificano la perdita di energia del masso in caduta, considerando (in aggiunta alla perdita di energia potenziale) gli impatti in seguito al rimbalzo del blocco sul suolo, oppure l'urto contro ostacoli a terra. RockyFOR3D permette di ottenere l'andamento del percorso del masso in funzione della sua traiettoria e velocità, vincolato alla micro-topografia del pendio. Tutto questo sempre avendo come base il DTM. Il grado di penetrazione del terreno del blocco di roccia  $(D_p)$  in seguito alle collisioni e i coefficienti di restituzione provocano una perdita di energia cinetica del blocco e ne condizionano estremamente il rimbalzo successivo.

#### Calcolo della velocità di caduta

Attraverso l'equazione di conservazione dell'energia è possibile determinare la velocità del masso a seguito dell'impatto:

$$\left(\frac{1}{2} J \omega_1^2 + \frac{1}{2} m v_{t1}^2\right) f(F) SF = \frac{1}{2} J \omega_2^2 + \frac{1}{2} m v_{t2}^2$$
 (1)

dove: J è il momento di inerzia del masso,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  sono rispettivamente la velocità di rotazione prima e dopo il rimbalzo, m è la massa del blocco (kg),  $v_{t1}$ ,  $v_{t2}$  sono la velocità di traslazione prima e dopo il rimbalzo (m/s), f(F) è una funzione di attrito e SF è un fattore di scala.

Le simulazioni si concentrano sul calcolo dell'energia cinetica posseduta dal blocco in ogni singola cella durante il moto verso valle; di conseguenza, nella determinazione del movimento in caduta, la velocità assume un ruolo di estrema importanza. In particolar modo si pone l'attenzione sul coefficiente di restituzione tangenziale, ovvero su come varia la velocità in seguito ai rimbalzi e le possibili deviazioni delle traiettorie iniziali. I principali fattori che ne determinano la variazione sono le caratteristiche morfometriche del blocco e le scabrezze della superficie del pendio (indice Mean Obstacle Height, MOH)

Scomponendo il vettore delle velocità nelle sue componenti normale e tangenziale si determinano i coefficienti di restituzione normale  $(R_n)$  e tangenziale  $(R_t)$ :

$$R_{n} = \frac{v_{2}sen\alpha}{v_{1}sen\alpha} \qquad R_{t} = \frac{v_{2}cos\alpha}{v_{1}cos\alpha} \quad (2)$$

Dorren et al. (2005) hanno dimostrato che  $R_t$  può essere calcolato sulla base della microtopografia, della composizione del terreno e delle dimensioni del masso, in quanto per i blocchi di dimensioni maggiori l'effettiva scabrezza della superficie è inferiore rispetto ai massi più piccoli (Kirby e Statham, 1975; Dorren e Seijmonsbergen, 2003). Dorren et al. (2006) hanno suggerito l'algoritmo per il calcolo di  $R_t$ :

$$R_t = \frac{1}{1 + \left[\frac{MOH + Dp}{R}\right]} \quad (3)$$

Dove  $D_p$  rappresenta la profondità di penetrazione (m); R è il raggio del blocco caduto (m); MOH è l'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo.

#### Precisione dei valori di scabrezza della superficie in RockyFOR3D

Nel software di calcolo Rockyfor3D, la scabrezza della superficie viene stabilita sulla base della granulometria del materiale presente nello strato subsuperficiale (con classe granulometrica superiore alla ghiaia) e sulla base di possibili ostacoli che un blocco potrebbe incontrare nel suo percorso (es. un masso di grandi dimensioni caduto in precedenza), ma non in riferimento alla micro-topografia del terreno (ad esempio solchi presenti sul versante dovuto al passaggio degli animali). Sulla base delle dimensioni del materiale o dei massi situati nello strato subsuperficiale (che formano la reale scabrezza), oppure alla presenza di ostacoli sul versante in seguito alla caduta dei massi e durante a un rimbalzo sulla superficie, i valori di scabrezza della superficie possono assumere valori differenti. Per assegnare determinati valori ai parametri RG70, RG20 e RG10, si suggeriscono quelli presenti in Figura 13 (consigliata da RockyFOR-3D):

Valori di scabrezza superficiale (MOH)	Valori possibili per Rg (m)
scabrezza nulla, assenza di ostacoli	0
> 0 – 10 cm	0,03, 0,05, 0,08, 0,1
> 10 – 50 cm	0,15, 0,2 0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,5
> 50 cm – 1 m	0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1
> 1 – 2,5 m	1,1, 1,2 1,3, 1,4, 1,5, 2, 2,5
> 2,5 – 10 m	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
> 10 m	100

Figura 13: Valori RG proposti da RockyFOR-3D (Dorren et al., 2014)

## 2.2 MODELLI GEOMORFOLOFICI

Di seguito sono riportati i punti fondamentali dei metodi geomorfologici (o empirici):

- permettono di stimare l'area di invasione nel fenomeno di caduta massi in maniera speditiva;
- stima di suscettibilità o pericolosità relativa;
- parametri empirici o meccanici molto semplificati.

Essi hanno come finalità la pianificazione urbanistica e territoriale e gli studi preliminari del fenomeno di caduta massi.

I metodi speditivi a piccola scala sono unicamente basati sulle caratteristiche geometriche del versante e su informazioni reperibili da database, archivi e sistemi informativi tematici nazionali e locali; come detto in precedenza, utilizzano metodi di analisi molto semplificati e parametri equivalenti, rappresentativi di tutti i fattori che influenzano il fenomeno. Fanno genericamente riferimento al concetto di "rockfall shadow zone" (Hungr & Evans, 1988), che suddivide il pendio in tre diverse zone (Figura 14):

- Source (area di distacco);
- Talus slope (zona di accumulo sul pendio);
- Rockfall shadow (zona di accumulo al piede del pendio).

La potenzialità di questi metodi risiede nella loro agevole implementazione in software GIS (QGIS).


Figura 14: Zone caratteristiche di un versante

La cosiddetta "rockfall shadow zone" rappresenta tutta quella zona del versante che ricade al di sotto della retta che unisce il piede della zona di distacco con il punto di massima elongazione raggiunto dai blocchi nella storia del pendio (è in sostanza la zona in cui la totalità dei blocchi che sono caduti in passato, si è accumulata sia al pendio sia al piede). Lo shadow angle è l'inclinazione di questa retta, secondo la definizione di Evans e Hungr (1993).

Lo stesso concetto può essere applicato a partire dal punto reale di distacco del blocco: in questo caso si parlerà di travel angle (Figura 15).



Figura 15: Definizioni alternative dello shadow angle

Shadow angle minimo  $\beta_s$ :

- più semplice da determinare quando l'esatta posizione della nicchia di distacco non è nota;
- Basato sull'assunzione che gran parte dell'energia cinetica si dissipa al primo impatto con il pendio (al piede della zona sorgente).

Travel angle  $\beta_t$ :

- Facilmente determinabile quando sono note le posizioni esatte della nicchia di distacco e della massima distanza percorsa;
- assume il significato di un angolo di attrito globale masso-pendio, che tiene conto di tutti i fenomeni dissipativi che si hanno durante il moto.

Entrambi dipendono dalle caratteristiche del sito e del blocco in caduta.

I molti studi statistici sull'argomento hanno portato a prime indicazioni sui valori che questi angoli possono assumere in contesti diversi (Figura 16).



Figura 16 : Stima degli angoli per diversi autori

## **2.3 QPROTO**

Il plugin QPROTO (QGIS Predictive Rockfall Tool, Castelli et al. 2020) è una procedura sviluppata per il software GIS open-source QGIS, per promuovere uno strumento libero e facilmente accessibile per tecnici e amministratori. Esso stima l'area di invasione e valuta mappe di pericolosità specifica su base territoriale sfruttando il Metodo dei Coni (Jaboyedoff & Labiouse, 2011). Implementa l'analisi di visibilità attraverso l'algoritmo r.viewshed di GRASS all'interno di una superficie topografica (DTM). Infine l'analisi viene condotta a partire da uno o più punti di osservazione, tramite la creazione di un cono di visibilità per ogni punto e l'intersezione tra il cono e la superficie topografica del pendio.

#### **METODO DEI CONI**

Presenta le seguenti caratteristiche:

- I punti di vista possono essere considerati aree sorgenti di caduta massi;
- A ciascun punto può essere associato un cono di visibilità, impostandone gli angoli di apertura (nei piani verticale e orizzontale).

Un masso che si distacca da un punto può raggiungere tutte le zone che un osservatore situato nello stesso punto è in grado di "vedere" nell'ambito del cono di visibilità.

Nel bidimensionale (Figura 17):



Figura 17:Schematizzazione dell' Energy line angle

- La massima distanza percorsa L si ottiene tramite l'intersezione tra la topografia del pendio e la retta di energy line;
- La energy line rappresenta la dissipazione di energia (lineare) lungo la traiettoria di caduta di un masso;
- L'inclinazione della energy line  $(\phi_p)$  assume il significato di un angolo di attrito globale equivalente masso-pendio

Nel tridimensionale (Figura 18):



Figura 18: Rappresentazione 3D del Cone Method (Castelli et al., 2020)

- $\phi_p$ : angolo di energy line, definito nel piano verticale come la retta che connette la sorgente con il punto più lontano raggiunta dal blocco staccatosi dal versante. L'inclinazione della retta di energy line rispetto all'orizzontale rappresenta l'energy line angle  $\phi_p$  e indica, in modo semplificato, le perdite di energia subite da un masso lungo la traiettoria del moto e assume quindi il significato di angolo di attrito equivalente masso-pendio (Jaboyedff e Labiouse, 2011). Rappresenta il fenomeno di dissipazione energetica in termini globali.
- α: angolo di dispersione laterale, che indica la dispersione laterale dell'area di propagazione rispetto alla direzione di massima pendenza del versante, misurato in gradi (°);
- ω: angolo di immersione del versante (dip direction). E' misurato in gradi (°) e indica la direzione di massima pendenza forma con il Nord geografico nel punto considerato

L'apice del cono corrisponde alla sorgente della caduta massi, mentre l'estensione del cono rappresenta le possibili aree visibili della superficie topografica che possono essere raggiunte dai massi.

Attraverso un bilancio energetico, è possibile calcolare la velocità del blocco in un punto generico P(x,y) e la sua energia cinetica:

$$v(x,y) = \sqrt{2g \left[H(x_0,y_0) - h(x,y) - \sqrt{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2} tan\varphi p\right]}$$
(4)  
$$E(x,y) = \frac{1}{2} m v^2(x,y)$$
(5)

Con:

- g = accelerazione di gravità
- (x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>) = coordinate del punto sorgente
- $H(x_0,y_0)$  =quota del punto sorgente
- h(x,y) = quota del punto P(x,y)
- $\varphi p =$  angolo di inclinazione della energy line
- m = massa del blocco



Figura 19: Sezione 2D del modello del Cone Method (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)

Il plugin consente inoltre di introdurre un indice di propensione al distacco  $I_d$  per ogni i-esimo punto sorgente, al fine di pesare la sua influenza sul risultato finale. E' un valore adimensionale compreso tra 0 e 1 [-]. In tal modo è possibile produrre:

- raster di suscettibilità (frequenza pesata);
- raster di pericolosità spaziale o specifica;

• pericolosità massima

$$w\_en = \left[I_{D,i} \cdot E(x,y)_i\right]_{Max} \tag{6}$$

• pericolosità cumulata

 $w_{\text{en,tot}} = \sum_{i=1}^{n} [I_{\text{D},i} \cdot E_{\text{k},i}(\mathbf{x},\mathbf{y})]$ (7)

dove n è il numero totale di punti sorgente che vedono la cella in questione.

#### **DATI DI INPUT**

Il plugin QPROTO necessita di pochi parametri di input, facilmente ottenibili:

- 1. ID: numero identificativo del punto di distacco [-];
- 2. Elevation: Altezza del punto di distacco in metri [m] sul livello del mare;
- 3. Aspect: angolo di immersione  $\omega$ ;
- 4. Boulder Mass: massa del blocco in caduta, misurata in (kg);
- 5. Energy Line Angle  $\varphi_p$ : già descritto in precedenza e misurato in gradi (°).
- 6. Lateral Spreading Angle α: Angolo di dispersione laterale;
- 7. Detachment Propensity ID: indica la propensione al distacco del blocco nel punto sorgente;
- 8. DTM del terreno.

#### **DATI DI OUTPUT**

In seguito all'elaborazione, QPROTO fornisce in output 10 mappe raster che possono essere visualizzate direttamente nell'interfaccia di QGIS attraverso una scala cromatica preimpostata, per facilitarne la visualizzazione. Vengono anche creati un layer vettoriale di punti che rappresenta l'area di invasione e un file di testo dove vengono visualizzate tutte le elaborazioni eseguite. Di seguito l'elenco completo degli output (Castelli et al., 2020):

1.count: mappa raster che restituisce un valore adimensionale e rappresenta la frequenza di passaggio non pesata, ovvero il numero di nicchie dalle quali una cella viene visualizzata.

2. suceptibility: mappa raster che restituisce un valore adimensionale e descrive come il fenomeno di caduta massi sia distribuito nell'area di invasione (probabilità spaziale di accadimento), evidenziando le zone che sono interessate maggiormente dal fenomeno. E' ottenuta come somma dei valori ID dell'indice di distacco di ogni cella sorgente che vede la cella in considerazione e rappresenta la frequenza di passaggio pesata per una data cella.

3. v\_min: mappa raster misurata in m/s che rappresenta la velocità minima calcolata in ogni cella dell'area di invasione.

4. v\_mean: mappa raster misurata in m/s che rappresenta la velocità media calcolata in ogni cella dell'area di invasione.

5. v\_max: mappa raster che rappresenta la velocità massima calcolata in ogni cella dell'area di invasione in m/s. Per il calcolo della velocità si fa riferimento all'Equazione (4), i cui elementi sono riportati in Figura 20:



Figura 20: Generica sezione di calcolo dell'algoritmo di QPROTO (Castelli et al., 2020)

6. e\_min: mappa raster misurata in J che rappresenta l'energia cinetica minima calcolata in ogni cella dell'area di invasione.

7. e\_mean: mappa raster misurata in J che rappresenta l'energia cinetica media calcolata in ogni cella dell'area di invasione.

8. e\_max: mappa raster misurata in J che rappresenta l'energia cinetica massima calcolata in ogni cella dell'area di invasione.

9. w\_en: mappa raster che caratterizza la massima energia cinetica pesata, ottenuta dal massimo valore assunto come prodotto tra l'indice di distacco ID dell'i-esimo del punto sorgente dal quale è vista la cella in questione e l'energia cinetica registrata nella medesima cella per ogni cono di visibilità alla quale appartiene. L'espressione utilizzata è l'Equazione (6).

10. w\_en\_tot: mappa raster che determina la sommatoria del prodotto tra l'i-esimo indice di distacco ID e l'iesima energia cinetica  $E_k$ , per ogni cono alla quale una determinata cella dell'area di invasione appartiene (Equazione (7)).

11. finalpoints.shp: layer vettoriale che rappresenta i punti dell'area di invasione sui quali è stata effettuata l'elaborazione. Per creare i punti viene utilizzata la stessa risoluzione del DTM, ovvero un punto per ogni cella.

12. log.txt: file di testo che riporta tutte le analisi effettuate.

#### 2.3.1 FUNZIONAMENTO DELL'ALGORITMO

Attraverso la funzione implementata in GRASS 7 di QGIS r.viewshed, QPROTO visualizza le celle del pendio a partire dalle celle sorgenti del DTM, assumendo che il punto di vista coincida con la nicchia di distacco del fenomeno, Successivamente vengono eliminate le celle visibili che si trovano al di fuori del cono individuato da  $\varphi_p$  e  $\alpha$  e calcolate le caratteristiche del moto (frequenze, energie, energie pesate, velocità). Occorre prestare particolare attenzione alle zone nascoste (Hidden zones) le quali dovranno tuttavia essere inglobate nelle aree potenzialmente raggiungibili dai blocchi (Figura 21).



Figura 21: Zone nascoste durante analisi di visibilità (Castelli et al., 2020)

Per la creazione del cono di invasioni vengono effettuati i seguenti passaggi (Figura 22)



Figura 22: Rappresentazioni grafiche schematiche delle elaborazioni condotte da QPROTO (Manuale di QPROTO, ver.1.4)

1. Creazione dei vertici del triangolo nel piano orizzontale tramite la definizione di:

- Punto 1: punto sorgente
- Punto 2: aspect ( $\omega$ ) + semiapertura ( $\alpha$ )
- Punto 3: aspect ( $\omega$ ) semiapertura ( $\alpha$ )

1. I punti sorgenti (o aree) sono definiti da uno shape file con diversi attributi (ID, quota topografica, massa del blocco, indice di propensione al distacco (I<sub>d</sub>), angolo di immersione o aspect  $\omega$ , angolo di energy line  $\varphi_{p}$ , angolo di apertura laterale o semiapertura  $\alpha$ .

2. Creazione del triangolo sul piano orizzontale a partire dai vertici definiti in precedenza.

3. La funzione r.viewshed è eseguita per ogni punto sorgente, fornendo in output una mappa raster di visibilità.

4. La mappa di visibilità viene filtrata per eliminare i pixel che non si trovano sotto la linea di energy line.

5. Il raster con i pixel filtrati viene trasformato in un vettore e viene generato un poligono convesso intorno ai punti.

6. Il poligono convesso viene intersecato con il triangolo creato nel punto 2.

7. Il cono creato viene convertito in file di punti (secondo la risoluzione del DTM di partenza). Ad ognuno dei punti sono associati degli attributi riguardanti gli output di QPROTO.

8. Per ogni punto viene verificata la condizione (Equazione 4) ≥0 per garantire che esso si trovi al di sotto della energy line.

#### 2.4 DISCUSSIONE SUL PROBLEMA DEI PARAMETRI DI QPROTO

L'uso di QPROTO comporta che vengano definiti a priori i parametri di input semi-empirici  $\varphi_p$  e  $\alpha$  per ricavare il cono di visibilità. Riguardo la valutazione di  $\varphi_p$ , sono presenti valori di riferimento reperibili in letteratura (legati alla percentuale dei punti di arresto, Figura 23):



Figura 23: Angoli di energy line  $\varphi_p$  per diversi autori (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)

Nella pratica solitamente si utilizzano (Castelli, 2020):

- $\varphi_p = 27^\circ \div 38^\circ$  per rockfall (massi isolati)
- $\varphi_p = 10^\circ \div 15^\circ$  rock avalanches (crolli in massa)

Alcuni autori suggeriscono una variazione del travel angle compresa fra 28,5° e 47,5° (Onofri e Candian, 1979; Meiβl, 1998) e una modifica del minimum shadow angle compresa fra 22° e 30° (Lied, 1977; Hungr and Evans, 1988; Evans and Hungr, 1993). Essi non tengono conto delle condizioni al contorno che influenzano il processo di caduta massi.

Per l'angolo di dispersione laterale  $\alpha$  non esistono valori di riferimento in letteratura. (Torsello, 2019). Nel caso di topografia regolare è possibile considerare  $\alpha = \pm 20^{\circ}$ . L'irregolarità della topografia influisce molto sulla dispersione laterale dei massi.

Nell'ambito di una procedura speditiva di valutazione della pericolosità (assenza di dati del terreno) si ricorre a:

- Analisi storica: attraverso inventari delle frane (IFFI, SIFRAP, altri cataloghi regionali)
- Analisi geometriche (condizioni necessarie per il distacco di un masso dal versante): è necessaria la presenza di fratture/discontinuità (immagini satellitari/aeree, osservazioni speditive del versante ecc.), densità di fratture e intersezioni (da immagini aeree o satellitari e infine inclinazione del pendio >40°-45° (dal DTM). Si ricorre quindi all'utilizzo di strumenti GIS.

Risulta quindi necessario lo studio dei parametri necessari per condurre le analisi con QPROTO (in particolare per l'angolo di energy line  $\varphi_p$ ) con riferimento a:

- Back analysis 3D di eventi passati;
- Analisi storiche (inventari delle frane);
- Analisi parametriche 3D per valutare l'influenza di alcuni parametri caratteristici del blocco o del versante (forma, volume del blocco, geometria del pendio, densità delle foreste, scabrezza del versante ecc.).

Lo scopo è quello di fornire agli utilizzatori del plugin gli strumenti necessari per condurre la stima dell'angolo  $\varphi_p$  in modo affidabile, anche se le informazioni a disposizione sul sito in esame sono limitate. Questo lavoro di tesi si aggiunge al filone di ricerca di precedenti tesi (Torsello, 2019) dedicato alla definizione dei parametri da utilizzare per QPROTO, al fine di fornire agli utilizzatori gli strumenti necessari per la stima. L'ambito di applicazione dell'elaborato tratta la scabrezza (che è uno dei fattori più delicati e complicati che influenzano il fenomeno), mentre tutti gli altri parametri sono stati mantenuti costanti. Nei precedenti lavori di tesi sono state effettuate analisi parametriche su  $\varphi_p$  con riferimento ad altri parametri (volume del blocco, forma del blocco, densità di vegetazione ecc.).

### **CAPITOLO 3**

# 3. ANALISI PARAMETRICHE SULL'INFLUENZA DELLA SCABREZZA DEL VERSANTE SULL'ANGOLO DI ENERGY LINE

Attraverso il software di dettaglio traiettografico RockyFOR-3D sono state effettuate analisi parametriche di dettaglio al variare dei parametri RG10, RG20, RG70 (considerati uniformi su tutta la zona di transito del pendio) per osservare l'influenza di ogni valore di RG (considerato indipendentemente dagli altri) su  $\varphi_{p}$ .

#### 3.1.1 ANALISI PARAMETRICHE PRELIMINARI

#### Creazione file raster di input per RockyFOR3D

Il punto di partenza del lavoro di questa tesi consiste nella creazione di pendii semplificati "virtuali", ottenuti dall'unione di tre piani inclinati che sono la zona di distacco, la zona di transito e la zona di arresto. Le simulazioni parametriche hanno l'obiettivo di evidenziare l'influenza della scabrezza (intesa come ostacoli presenti lungo il versante e quindi per il software RockyFOR-3D RG10-RG20-RG70) attraverso lo studio dei valori contenuti nei raster di output di RockyFOR-3D, relativi all'angolo di energy line  $\varphi p$  (EL\_angle.asc) e al numero di blocchi depositati (nr\_deposited.asc). Ogni versante è originato a partire da una griglia Excel contente i valori di x, y, z. Successivamente il file Excel, dopo essere convertito in un file di testo, viene importato in QGIS e discretizzato nella prima mappa raster dem.asc con risoluzione 5 m x 5 m.

Le restanti mappe raster di input si ricavano creando gli shape file delle aree con parametri omogenei, le tabelle degli attributi relative e convertendo tali file in raster, utilizzando i differenti campi della tabella degli attributi.



Figura 24: Creazione di pendio virtuale a 45° per RockyFOR-3D (creato su "AutoCAD")

Attraverso uno script di Matlab sono stati definiti i dati di input dell'analisi dei pendii virtuali, con molte assunzioni base. In particolare:

- Pendenza della parete sorgente, del pendio e del piede del pendio (Figura 24);
- Inclinazione del pendio  $\beta$  (nelle analisi si è considerato  $\beta=45^{\circ}$ );
- Altezza massima del pendio = 300 metri;
- Coordinate della nicchia di distacco x,y impostate in modo che il blocco si trovi al centro della cella per non risentire degli effetti di bordo e nel centro della zona di distacco;
- Valore di densità della nicchia di distacco impostata a 2500 Kg/m<sup>3</sup>;
- Forma del blocco che dipende dal caso in esame e può essere parallelepipeda, sferica, ellissoidale e discoidale (per le analisi sono stati considerati blocchi di forma cubica e sferica);
- Volume del blocco che dipende dalle 3 dimensioni d1, d2, d3 (lunghezza, larghezza e altezza); per le analisi sono stati considerati volumi di 1 m<sup>3</sup>, 2 m<sup>3</sup> e 5 m<sup>3</sup>;
- Definizione del DTM con risoluzione 5x5 metri;
- Sono state effettuate analisi senza alberi e successivamente con una densità di vegetazione ad alto fusto pari al 100% (ovvero 400 alberi/ettaro); si assume che per un DTM 5 m x 5 m di risoluzione, una densità di vegetazione pari al 100% corrisponda a 400 alberi/ha, ovvero 1 albero per ogni cella del DTM, in quanto sembrerebbe che i risultati delle analisi non siano sensibili all'aumentare del valore massimo del numero di alberi in ogni cella del 50

DTM (Netti et al., 2016). La vegetazione, la quale è concentrata nella zona di transito, a favore di sicurezza si assume che sia costituita dal 100% di conifere per la scarsa resistenza meccanica delle conifere nei confronti dei fenomeni di caduta massi (Stokes et al., 2005);

- Diametro medio degli alberi (DBH) = 35cm e deviazione standard del diametro degli alberi (DBHSTD) = 1 cm;
- Tipi di suolo presenti nelle tre zone di innesco, transito e arresto secondo la Figura 9; nelle simulazioni è stato considerato suolo 4 zona di innesco, suolo 4 zona di transito e suolo 1 zona di arresto;
- Non sono presenti opere di protezione sul versante;
- Estensione elevata del versante nella direzione y, in modo da considerare la dispersione laterale di tutte le possibili traiettorie del software (Figura 24);
- Numero di simulazioni per cella sorgente: 20000 traiettorie indipendenti;
- Infine, si sono fatti variare i valori di scabrezza RG10, RG20, RG70 nella zona di transito del pendio virtuale, in maniera del tutto indipendente, osservando i risultati di  $\phi_p$  al variare degli ostacoli presenti sul versante I valori di RG nella zona di innesco e di arresto sono sempre rimasti costanti a 0.05 metri (ovvero scabrezze molto basse). Sono state effettuate diverse simulazioni aumentando gradualmente un parametro (ad es. RG10 da 0.05 a 10 m, lasciando costanti gli altri due parametri a 0.05 m) e così via per RG20 e RG70, osservando i valori di  $\phi_p$  che restituisce il software.

Nelle Figure 25-33 sono riportate le analisi parametriche preliminari per blocchi cubici e sferici di 1 m<sup>3</sup>, 2 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup> di volume, sia in assenza alberi e sia in presenza di un albero per ogni cella del DTM (densità di vegetazione 100%), analizzando la variazione di  $\phi_p$  al crescere dei valori di RG.



**VOLUME BLOCCO = 1 m<sup>3</sup> – BLOCCHI CUBICI E SFERICI** 

Figura 25: RG10- $\varphi_p$  (volume 1m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 26: RG20- $\varphi_p$  (volume 1m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 27: RG70- $\varphi_p$  (volume 1m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



# **VOLUME BLOCCO = 2 m<sup>3</sup> – BLOCCHI CUBICI E SFERICI**

Figura 28: RG10- $\varphi_p$  (volume 2m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 29: RG20- $\varphi_p$  (volume 2m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 30: RG70- $\varphi_p$  (volume 2m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



# VOLUME BLOCCO = $5 m^3$ – BLOCCHI CUBICI E SFERICI

Figura 31: RG10- $\varphi_p$  (volume 5m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 32: RG20- $\varphi_p$  (volume 5m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO



Figura 33: RG70- $\varphi_p$  (volume 5m<sup>3</sup>) – BLOCCO CUBICO+SFERICO

#### 3.1.2 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Osservando i grafici riportati in figura, è possibile evidenziare che in tutti i casi, indipendentemente dalla forma del blocco e dal volume, all'aumentare dei valori di RG il valore di  $\varphi_p$  aumenta, in quanto, al crescere dell'altezza degli ostacoli presenti lungo il versante, il masso potrebbe impattare contro di essi e rallentare o addirittura arrestare la sua corsa (un ostacolo più grande ha più probabilità di fermare un blocco in discesa, in relazione alle dimensioni e alla forma di quest'ultimo);  $\varphi_p$  sarà quindi maggiore e l'area di invasione più piccola.

Si può notare che la presenza di alberi aumenta il numero di ostacoli presenti lungo il pendio portando a un ulteriore aumento dei valori di  $\varphi_p$ , anche se non eccessivo. Come specificato nei primi capitoli, essi svolgono quindi una funzione di protezione nel fenomeno di caduta massi, ma da studi di tesi precedenti (Torsello, 2019), sempre nell'ambito della ricerca sui versanti virtuali con le medesime caratteristiche del lavoro di questa tesi (ovvero stesso DTM, stessa dimensione degli alberi ecc.), si deduce che essi influiscono fino a un volume di 5 m<sup>3</sup> (sembrerebbe infatti che oltre quel volume non svolgano più alcuna protezione).

Per quanto riguarda le forme del blocco, si sono effettuate le analisi solo per blocchi isometrici (in particolare blocchi cubici o sferici). I valori di  $\varphi_p$  sono molto simili trattandosi di forme isometriche, ma leggermente maggiori per il blocco cubico rispetto al blocco sferico in tutti e tre i casi; questo è probabilmente dovuto al fatto che il cubo presenta una maggiore superficie di appoggio rispetto alla sfera (il blocco si arresterà prima). I possibili effetti in merito ad altre forme del blocco (non isometriche) potranno essere valutati in studi futuri.

Un'altra importante osservazione presente in tutti i grafici, riguarda l'esistenza di un limite di altezza di ostacoli oltre il quale non si ha più alcuna influenza del valore di energy line angle; esso rimarrà costante nonostante si continui ad aumentare RG; questo si presenta quando la dimensione dell'ostacolo è effettivamente  $\geq$  della dimensione del blocco in caduta (vedi sopra Ritchie, 1963; Kirkby e Statham, 1975; Bozzolo e Pamini, 1986; Statham e Francis, 1986; Giani, 1992; Evans e Hungr, 1993) e il masso viene quindi intrappolato dalle asperità del pendio e si ferma rapidamente.

Come ultimo step, si nota dai grafici che i valori di  $\varphi_p$  per gli RG70 sono molto simili tra di loro rispetto ai casi con RG10 e RG20 (indipendentemente da volume, forma del blocco e presenza di alberi) e raggiungono valori generalmente più alti (fino a circa 58° per il blocco di 1 m<sup>3</sup>). Questo è probabilmente dovuto al fatto che il valore di RG70 (corrispondente all'altezza in metri di un ostacolo incontrata da un blocco in caduta durante un rimbalzo nel 70% dei casi e che potrebbe farlo arrestare) è una percentuale decisamente maggiore rispetto a RG10 e RG20 (rispettivamente 10% e 20% di probabilità); il masso avrà una maggiore probabilità di incontrare un ostacolo e arrestarsi (i valori di  $\varphi_p$  sono maggiori e aumentano di poco nonostante si aumenti RG70), (Figure 27, 30 e 33).

In generale, un aumento di volume porterà a una leggera diminuzione dell'angolo  $\varphi_p$  e a un aumento delle aree di invasione (i blocchi andranno ad arrestarsi più lontano).

Nelle Tabelle 1 e 2 sono riportati i valori minimi e massimi di  $\varphi_p$  per i differenti tipi di forma e volume dei blocchi, dalle quali si possono verificare i risultati discussi in precedenza, ovvero che i valori massimi di  $\varphi_p$  si raggiungono per alti valori di RG70 (mantenendo RG10 e RG20 costanti e con valori molto bassi) e inoltre che il valore massimo di  $\varphi_p$  si ha quando la dimensione dell'ostacolo è  $\geq$  alla dimensione del blocco in caduta.

BLOCCO CUBICO							
β(°)	volume(m³)	RG10 (m)	RG20 (m)	RG70 (m)	trees (alberi/ha)	φp (°)	
45°	1	0.05	0.05	0.05	0	36.87	
45°	1	0.05	0.05	1.5	0	56.96	
45°	1	0.05	0.05	0.05	400	40.48	
45°	1	0.05	0.05	1.5	400	58.41	
45°	2	0.05	0.05	0.05	0	34.39	
45°	2	0.05	0.05	2	0	56.96	
45°	2	0.05	0.05	0.05	400	37.26	
45°	2	0.05	0.05	2	400	56.96	
45°	5	0.05	0.05	0.05	0	31.85	
45°	5	0.05	0.05	2	0	53.98	
45°	5	0.05	0.05	0.05	400	33.98	
45°	5	0.05	0.05	5	400	56.96	

Tabella 1: Valori di  $\varphi_p$  per blocchi cubici

BLOCCO SFERICO							
β (°)	volume(m³)	RG10 (m)	RG20 (m)	RG70 (m)	trees (alberi/ha)	φp (°)	
45°	1	0.05	0.05	0.05	0	32.79	
45°	1	0.05	0.05	2	0	56.5	
45°	1	0.05	0.05	0.05	400	36.5	
45°	1	0.05	0.05	2	400	56.6	
45°	2	0.05	0.05	0.05	0	31.33	
45°	2	0.05	0.05	5	0	55.42	
45°	2	0.05	0.05	0.05	400	33.72	
45°	2	0.05	0.05	5	400	56.6	
45°	5	0.05	0.05	0.05	0	29.72	
45°	5	0.05	0.05	5	0	55.42	
45°	5	0.05	0.05	0.05	400	30.91	
45°	5	0.05	0.05	5	400	55.42	

Tabella 2: Valori di  $\varphi_p$  per blocchi sferici

Le analisi parametriche di dettaglio condotte in questo capitolo di tesi sono un buon strumento per indagare sull'angolo  $\phi_p$  al variare della scabrezza.

Nel successivo capitolo, si vuole ricavare la scabrezza sulla base di una distribuzione di volumi al piede, in modo da ricavare terne di scabrezze da inserire in RockyFOR-3D per la valutazione di  $\phi_{p.}$ 

## **CAPITOLO 4**

# 4. DEFINIZIONE STATISTICA DELLA SCABREZZA SUPERFICIALE DEL VERSANTE

In questo capitolo verrà affrontato il parametro scabrezza partendo da una distribuzione di volumi al piede di un caso reale in sito.

Come visto in precedenza, attraverso il software RockyFOR-3D è possibile effettuare analisi parametriche su pendii virtuali: si sono fatte variare le terne RG10, RG20; RG70 in maniera indipendente, impostandole manualmente nel software e trovando diversi valori di  $\varphi_p$ . L'obiettivo è quello di riuscire a determinare delle terne di scabrezza (sulle quali effettuare successivamente le analisi tramite il software RockyFOR-3D) sulla base delle caratteristiche proprie del sito in esame. Per la determinazione delle scabrezze, si rimanda alla legge di frequenza sui volumi di blocchi caduti al piede del caso studio di Nosuggio, una piccola frazione di Cravagliana (VC). Nosuggio è situata alla base di un versante molto ripido che si estende dalla quota di 1070 m s.l.m. fino a 780 m s.l.m. Al di sotto dei 780 m s.l.m. hanno inizio una serie di pareti sub-verticali (altezza di circa 20 m). La nicchia di distacco è stata individuata in uno sperone roccioso avente una quota di circa 40 metri, superiore rispetto alla strada provinciale (Fanni, 2019). L'evento franoso a cui si farà riferimento è quello avvenuto il 25/06/2014, nel quale sono stati coinvolti circa 1000 m<sup>3</sup> di roccia; gran parte del volume mobilitato si è arrestato prima delle zone abitate, mentre sulla strada sono arrivati tre grandi blocchi di dimensione circa 5.3 m<sup>3</sup> (Fanni, 2019).

Prima di analizzare il caso studio, si fa un breve cenno ai parametri a e b della legge di potenza negativa presenti in letteratura e fondamentali per le successive analisi.

# 4.1 VALORI DEI COEFFICIENTI DELLA CURVA REPERIBILI IN LETTERATURA

#### 4.1.1 ANALISI DI FREQUENZA PER LA CADUTA MASSI

Generalmente i metodi empirici calcolano la probabilità di rottura per la caduta massi attraverso analisi statistiche, utilizzando gli inventari di eventi passati, che consentono anche di preparare relazioni di magnitudo-frequenza (MF) degli eventi (Hungr et al. 1999; Dussauge-Peisser et al. 2002; Guzzetti et al. 2003).

L'occorrenza temporale delle frane può essere espressa in termini di frequenza, periodo di ritorno o probabilità di superamento. La frequenza esprime il numero di eventi in un determinato intervallo di tempo (ad es. frequenza annuale) e può essere valutata dagli inventari di caduta massi.

Le analisi statistiche applicate alle frane hanno rilevato che la magnitudo rispetto al numero cumulativo o alla frequenza delle frane è invariante rispetto alla scala e segue una distribuzione di legge di potenza (Hovius et al. 1997; Pelletier et al. 1997; Guzzetti et al. 2002b). La distribuzione dimensionale è simile a quella osservata da Gutenberg e Richter (1944, 1954) per i terremoti e può essere espressa nel modo seguente:

$$Log_{10}N (> M) = a - bM$$
 (8)

dove:

- N è il numero cumulativo di frane aventi una magnitudo superiore a un valore prefissato M (ad esempio un volume maggiore di una certa soglia);

- *a* è un coefficiente che misura il livello di attività di una frana;

- b è il gradiente della relazione, dove un valore b più alto indica una proporzione maggiore di piccole frane e un valore b più basso una proporzione minore di piccole frane.

Poichè M è misurata su una scala logaritmica, si ottiene una relazione lineare nella scala log-log.

Questo tipo di relazioni sono state ottenute per flussi di detriti (Guthrie ed Evans 2004; Hungr et al. 2008) e caduta massi (Hungr et al. 1999; Dussauge-Peisser et al. 2002; Chau et al. 2003; Guzzetti et al. 2003). Per eseguire questa analisi è necessario un inventario più completo possibile (Hungr et al. 1999; Dussauge-Peisser et al. 2002).

Il TLS (Terrain Laser Scanner) viene utilizzato per l'identificazione e il calcolo dei volumi di blocchi di roccia caduti, a partire dalle immagini delle scansioni sequenziali (Abellan et al. 2006; Royán et al. 2015). La sottrazione dei Modelli Digitali di Superficie (DSM) ottenuti con le rispettive nuvole di punti può calcolare accuratamente i volumi mancanti. Se la geometria precedente alla rottura è sconosciuta, i volumi scomparsi possono essere calcolati con la ricostruzione della topografia originale su un DSM generato sulla base di immagini precedenti dell'evento.

Nel campo delle dimensioni, una chiara sottovalutazione dei piccoli volumi nella maggior parte degli inventari nasce da due cause. In primo luogo, quando si tratta di vecchi eventi del passato, solo quelli più grandi, che sono rimasti nella memoria dell'uomo, si trovano ancora negli archivi. In secondo luogo, anche al giorno d'oggi le cadute massi si notano soprattutto quando creano danni in foreste, strade ed edifici. Di conseguenza, i piccoli eventi sono raramente segnalati.

A causa di queste difficoltà, occorre prestare particolare attenzione a valutare la stabilità statistica dei set di dati utilizzati. Nelle analisi vengono considerate finestre temporali in cui il numero di eventi per anno (o decennio o secolo) è relativamente costante.

Dussauge-Peisser et al. (2002) hanno discusso l'interpretazione dei parametri a e b della legge di potenza negativa. Essi ritengono che se i dati non corrispondono a nessuna legge, l'inventario può essere utilizzato per stimare una frequenza complessiva nell'intervallo di volumi coperti dai dati. Tuttavia, nel caso in cui sia possibile applicare una legge di potenza (e i test statistici ne certifichino la completezza), è possibile estrapolare la frequenza a volumi più grandi. Questo punto di vista è condiviso da altri ricercatori (Guzzetti et al. 2003; Picarelli et al. 2005). In ogni caso, come osservato da Corominas e Moya (2008), la relazione frequenza-magnitudo per le frane non è puramente lineare in una scala log-log. Un effetto di appiattimento della curva si osservate è inferiore a quello previsto dalla relazione dell'esponenziale. È stato suggerito che l'appiattimento della curva potrebbe essere dovuto da diversi fattori:

- all'incompletezza (censura) delle registrazioni delle frane, in quanto le piccole frane non vengono rilevate nelle fotografie aeree (Hungr et al. 2008; Stark e Hovius 2001);
- alla limitata durata temporale delle serie storiche di eventi;
- al fatto che piccoli volumi possono erroneamente essere considerati appartenenti a uno stesso evento e non indipendenti;
- esiste un qualche tipo di vincolo fisico che giustifichi questo appiattimento a piccole dimensioni (Guthrie e Evans 2004).

Tuttavia, la mancanza di idoneità alla legge di potenza può avvenire anche per grandi frane (Guzzetti et al. 2002b; Malamud et al. 2004) e, di conseguenza, altre cause dovrebbero essere esplorate per spiegare tale comportamento. Questi tipi di vincoli non sono ancora ben compresi. Questo problema diventa critico quando si tratta di strategie di gestione del rischio di caduta massi.



Figura 34: Esempio di distribuzione cumulativa delle frequenze per i volumi di caduta massi delle gole superiori dell'Arly, Francia in seguito a 59 eventi registrati su 2.2 km tra il 1954 e il 1976 (C. Dussauge-Peisser et al., 2002)

#### 4.1.2 CICATRICI SULLE PARETI ROCCIOSE

Ottenere lunghe registrazioni di caduta massi è molto complicato, in quanto in presenza di strade i blocchi di roccia vengono immediatamente rimossi dopo il loro verificarsi per riprendere le condizioni del traffico. In alcuni casi eccezionali, le squadre di manutenzione hanno raccolto le informazioni necessarie per la preparazione delle relazioni Magnitudo-Frequenza (Hungr et al. 1999; Ferlisi et al. 2012). Purtroppo, la situazione è peggiore nei pendii naturali. Sono disponibili alcuni inventari storici di caduta massi che permettono l'analisi fino a un centinaio di anni (Wieczorek et al. 1998; Guzzetti et al. 2003; Hantz et al. 2003). D'altra parte, i blocchi di roccia depositati sul pendio sottostante le sorgenti di caduta massi non possono essere solitamente utilizzati per preparare serie di dati perché non è possibile discriminare quale dei blocchi appartenga ai diversi eventi di caduta massi che hanno generato il deposito.

Invece, la parete rocciosa dove sono state generate le frane può conservare la registrazione degli eventi verificatisi durante le ultime centinaia o migliaia di anni sotto forma di cicatrici di caduta massi. La cicatrice è un'area di rottura sulla parete rocciosa generata dalla separazione di una massa rocciosa in uno o più eventi (Figura 35). La distribuzione dei volumi o della densità delle cicatrici, sono indicative del verificarsi della caduta massi e possono essere usate come misura indiretta della frequenza degli eventi.



Figura 35 Esempio di cicatrice di caduta massi (Corominas et al., 2017)

#### 4.1.3 VALORI COEFFICIENTI SECONDO DIVERSI AUTORI

E' stata recentemente sviluppata una metodologia per il calcolo delle distribuzioni di volume delle cicatrici su pareti rocciose (in seguito a un evento di caduta massi) attraverso l'utilizzo del TLS (Terrain Laser Scanner). Il tutto è avvenuto nella parete rocciosa di Forat Negre, nel Principato di Andorra (Santana et al., 2012). Negli ultimi decenni sono stati costruiti edifici sul territorio, continuamente minacciati dalla caduta massi. La zona di deposito contiene blocchi con volumi compresi tra 0.5 e 270 m<sup>3</sup>. Per la descrizione dettagliata dell'area e delle azioni di protezioni intraprese, si rimanda a Copons (2007), Copons et al. (2004) o Corominas et al. (2005).

Il valore di *a* dell'Equazione (8) rappresenta il tasso di attività di caduta massi, che, se non normalizzato, è anche funzione delle dimensioni dell'area di studio. Per quanto riguarda *b*, più è alto il suo valore e meno importante è il contributo delle rotture più grandi e viceversa. La Figura 56 riporta alcuni valori dei coefficienti secondo vari autori. Rispetto ad altri lavori pubblicati (Dussauge et al. 2003; Guzzetti et al. 2003), il valore *b* assoluto per il caso di Forat Negre è relativamente alto. Dussauge et al. (2003), sostengono che la caduta massi per i piani sub-verticali e per un'ampia gamma di volumi ( $10^2-10^{10}$  m<sup>3</sup>) ha valori *b* di 0,5 ± 0,2.

Diversi autori mettono in relazione il valore *b* con la litologia e il livello di fratturazione del pendio (Dussauge-Peisser et al. 2002). Brunetti et al. (2009), dopo aver analizzato 19 set di dati (inclusi diversi set di dati di caduta massi), hanno concluso che la variazione del comportamento di scala delle distribuzioni non cumulative è indipendente dalle caratteristiche litologiche, dalle impostazioni morfologiche, dai meccanismi di innesco, dalla durata del periodo e dall'estensione dell'area coperta dai set di dati. Essi sostengono che la statistica del volume delle frane è condizionata principalmente dalle proprietà geometriche del pendio o della massa rocciosa e che la differenza tra gli esponenti di scala delle frane è conseguenza della disparità dei meccanismi. D'altra parte, il fatto che le frane e le discontinuità da loro studiati presentano la stessa relazione frequenza-volume ha fatto sì che Guzzetti et al. (2003) e Dussauge-Peisser et al. (2002) concludessero che non vi è alcuna differenza statistica tra questi tipi di frane. Confrontando i risultati di quattro serie di dati, Hungr et al. (1999) hanno suggerito che gli esponenti inferiori potrebbero corrispondere ad aree di rocce massicce con la possibilità di produrre una proporzione relativamente maggiore di guasti strutturalmente controllati di grande magnitudo.

Reference	Location	Length of the record (year)	Range of volumes fitted (m <sup>3</sup> )	Number of events (N)	Scaling parameter (b)
Hungr et al. ( <u>1999</u> )	Highway 99 British Columbia	40	$10^{1}8\times10^{8}$	390	-0.43
	BCR line	12	10 <sup>0</sup> -10 <sup>4</sup>	403	-0.4
	Highway 1		10 <sup>0</sup> -10 <sup>4</sup>	226	-0.7
	CP Line	22	10 <sup>0</sup> -10 <sup>4</sup>	918	-0.65
Gardner (1970) <sup>a</sup>	Lake Louis	Two summers	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>3</sup>	409	-0.72
Chau et al. ( <u>2003</u> )	Hong Kong, China			201	-0.87
Dussauge- Peisser et al. ( <u>2002</u> )	Upper Arly, gorge French Alps		10 <sup>0</sup> -10 <sup>4</sup>	59	-0.45
	Grenoble, French Alps	60	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>6</sup>	87	-0.41
	Yosemite, USA	77	10 <sup>0</sup> -10 <sup>5</sup>	101	-0.46
Royán et al. ( <u>2015</u> )	Puigcercós	<b>6.8</b> 7	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>2</sup>	3096	-0.72

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Cited in Hungr et al. (1999)

Figura 36: Esponenti sulla legge di potenza hanno adattato le distribuzioni ottenute per i diversi inventari di caduta massi (Hungr et al.,1999)

Nel caso del Forat Negre di Andorra, l'analisi strutturale dei set di giunti suggerisce che potrebbe esistere un controllo geologico sulle dimensioni delle frane che potrebbe giustificare il maggiore valore b della distribuzione del volume della cicatrice.

In conclusione, l'osservazione di numerosi inventari di caduta massi mostra che una legge di potenza negativa fornisce i dati per un dato intervallo di volumi. Per i vari tipi di scogliera rocciosa, i valori di *b* non dipendono dal sito, ma dal grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, dalla distribuzione di frequenza dei volumi e i valori spaziano da 0.4 a 0.9 circa; i valori di *a* spaziano entro due ordini di grandezza e variano da sito a sito (è il valore di frequenza corrispondente ai range di volumi presenti al piede).

E' importante limitare correttamente i parametri prima di qualsiasi uso estensivo di questa legge per la valutazione dei pericoli. Ulteriori indagini su vari inventari sono ancora necessarie per confermare l'indipendenza del sito dal valore di *b*. Il confronto sistematico tra l'attività di caduta massi (frequenza degli eventi) e le caratteristiche dell'area di origine (impostazioni geologiche, geomeccaniche e morfologiche della massa rocciosa, condizioni climatiche) aiuteranno a limitare il parametro *a*.

#### 4.1.4 DETERMINAZIONE LEGGE VOLUME-FREQUENZA PER IL CASO DI NOSUGGIO (VC)



Figura 37: Nosuggio (VC), 2014. Caduta massi: 1 m<sup>3</sup>-5m<sup>3</sup>

I fenomeni di caduta massi hanno colpito l'intero territorio di Nosuggio (ovvero sia nelle aree settentrionali sia meridionali), dove sono presenti due grandi zone di deposito con detriti di dimensioni molto variabili (da decimetriche fino a 100 m<sup>3</sup>). In media però la maggior parte dei blocchi rilevati in sito presentano volumi di circa 5 m<sup>3</sup>.

L'area settentrionale è stata colpita da massicci eventi di caduta massi, che hanno coinvolto volumi estremamente grandi e raggiungendo spesso gli edifici di Nosuggio (novembre 1951, novembre 1968 e ottobre 1985). L'area meridionale è stata recentemente interessata da fenomeni di instabilità che hanno interessato sia il paese che la strada provinciale. Grazie al monitoraggio continuo, iniziato nell'ultimo decennio del XX secolo, l'area meridionale di Nosuggio è stata scelta dagli autori Barbero et al., per il rilievo dei volumi e per avviare gli studi relativi alla metodologia proposta nell'articolo. Tali studi sono il punto di partenza per i test su un sito reale dei valori ottenuti in questa tesi.

Come accennato prima, al di sotto della zona di origine, l'area del deposito è caratterizzata da volumi di blocchi da decimetrici a metrici, spesso in condizioni di equilibrio precario. Questo deposito è fornito da blocchi crollati con una frequenza annuale (in media) e può innescare fenomeni di caduta massi verso la pendenza sottostante. Il pendio è principalmente composto da affioramenti rocciosi mescolati a vegetazione irregolare (da scarsa a molto fitta) e detriti medio-fini con blocchi sparsi. Il piede del pendio ospita un'area di deposito fornita dagli eventi di instabilità verificatisi nelle epoche passate.



Figura 38: Aree Nosuggio interessate dal fenomeno di caduta massi (Barbero et al., 2019)

La metodologia perseguita dagli autori è stata la seguente:

- è stato eseguito un sondaggio dettagliato in loco (Ruiz-Carulla et al., 2015) per definire la distribuzione dei blocchi caduti in un'area rappresentativa alla base del pendio, vicino all'area abitata;
- l'area rappresentativa è stata suddivisa in due diverse aree omogenee  $(A_i)$ : un'area omogenea è una regione in cui la distribuzione dei volumi di blocchi è simile;
- in ciascuna area viene definita una sotto-area, cioè un'area campione  $(A_{is})$ , in cui viene eseguito il conteggio dei blocchi.

In seguito al rilievo effettuato in sito, è stato costruito un elenco, contando i blocchi caduti in ciascuna area campione e classificandoli in nove classi di volume ordinate in una progressione geometrica (classi che vanno da 0,008 m<sup>3</sup> a 10 m<sup>3</sup>, come mostrato in Figura 39). Un numero  $n(V_j)_i$ di blocchi appartiene a ciascuna classe *j* e a qualsiasi zona campione *i*. La distribuzione in ciascuna area del campione è omogeneizzata rispetto alla dimensione dell'area omogenea corrispondente. Rispetto all'area  $A_i$ , il numero di blocchi di ciascuna classe viene moltiplicato per un fattore di scala ottenuto dal rapporto tra l'area omogenea e quella di campionamento:

$$n(V_j)_i^{hom} = n(V_j)_i \frac{A_i}{A_i^s} \quad (9)$$

I volumi ciclopici (LSB), presenti nell'area rappresentativa e con un volume maggiore di 10 m<sup>3</sup>, sono stati contati singolarmente. Ne risulta che il volume dei blocchi misurati va da 0,008 m<sup>3</sup> a 40 m<sup>3</sup>. I risultati dello studio vengono riportati in Figura 40, con la rappresentazione del numero decrescente stimato di blocchi e la corrispondente funzione di distribuzione cumulata (CPD) rispetto alla classe di volume.

Class	Volume [m <sup>3</sup> ]	N° blocks	Inv. cumul.	CPD
0	0.008	11580	12162	1.000000
I	0.023	317	582	0.047854
п	0.064	143	265	0.021789
III	0.181	57	122	0.010031
IV	0.512	39	65	0.005345
V	1.448	8	26	0.002138
VI	2.500	3	18	0.001480
VII	5.000	11	15	0.001233
VIII	10.000	3	4	0.000329
LSB	40.000	1	1	0.000082

Figura 39: Classi di volumi e CDP Nosuggio (Barbero et al., 2019)



Figura 40: Rappresentazione curva volume-frequenza Nosuggio (Barbero et al., 2019)

#### 4.1.5 CONVERSIONE DI VOLUMI IN ALTEZZE

La curva di distribuzione dei volumi, la quale può essere ricavata da analisi di fenomeni avvenuti in passato e presenti all'interno di archivi o cataloghi (Dussauge-Peisser et al., 2002), oppure in virtù dei volumi presenti al piede (tra i tanti esempi si cita Ruiz Carulla et al., 2015), permette di ricavare un legame tra la magnitudo di un evento in termini di volume del singolo blocco o dell'evento e la sua frequenza cumulata. Questa metodologia tratta diversi fenomeni naturali (dai terremoti alle alluvioni fino ad arrivare a frane e caduta massi). In generale però, mentre negli altri casi sono disponibili molti dati storici negli archivi per il calcolo dei parametri della distribuzione, nella caduta massi non si dispone di sufficienti dati storici, ed è per questo che molti autori (ad es. De Biagi et al.,2017) cercano di fornire, oltre ai dati storici, delle modellazioni matematiche che si basano su rilievi effettuati in campo.

Diversi autori hanno sottolineato come nel caso della caduta massi la relazione che lega i valori rilevati risulta espressa da una funzione matematica (De Biagi et al., 2017) e in particolare da una legge di potenza negativa nella generica forma:

$$n(v \ge V) = a \cdot V^{-b} \quad (10)$$

dove  $n(v \ge V)$  è la frequenza di blocchi che presentano un volume maggiore di V e *a* e *b* sono due costanti che possono essere determinate attraverso una regressione lineare o metodi di stima della massima verosimiglianza. Come si può notare dal grafico in Figura 61, volume e frequenza sono espressi in termini logaritmici è la relazione è di tipo lineare. Il coefficiente *a* è il valore di frequenza che corrisponde a un blocco di volume pari a 1 m<sup>3</sup> (come specificato nell'esempio in Figura 41 o più correttamente è il valore di frequenza corrispondente all'unità di misura considerata), mentre *b* è il coefficiente angolare della retta e indica la sua pendenza. Il valore di *a* varia da sito a sito, mentre *b* viene considerato da diversi autori come indipendente dal sito in questione e dalla scala di studio del problema, ma dipendente dal grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, con un valore più piccolo per ammassi meno fratturati.



Figura 41: Rappresentazione della legge di potenza che lega volume a frequenza (assi logaritmici) (De Biagi et al., 2017)

Mediante tale approccio vengono rilevati e misurati i volumi dei blocchi al piede del versante e la loro distribuzione segue una legge di potenza negativa (Figura 41). I parametri di questa legge variano al variare del sito e altri fattori legati al sito (ad esempio il tipo di roccia, il grado di frammentazione della parete, tipo di suolo, quanto e in che modo si frantuma un blocco all'impatto col terreno); per considerare tutte le casistiche che potrebbero verificarsi in sito, è necessario variare parametricamente i due coefficienti a e b della curva.

Si ipotizza che i tre valori di scabrezza RG10, RG20 e RG70 siano collegati tra di loro e varino al variare della distribuzione dei blocchi al piede.

Di seguito vengono riportati i grafici volume-frequenza per la rappresentazione dei blocchi al piede del sito di Nosuggio (in riferimento alla Figure 39 e 40) e successivamente lo stesso grafico con la conversione dei volumi in altezze di ostacoli.



Figura 42: Rappresentazione volumi al piede sito Nosuggio (VC)



Figura 43: Rappresentazione altezze ostacoli sul versante sito Nosuggio (VC)

Per Nosuggio si sono ricavati i seguenti valori di coefficienti *a* e *b* (Tabella 3):

	а	b
<b>VOLUMI DI BLOCCHI AL PIEDE</b>	0.003	0.944
ALTEZZE OSTACOLI LUNGO IL VERSANTE	0.003	2.831

#### Tabella 3: coefficienti a e b per Nosuggio (VC)

Il passaggio da volumi ad altezze di ostacoli è stato effettuato per ricondurci ai valori di scabrezza, adottando le seguenti ipotesi semplificative:

- per semplicità si considerano blocchi con forma isometrica (in particolare cubica);
- per passare da blocchi di volumi rilevati al piede ad altezze di ostacoli si effettua una semplice operazione matematica (h (m) =  $\sqrt[3]{V(m^3)}$ ), in quanto si stanno considerando blocchi di forma cubica;
- gli ostacoli saranno considerati distribuiti in maniera omogenea lungo la zona di transito del versante;
- Si ipotizza l'altezza ostacolo uguale all' altezza totale del blocco in caduta.

E' evidente che tutte le ipotesi sopra riportate presentano forti semplificazioni. Innanzitutto, si stanno considerando blocchi distribuiti in maniera costante lungo il versante, mentre nella maggior parte dei casi (e in modo particolare per Nosuggio), i blocchi sono sparsi e abbastanza isolati lungo il pendio. Successivamente, dopo aver effettuato il rilievo dei volumi, si è ipotizzato che questi fossero tutti di forma cubica. Infine, si è ipotizzato che l'altezza dell'ostacolo corrispondesse all'altezza totale del blocco, mentre solitamente (quando si ha un accumulo di blocchi al piede) i blocchi potrebbero essere incastrati tra di loro o potrebbero penetrare nel terreno (in base alla sua deformabilità) restituendo un'altezza più piccola rispetto a quella iniziale del blocco.

In relazione a tutte le ipotesi semplificative descritte in precedenza, la metodologia proposta in questo lavoro di tesi è preliminare: i risultati sono approssimati e saranno oggetto di studi più approfonditi.

Le serie di analisi vengono effettuate facendo riferimento alla distribuzione dei volumi ricavata dal sito di Nosuggio che sarà la validazione della procedura.


Figura 44: Determinazione di RG10, RG20, RG70 sulla base della distribuzione dei volumi al piede

Il grafico riportato in Figura 44 descrive il metodo proposto; sulla base della distribuzione dei blocchi al piede, si ricavano i due coefficienti a e b della curva e successivamente la terna di RG da inserire nel software RockyFOR-3D (per stimare il valore di  $\varphi_p$ ) risulterà automaticamente determinata. Attraverso una "ricerca obiettivo" fatta sul programma "Microsoft Excel", si individuano i valori di altezze RG10, RG20, RG70 (m) sull'asse delle ascisse, corrispondenti ai valori 0.1, 0.2, 0.7 sull'asse delle ordinate (ovvero il 10%, 20% e 70% della loro frequenza cumulata). I due parametri a e b determinano la forma della curva e di conseguenza il valore delle terne di scabrezza. A ogni classe di volume (riferita al caso di Nosuggio) corrisponderà una classe di altezza e, per determinare i valori di scabrezza, si discretizza la curva al variare di a e b (mantenendo fisse le classi di altezze).

In riferimento ai valori di a e b (a=0.003 e b=2.831) ricavati per Nosuggio, si sono ottenute le seguenti terne di RG:

RG10 = 0.290 (m)RG20 = 0.227 (m)RG70 = 0.146 (m)

I valori di RG non vengono quindi modificati in maniera indipendente come è stato effettuato per le analisi preliminari parametriche nel Capitolo 3, ma variano al variare della distribuzione dei blocchi al piede secondo una legge di potenza negativa e attraverso i due parametri a e b della curva.

## 4.2 CONSIDERAZIONI SUI COEFFICIENTI DELLA CURVA

Nei seguenti grafici si riporta l'andamento dei valori di RG in funzione dei due parametri a e b. Nel primo grafico (Figura 45) si è fatto variare a mantenendo b costante (b=2.831 ricavato per il sito di Nosuggio), mentre nel secondo (Figura 46) si è fatto variare b mantenendo a costante (a=0.003 ricavato per il sito di Nosuggio). In entrambi i casi si nota un aumento dei valori di RG all'aumentare dei rispettivi parametri.



Figura 45: Rappresentazione RG-a (b=2.831)



Figura 46: Rappresentazione RG-b (a=0.003)

Come detto in precedenza, i due coefficienti a e b definiscono la forma della curva (a è una costante, mentre b è il coefficiente angolare della retta).

*a* rappresenta la frequenza del volume più piccolo rilevato in sito (volume di soglia). Abbassando il valore di *a*, la distribuzione dei volumi si sposta verso un range di volumi più piccoli, viceversa aumentando *a* si passa a range maggiori di volumi. Passando da volumi ad altezze, diminuendo il valore di *a*, la retta si sposta verso un range di ostacoli con altezze più piccole, viceversa aumentando *a* si passa a range di ostacoli con altezze maggiori.

Per quanto riguarda *b*, esso dipende dal grado di assortimento dei blocchi: al suo aumentare la retta diventerà più ripida, si avranno maggiori blocchi isolati (non fratturati) e le altezze degli ostacoli saranno più grandi, mentre al suo diminuire la retta si appiattirà e ciò implica avere volumi al piede con altezze minori (in quanto saranno blocchi che si sono fratturati). Il coefficiente *b* dipende quindi dalla frequenza dei blocchi classificati entro una determinata altezza (o meglio entro quella determinata classe di volume e successivamente convertito in altezza di ostacoli lungo il versante).

Tutte le considerazioni riportate fanno riferimento all'evento franoso nel giugno del 2014 avvenuto nel sito di Nosuggio, attraverso il quale è stato costruito il grafico Volume-CDP riportato in Figura 40.

### 4.3 CREAZIONE ABACHI PER QPROTO

Al fine di individuare il range di parametri *a* e *b* per condurre le analisi, si è fatto riferimento ai valori ottenuti per il sito di Nosuggio e ai valori presenti in letteratura (citati in precedenza) in merito alla distribuzione dei blocchi di volumi al piede.

In particolare, per il coefficiente *a*, si sono considerati tre ordini di grandezza (a=0.0001 - 0.001 - 0.01), mentre il valore di *b* è stato fatto variare da 1 a 6. Dalla Tabella 3 si osserva che per Nosuggio (che è la validazione del nostro approccio), si sono ottenuti i seguenti valori: a=0.003 - b=0.944 per la distribuzione dei volumi al piede e a=0.003 - b=2.831 passando da volumi ad altezze. Il valore di *b* risulta concorde ai valori di riferimento presenti in letteratura.

Successivamente sono stati realizzati degli abachi (attraverso il Software "Surfer 8") i quali, anche se in una prima fase di ricerca, possono essere usati dagli utilizzatori di QPROTO. Essi permettono di ricavare  $\varphi_p$  in maniera semplice e speditiva in funzione dei parametri *a* e *b* dell'equazione di potenza negativa (e quindi conoscendo le scabrezze del sito in esame).

 $\phi_p$  contiene al suo interno i parametri caratterizzanti il fenomeno di caduta massi nell'ambito del Cone Method, posto alla base di QPROTO, i quali vengono caratterizzati dettagliatamente esplicitati in RockyFOR-3D.

Per la creazione degli abachi, si è indagato sul parametro scabrezza, mantenendo costanti tutti gli altri (volume e forma dei blocchi, densità di vegetazione).

Di seguito sono riportati gli abachi e le superfici interpolate per ricavare i  $\varphi_p$  in funzione dei parametri *a* e *b* (e quindi della scabrezza del versante) per diverse inclinazioni del pendio e caratteristiche del blocco.



Figura 47: Valori di  $\varphi_p$  per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=5m<sup>3</sup>, 100% densità di vegetazione)



Figura 48: Valori di  $\varphi_p$  per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=5m<sup>3</sup>, no alberi)



*Figura 49: Valori di*  $\varphi_p$  *per pendio a* 45°, *blocco cubico, volume blocco=1m*<sup>3</sup>, *no alberi)* 



*Figura 50: Valori di*  $\varphi_p$  *per pendio a* 45°, *blocco cubico, volume blocco=5m*<sup>3</sup>, *no alberi*)



*Figura 51: Valori di*  $\varphi_p$  per pendio a 60°, blocco cubico, volume blocco=1m<sup>3</sup>, no alberi)



*Figura 52: Valori di*  $\varphi_p$  per pendio a 30°, blocco cubico, volume blocco=1m<sup>3</sup>, no alberi)



Figura 53: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 30°



Figura 54: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 30° a colori



Figura 55: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 45°



Figura 56: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 45° a colori



Figura 57: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 60°



Figura 58: Superfice interpolata 3D di  $\varphi$ p per pendio a 60° a colori

## **CAPITOLO 5**

# 5. APPLICAZIONE AL CASO STUDIO DI NOSUGGIO (VC)

In questo ultimo capitolo della tesi, sulla base dei valori di  $\phi_p$  calibrati attraverso gli abachi (illustrati nel capitolo precedente), si è svolta la back analysis per il caso studio di Nosuggio, analizzando e confrontando i risultati parallelamente con l'utilizzo di RockyFOR-3D e QPROTO, in termini di aree di invasione.



Figura 59: Ortofoto Nosuggio (Fanni, 2019)

### 5.1 INDIVIDUAZIONE PENDENZA VERSANTE

Inizialmente si è determinata l'inclinazione media del pendio a Nosuggio. A partire dalla zona sorgente, è stata individuata la linea di massima pendenza e si è tracciato il profilo altimetrico del sito, dove si nota un'inclinazione media del pendio di circa 34° (Figura 60).



Figura 60: Profilo di massima pendenza Nosuggio (VC)

Tracciando successivamente una sezione lungo la linea di massima pendenza e osservandone le pendenze medie, si è notato che la maggior parte dei valori si aggira attorno ai 30°. Per questo, per le analisi si è considerato con buona approssimazione un angolo di inclinazione del versante  $\beta$ =30° (Figura 61).



Figura 61: Profilo medio delle pendenze Nosuggio (VC)

### 5.1 PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ANALISI

A seguito del crollo avvenuto durante l'evento franoso del 2014, tra i massi che si sono arrestati sulla strada, ne sono stati individuati tre di dimensioni significative, stimando un volume medio di circa  $5.3 \text{ m}^3$  e aventi forma mediamente rettangolare (2m x 1.4m x 1.9m, sulla base delle osservazioni in sito) (Fanni, 2019).



Figura 62: Edificio colpito da blocco durante evento franoso del 2014 (Fanni, 2019)

Gli alberi non sono stati presi in considerazione in quanto, sulla base delle osservazioni effettuate in sito (Fanni, 2019), la loro presenza è molto ridotta lungo il tratto di pendio che va dalla zona di innesco alla zona di deposito (così come la percentuale di conifere).

Si sono quindi condotte le analisi con blocchi cubici di 5 m<sup>3</sup> prima su RockyFOR-3D e successivamente su QPROTO (con valore di  $\varphi_p$  ricavato in Figura 83) e con valori di scabrezza costanti (ovvero RG10=0.290 m, RG20=0.227 m, RG70=0.146 m) corrispondenti alle analisi illustrate nel Capitolo 4 (costanti su tutto il versante). In parallelo si sono svolte le stesse analisi su RockyFOR-3D e QPROTO considerando il valore realistico di volume di 5.3 m<sup>3</sup> (forma rettangolare) e confrontando tutti i risultati in termini di area di invasione.

Nell'ambito di QPROTO è stato utilizzato un indice di propensione al distacco ID pari a 1, ovvero considerando 100% di probabilità di distacco alle nicchie.

I valori φp da utilizzare per QPROTO presi dagli abachi sono i seguenti:





Figura 63: valore  $\varphi_p$  ricavato da abaco

 $\phi_{\text{p}}=38^{\circ}$ 

Per il blocco rettangolare da 5.3m3, si è ricavato invece dal software RockyFOR-3D un valore di  $\varphi_p = 35.5^{\circ}$  (da utilizzare per condurre le analisi su QPROTO).

# 5.2 CONFRONTO ANALISI CON ROCKYFOR-3D E QPROTO E DISCUSSIONE DEI RISULTATI



Figura 64: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco cubico (5m<sup>3</sup>) - RG ricavato da approccio Capitolo 4



Figura 65: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco rettangolare (5.3m<sup>3</sup>) - RG ricavato da approccio Capitolo 4



Figura 66: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco cubico (5m<sup>3</sup>) - RG ricavato da rilievo in sito



Figura 67: Area di invasione ricavata con RockyFOR-3D per blocco rettangolare (5.3m<sup>3</sup>) - RG ricavato da rilievo in sito

Da un primo confronto tra le quattro aree di invasione (ricavate tramite il software RockyFOR-3D), sembrerebbe che simulare un blocco cubico non sia a favore di sicurezza: l'area di invasione è piccola rispetto alle simulazioni effettuate con i blocchi rettangolari, non permettendo a questi ultimi di depositarsi sulla strada. Il blocco rettangolare invece, indipendentemente dai valori di scabrezza considerati, simula con una buona approssimazione l'evento avvenuto nel 2014.

In termini di scabrezza, si osserva come i valori ricavati dal metodo illustrato nel Capitolo 4, siano paragonabili ai valori realmente misurati dai rilievi in sito (Fanni, 2019), restituendo aree di invasioni simili (Figure 64-66 e Figure 65-67).

Nella Figura 68 si nota come da studi condotti precedentemente (Castelli et al., 2020) e sulla base di analisi parametriche effettuate su pendii virtuali, l'effetto della forma influisca particolarmente sui valori di  $\varphi_p$  (anche se meno di altri parametri, come il volume e la vegetazione); passando da blocco cubico a blocco ellissoidale (senza considerare la densità di alberi) si va da un valore di 26° a 22° (l'area di invasione sarà maggiore). I grafici in Figura 68 si basano su valori di rugosità molto bassa (ovvero 0.05 m su tutto il versante).



Figura 68: valori di  $\varphi_p$  in funzione di pendenza del versante, densità di alberi, volume del blocco e forma del blocco (Castelli et al., 2020)

Dai grafici in figura (Figura 69 e Figura 70) si nota che, a prescindere dai valori di rugosità adottati, cambiando le condizioni di simmetria e quindi la forma del blocco (in particolare si considerano forme non isometriche), l'angolo  $\varphi_p$  diminuisce e l'area di invasione sarà maggiore.

Un aumento di volume e una forma del blocco non isometrica, portano a un aumento delle aree di invasione (il blocco andrà ad arrestarsi più lontano).

Osservando le analisi condotte con QPROTO, si osserva immediatamente che i risultati non sono conservativi. Inizialmente si è considerato un blocco cubico con volume di 5 m<sup>3</sup> (valore di  $\varphi_p = 38^\circ$  ricavato dall' abaco in Figura 63) e i risultati non sono soddisfacenti (Figura 69).

Si è deciso allora di variare la forma del blocco (considerando sempre blocco rettangolare con un volume di 5.3 m<sup>3</sup>) e si è osservato un netto miglioramento dei risultati, pur sempre rimanendo non conservativi (il valore di  $\varphi_p$  è passato da 38° a 35.5°), in quanto i blocchi non raggiungono la strada come invece avviene con RockyFOR-3D.



Figura 69: Area di invasione ricavata con il plugin di QPROTO per blocco cubico (5m<sup>3</sup>) - RG ricavato da approccio Capitolo 4



Figura 70: Area di invasione ricavata con il plugin di QPROTO per blocco rettangolare (5.3m<sup>3</sup>) - RG ricavato da approccio Capitolo 4

### 5.3 CONFRONTO ENERGIE

Infine, si è voluto effettuare un confronto in termini di energie medie tra i due scenari ottenuti con RockyFOR-3D, considerando sempre un volume di 5.3 m3, ma con scabrezze diverse lungo il versante (prima con i valori misurati in sito e successivamente con le scabrezze ottenute da approccio probabilistico). Andando a sezionare i due raster delle energie lungo un tratto di strada (circa 20 m di lunghezza) si vuole osservare con quanta energia i blocchi sono arrivati a impattare nel tratto di strada dove si sono arrestati.



Figura 71: Energie medie lungo tratto di strada di Nosuggio (VC)

Dal grafico in Figura 71, si nota che i valori di energia per scabrezze ricavate mediante approccio probabilistico risultano maggiori, in quanto presentano un'area di invasione relativamente maggiore e i blocchi andranno ad arrestarsi più avanti.

### 6. CONCLUSIONI

La caduta massi è un fenomeno franoso molto diffuso ad elevata pericolosità, in quanto può coinvolgere elevate energie a causa delle grandi velocità che il blocco può acquisire durante il moto verso valle. Per questo motivo può avere un grande impatto sull'ambiente antropico (vita e attività umane) con effetti talvolta distruttivi. L'analisi del fenomeno di pericolosità è affetta da grandi incertezze a causa della grande complessità di comportamento dei blocchi in movimento, l'elevato numero di variabili coinvolte, l'elevata variabilità intrinseca dei parametri che influenzano il comportamento (variabilità aleatoria) e la difficoltà nel reperire le informazioni ed i dati necessari (incertezza epistemica).

A causa della grande variabilità dei fattori che influenzano il fenomeno, in funzione dello scopo dell'analisi e dell'estensione della zona coinvolta, è necessario far riferimento a diverse scale. La scala di dettaglio (grande scala) si riferisce a porzioni limitate di territorio circoscritta a un evento avvenuto o potenziale e riguarda la progettazione di opere di protezione, le back analysis e in generale gli studi di dettaglio. Le analisi a scala comunale, di valle o regionale (piccola scala) riguardano invece porzioni di territorio più vaste e servono per studi preliminari e per la pianificazione urbanistica e territoriale. Alla scala di valle non si riesce ragionevolmente a raccogliere dati sufficienti per caratterizzare i parametri con distribuzioni statistiche affidabili, per cui si ha un'incertezza legata alla scarsa conoscenza del dato (epistemica). I metodi di analisi che si possono utilizzare sono molto semplificati e richiedono una quantità inferiore di dati, spesso di tipo "equivalente", che naturalmente produrranno un risultato meno affidabile. Un esempio è il plugin QPROTO (Castelli, 2020), oggetto di questo lavoro di tesi. I punti di forza del software sono la speditività e il fatto di basarsi su pochi parametri, mentre i punti di debolezza sono la stima di questi parametri (ad esempio l'energy line angle) in quanto è necessario tenere conto di tutti i fattori che influenzano il fenomeno (forma e dimensione del blocco, copertura del pendio, presenza di alberi ecc.).

In virtù di queste considerazioni, si è indagato sul fenomeno della scabrezza (intesa come altezza degli ostacoli presenti lungo il versante) in aggiunta ad altri lavori di tesi (Torsello, 2019) riguardanti l'analisi di altri fattori caratteristici del blocco (forma, volume) o del pendio (inclinazione, densità di vegetazione ecc.) che interessano l'evoluzione di un crollo di roccia.

Le metodologie utilizzate per caratterizzare la scabrezza sono le seguenti:

- Analisi parametriche al variare dei parametri RG10, RG20, RG70 (considerati uniformi su tutta la zona di transito del pendio), attraverso l'utilizzo del software di dettaglio RockyFOR-3D;
- 4. Definizione delle altezze degli ostacoli tramite una legge di potenza negativa (nella generica forma  $y=a \cdot x^{-b}$ ).

Osservando le analisi parametriche effettuate mediante l'approccio 1, si nota che all'aumentare dei valori di RG10-RG20, RG70 (definiti in RockyFOR-3D come l'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo che il masso incontra durante il tragitto di caduta nel 10%, 20% e 70% dei casi) il valore di  $\varphi_p$  aumenta, in quanto al crescere dell'altezza degli ostacoli presenti lungo il versante, il masso potrebbe impattare contro di essi e rallentare o addirittura arrestare la sua corsa (un ostacolo più grande ha più probabilità di fermare un blocco in discesa, in relazione alle dimensioni e alla forma di quest'ultimo); φ<sub>p</sub> sarà quindi maggiore e l'area di invasione più piccola. La presenza di alberi aumenta il numero di ostacoli presenti lungo il pendio portando a un ulteriore aumento dei valori di  $\varphi_p$ , anche se non eccessivo. Infine esiste un limite di altezza di ostacoli oltre il quale non si ha più alcuna influenza del valore di energy line angle; esso rimarrà costante nonostante si continui ad aumentare RG; questo si presenta quando la dimensione dell'ostacolo è effettivamente > della dimensione del blocco in caduta (Ritchie, 1963; Kirkby e Statham, 1975; Bozzolo e Pamini, 1986; Statham e Francis, 1986; Giani, 1992; Evans e Hungr, 1993) e il masso viene quindi intrappolato dalle asperità del pendio e si ferma rapidamente. In generale, un aumento di volume porterà a una leggera diminuzione dell'angolo  $\varphi_p$  e a un aumento delle aree di invasione (i blocchi andranno ad arrestarsi più lontano).

Gli RG sono parametri che difficilmente possono essere messi in relazione con le caratteristiche globali del pendio: l'utilizzatore di QPROTO non riuscirebbe a definirli per valutare l'energy line angle. Le analisi di dettaglio effettuate con RockyFOR-3D (Approccio 1) danno quindi solo un'idea di quale sia l'influenza di ogni valore di RG (considerato indipendentemente dagli altri) su  $\varphi_p$ .

Sono stati successivamente realizzati degli abachi (attraverso il Software "Surfer 8") i quali, anche se in una prima fase di ricerca, possono essere usati dagli utilizzatori di QPROTO. Essi permettono di ricavare  $\varphi_p$  in maniera semplice e speditiva in funzione dei parametri *a* e *b* dell'equazione di potenza negativa (e quindi conoscendo le scabrezze del sito in esame). Risulta molto complicato definire i 2 parametri *a* e *b* della curva (essi potrebbero essere definiti dall'utilizzatore di QPROTO solo nel caso avesse a disposizione un rilievo di volumi al piede o attraverso l'analisi di DTM e DSM). Con DSM (*Digital Surface Model*) si intende la superficie terrestre comprensiva degli oggetti che al di sopra: edifici, alberi ed altri manufatti. Il DTM (*Digital Terrain Model*), rappresenta l'andamento della superficie del suolo senza gli elementi antropici e vegetazionali.

In riferimento alla back analysis dell'evento franoso del 2014 avvenuto nel sito di Nosuggio e confrontando le analisi condotte con RockyFOR-3D e QPROTO (in termini di aree di invasione), si è osservato che semplificare la forma del blocco con un cubo (ipotesi semplificativa di base) di 5m<sup>3</sup> di volume, ha reso le analisi effettuate con QPROTO non conservative, in quanto l'area di invasione non arriva a interessare il tratto di strada (come invece è avvenuto nella realtà). Considerando un blocco rettangolare (5.3 m<sup>3</sup> di volume) i risultati migliorano sensibilmente (l'area di invasione aumenta). La scabrezza ha senz'altro un'influenza molto importante in queste analisi; l'approccio parametrico con il metodo della legge di potenza ha messo in evidenza l'effetto della forma (almeno con riferimento al caso specifico di Nosuggio). Risulta quindi necessario condurre ulteriori approfondimenti andando a indagare sul ruolo della geometria del blocco.

Si ricorda che i risultati sono parziali e preliminari, in quanto (oltre alla forma) non è stata presa in considerazione la discretizzazione della pendenza, il tipo di suolo e la presenza di opere di protezione sul pendio. Saranno quindi necessarie in futuro ulteriori analisi approfondite.

#### **BIBLIOGRAFIA**

Abellan A, Vilaplana JM, Martinez J (2006) Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain). Eng Geol 88:136–148

Barbero M., Castelli M., Cavagnino G., De Biagi V., Scavia C. and Vallero G. (2019). Application of a statistical approach for the assessment of design block in rockfall: a case study in Sesia Valley (Northern Italy). Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering, Politecnico di Torino.

Berger, F., Dorren, L.K.A. (2007). Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen, 158(6), 157-165.

Bozzolo, D., Pamini, R. (1986). Simulation of rock falls down a valley side. Acta Mechanica, 63(1-4), 113-130.

Brunetti MT, Guzzetti F, Rossi M (2009) Probability distributions of landslide volumes. Nonlin Processes Geophys 16:179–188

Castelli Marta · Grisolia Marco · Barbero Monica · Vallero Gianmarco · Campus Stefano · Pispico Rocco · Lanteri Luca. (2020) A GIS-based procedure to estimate rockfall hazard at a small scale: the QPROTO plugin

Castelli Marta, Grisolia Marco, Pispico Rocco, Lanteri Luca, Campus Stefano, Barbero Monica. (2020) QPROTO – a QGIS plugin for rockfall analyses at small scale

Castelli M., Torsello G. and Vallero G. (in preparation, IACMAG2020) Rockfall hazard analysis at small scale: a numerical study for the estimation of representative slope parameters

Castelli M. (FOSS4G, 2020). Strumenti di analisi speditiva per la valutazione della pericolosità da frana in ambiente QGIS

Chau KT, Wong RCH, Liu J, Lee CF (2003) Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory. Rock Mech Rock Eng 36:383–408

Copons R, Vilaplana JM, Corominas J, Altimir J, Amigó J (2004) Rockfall risk management in high-density urban areas. The Andorran experience. In: Glade T, Anderson M, Crozier MJ (eds) Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, pp 675–698 Copons R (2007) Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella. Monografies del CENMA

Corominas J, Copons R, Moya J, Vilaplana JM, Altimir J, Amigó J (2005) Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area. Landslides 2:343–357

Corominas J, Moya J (2008) A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. Eng Geol 102:193–213

Corominas Jordi, Mavrouli Olga, Ruiz Carulla Roger. Rockfall Occurance and Fragmentation. WLF (2017): Advancing Culture of Living with Landslides pp 75-97.

De Biagi Valerio, Napoli Maria Lia, Barbero Monica and Peila Daniele. (2017) Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 103–113,

Dussauge-Peisser C., Helmstetter A., Grasso J.-R., Hantz D., Desvarreux P., Jeannin M., and Giraud A.. (2002) Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. Natural Hazards and Earth System Sciences 2: 15–26.

Dussauge C, Grasso JR, Helmstetter A (2003) Statistical analysis of rockfall volume distributions: implications for rockfall dynamics. J Geophys Res B6(108):2286

Dorren, L.K.A., Seijmonsbergen, A.C. (2003). Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. Geomorphology, 56(1-2), 49-64.

Dorren, L.K.A., Berger, F., Imeson, A.C., Maier, B., Rey, F. (2004). Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. Forest Ecology and Management, 195(1-2), 165-176.

Dorren, L.K.A., Berger, F., Putters, U.S. (2006). Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Natural Hazards and Earth System Science, 6(1), 145-153.

Dorren L.K.A. & Simoni, S., (2014). Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi. ecorisQ Paper (www.ecorisq.org): 27 p.

Evans, S.G., Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Canadian Geotechnical Journal, 30(4), 620-636..

Fanni, S. (2019). La protezione del territorio nei confronti della caduta massi: un caso studio nel comune di Cravagliana (VC), Laurea Magistrale in Ingegneria Civile.

Fell R., Ho S., Lacasse S., Leroi E., 2005. A framework for landslides risk assestment and management. In landslide risk management: proceedings of the international conference on landslide risk management, Vancouver, Canada, May 31-June 3, Taylor & Francis, London, pp. 3-26.

Ferlisi S, Cascini L, Corominas J, Fabio M (2012) Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy). Nat Hazards 62:691–721

Ferrari Federica, Thoeni Klaus, Giacomini Anna & Lambert Cedric. (2016) A rapid approach to estimate the rockfall energies and distances at the base of rock cliffs. Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards,

Giani, G.P. (1992). Rock Slope Stability Analysis, Balkema, Rotterdam.

Govers, G., Takken, I., Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. Agronomie, 20(2), 131-146.

Gutenberg, B., and C. F. Richter (1944). Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am. 34, 185–188.

Gutenberg, B., and C. F. Richter (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Second ed., Princeton University Press, Princeton.

Guthrie RH, Evans SG (2004) Analaysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. Earth Surf Proc Land 29:1321–1339

Guzzetti F, Malamud BD, Turcotte DL, Reichenbach P (2002b) Power-law correlations of landslide areas in Central Italy. Earth Planet Sci Lett 195:169–183

Guzzetti F, Reichenbach P, Wieczorek GF (2003) Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. Nat Hazards Earth Syst Sci 3:491–503

Hantz D, Vengeon JM, Dussauge-Peisser C (2003) An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. Nat Hazards Earth Syst Sci 3(6):693–701

Hodge, R., Brasington, J., Richards, K. (2009). In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning. Earth Surface Processes and Landforms, 34(7), 954-968.

Hoek, E., 1987. Rockfall—a program in BASIC for the analysis of rockfall from slopes. Unpublished note, Golder Associates/University of Toronto, Canada. Hollaus, M., Aubrecht, C., Höfle, B., Steinnocher, K., Wagner, W. (2011). Roughness mapping on various vertical scales based on fullwaveform Airborne Laser Scanning data. Remote Sensing, 3(12), 503-523.

Hovius N, Stark CP, Allen PA (1997) Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. Geology 25:231–234

Hungr, O., Evans S.G., 1988 "Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards". Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Rotterdam, Balkema, pp. 685–690.

Hungr O, Evans SG, Hazzard J (1999) Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. Can Geotech J 36:224– 238

Hungr O, McDougall S, Wise M, Cullen M (2008) Magnitude–frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. Geomorphology 96:355–365

Jaboyedoff, M. and Labiouse, V. (2011). Preliminary estimation of rockfall runout zones. Nat Hazards Earth Sys Sci 11(3), 819-828.

Jones, C.L., Higgins, J.D., Andrew, R.D. (2000). Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0. Colorado Department of Transportation.

Jutzi, B., Neulist, J., Stilla, U. (2005). Sub-pixel edge localization based on laser waveform analysis. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 36(Part3/W19), 109-114.

Kirkby, M.J., Statham, I. (1975). Surface Stone Movement and Scree Formation. Journal of Geology, 83(3), 349-362.

Lied K., 1977. Rockfall problems in Norway, Rockfall dynamics and protective work effectivness. ISMES, Bergamo, 90, pp. 51-53.

Lundström, T., Jonas, T., Stockli, V., Ammann, W. (2007). Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. Tree Physiology, 27(9), 1217-1227.

Lundström, T., Jonsson, M.J., Volkwein, A., Stoffel, M. (2009). Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: a detailed assessment using a new experimental method. Tree Physiology, 29(3), 345-359.

Malamud B, Turcotte L, Guzzetti F, Reichenbach P (2004) Landslide inventories and their statistical properties. Earth Surf Proc Land 29:687–711

Meissl G., (1998) "Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispeile zur GISgestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28". Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck, pp 1-249.

Mazzalai P., Vuillermin M.: "Definizione e protezione delle aree esposte a rischio di caduta massi: un esempio operativo" Geologia Tecnica e ambientale n. 3, Roma, luglio settembre 1995.

Michelini T. (2016). Analisi sperimentale delle scabrezze di superficie e di fondo per la modellazione dinamica dei flussi torrentizi e della caduta massi, Università degli Studi di Padova.

Netti, T., Castelli, M., De Biagi, V. (2016). Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis. PROCEDIA ENGINEERING 158, 464-469.

Onofri, R. and Candian, C. (1979). Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976: considerazioni sulle opere di difesa. Regione autonoma Friuli-Venezia-Giulia, CLUET, 1-42.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H.U., Lüscher, P. (1997). Gebirgsnadelwälder: praxisorientierter Leitfadenfür eine standortgerechte Waldbehandlung. Verlag PaulHaupt, Bern, Stuttgart, Wien, pp. 287.

Pelletier JD, Malamud BD, Blodgett TA, Turcotte DL (1997) Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. Eng Geol 48:254–268

Perret, S., Dolf, F., Kienholz, H. (2004). Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories? considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. Landslides, 1(2).

Pfeiffer, T.J., Bowen, T. (1989). Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 26(1), 135146.

Picarelli L, Oboni F, Evans SG, Mostyn G, Fell R (2005) Hazard characterization and quantification. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberthardt E (eds) Landslide risk management. Taylor and Francis, London, pp 27–62 ISBN 041538043X

Piteau, D.R., Clayton, R., 1976. Computer Rockfall Model. In: Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness, Bergamo, Italy, ISMES Publication No. 90, pp. 123–125.

Ritchie, A. (1963). Evaluation of rockfall and its control. Highway research record, 17, 13-28.

Rochet L., 1987. Application des modèles numériques de propagation à l'étude des èboulements rocheux (Application of numerical propagation models to the study of rocky landslides). Bulletin Liaisons des Ponts et Chaussées, Vol. 150–151, pp. 84-95.

Royán MJ, Abellán A, Vilaplana JM (2015) Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp (Catalonia, Spain). Landslides 12:585–595

Ruiz-Carulla Roger, Corominas Jordi, Mavrouli Olga. A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits. Landslides (2015)

Santana D, Corominas J, Mavrouli O, Garcia-Sellés D (2012) Magnitude-frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. Eng Geol 145–146:50–64

Sidle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., Shimizu, T. (2000). Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. Hydrological Processes, 14(3), 369-385.

Smith, M.W., Cox, N.J., Bracken, L.J. (2010). Terrestrial laser scanning soil surfaces: a field methodology to examine soil surface roughness and overland flow hydraulics. Hydrological Processes, 25(6), 842-860.

Stark CP, Hovius N (2001) The characterization of the landslide size distributions. Geophys Res Lett 28:1091–1094

Statham, I., Francis, S.C. (1986). Influence of scree accumulation and weathering on the development of steep mountain slopes. In: Abrahams, A.D. editor, Hillslope processes. Winchester: Allen and Unwin Inc., 245-267.

Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., Perret, S., Kienholz, H. (2006). Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. Forest Ecology and Management, 225(1-3), 113-122.

Stoffel, M., Bollschweiler, M., Vázquez-Selem, L., Franco-Ramos, O., Palacios, D. (2011). Dendrogeomorphic dating of rockfalls on low-latitude, high-elevation slopes: Rodadero, Iztaccíhuatl volcano, Mexico. Earth Surface Processes and Landforms, 36(9), 1209-1217.

Stokes A., Salin F., Kokutse A.D., Berthier S., Jeannin H., Mochan S., Dorren L.K.A., Kokutse N., Ghani M.A., Fourcaud T. (2005), "Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps", Plant Soil, n.278, 1-2, pp.107-117.

Torsello, G. (2019). La modellazione del fenomeno di caduta massi a piccola scala: valutazione dei parametri necessari per analisi speditive. Politecnico di Torino, Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes. 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., pp. 11-33.

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ..., and Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection-a review. Natural Hazards and Earth System Science, 11(9), 2617-2651.

Wieczorek GF, Morrissey MM, Iovine G, Godt J (1998) Rock fall Hazards in the Yosemite Valley. US Geological Survey, Open File Report. 98–467

Zevenbergen L.W. und Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surf. Proc. Landforms 12: 47-56.

## RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto vorrei ringraziare tanto la mia famiglia: Mamma, Papà, Fede, Ale e Luca: sono stati la mia forza in tutti questi anni e nonostante le tante difficoltà e i momenti bui durante il percorso, sono sempre stati pronti a supportarmi moralmente, a darmi preziosi consigli, a tranquillizzarmi, a credere in me e a ricordarmi di non mollare mai!!! GRAZIE, questa laurea è anche vostra!

Poi vorrei ringraziare Cecilia, entrata da poco a far parte della mia vita, ma sembra già da un'eternità; è stata fondamentale in questo ultimo percorso di studi, anche lei ha davvero sempre creduto in me, mi ha tranquillizzato nel periodo molto stressante lavoro/università, dandomi saggi consigli e standomi vicino, sempre e comunque; senza di lei non so se ce l'avrei fatta. GRAZIE di cuore!

Un grazie generale va a tutti i miei amici e compagni di università; ma in modo particolare vorrei ringraziare Simone, che mi ha sempre aiutato nel momento del bisogno! Grazie Simo e grazie a tutti.

Infine voglio ringraziare la prof.ssa Castelli, la prof.ssa Barbero, l'Ing. Vallero e l'Ing. Torsello che mi hanno seguitò con volontà e pazienza nello svolgimento della tesi, nonostante i miei impegni lavorativi.

Grazie a tutti!!!