

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**STUDIO DEI PARAMETRI NECESSARI PER UNA
VALUTAZIONE PRELIMINARE DELLA PERICOLOSITÀ
DA CADUTA MASSI**

Candidato:

Cremona Lorenzo Paolo

Relatori:

Prof.ssa Ing. Castelli Marta (DISEG)

Prof.ssa Ing. Barbero Monica (DISEG)

Marzo 2018

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
Capitolo 1 - Il Fenomeno della Caduta Massi.....	8
1.1 - Analisi Fisico-Meccanica del Fenomeno.....	9
1.2 - Identificazione dei Parametri Geometri che Caratterizzano un Versante Soggetto a Caduta Massi..	12
1.3 - Modellazione del Fenomeno.....	13
1.3.1 - Modellazione di Dettaglio.....	13
1.3.1.1 - Il Software RockyFor3D.....	17
1.3.2 - Modellazione Speditiva.....	20
Capitolo 2 - Le Principali Metodologie di Calcolo Preliminare Presenti in Letteratura.....	22
2.1 - Individuazione e Definizione degli Angoli Caratteristici.....	22
2.2 - Descrizione ed Analisi Critica delle Principali Metodologie di Studio.....	26
2.2.1 - Shadow Angle Method e Cone Method.....	32
Capitolo 3 - Studi Effettuati sulla Val Germanasca (TO).....	37
3.1 - Inquadramento del Sito di Indagine.....	37
3.2 - I Fenomeni di Crollo in Roccia Analizzati.....	38
3.3 - Definizione di Profili all'Interno delle Aree di Invasione.....	53
3.4 - Analisi Effettuate sui Profili.....	58
3.4.1 - Height Function Model.....	59
3.4.2 - α - β Model.....	61
3.4.3 - Runout Ratio Model.....	65
Capitolo 4 - Influenza della Vegetazione ad Alto Fusto.....	68
4.1 - Rilievo della Densità di Vegetazione.....	68
4.2 - Risultati Ottenuti.....	74
Capitolo 5 - Verifica e rielaborazione delle Correlazioni Identificate.....	77
5.1 - Applicazione della Metodologia di Analisi ad un Evento in Val di Susa.....	77
5.2 - Creazione ed Analisi di Versanti Virtuali.....	81
5.2.1 - Creazione dei Versanti Virtuali.....	81
5.2.2 - Risultati Ottenuti sul Versante Standard.....	82
5.2.3 - Risultati Ottenuti al Variare della Lunghezza del Pendio.....	89
CONCLUSIONI.....	102
APPENDICE A.....	106
BIBLIOGRAFIA.....	114
Ringraziamenti.....	120

INTRODUZIONE

I fenomeni franosi e, in particolare, i crolli in roccia sono eventi naturali molto ricorrenti sul territorio nazionale italiano che portano, in taluni casi, ad un'evidente alterazione da un punto di vista geomorfologico dell'area da essi coinvolta nonché ad ingenti danni a beni materiali e/o persone con epiloghi, talvolta, catastrofici.

Le lunghe distanze percorse dai blocchi distaccatisi da un versante montuoso e le elevate energie che essi possono raggiungere, unitamente all'assenza di segnali premonitori dell'evento e alla notevole rapidità con cui esso si sviluppa, rendono, inoltre, praticamente vana la possibilità di adottare misure limitative o difensive negli attimi immediatamente successivi al verificarsi dell'avvenimento.

Per fronteggiare il fenomeno è perciò necessario un attento studio di carattere previsionale al fine di adoperare procedure preventive e/o protettive appropriate per ridurre il rischio di manifestazione della calamità naturale all'interno dell'area in esame. Ciò è possibile sviluppando un'analisi capace di identificare tutti i fattori che influenzano il moto degli elementi in movimento (le caratteristiche meccaniche e geometriche del terreno, la densità e la tipologia di vegetazione presente sul pendio e le caratteristiche fisiche e litologiche del masso distaccatosi) e di valutare, in funzione di essi e della loro variabilità, le traiettorie percorse dai blocchi distaccatisi dalla parete rocciosa, le energie ad essi associate e le loro velocità caratteristiche.

Come si può immaginare, la considerazione di tutti questi termini porta alla definizione di un livello di dettaglio molto elevato che necessita di un procedimento di raccolta ed elaborazione dati alquanto oneroso sia da un punto di vista economico (si richiede l'utilizzo di prove in situ e in laboratorio, attrezzature rigorose, squadre di specialisti) che organizzativo. Inoltre, i tempi di simulazione per giungere a risultati realistici, al fine di determinare con precisione l'eventuale zona di invasione soggetta ad un crollo in roccia, sono in genere molto lunghi.

In base a queste osservazioni, nel corso degli anni, sono state elaborate differenti metodologie di studio, che possono essere raggruppate in due macrocategorie:

- *Analisi di dettaglio*: procedure di stima probabilistiche che tengono conto della variabilità dei dati di input e del grado di conoscenza degli stessi. Esse sono sviluppate mediante software di calcolo avanzati che richiedono l'immissione di numerosi dati di input e lunghe elaborazioni (è necessario simulare un gran numero di traiettorie per avere risultati statistici significativi), fornendo risposte accurate sulla fenomenologia studiata e rappresentazioni grafiche rigorose delle possibili traiettorie percorse dalle masse in movimento.
- *Analisi preliminari o speditive*: sviluppate a partire da dati di facile e veloce reperibilità quali ad esempio le caratteristiche geometriche del versante o il massimo volume di distacco. Esse sono utili ad identificare e confrontare

rapidamente i confini delle zone di invasione che saranno in seguito esaminate, qualora necessario, tramite analisi di dettaglio.

È importante precisare che le due metodologie di studio soprariportate hanno scopi differenti. Per quanto riguarda, infatti, una procedura di calcolo di dettaglio, essa ha come principale obiettivo l'analisi accurata del fenomeno franoso e la restituzione di risultati precisi, utili a definire in termini probabilistici l'evento calamitoso, a calcolare il rischio degli elementi esposti e a progettare opere di prevenzione o difesa adeguate. Per quanto concerne, invece, una metodologia preliminare, essa ha come principale obiettivo l'individuazione speditiva delle possibili zone di invasione colpite da un eventuale crollo in roccia (su vaste aree) al fine di compiere una corretta pianificazione territoriale e di valutare le zone su cui è necessario concentrare studi di dettaglio.

È ora necessario introdurre il concetto di rischio e specificarne la differenza con quello di pericolosità in quanto, spesso, questi vocaboli vengono confusi o utilizzati come sinonimi mentre, in realtà, presentano significati differenti.

Per quanto riguarda il termine pericolosità si fa qui di seguito riferimento alla definizione fornita da Varnes e dall'IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*) nel rapporto UNESCO del 1984: "probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area".

Il rischio, invece, tiene conto dei danni a beni, servizi e/o essere umani causati dalla potenziale manifestazione di un evento calamitoso. Questo concetto, quindi, non prende solo in considerazione la pericolosità di un determinato avvenimento ma correla quest'ultima agli effetti che tale avvenimento può avere su strutture e persone presenti nell'area da esso colpita.

Una zona ad alta pericolosità potrebbe, perciò, avere rischio nullo mentre una zona a rischio elevato sottintende l'esistenza di una certa pericolosità, intrinsecamente nella sua definizione.

Prendendo in considerazione quanto appena enunciato, lo scopo delle due tipologie di analisi sopraindicate è quello di determinare, una volta identificata una macrozona di interesse, tutte quelle aree all'interno di essa il cui rischio è maggiore di 0 al fine di predisporre, qualora necessario, interventi preventivi (imposizione di vincoli di inedificabilità, operazioni di rimodellamento, sostegno e ancoraggio, drenaggi, rivestimenti e contenimenti) o protettivi (creazione di barriere, reti di aderenza e vasche di accumulo) lungo o a valle di esse.

Per il calcolo della pericolosità su vaste aree, questa tesi di laurea fa riferimento ad alcuni dei principali metodi speditivi presenti in letteratura, in particolare, ai modelli *Height Function Model*, α - β *Model* e *Runout Ratio Model* (Keylock e Domaas, 1999) e al *Cone Method*, teorizzato da Jaboyedoff e Labiouse nel 2003. Quest'ultimo è stato impiegato come base per lo sviluppo di un software di calcolo preliminare (CONEFALL, Jaboyedoff, 2003b) che permette di stimare la zona di invasione di un crollo in roccia a partire da un Digital Terrain Model (DTM) e da un file contenente informazioni sulla posizione di tutte le celle

sorgente dalle quali si ipotizza un distacco di massi. Il programma, inoltre, permette di valutare l'energia media dissipata lungo le traiettorie percorse dai blocchi in movimento e la velocità da essi assunta lungo il loro percorso.

Una volta definiti i punti di origine dell'evento franoso, il *Cone Method* prevede la creazione di un cono virtuale utilizzando come principali parametri di input due angoli, di ampiezza prefissata, che definiscono le dimensioni del cono di invasione. L'intersezione di tale cono con la superficie del versante determina, quindi, la zona di possibile invasione. Nel dettaglio, tale cono si svilupperà a partire dal proprio vertice, localizzato in un *punto di vista* prestabilito, e si svilupperà in base ai suddetti parametri ricorrendo, unicamente, a considerazioni sulla topografia del pendio.

Il *Cone Method* è stato recentemente implementato sul software QGIS (Sistema di Informazione Geografica Open Source) al fine di fornire un risultato in coordinate cartografiche, utile per integrare questo tipo di analisi nella cartografia disponibile. Il codice sviluppato è denominato QPROTO (QGis Predictive ROCKfall TOol, Castelli et al., 2018) e sfrutta la funzione di visibilità presente in ambiente GIS. Il cono di invasione è quindi rappresentato come un cono di visibilità a partire dal suo vertice che è collocato in un punto del versante in cui si assume sia situato un osservatore. Le zone del versante che sono state viste dall'osservatore nell'ambito del cono di visibilità sono quelle che possono essere raggiunte da un masso che si distacca dal punto di osservazione.

Il plugin QPROTO, al pari di CONEFALL, rende, inoltre, possibile una valutazione semplificata ma verosimile della velocità e dell'energia ad essa associata che il blocco considerato possiede in una qualunque posizione nell'ambito del cono definito dall'utente e consente, perciò, una stima semplificata della pericolosità del fenomeno. Questo calcolo si basa sull'assunzione che l'inclinazione del cono rispetto al piano orizzontale rappresenti la dispersione di energia del masso lungo il versante (*energy line*).

Da questa considerazione deriva che le caratteristiche del cono hanno una grande influenza sui risultati dell'analisi. Gli angoli che lo definiscono dovranno perciò essere accuratamente tarati dall'utente, prima di effettuare l'analisi, e dovranno tenere conto di tutti i fattori che condizionano il fenomeno.

Scopo di questa tesi di laurea è, quindi, quello di analizzare alcuni dei fattori principali che influiscono sul propagarsi di un crollo in roccia con l'intento di determinare parametri utili nell'implementazione della metodologia di analisi preliminare che sta alla base del plugin QPROTO e di fornire agli operatori uno strumento per la definizione di tali parametri, con riferimento al caso in esame.

Tutte le valutazioni, trattate nei prossimi capitoli, sono state condotte tramite l'impiego back-analyses con riferimento al territorio regionale piemontese. In particolare, la metodologia di studio verrà sviluppata a partire dalle informazioni fornite dal dataset SIFraP (Sistema Informativo Frane in Piemonte), pubblicato sul sito di Arpa Piemonte, che cataloga un numero molto elevato di frane verificatisi negli anni passati, con la possibilità di implementare le caratteristiche a loro associate sul DTM della regione. Una volta identificate

le informazioni ritenute necessarie per lo sviluppo della procedura di analisi preliminare, ovvero l'estensione delle aree che sono state soggette a crolli in roccia, la loro geometria e la loro densità di vegetazione ad alto fusto, esse saranno studiate al fine di ricercare una o più correlazioni caratteristiche che leghino le variabili appena citate alla massima distanza percorsa da un fenomeno gravitativo di versante.

La principale area di esame di questo elaborato sarà il territorio della Val Germanasca (TO) ma verranno anche studiate alcune regioni localizzate nei pressi di Bardonecchia, in Val di Susa, e versanti virtuali creati grazie al software di dettaglio RockyFor3D.

Al fine di garantire al lettore un'esposizione più chiara degli argomenti trattati all'interno di questa tesi di laurea, essa è stata così suddivisa:

- Nel capitolo 1 sarà, innanzitutto, studiata la caduta massi da un punto di vista fisico e meccanico e verranno individuate tutte le caratteristiche geometriche utili per contraddistinguere una parete rocciosa interessata da un fenomeno gravitativo di versante. In seguito, sarà riportata un'analisi delle principali metodologie per la modellazione, con particolare riferimento al software RockyFor3D.
- Nel capitolo 2 verrà esaminato lo stato dell'arte e identificate le principali metodologie di calcolo preliminare presenti in letteratura, con particolare riferimento al *Cone Method* e al software QPROTO.
- Nel capitolo 3, dopo un inquadramento della Val Germanasca e dei fenomeni raccolti nel dataset SiFraP, verranno ricercate, a partire dall'osservazione della geometria del versante, una o più correlazioni caratteristiche, utili per determinare in maniera speditiva la massima distanza percorsa da un crollo in roccia.
- Nel capitolo 4 verrà analizzato criticamente il rapporto del fenomeno di caduta massi con la densità media di vegetazione ad alto fusto presente sul pendio.
- Nel capitolo 5, infine, le correlazioni individuate verranno confrontate con i risultati ottenuti da uno studio parametrico condotto tramite un software di modellazione di dettaglio, al variare della geometria del versante (semplificato) e della densità di vegetazione, al fine di valutare la possibilità di estenderne la validità ad altri contesti.

CAPITOLO 1 - IL FENOMENO DELLA CADUTA MASSI

Il crollo in roccia è un fenomeno fisico molto ricorrente nelle aree montane che si manifesta con frequenza ed intensità imprevedibile. Esso è governato dalla forza di gravità che, superando la resistenza del terreno, provoca il distacco di frammenti di substrato roccioso dal versante e il loro successivo movimento verso il basso. I fattori o le cause che producono tale avvenimento sono generalmente molteplici e, spesso, risultano combinati tra loro. Tra essi si può citare:

- *Conformazione morfologica del versante*, ovvero le caratteristiche geometriche dell'area in esame, utili a definirne (per esempio tramite un'analisi delle pendenze che lo contraddistinguono) le potenziali aree di distacco e di arresto dei massi soggetti a crollo.
- *Conformazione geologica del versante*, ovvero la tipologia di suolo e di substrato roccioso che caratterizza le superfici oggetto di studio.
- *Fattori idrogeologici* che derivano dall'azione delle acque, sia di deflusso superficiale (torrenti e fiumi), sia di tipo meteorico (pioggia e neve) che di infiltrazione. In particolare, la permeabilità e la porosità dell'ammasso roccioso possono condizionare in maniera consistente la circolazione idrica superficiale e/o sotterranea con conseguente alterazione delle pressioni idrauliche all'interno del substrato.
- *Fattori strutturali*, quali la presenza di fessurazioni, fratture, faglie, scistosità o vuoti che riducono la resistenza meccanica del versante in esame.
- *Fattori climatici* come le forti escursioni termiche e le abbondanti precipitazioni che possono portare a distacchi di materiale roccioso.
- *Eventi sismici*, le cui onde, provocate dallo spostamento improvviso di una massa rocciosa nel sottosuolo, trasportano una quantità di energia capace di provocare ingenti danni.
- *Erosione e degradazione dell'ammasso roccioso*, ovvero la riduzione graduale di suolo o roccia per effetto di precedenti fenomeni franosi, ad opera di agenti atmosferici (vento, acqua o ghiaccio) o di organismi viventi.
- *Fattori antropici*, legati alle alterazioni improvvise delle preesistenti situazioni naturali in seguito ad azioni dell'uomo quali disboscamenti, scavi o appesantimenti.

Genericamente, con il termine crollo in roccia si descrive il distacco di un certo volume di roccia da un versante. Esso può, quindi, evolvere come:

- *Caduta massi*: fenomeno identificato dal distacco di uno o più blocchi isolati che, durante la caduta lungo il versante, non presentano interazioni tra di loro. In genere, per quanto concerne una caduta massi, si considera un volume di distacco minore di 100 m³.
- *Valanga di roccia*: evento franoso caratterizzato da una massa in movimento, assimilabile ad un continuo equivalente. Una valanga di roccia coinvolge un

numero molto elevato di blocchi che, oltre ad interagire con la parete rocciosa, dissipano energia tramite molteplici urti interni con i blocchi limitrofi che compongono, anch'essi, la massa continua distaccatasi, rendendo indispensabile uno studio oneroso dell'avvenimento e degli urti tra gli elementi in movimento. In genere, in questo caso, si considera un volume di distacco maggiore di 10^6 m^3 .

- *Crollo in massa*: situazione intermedia tra le due appena esplicate che spesso comporta una forte incertezza sui metodi di analisi da utilizzare. In genere, per quanto concerne un crollo in massa, si considera un volume di distacco compreso tra i 10^3 e i 10^6 m^3 .

All'interno di questa tesi di laurea verranno unicamente analizzati i fenomeni di caduta massi.

1.1 - ANALISI FISICO-MECCANICA DEL FENOMENO

Dopo che si sono verificate le condizioni che portano al distacco di uno o più massi da una parete rocciosa, essi iniziano a muoversi verso il basso seguendo quattro differenti modelli di moto (fig. 1.1):

- *Caduta libera (nell'aria) o volo parabolico*: movimento caratterizzato dalla compresenza di traslazione e rotazione del blocco intorno al proprio asse; avviene, successivamente al distacco, nel caso di pareti molto ripide, ovvero con un angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale maggiore di 76° (Ritchie, 1963). Un masso in caduta libera (fig. 1.2) è influenzato principalmente da due fattori: (i) le forze di attrito con l'aria, che riducono la velocità del blocco soggetto ad accelerazione gravitazionale, senza però incidere in maniera considerevole sul movimento stesso del blocco (Bozzolo e Pamini, 1986); (ii) gli urti causati dall'interazione di più massi, fattore di difficile stima e previsione. In particolare, si fa riferimento al termine *caduta libera* quando la traiettoria del crollo è unicamente verticale, in tutti gli altri casi, ovvero quando è presente una componente orizzontale dovuta al cinematismo di distacco, si parla di *volo parabolico* (fig. 1.3, 1.4).
- *Rimbalzo*: si verifica in genere per angoli di inclinazione del pendio compresi tra 45° e 70° . Nella maggior parte dei casi, questo cinematismo accade negli attimi immediatamente successivi alla fase di caduta libera quando, dopo l'impatto con il suolo (vegetato o non), l'elemento in moto perde gran parte dell'energia da esso posseduta e tende a dividersi in frammenti più piccoli che proseguono la caduta. Come immaginabile, le traiettorie che derivano dai rimbalzi sono di difficile valutazione in quanto sussiste una forte incertezza sull'individuazione della posizione esatta dei punti di impatto e, quindi, della conformazione geometrica degli stessi, fondamentale per il calcolo degli angoli caratterizzanti il cinematismo. In versanti con forti pendenze, dopo il primo rimbalzo, il masso continua la propria discesa compiendo una o più successioni di voli ed altri

rimbalzi, mentre quando l'inclinazione del pendio decresce al di sotto di 45° , in genere esso tende ad una maggiore aderenza alla superficie della parete rocciosa, tramutandosi in rotolamento o rotoscivolamento. Ovviamente, però, l'inclinazione della parete rocciosa rispetto all'orizzontale non è l'unico fattore che influenza il modello di moto di un blocco in movimento ma, al contrario, esistono numerose altre cause quali le caratteristiche di resistenza e deformazione del masso e del suolo e gli angoli di ingresso e di uscita dall'urto descritti dall'elemento distaccatosi con la superficie del versante.

- *Rotolamento*: usualmente, quando la pendenza della parete rocciosa decresce sotto i 45° , il blocco varia il proprio modello di moto in un rotolamento semplice. L'energia cinetica da esso posseduta è quindi quantificabile dalla somma di due termini: il primo è l'energia cinetica rotazionale dovuta al moto di rotazione attorno ad un asse passante per il centro di massa del corpo, il secondo è l'energia cinetica dovuta alla sua traslazione.
- *Scivolamento*: questo modello si verifica solamente in taluni casi, quando l'inclinazione sull'orizzontale della parete è bassa e le forze di attrito tra essa e l'elemento distaccatosi sono ridotte. In realtà è molto difficile che un blocco assuma come modello di moto uno scivolamento puro, se non per brevi tratti, perciò, in caso di basse pendenze, ci si riferisce spesso ad un modello denominato *rotoscivolamento*, che risulta essere un'unione tra rotolamento e scivolamento.

Lo scivolamento può, in taluni casi, contraddistinguere la fase iniziale del moto in particolare quando avviene un distacco per scorrimento del blocco.

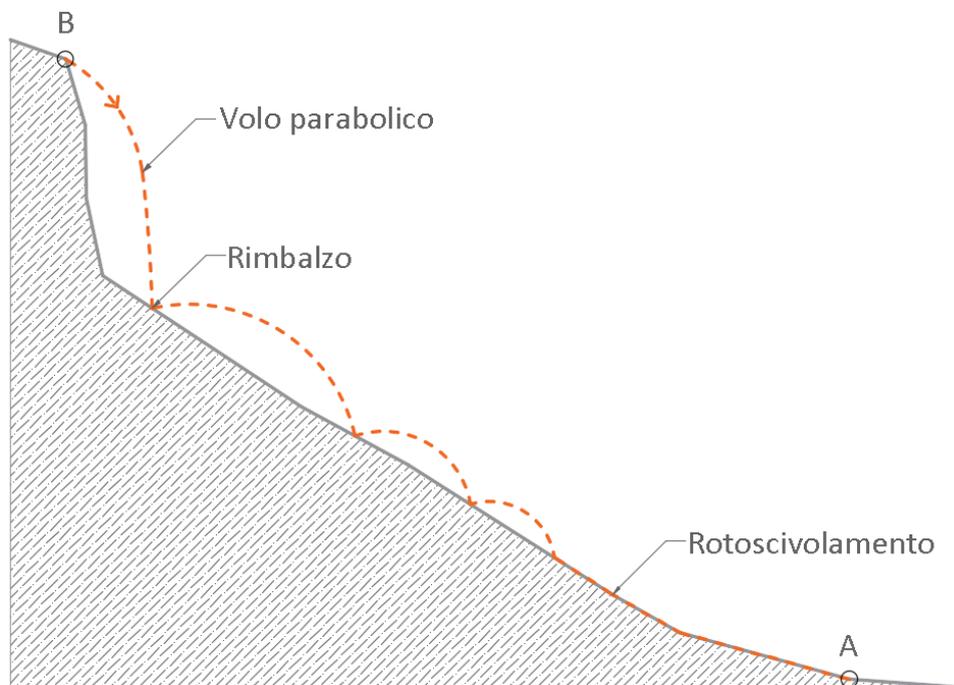


Fig. 1.1 – Modelli di moto di un blocco soggetto a crollo. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco. (modificato da Del Maschio et al., 2007).

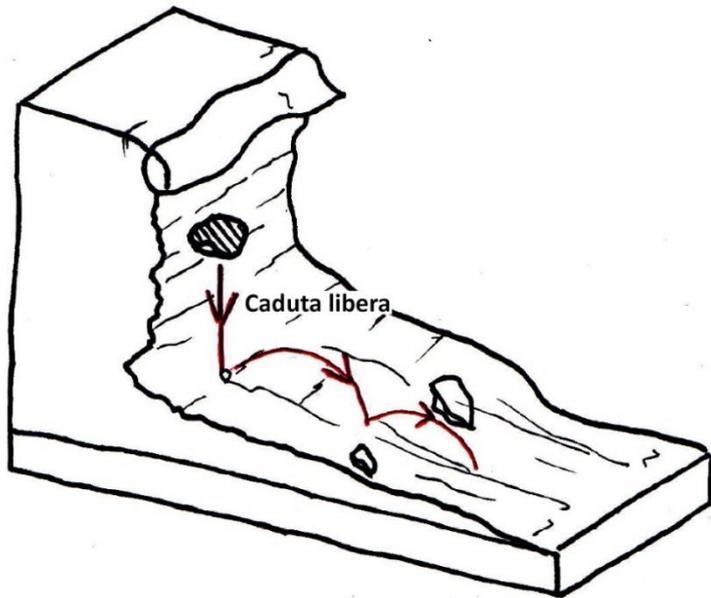


Fig. 1.2 – Innesco per crollo puro. Il cinematismo di partenza sarà un moto di caduta libera (traiettoria puramente verticale) (modificato da Varnes, 1978).

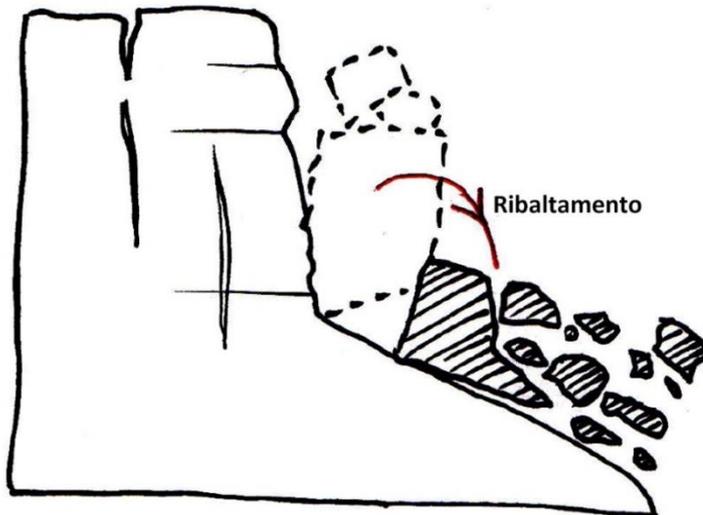


Fig. 1.3 – Innesco per ribaltamento. Il cinematismo di partenza sarà un volo parabolico (modificato da Varnes, 1978).

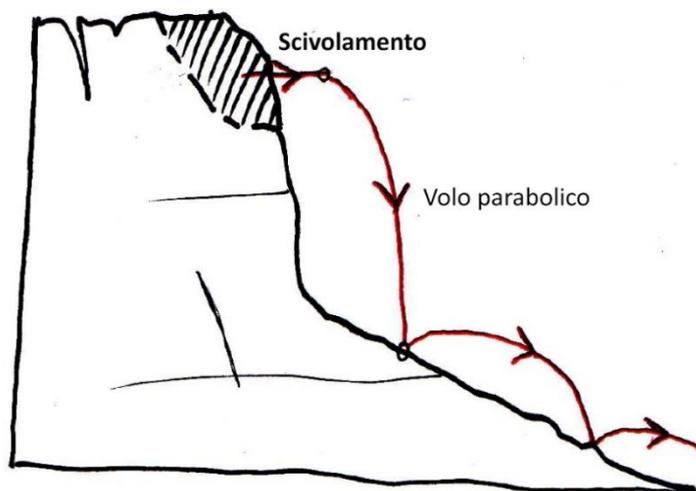


Fig. 1.4 – Innesco per scivolamento. Il cinematismo di partenza sarà un volo parabolico (modificato da Varnes, 1978).

1.2 - IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI GEOMETRI CHE CARATTERIZZANO UN VERSANTE SOGGETTO A CADUTA MASSI

Al fine di approfondire la descrizione del fenomeno in esame, verranno di seguito identificate tre differenti zone, utili a caratterizzare da un punto di vista geometrico il pendio (fig. 1.2):

- *Zona di distacco*: regione della parete rocciosa da cui si separa il volume in caduta.
- *Zona di transito*: porzione di versante attraversata dai massi in movimento, contraddistinta da una pendenza variabile e caratterizzata da una forte dissipazione di energia da parte degli elementi in movimento, per effetto delle interazioni con la parete rocciosa. A seconda della conformazione fisica dell'area non è da escludersi la possibilità che alcuni corpi in moto esauriscano la quantità di energia cinetica da essi posseduta, arrestandosi lungo questo tratto. Il punto con la massima quota verticale appartenente alla zona di transito viene detto *apice del pendio*.
- *Zona di arresto o di deposito*: area di accumulo della totalità (o quasi) di massi e detriti oggetti del crollo, caratterizzata da pendenza minore rispetto alle zone di distacco e transito. Il punto con la massima distanza orizzontale appartenente a questa superficie viene detto *punto di arresto*.

Ad ognuna delle zone precedentemente distinte, corrisponde una fase ben specifica del fenomeno, in particolare:

- *Fase di distacco*: a seguito di una variazione della condizione di equilibrio tra le forze interne ed esterne che agiscono su una determinata area della parete rocciosa analizzata, si crea una situazione di instabilità tale da portare al distacco di un blocco dal versante.
- *Fase di propagazione*: il blocco distaccatosi, per azione della forza di gravità, si muove lungo il pendio con velocità che possono raggiungere i 50 m/s (Barbero, 2015) dissipando energia per effetto della forza di attrito che si genera tra il pendio e il corpo in movimento, dell'energia di disgregazione che caratterizza quest'ultimo, ogniquale volta esso si scinde in frammenti di dimensioni minori, e della plasticizzazione del versante stesso.
- *Fase di arresto*: le forze interne ed esterne che agiscono sul masso distaccatosi raggiungono un nuovo equilibrio quando esso si arresta.

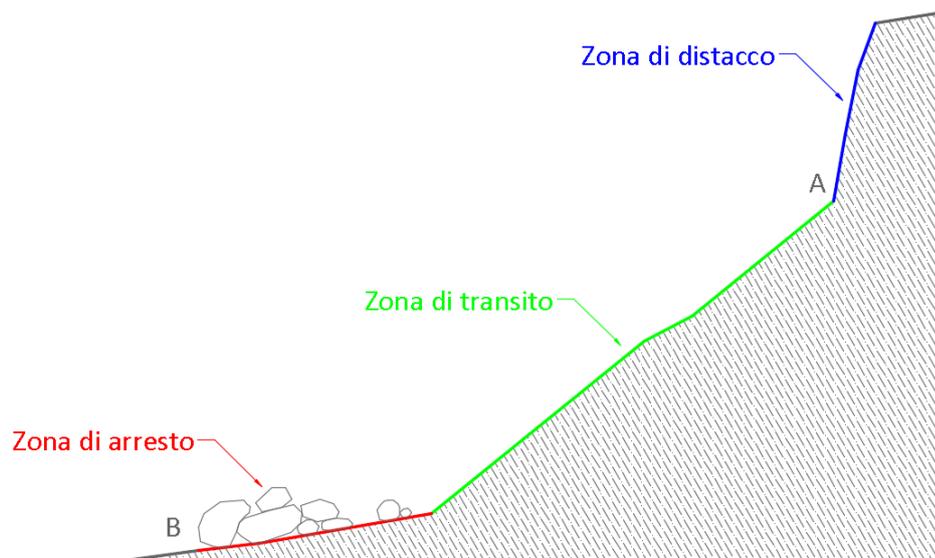


Fig. 1.5 – Identificazione grafica delle tre differenti zone che caratterizzano il pendio da un punto di vista geometrico. A - Apice del pendio; B - Punto di arresto.

1.3 - MODELLAZIONE DEL FENOMENO

Come citato nel capitolo introduttivo, la modellazione del fenomeno di caduta massi può avere diversi scopi e, pertanto, possono essere applicate due differenti metodologie di analisi a seconda degli obiettivi che si vogliono raggiungere.

In particolare, si distingue tra:

- *Analisi di dettaglio*: definiscono su piccole aree (grande scala) le traiettorie di caduta dei massi distaccatosi da un versante e permettono di calcolarne le velocità, le energie, le altezze di volo e di rimbalzo e le eventuali interazioni con vegetazione ad alto fusto presente sul versante oggetto di studio.

Scopo di queste metodologie è quello di analizzare in modo accurato il fenomeno franoso, restituendo risultati utili a definire l'evento calamitoso nella sua interezza, e a progettare eventuali opere di prevenzione o difesa in funzione dell'entità del fenomeno stesso.

- *Analisi preliminari o speditive*: permettono di identificare le zone di invasione colpite da un crollo in roccia e la sua suscettibilità o pericolosità relativa.

Scopo di queste metodologie di indagine è quello di stimare rapidamente su piccola scala (grandi aree) le possibili aree interessate da un fenomeno gravitativo di versante, al fine di attuare una corretta pianificazione territoriale e di valutare se sia doveroso analizzare la regione in esame tramite un software di dettaglio, qualora le zone di invasione intersechino elementi antropici o a rischio.

1.3.1 - MODELLAZIONE DI DETTAGLIO

L'analisi dettagliata dei cinematismi descritti nel paragrafo 1.1, tramite modellazione numerica, è necessaria al fine di descrivere in maniera accurata le velocità e le energie assunte dal masso in movimento, le altezze di volo e di rimbalzo che lo contraddistinguono

e la sua traiettoria. Inoltre, attraverso questa tipologia di indagini è possibile ricavare tutte le informazioni necessarie per valutare la pericolosità del fenomeno, il rischio relativo degli elementi antropici esposti e, infine, per dimensionare eventuali opere di mitigazione o difesa. Ciò, come citato precedentemente, è molto complicato in quanto rende essenziale la minuziosa definizione di tutti i parametri che identificano da un punto di vista geometrico, morfologico e litologico il pendio nonché di tutte quelle altre variabili che possono entrare in gioco nella formazione o nella propagazione del fenomeno.

Ovviamente, lo svolgimento di queste operazioni richiede spesso l'utilizzo di un procedimento di raccolta ed elaborazione dati alquanto oneroso. Inoltre, tali dati dovranno essere forniti in termini statistici al fine di ottenere risultati in termini di probabilità.

Si presenta di seguito una classificazione delle principali procedure di analisi di dettaglio:

- *Metodi di dettaglio basati su algoritmi di tipo cinematico (lumped mass)*: procedure che identificano i massi in movimento sul versante come dei punti ai quali è associata una velocità v e nei quali è concentrata una massa m , definita per esempio attraverso analisi statistiche su eventi pregressi nella macrozona in esame. La traiettoria percorsa dal punto oggetto di studio sarà individuata tramite indagini di tipo balistico, trascurando l'attrito con l'aria.
Nei metodi *lumped mass*, la massa m non influenza i risultati in termini di traiettorie e velocità e l'energia cinetica del blocco in caduta sarà proporzionale alla velocità calcolata.
- *Metodi di dettaglio basati su algoritmi di tipo dinamico (rigid body)*: metodologie che introducono all'interno dell'analisi la dimensione, la forma e le rotazioni dei blocchi in movimento, sia nell'aria che durante gli impatti che essi hanno con il suolo o la vegetazione. In particolare, le fasi di impatto vengono modellate attraverso l'utilizzo di due parametri che definiscono il rapporto tra le velocità normali alla superficie del pendio prima e dopo ogni impatto e la variazione della componente tangenziale della velocità.
Nei metodi *rigid body*, la massa m influenza i risultati in termini di traiettorie e l'energia cinetica del blocco in caduta sarà ad essa proporzionale.
- *Metodi di dettaglio ibridi*: procedure che derivano dall'unione dei metodi *lumped mass* e *rigid body*. Esse schematizzano il blocco come un corpo rigido durante alcune fasi del suo moto mentre come punto materiale in altre.

Come citato nell'introduzione, scopo di questa tesi di laurea è quello di identificare i parametri necessari per elaborare e implementare la metodologia di analisi preliminare che sta alla base del plugin QPROTO (Castelli et al., 2018). Per questo motivo si ritiene che la trattazione fino a qui esposta sui differenti metodi di dettaglio presenti in letteratura sia sufficientemente approfondita anche se si è ritenuto opportuno, a fini di completezza, riportare le tabelle 1.1 e 1.2 per fornire al lettore un'idea generale dei software di dettaglio in 2D e 3D presenti sul mercato e le loro sostanziali differenze.

NOME PROGRAMMA	TIPOLOGIA	BREVE DESCRIZIONE	AUTORI
DISCRETE ELEMENT METHOD	Rigid Body	Non è un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Cundall, 1971
ROCKSIM	Lumped Mass	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Wu, 1985
SASS	Hybrid	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Bozzolo e Pamini, 1986
CRSP (4.0)	Hybrid	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Pfeiffer e Bowen, 1989; Jones et al., 2000
CADMA	Hybrid	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Azzoni et al., 1995
ROCKFALL	Hybrid	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Spang e Sönser, 1995
ROFMOD	Lumped Mass	È un metodo probabilistico. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Zinggeler et al., 1990
ROCFALL	Lumped Mass	Analisi statistica con stima delle energie, velocità, altezze di rimbalzo e punti di arresto lungo profili bidimensionali. Possibile inserimento di opere di ritenuta. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Rocscience, 2001

Tab. 1.1 – Software di dettaglio bidimensionali trattati in letteratura (modificato da Aricò, 2015).

NOME PROGRAMMA	TIPOLOGIA	BREVE DESCRIZIONE	AUTORI
Eboul_Lmr	Rigid Body	Non è un metodo probabilistico e non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Descoeudres e Zimmermann, 1987
Rotomap	Lumped Mass	Simula la traiettoria di caduta di un masso lungo un versante, adoperando un approccio di tipo parametrico. È possibile utilizzare modelli digitali della superficie topografica. È possibile inserire opere di ritenuta. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Scioldo, 1991
3-D-Geotest-Zinggeler	Hybrid	È un metodo probabilistico che permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Krummenacher et al., 2008
Stone	Lumped Mass	Simula la traiettoria di caduta di un masso lungo un versante. Necessita di un DTM. È possibile inserire opere di ritenuta. Non permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Guzzetti e Crosta, 2002
Star3-D	Rigid Body	Non è un metodo probabilistico. Permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Dimnet, 2002
HY-Stone	Hybrid	È un metodo probabilistico. Permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Crosta et al., 2004; Frattini et al., 2008; Agliardi et al., 2009
Pir3D	Lumped Mass	È un metodo probabilistico.	Cottaz e Faure, 2008
RockyFor3D	Rigid Body	È un metodo probabilistico. Simula la traiettoria di caduta di un masso lungo un versante attraverso il calcolo di una sequenza di voli parabolici in aria. Permette la simulazione con presenza di vegetazione.	Dorren, 2010

Tab. 1.2 – Software di dettaglio tridimensionali trattati in letteratura (modificato da Aricò, 2015).

1.3.1.1 - IL SOFTWARE ROCKYFOR3D

Il software RockyFor3D (Dorren, 2010), utilizzato per le analisi parametriche riportate al capitolo 5 di questo elaborato, è uno dei più recenti simulatori tridimensionali, tuttora utilizzati, che permette di svolgere analisi di dettaglio di fenomeni di caduta massi su scala regionale, locale e di versante tramite un approccio probabilistico che tiene conto in modo esplicito della presenza di vegetazione ad alto fusto e di reti paramassi sul pendio oggetto di studio.

Il software si basa sul metodo *rigid body* e permette di interpretare stocasticamente i fenomeni di caduta massi su versanti forestati o privi di vegetazione. In particolare, esso simula tridimensionalmente le traiettorie percorse dai blocchi in movimento lungo la parete rocciosa in esame con un vettore che memorizza i valori tridimensionali di posizione e velocità, attraverso una combinazione di algoritmi deterministici e processi fisici.

Il software riconduce ogni movimento dei massi in caduta sul versante ad un solo modello di moto, il rimbalzo, espresso come volo parabolico. Il rotolamento viene, infatti, computato come una sequenza di rimbalzi ad infinitesima distanza, mentre lo scivolamento dei massi (inteso come slittamento) non viene modellato ma ricondotto, logicamente, ad un semplice rotolamento.

RockyFor3D utilizza una rappresentazione tridimensionale del terreno di tipo raster, sotto forma di DEM (Digital Elevation Model), al quale associa ulteriori altri file raster (in formato ASCII Grid) che hanno il compito di descrivere in modo minuzioso la microtopografia del versante considerato. È, perciò, indispensabile una buona conoscenza del territorio in esame.

I principali risultati restituiti dal programma sono:

- Il valore dell'angolo, caratteristico di ogni traiettoria, generato con l'orizzontale dal segmento che unisce il *punto di distacco* con il *punto di arresto* (*Geometric Angle*).
- Una rappresentazione grafica delle traiettorie percorse da ciascun masso distaccatosi da una cella sorgente.
- La media dei valori massimi di energia cinetica di tutti i blocchi passati attraverso una determinata cella.
- Le velocità di rotazione e traslazione in qualsiasi punto del percorso.
- Il valore medio delle altezze massime di passaggio raggiunte dai massi.
- Il numero dei massi arrestati su di una determinata cella.

DATI BASE DI INPUT

Sono di seguito riportati i primi file di input necessari per l'avvio di una simulazione tramite il software RockyFor3D:

- 1) dem.asc: mappa raster del DEM (Digital Elevation Model), che descrive la topografia del territorio in esame. Dal DEM, Rockyfor3D calcola una mappa delle pendenze e una mappa dell'esposizione seguendo l'approccio proposto da Zevenbergen e Thorne (1987).
- 2) rockdensity.asc: mappa raster che descrive la densità dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco. Le celle raster con un valore pari a 0 non saranno considerate come delle celle sorgente, mentre dalle celle con valore maggiore di zero verrà simulata la caduta di un blocco con densità rispettivamente pari al valore indicato. Per evitare effetti ai bordi, le celle sorgenti non devono essere nelle due righe o colonne più esterne del raster, poiché queste celle non vengono prese in considerazione.
- 3) d1.asc: mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce le dimensioni in metri del blocco in ogni cella sorgente: altezza, larghezza e lunghezza. Le tre dimensioni del blocco definite in ogni cella sorgente possono essere fatte variare di una percentuale predefinita, in modo casuale ed uniforme.
- 4) d2.asc: mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco in ogni cella sorgente.
- 5) d3.asc: mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco in ogni cella sorgente.
- 6) blshape.asc: mappa raster che definisce, per ogni cella sorgente, la forma del blocco in caduta. In particolare Rockyfor3D prevede la possibilità di identificare 4 tipologie di forme differenti (tab. 1.3).

0	Assenza di celle sorgenti
1	Blocco parallelepipedo
2	Blocco ellissoidale
3	Blocco sferico
4	Blocco discoidale

Tab. 1.3 – Valori da assegnare alla mappa raster *blshape.asc* al fine identificare la forma del blocco in caduta lungo il versante.

- 7) rg70.asc: mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce la scabrezza della superficie del pendio espressa come probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza lungo il suo percorso. Il raster *rg70* riporta il valore numerico (in metri) dell'altezza di un ostacolo rappresentativo che un masso che cade incontra nel 70%, dei casi, durante un rimbalzo nell'area definita. La scabrezza varia tra 0 e 100 metri.

- 8) rg20.asc: mappa raster che riporta il valore numerico (in metri) dell'altezza di un ostacolo rappresentativo che un masso che cade incontra nel 20%, dei casi, durante un rimbalzo nell'area definita. La scabrezza varia tra 0 e 100 metri.
- 9) rg10.asc: mappa raster che riporta il valore numerico (in metri) dell'altezza di un ostacolo rappresentativo che un masso che cade incontra nel 10%, dei casi, durante un rimbalzo nell'area definita. La scabrezza varia tra 0 e 100 metri.
- 10) soiltype.asc: mappa raster che definisce la tipologia del suolo come elasticità del terreno.

I valori di R_n (coefficiente di restituzione normale), osservabili in tabella 1.4, vengono assegnati di default dal programma a seconda del valore numerico intero (colonna di sinistra della tabella) attribuito dall'utente alla mappa raster *soiltype.asc*. Rockyfor3D prevede la possibilità di identificare 8 differenti tipologie di suolo.

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R_n valori medi	R_n intervallo di valori
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0	0
1	Materiale fine (spessore > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Materiale fine fluviale (spessore < ~100 cm) o sabbia/ghiaia mista	0,28	0,25 - 0,31
3	Detrito di falda (\emptyset < ~10 cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0,33	0,30 - 0,36
4	Detrito di versante (\emptyset > ~10 cm); 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

Tab. 1.4 – Tipi di suolo e relativi valori di R_n (riportato da Manuale ecorisQ, Dorren, 2010).

DATI DI INPUT PER SIMULAZIONE CON FORESTA

Al fine di effettuare una simulazione con foresta, RockyFor3D permette di scegliere tra due approcci differenti:

- Creare un file, denominato *treefile.txt*, contenente al suo interno tutte le informazioni riguardanti le coordinate di ogni singolo albero sul versante in esame e il diametro medio del fusto misurato all'altezza del petto (in centimetri).
- Rappresentare la vegetazione utilizzando quattro mappe raster di seguito elencate:
 - 1) nrtrees.asc: mappa raster che indica il numero di alberi per ettaro all'interno di ogni cella.
 - 2) conif_percent.asc: mappa raster che precisa la percentuale media di alberi di conifere all'interno di ogni cella.
 - 3) dbhmean.asc: mappa raster che specifica il diametro medio del fusto degli alberi presenti sul versante misurato all'altezza del petto (DBH), all'interno di ogni cella.
 - 4) dbhstd.asc: mappa raster che indica la deviazione standard di DBH all'interno di ogni cella.

Sulla base di questi quattro raster, il software assegna all'interno di ogni cella, in modo casuale, un dato numero di alberi aventi un determinato diametro e, successivamente, costruisce il file contenente le coordinate x e y di tutti gli arbusti e la loro DBH (*treefile.txt*).

DATI DI INPUT PER SIMULAZIONE CON RETE PARAMASSI

Al fine di effettuare una simulazione con rete paramassi, che fornisca informazioni sulla velocità e l'energia di ogni masso in caduta in precisi punti prefissati, sono necessari i seguenti tre file raster:

- 1) *net_number.asc*: numero di reti paramassi.
- 2) *net_energy.asc*: capacità di assorbimento dell'energia da parte della rete [kJ].
- 3) *net_height.asc*: altezza della rete nella direzione perpendicolare alla superficie del versante.

Ognuno dei tre file raster appena identificato deve essere creato mediante una conversione (attraverso un software GIS) dei valori vettoriali delle linee che rappresentano le reti.

L'assegnazione del valore 0 ai raster *net_energy.asc* e *net_height.asc* permette di contare i massi che attraversano le reti virtuali che sono state posizionate lungo il versante e di fornire informazioni sui valori calcolati, senza tener conto dell'effetto barriera e della conseguente dissipazione di energia derivante dalla presenza di una reale rete paramassi posta lungo la parete rocciosa.

1.3.2 - MODELLAZIONE SPEDITIVA

Come citato precedentemente, l'analisi speditiva di un fenomeno di caduta massi è generalmente basata su metodologie di calcolo che analizzano, attraverso semplici osservazioni sul versante in esame, la geometria del pendio e le dimensioni fisiche della massa di distacco al fine di definire in modo statistico le zone che possono essere raggiunte da un masso in caduta lungo un versante.

L'applicazione di una procedura di analisi preliminare, non permette di identificare compiutamente le fasi del moto ma viene utilizzata per definire l'area di invasione del fenomeno calamitoso sulla base di considerazioni empiriche o modelli semplificati, basati generalmente su osservazioni di parametri di semplice reperibilità.

In particolare, nell'ottica di un'analisi preliminare, si può distinguere tra due differenti procedure di calcolo:

- *Metodi empirici*: che propongono correlazioni tra dati reali, quali la geometria del versante, il volume di distacco o le dimensioni fisiche del blocco in caduta, e la massima distanza percorsa da un crollo in roccia (ad esempio: *Height Function Model*, *α - β Model* e *Runout Ratio Model*).
- *Metodi topografici*: che consentono di riprodurre in modo speditivo il comportamento del masso in caduta attraverso simulazioni sulla topografia del versante (ad esempio: *Cone Method*).

È ora importante notare che, nel caso in cui sia previsto l'utilizzo di un'indagine speditiva attraverso l'applicazione di un metodo preliminare semplificato, non è necessaria la definizione precisa dei quattro cinematismi identificati nel paragrafo 1.1, poiché questa operazione porterebbe alla determinazione di un livello di dettaglio maggiore di quanto necessario.

Per un'analisi dettagliata dei metodi di analisi preliminare presenti in letteratura e per la definizione dei loro parametri caratteristici si rimanda al capitolo 2 di questa tesi di laurea magistrale.

CAPITOLO 2 - LE PRINCIPALI METODOLOGIE DI CALCOLO PRELIMINARE PRESENTI IN LETTERATURA

L'analisi della massima distanza coperta da un crollo in roccia e la definizione delle possibili zone di invasione possono essere effettuate, in maniera speditiva, utilizzando differenti metodologie proposte ed analizzate da diversi autori (Heim, 1932; Scheidegger, 1975; Lied, 1977; Onofri e Candian, 1979; Tianchi, 1983; Toppe, 1987; Hungr e Evans, 1988; Van Dijke e Van Westen, 1990; Evans e Hungr, 1993; Corominas, 1996a, 1996b; Meißl, 1998; Keylock e Domaas, 1999; Jaboyedoff e Labiouse, 2003, 2011).

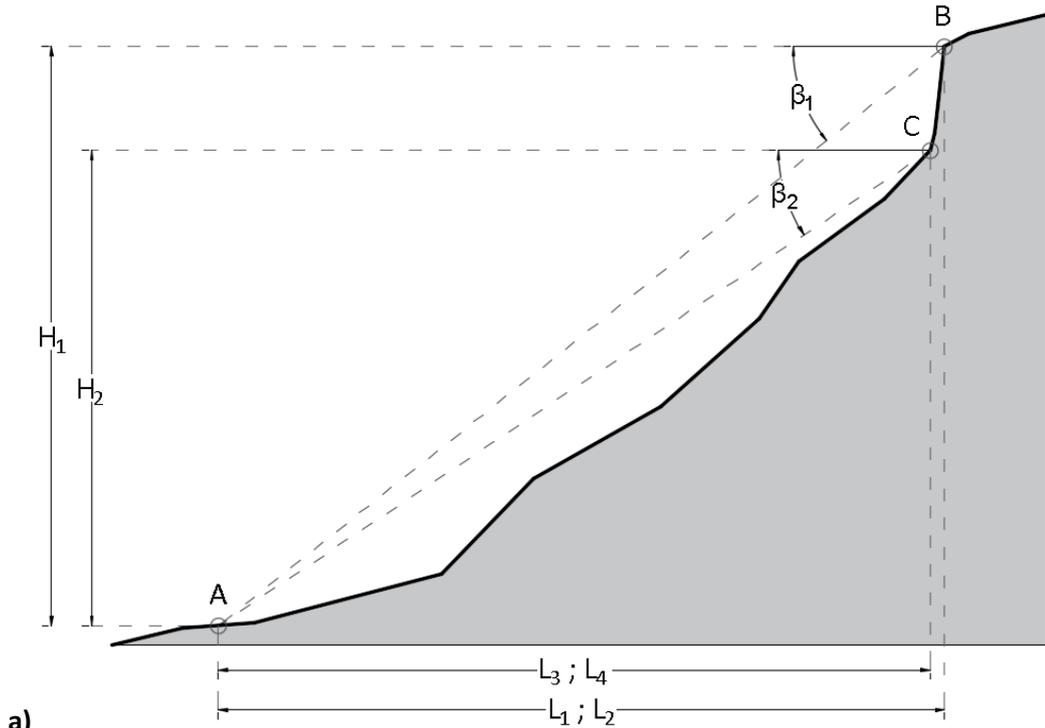
Le relazioni proposte in questo elaborato sono basate sulla definizione di alcuni punti specifici e angoli caratteristici (fig. 2.1 e tab. 2.1), come descritto in dettaglio nei paragrafi che seguono.

2.1 - INDIVIDUAZIONE E DEFINIZIONE DEGLI ANGOLI CARATTERISTICI

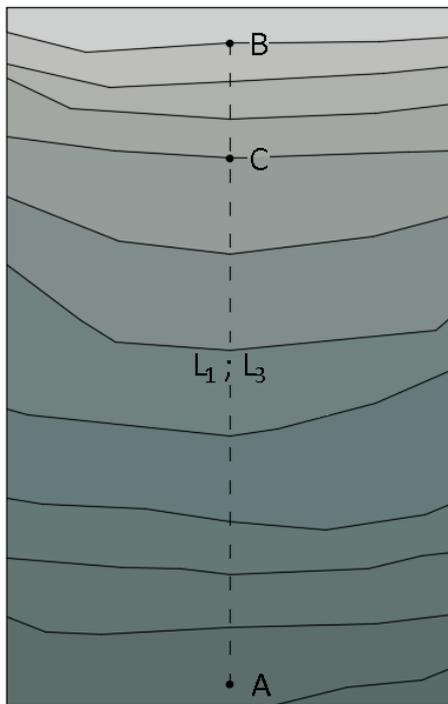
Tra i primi e principali autori che hanno ideato e sperimentato uno dei modelli preliminari sopracitati si vuole menzionare Heim (1932) che propose un metodo per la stima del cosiddetto *Fahrböschung* (*Travel Angle*) e che osservò che il valore di tale angolo varia in funzione del volume del crollo in roccia. Indagini dettagliate condotte successivamente da numerosi altri specialisti del settore (Hsü, 1975; Lied, 1977; Onofri e Candian, 1979; Hungr e Evans, 1988) hanno confermato gli studi di Heim e hanno permesso di identificare quattro diversi angoli (tab. 2.1) che differiscono in funzione delle assunzioni fatte sulle caratteristiche geometriche del versante e dei punti di riferimento assunti per la loro individuazione (fig. 2.1):

1. *Geometric Angle* (β_g): la cui tangente ($\tan\beta_g$) è definita come il rapporto tra la proiezione verticale (H_1) e la proiezione orizzontale (L_1) della retta che congiunge il *punto di distacco* con il *punto di arresto*: $\beta_g = \arctan(H_1/L_1)$.
2. *Travel Angle* (β_t): la cui tangente ($\tan\beta_t$) è definita come il rapporto tra la proiezione verticale (H_1) della retta che congiunge il *punto di distacco* con il *punto di arresto* e la proiezione orizzontale (L_2) della reale distanza percorsa dal blocco (traiettoria curvilinea), sviluppata in linea retta, con origine nel *punto di distacco*: $\beta_t = \arctan(H_1/L_2)$.
3. *Minimum Shadow Angle* (β_s): la cui tangente ($\tan\beta_s$) è definita come il rapporto tra la proiezione verticale (H_2) e la proiezione orizzontale (L_3) della retta che congiunge l'*apice del pendio* con il *punto di arresto*: $\beta_s = \arctan(H_2/L_3)$.
4. *Average Gradient Angle* (β_n): la cui tangente ($\tan\beta_n$) è definita come il rapporto tra la proiezione verticale (H_2) della retta che congiunge l'*apice del pendio* con il *punto di arresto* e la proiezione orizzontale (L_4) della reale distanza percorsa dal

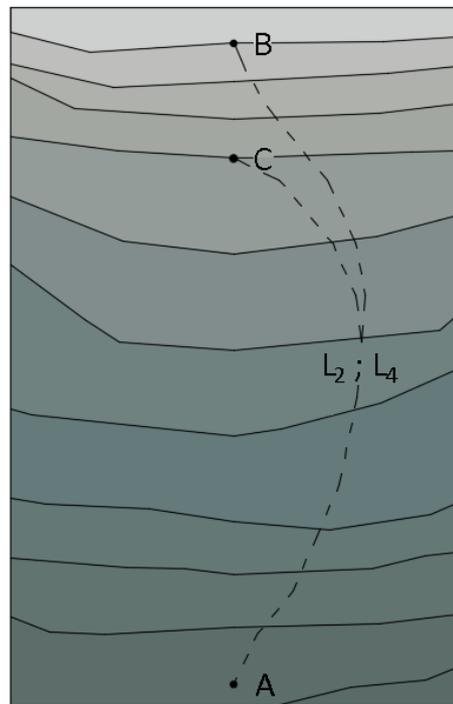
blocco (traiettoria curvilinea), sviluppata in linea retta, con origine nell'apice del pendio: $\beta_n = \arctan(H_2/L_4)$.



a)



b)



c)

Fig. 2.1 – Rappresentazione in sezione (immagine a) e in pianta (immagini b e c) dei punti e degli angoli caratteristici di una traiettoria di caduta massi, identificati in letteratura. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco; C - Apice del pendio; β_1 - Può riferirsi al Geometric Angle o al Travel Angle se si considerano, rispettivamente, le proiezioni orizzontali L_1 e L_2 ; β_2 - Può riferirsi al Minimum Shadow Angle o all' Average Gradient Angle se si considerano, rispettivamente, le proiezioni orizzontali L_3 e L_4 . Informazioni più dettagliate di quanto appena enunciato sono fornite in tabella 2.1 (modificato da Petje et al., 2005).

DENOMINAZIONE	DEFINIZIONE DELLA DISTANZA VERTICALE	DEFINIZIONE DELLA DISTANZA ORIZZONTALE	FONTI
Geometric Angle (β_g)	Proiezione verticale della retta che congiunge il <i>punto di distacco</i> con il <i>punto di arresto</i> (H_1)	Proiezione orizzontale della retta che congiunge il <i>punto di distacco</i> con il <i>punto di arresto</i> (L_1)	Heim, 1932; Hsü, 1975; Onofri e Candian, 1979; Meißl, 1998
Travel Angle (β_t)	Proiezione verticale della retta che congiunge il <i>punto di distacco</i> con il <i>punto di arresto</i> (H_1)	Proiezione orizzontale della distanza reale percorsa dal blocco, con origine nel <i>punto di distacco</i> (L_2)	Heim, 1932; Hsü, 1975; Onofri e Candian, 1979; Meißl, 1998
Minimum Shadow Angle (β_s)	Proiezione verticale della retta che congiunge l' <i>apice del pendio</i> con il <i>punto di arresto</i> (H_2)	Proiezione orizzontale della retta che congiunge l' <i>apice del pendio</i> con il <i>punto di arresto</i> (L_3)	Lied, 1977; Hungr e Evans, 1988; Evans e Hungr, 1993; Meißl, 1998
Average Gradient Angle (β_n)	Proiezione verticale della retta che congiunge l' <i>apice del pendio</i> con il <i>punto di arresto</i> (H_2)	Proiezione orizzontale della distanza reale percorsa dal blocco, con origine nell' <i>apice del pendio</i> (L_4)	Lied, 1977; Hungr e Evans, 1988; Evans e Hungr, 1993; Meißl, 1998

Tab 2.1 – Tabella riassuntiva riportante gli angoli utilizzati nelle principali procedure di calcolo preliminare.

Talvolta può succedere che la proiezione orizzontale del punto di distacco e dell'apice del pendio si sovrappongano; ciò significa che, in questo caso particolare, il blocco distaccatosi incorre in una fase di caduta libera dal punto di distacco all'apice del pendio disegnando una linea retta con un'inclinazione di 0° rispetto alla verticale. La retta L_1 coinciderebbe, perciò, con la retta L_3 e la traiettoria L_2 con quella L_4 .

Diversi autori, sulla base dell'osservazione di casi reali, hanno verificato che la tangente del cosiddetto *Travel Angle*, basato sulla reale traiettoria del masso, rappresenta in modo discretamente accurato il coefficiente di attrito dinamico dovuto alle forze di interazione tra la massa di distacco e il versante; d'altra parte, essi hanno anche evidenziato la difficoltà di determinare in modo esauriente questo parametro. Esso richiede, infatti, un approfondito studio sul campo della traiettoria (L_2) percorsa da ogni blocco distaccatosi dal versante e ciò può essere fatto solamente tramite di analisi di dettaglio che, però, non rientrano negli obiettivi di rapidità imposti da un'indagine preliminare. Lo stesso ragionamento può essere immaginato anche a proposito del cosiddetto *Average Gradient Angle* il quale viene

calcolato, come il *Travel Angle*, analizzando la traiettoria effettiva disegnata dal crollo in roccia (L_4).

Per i motivi sopracitati, gli angoli più frequentemente utilizzati all'interno delle procedure di calcolo preliminare sono il *Minimum Shadow Angle* e il *Geometric Angle* che, basandosi unicamente su correlazioni trigonometriche tra le proiezioni orizzontali e verticali delle distanze tra i punti caratteristici del versante, sono di facile ed immediata stima. Il *Minimum Shadow Angle*, in particolare, è l'angolo più facile da definire in quanto esso richiede solamente la definizione della posizione dell'apice del pendio determinabile tramite semplici osservazioni e analisi della cartografia. Al contrario, il *Geometric Angle* richiede una valutazione piuttosto dettagliata della posizione del punto di distacco. In particolare, con riferimento al *Cone Method* e al software QPROTO, come descritto nel capitolo 1, nell'ambito di una metodologia speditiva utilizzata per scopi previsionali, è possibile individuare le cosiddette *zone di distacco omogenee* sulla base di considerazioni geologico-strutturali quali, ad esempio, lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso, le giaciture del versante o tramite osservazioni sulle pendenze. Successivamente, all'interno di ciascuna zona di distacco si individuano una serie di punti che hanno la stessa probabilità di generare un crollo. Tali punti sono denominati punti di distacco.

Numerosi professionisti hanno definito i valori che gli angoli sopracitati possono assumere, sulla base di studi sperimentali, analisi dettagliate e back-analysis di fenomeni già avvenuti. In particolare, per quanto riguarda il *Minimum Shadow Angle*, Lied (1977) concluse che esso dovesse avere un intervallo di valori compreso tra 28° e 30° ; Evans e Hungr (1993) stabilirono un valore medio di $27,5^\circ$, sulla base di uno studio compiuto nella British Columbia (per versanti caratterizzati da materiali che minimizzassero il coefficiente d'attrito tra il masso distaccatosi ed il pendio, essi proposero un angolo pari a 23°); Wieczorek et al. (1998, 2008) fissarono un valore di 26° dall'analisi di casi verificatisi nella Yosemite Valley e proposero un valore di 22° per crolli in roccia di grandi volumi; Meißl (2001) riportò un valore di $31,5^\circ$ sulla base di osservazioni sulle Alpi tedesche e austriache e, infine, Copons (2004) individuò 27° come valore medio dell'angolo. Queste considerazioni hanno, perciò, portato ad identificare che il *Minimum Shadow Angle* è generalmente compreso tra i 22° e i 30° .

Per quanto riguarda la stima degli altri angoli sopracitati, Onofri e Candian (1979) definirono un valore minimo da assegnare al *Geometric Angle* pari a $28,5^\circ$ mentre Meißl (1998), durante studi compiuti sulle Alpi Bavaresi, notò che il *Geometric Angle* e il *Travel Angle* differivano tra di loro per meno di 1° ; egli osservò, infatti, che il primo assumeva valori compresi tra $29,5^\circ$ e $45,5^\circ$ mentre il secondo tra 29° e 45° , con valori medi di 38° per entrambi gli angoli. Similmente, anche il *Minimum Shadow Angle* e l'*Average Gradient Angle* presentavano valori che si scostavano per meno dell' 1° , dimostrando che la decisione di assumere come distanza orizzontale la proiezione della traiettoria reale percorsa dal crollo in roccia piuttosto che la proiezione della linea retta che congiunge il punto di distacco o l'apice del pendio con il punto di arresto, fornisce solo piccole variazioni sul valore dell'angolo considerato. Ovviamente, però, ognuno di questi studi è stato compiuto su versanti presentanti

caratteristiche geomorfologiche e litologiche simili le quali, ipoteticamente, potrebbero aver influenzato l'analisi conducendo ad un risultato non generalizzabile.

2.2 - DESCRIZIONE ED ANALISI CRITICA DELLE PRINCIPALI METODOLOGIE DI STUDIO

La valutazione della massima distanza coperta da un crollo in roccia tramite l'impiego di metodologie d'analisi preliminare ha inizio, generalmente, dall'identificazione e dalla caratterizzazione della geometria del versante e, in particolare, dell'area di distacco. Spesso, l'individuazione di questa zona viene effettuata per mezzo di procedure basate sull'utilizzo di cartografie digitali in ambiente GIS e su rappresentazioni della topografia del territorio (Digital Terrain Model) che, a seconda del grado di dettaglio con cui è stata realizzata ed implementata, fornisce una discretizzazione della superficie differente. Infatti, il DTM è associato ad una risoluzione caratteristica, il cui valore indica la dimensione del lato delle celle quadrate che lo compongono. Ad ogni cella è assegnata una quota che corrisponde alla quota del baricentro della cella stessa. È, quindi, chiaro che più la risoluzione del DTM è bassa, più si identificherà, all'interno della superficie topografica, un numero crescente di celle (di dimensione minore) e, di conseguenza, una maggiore discretizzazione della superficie, il che aumenta notevolmente il grado di dettaglio del DTM stesso.

In questo paragrafo saranno identificate le principali procedure di analisi preliminare presenti in letteratura. Verranno, inoltre, esaminati i vantaggi e gli svantaggi che esse presentano, l'affidabilità e la precisione attesa dai dati di output e, infine, il campo di applicabilità e le situazioni in cui queste metodologie possono fornire risultati poco attendibili.

Come si evince dalle tabelle 2.2 e 2.3, esistono numerosi metodi che possono essere impiegati per una stima speditiva delle aree potenzialmente colpite da un fenomeno di caduta massi che interessano un determinato territorio montano. Essi sono stati tutti ricavati dallo studio delle correlazioni che si instaurano tra i diversi fattori che influenzano il fenomeno, attraverso indagini critiche svolte sulla base di dati ottenuti da crolli realmente avvenuti.

MODELLO	TIPOLOGIA	DATI DI INPUT	FONTI
α - β Model	Metodo empirico-statistico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> . Posizione geometrica del <i>pedice del pendio</i> .	Heim, 1932; Hsü, 1975; Körner, 1980; Keylock e Domaas, 1999
Cone Method	Metodo topografico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> .	Heim, 1932; Onofri e Candian, 1979; Jaboyedoff e Labiouse, 2003, 2011
Height Function Model	Metodo empirico-statistico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> .	Keylock e Domaas, 1999
Runout Ratio Model	Metodo empirico-statistico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> . Inclinazione media della <i>zona di arresto</i> .	McClung e Lied, 1987; Keylock e Domaas, 1999
Scheidegger Method	Metodo topografico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> . Angolo d'attrito.	Scheidegger, 1975; Van Dijke e Van Westen, 1990
Shadow Angle Method	Metodo topografico	Geometria del versante. Posizione geometrica dell'apice del pendio.	Heim, 1932; Lied, 1977; Hungr e Evans, 1988; Evans e Hungr, 1993, Meißl, 1998
Tianchi Model	Metodo empirico	Geometria del versante. Posizione geometrica del <i>punto di distacco</i> . Volume di distacco.	Tianchi, 1983

Tab 2.2 –Identificazione della tipologia di calcolo, dei dati di input e delle fonti principali da cui derivano i principali modelli di calcolo preliminare presenti in letteratura.

MODELLO	VANTAGGI	LIMITI
α - β Model	Rapida stima della zona di invasione. Dati di input facili da reperire. Uso semplice e veloce.	Stima approssimativa della zona di invasione. Movimenti laterali non simulati. Non fornisce mappature delle zone di invasione.
Cone Method	Rapida stima della zona di invasione. Dati di input facili da reperire. Uso semplice e veloce. Simulazione dei movimenti laterali. Fornisce una mappatura della zona di invasione.	Stima approssimativa della zona di invasione. Di difficile applicazione in caso di stima troppo approssimata della zona di distacco.
Height Function Model	Rapida stima della zona di invasione. Dati di input facili da reperire. Uso semplice e veloce.	Stima molto approssimativa della zona di invasione. Movimenti laterali non simulati. Non fornisce mappature delle zone di invasione.
Runout Ratio Model	Rapida stima della zona di invasione. Dati di input facili da reperire. Uso semplice e veloce.	Stima approssimativa della zona di invasione. Movimenti laterali non simulati. Non fornisce mappature delle zone di invasione.
Scheidegger Method	Stima sufficientemente dettagliata della zona di invasione. Fornisce una mappatura delle velocità sul versante.	Necessità di stimare correttamente l'angolo d'attrito. Per stime più dettagliate sono necessarie mappe sulla densità di vegetazione.
Shadow Angle Method	Rapida stima della zona di invasione. Dati di input facili da reperire. Uso semplice e veloce.	Stima cautelativa ma approssimata della zona di invasione. Movimenti laterali non simulati. Non fornisce mappature delle zone di invasione sul versante.
Tianchi Model	Una delle prime procedure semplificate utilizzate.	È necessaria una stima dettagliata del volume di distacco. Movimenti laterali non simulati. Non fornisce mappature delle zone di invasione sul versante.

Tab 2.3 – Individuazione dei vantaggi e degli svantaggi derivanti dall'applicazione di alcune delle procedure di calcolo preliminare presenti in letteratura.

Il primo modello che si vuol prendere in esame è quello proposto da Scheidegger (1975) e successivamente implementato da Van Dijke e Van Westen (1990). Questo metodo può essere considerato come il precursore del *Cone Method* (Onofri e Candian, 1979); infatti, Scheidegger ipotizzava di stimare il *Geometric Angle* a partire dalla definizione della geometria del versante e del coefficiente di attrito (μ) che caratterizza la relazione tra il masso distaccatosi e la parete rocciosa. Ovviamente, la determinazione di questo ultimo parametro ha un grado di complessità piuttosto elevato che, però, può essere ovviato, nell'ambito di un'analisi preliminare, dall'utilizzo di tabelle create per via sperimentale che riportano gli intervalli di valori che possono essere assunti da μ a seconda del materiale di cui è composto lo strato superficiale del versante. Questa semplificazione è però solo applicabile a pareti contraddistinte da una certa omogeneità nei materiali; nel caso in cui, infatti, essi siano troppo eterogenei, il metodo richiede una stima con un livello di approfondimento troppo elevato, che non rispecchia gli obiettivi imposti da un'analisi speditiva.

Nel 1990 il metodo fu rivisitato da Van Dijke e Van Westen che introdussero, oltre alla possibilità di utilizzare come ulteriore dato di input una mappa che tenesse conto della densità di vegetazione presente nella zona di studio, anche una nuova tecnica di simulazione chiamata *Neighborhood Analysis*. Essa, basandosi sul GIS e identificando una cella sorgente, simula la traiettoria ipotetica seguita dal crollo in roccia, supponendo che il masso distaccatosi si muova sempre nella direzione della cella con la minore quota verticale rispetto a quelle ad esso più prossime. Questa procedura, molto innovativa al momento della sua proposta, permette di stimare la velocità dei massi in caduta ma, allo stesso tempo, non tiene in conto delle piccole irregolarità topografiche o morfologiche che potrebbero influenzare in modo sostanziale la traiettoria del blocco.

Un altro procedimento di analisi, considerato come uno dei "capostipiti" dei metodi di indagine preliminare, è quello che è stato proposto da Tianchi nel 1983. L'autore, dopo numerosi studi sul campo, valutò la massima distanza percorsa dal volume di distacco (V) tramite la semplice equazione matematica:

$$\log\left(\frac{H_1}{L_1}\right) = A + B \cdot \log(V) \quad (2.1)$$

dove con H_1 ed L_1 vengono rispettivamente definite le proiezioni verticale ed orizzontale della retta che congiunge il *punto di distacco* con il *punto di arresto*, mentre A e B sono due costanti del valore rispettivo di 0.6640 e -0.1529 .

Nell'ambito dell'applicazione del metodo proposto da Tianchi, è possibile evidenziare due problematiche principali. Innanzitutto, come si può facilmente intuire, il volume V è di difficile determinazione poiché richiederebbe studi molto approfonditi sul versante e l'utilizzo di strumentazioni precise e lunghe tempistiche. Ovviamente, ciò è parzialmente evitabile definendo il volume sulla base di osservazioni in situ o di cartografie numeriche e sulla successiva valutazione attraverso back-analyses di casi già verificatisi con caratteristiche affini, permettendo, così, di ricavarne una stima approssimata la cui affidabilità dipenderà però dal livello di dettaglio delle indagini.

In secondo luogo, il metodo fornisce risultati tanto più attendibili quanto più è grande la massa considerata; in particolare esso provvede una stima affidabile quando il volume di distacco è superiore alle migliaia di m³. I coefficienti A e B sono, infatti, “calibrati” per volumi di quest’ordine di grandezza.

Per i motivi sopracitati, il modello di Tianchi è raramente impiegato nella valutazione delle zone di arresto di un singolo masso in caduta e viene preferito per lo studio delle aree interessate da grandi volumi, come le valanghe di roccia.

Tre ulteriori procedure di analisi, ideate per la determinazione della massima distanza percorsa da una frana di crollo, furono illustrate e confrontate da Keylock e Domaas nel 1999. Gli autori, basandosi su un ampio dataset contenente caratteristiche dettagliate su 121 crolli in roccia avvenuti in Norvegia e classificati dallo stesso Domaas, stabilirono i vantaggi e gli svantaggi di ogni modello e quale tra essi potesse essere quello più affidabile. In particolare, la valutazione iniziò, dapprima, con la distinzione di tutti i parametri topografici necessari per definire le correlazioni interessate (fig. 2.3) e, successivamente, con l’analisi delle procedure distintive di ogni metodologia. I modelli confrontati sono:

- *Height Function Model*: assumendo che la caduta massi sia un processo governato principalmente dalla forza di gravità in cui il masso coinvolto ha interazioni quasi unicamente con il versante che discende, la zona di invasione può essere dedotta da semplici relazioni sulla geometria del versante; in particolare combinando la proiezione orizzontale della zona d’arresto (L_1 in figura 2.2) con la proiezione verticale della retta che congiunge il punto di distacco con la base del pendio ($H_2 + H_3$ in figura 2.2). Per i casi esaminati da Keylock e Domaas, la relazione che si ottiene è:

$$\log(L_1) = 0.77 \cdot \log(H_2 + H_3) \quad (2.2)$$

È importante evidenziare che l’applicazione di questo modello ai casi analizzati dagli autori ha portato all’individuazione di un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0,56 (la variabilità dei dati rispetto alla retta di regressione è perciò parecchio elevata).

- α - β *Model*: A partire dalla definizione dell’angolo α fornita da Heim nel 1932, che coincide con il *Geometric Angle* precedentemente identificato, il modello, in seguito alle valutazioni condotte da Keylock e Domaas sui 121 crolli in roccia avvenuti in Norvegia e classificati dallo stesso Domaas, individua la seguente correlazione:

$$\alpha = 0.77 \cdot \beta + 4.24 \quad (2.3)$$

dove l’angolo β identifica la cotangente del rapporto tra la proiezione verticale ($H_2 + H_3$) e quella orizzontale ($L_2 + L_3$) della retta che congiunge il punto di distacco (B in figura 2.2) con la base del pendio (J in figura 2.2):

$$\tan(\beta) = \frac{(H_2 + H_3)}{(L_2 + L_3)} \quad (2.4)$$

In questo caso il coefficiente di determinazione R^2 , riferito ai casi studiati dagli autori, è risultato essere pari a 0,86 sottolineando, perciò, un decremento notevole nella variabilità dei risultati rispetto alla retta di regressione. Questo

fatto indica che il α - β Model presenta un grado di precisione maggiore rispetto al *Height Function Model* nel calcolo della massima distanza percorsa da un masso in movimento lungo un versante.

- *Runout Ratio Model*: Questa metodologia è stata ricavata dagli studi compiuti da McClung e Lied (1987) sulla ricerca delle zone colpite da valanghe di neve e poi riadattata da Keylock e Domaas per i fenomeni di caduta massi, tramite la seguente correlazione:

$$L_1 / (L_2 + L_3) = [\tan(\beta) - \tan(\alpha)] / [\tan(\alpha) - \tan(\theta_1)] \quad (2.5)$$

Essa esplica il rapporto tra la proiezione orizzontale della zona di arresto (L_1) e la proiezione orizzontale della retta che congiunge il punto di distacco con la base del pendio ($L_2 + L_3$). Il termine θ_1 rappresenta, invece, l'inclinazione media della zona di arresto sull'orizzontale.

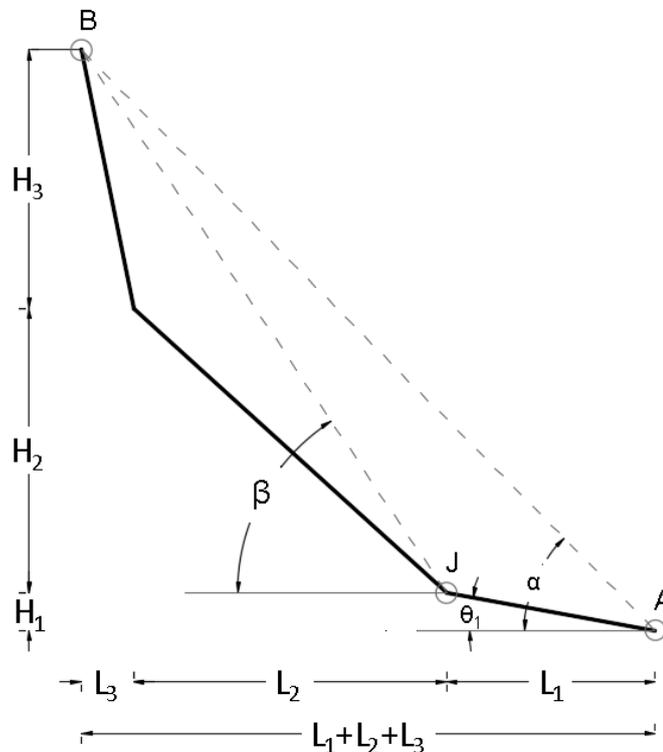


Fig. 2.2 – Illustrazione grafica dei parametri geometrici utilizzati nei metodi descritti da Keylock e Domaas. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco; J - Base del pendio. (modificato da Keylock e Domaas, 1999).

Dopo numerose analisi statistiche effettuate sui risultati ottenuti dall'applicazione delle procedure sopra elencate, Keylock e Domaas identificarono il *Runout Ratio Model* come la più accurata, anche se sottolinearono che essa dovrebbe essere utilizzata con cautela quando si hanno a disposizione solo scarsi dati di input. La determinazione dei parametri che la contraddistinguono richiede, infatti, una certa meticolosità e precisione. Oltre a questo, va considerato il fatto che tali metodi sono stati studiati e comparati tra di loro utilizzando dati derivanti da un'unica grande macrozona con caratteristiche topografiche e geometriche

affini che potrebbero, teoricamente, avere influenzato parzialmente la ricerca e i risultati finali.

2.2.1 - SHADOW ANGLE METHOD E CONE METHOD

Gli ultimi due metodi che si vogliono, ora, prendere in esame, sono i cosiddetti *Shadow Angle Method* e *Cone Method*, cardini delle più moderne procedure di calcolo preliminare.

Il primo, teorizzato da Hungr e Evans (1988) partendo dai primi studi di Lied (1977), si basa sull'ipotesi che un qualsiasi blocco distaccatosi da un versante dissipi la maggior parte di energia cinetica, acquisita durante la fase di caduta libera, nel momento in cui impatta in un punto vicino all'*apice del pendio*. Alla luce di ciò, la procedura individua la cosiddetta *Shadow Zone*, definita come l'area sottesa dalla corda che unisce l'*apice del pendio* con il *punto di arresto*, e l'angolo β_s (fig. 2.4) che è fissato pari a $27,5^\circ$ in funzione ai risultati ottenuti per mezzo di numerose back-analyses condotte dagli autori.

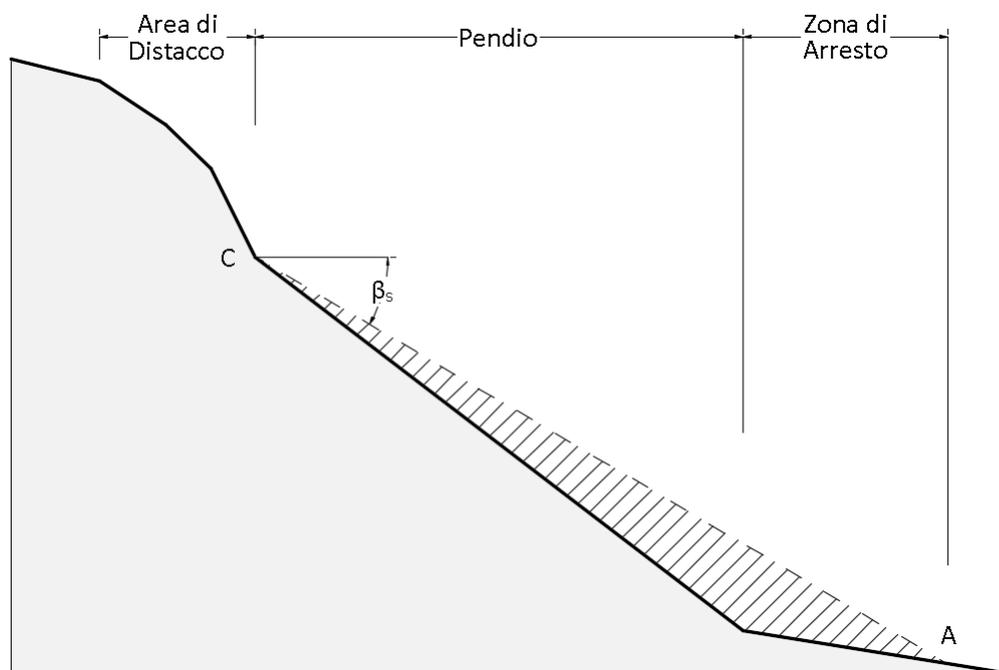


Fig. 2.3 – Diagramma schematico di alcuni parametri caratteristici del versante. A - Punto di arresto; C - Apice del pendio; Area tratteggiata - Shadow Zone. (modificato da Evans e Hungr, 1993).

Per quanto riguarda il *Cone Method*, invece, esso è stato teorizzato da Onofri e Candian (1979) a partire da precedenti studi compiuti da Heim nel 1932.

La procedura si basa sul concetto di *Energy Line* definita come il segmento limitato superiormente dal punto di distacco e inferiormente dal punto di arresto, che presenta un'inclinazione rispetto all'orizzontale identificata dal *Travel Angle* β_t , precedentemente citato.

L'*Energy Line*, così esplicita, rappresenta la dissipazione lineare di energia lungo la traiettoria che percorre il crollo in roccia e la sua pendenza, pari alla tangente dell'angolo β_t , corrisponde al coefficiente di attrito equivalente che tiene conto di tutti i fenomeni che si generano dalla relazione tra il masso distaccatosi e la parete del versante (Jaboyedoff e

Labiouse, 2011). In realtà, da un punto di vista teorico, l'energia dissipata lungo una complessa traiettoria di un masso in caduta dipende da numerosi fattori quali la dissipazione puntuale di energia durante ogni singolo impatto e il rotolamento o lo scivolamento del corpo sul versante. In prima approssimazione, però, tali fenomeni possono essere semplificati attraverso un processo equivalente di rotoscivolamento in cui l'angolo β_t tiene conto di tutti i processi reali che portano alla dissipazione di energia fino all'arresto dell'elemento in movimento. Perciò, la media dell'energia dissipata lungo l'intero percorso di un blocco distaccatosi da un versante può essere facilmente valutata attraverso l'angolo β_t . In particolare (in riferimento alla sezione verticale in figura 2.4), l'equazione di bilancio dell'energia di un elemento che si distacca da un'altezza H , risulta essere:

$$m \cdot g \cdot H - m \cdot g \cdot h(x) = \frac{1}{2} m \cdot v(x)^2 + m \cdot g \cdot x \cdot \mu \quad (2.6)$$

dove con m si denota la massa del blocco in movimento, g indica l'accelerazione di gravità, x la coordinata orizzontale del punto considerato, $h(x)$ la quota della superficie topografica nel punto x , $v(x)$ la velocità nel punto x e μ il coefficiente di attrito equivalente caratteristico. Dall'equazione 2.6 è, quindi, possibile ricavare una stima semplificata della velocità che un masso in caduta possiede in una qualunque posizione lungo la propria traiettoria:

$$v(x) = \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (2.7)$$

dove con il termine Δh si indica la differenza di quota, misurata rispetto allo stesso piano di riferimento, tra l'*Energy Line* e il profilo topografico reale della parete analizzata (fig. 2.4). È ora facile comprendere che se la pendenza di un qualsiasi punto sul profilo topografico reale presenta un angolo di inclinazione con l'orizzontale maggiore rispetto al *Travel Angle*, in quel preciso punto il masso distaccatosi avrà una velocità maggiore rispetto a quella media calcolata con l'equazione 2.7 mentre, in caso contrario, esso subirà un decremento di velocità tanto maggiore quanto più è importante la differenza di pendenza.

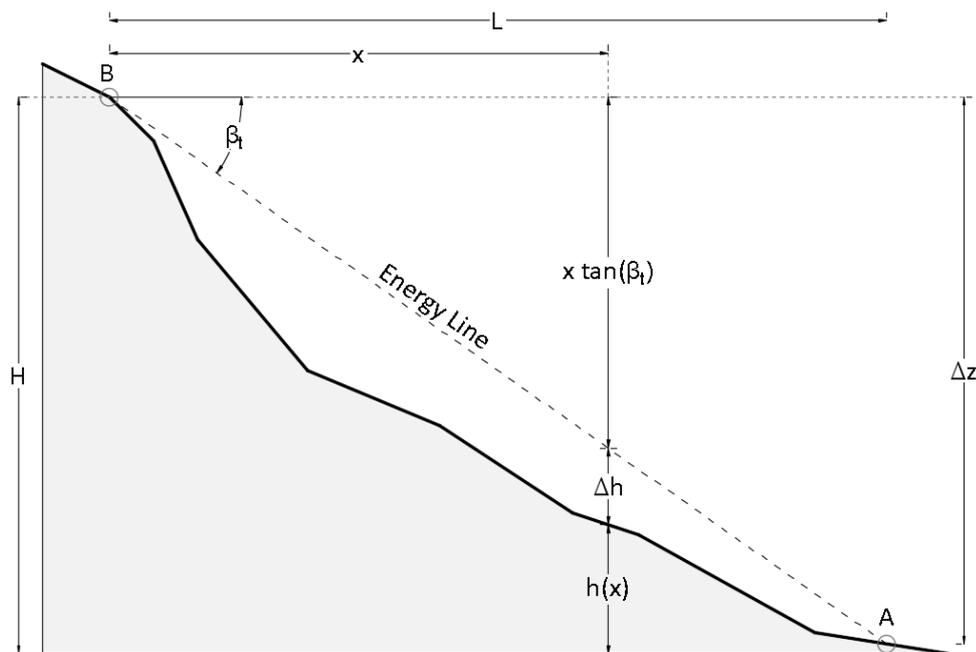


Fig. 2.4 – Rappresentazione dei parametri caratterizzanti il Cone Method. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco. (modificato da Jaboyedoff e Labiouse, 2011).

Secondo quanto appena enunciato, in una rappresentazione bidimensionale, la massima distanza coperta da un crollo in roccia può essere stimata, tramite il *Cone Method*, attraverso l'intersezione dell'*energy line* con il profilo topografico del versante oggetto di studio.

In una rappresentazione tridimensionale (fig. 2.5), invece, il *Cone Method* individua la zona di invasione attraverso il disegno di un cono immaginario, con vertice nel punto di distacco, identificato da due differenti angoli: i) il *Cone Angle* φ_p , ovvero l'angolo di inclinazione dell'*energy line* rispetto all'orizzontale (che coincide con il *Travel Angle*) e ii) l'angolo di dispersione laterale α , definito preliminarmente a seconda della topografia dell'area in esame. Esso viene assunto generalmente pari a $\pm 20^\circ$ (Jaboyedoff e Labiouse, 2011) e rappresenta l'ampiezza del cono immaginario.

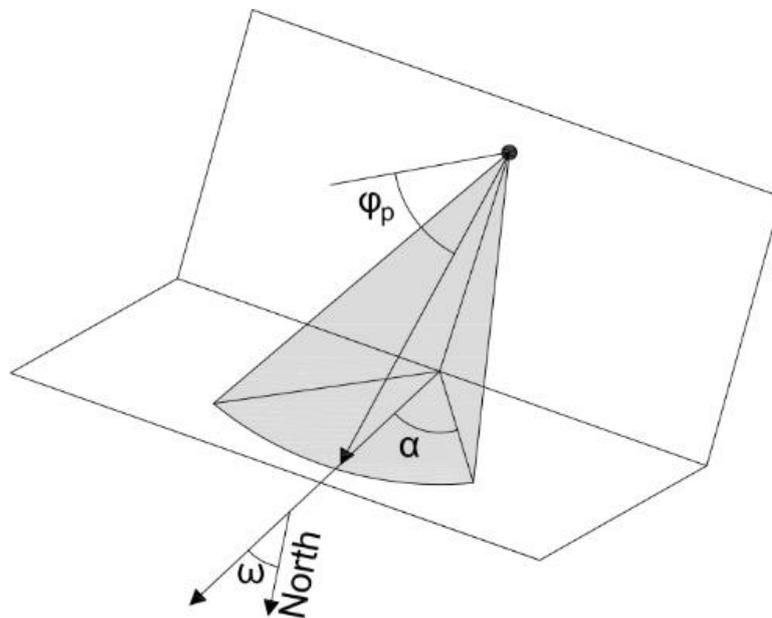


Fig. 2.5 – Rappresentazione grafica tridimensionale della zona di invasione identificata utilizzando il *Cone Method*. φ_p - *Cone Angle*; α - *Angolo di dispersione laterale*; ω - *Direzione del cono*; (modificato da Jaboyedoff, 2003b).

Il passaggio da un'analisi di tipo bidimensionale ad una di tipo tridimensionale è però solo possibile relazionando le metodologie qui discusse con un modello digitale del terreno (DTM), spesso implementato su di un ambiente GIS, che fornisce un quadro più o meno dettagliato delle caratteristiche topografiche del versante oggetto di studio. In riferimento al *Cone Method*, l'utilizzo di un Digital Terrain Model ha permesso il passaggio da un'analisi bidimensionale ad una tridimensionale e allo sviluppo di software quali CONEFALL (Jaboyedoff, 2003b) e QPROTO (Castelli et al., 2018).

In particolare, sia CONEFALL che QPROTO sono stati sviluppati al fine di fornire, oltre ad una rapida stima della zona colpita da un fenomeno di caduta massi, anche informazioni inerenti la velocità e l'energia cinetica media che caratterizzano un blocco in movimento sul versante. Al fine di valutare correttamente tali parametri, CONEFALL combina la teoria alla base del *Cone Method* con un modello digitale di terreno che viene generato dal software stesso all'interno di un ambiente proprio.

QPROTO, invece, stima la massima distanza coperta da un crollo in roccia e la velocità e l'energia cinetica ad esso associate relazionando le procedure caratteristiche del *Cone Method* con il software QGIS, sfruttando la *funzione di visibilità* di GRASS (utilizzabile all'interno di QGIS) che permette automaticamente di identificare, a partire da ogni eventuale cella sorgente, tutti i punti della superficie raster, visibili da essa.

Infine, QPROTO associa a tutti i punti o superfici omogenee all'interno delle aree di distacco un valore (*indice di propensione al distacco, I_D*) che permette di differenziare le celle all'interno di tali zone sulla base della loro predisposizione ad essere caratterizzate da un futuro distacco. L'indice, espresso in termini di incidenza, può essere individuato, con differenti livelli di dettaglio, in funzione delle informazioni disponibili sull'area oggetto di studio (come ad esempio: dati storici, mappe che contengono informazioni della densità di fratture, forti variazioni di pendenza) o attraverso indagini speditive sul versante in esame. Come risultato finale, QPROTO fornirà: i) una mappa di frequenza (*susceptibility map*), che definisce la distribuzione del crollo all'interno della zona di invasione (evidenziando le aree maggiormente colpite in termini di probabilità di manifestazione) e ii) due relative mappe raster che contengono le informazioni riguardanti l'energia cinetica caratteristica di ciascuna cella all'interno dell'area di invasione e la propensione al distacco di un blocco in ogni cella sorgente.

Naturalmente, l'utilizzo dello *Shadow Angle Method* piuttosto che del *Cone Method* è a completa discrezione del professionista che si occupa dell'analisi preliminare della zona interessata, anche se si ritiene necessario identificare i casi in cui sia meglio l'applicazione della prima procedura piuttosto che della seconda e viceversa.

Nella circostanza in cui sia ragionevole che gran parte dell'energia cinetica, acquisita dal masso in movimento durante la fase di caduta libera, sia dissipata nell'istante del primo impatto in un punto vicino all'apice del pendio, lo *Shadow Angle Method* risulta essere la metodologia che fornisce risultati più simili a quelli reali. Questo è il caso di versanti molto ripidi o di aree di distacco di grande estensione, dove risulta difficile la determinazione dei punti di distacco.

Contrariamente, su versanti che presentano inclinazioni discretamente omogenee dove le aree di distacco sono puntualmente individuate, è consigliato l'impiego del *Cone Method* poiché fornisce risultati più attendibili rispetto all'altra metodologia approfondita.

È interessante sottolineare che il software QPROTO è in grado di utilizzare sia lo *Shadow Angle Method* che il *Cone Method*, calibrando opportunamente i "punti vertice" del cono virtuale e gli angoli che caratterizzano i coni da generare. Questo aspetto è di rilevante importanza in quanto, a seconda della conformazione geometrica del versante oggetto di studio e delle informazioni che si posseggono sull'area di distacco che lo contraddistingue, si può procedere secondo il metodo che risulta essere il più conveniente rispetto alla circostanza in cui si opera.

Per l'utilizzo di queste metodologie di indagine speditiva è, però, necessario definire a priori gli angoli che permettono di disegnare il cono virtuale che servirà per identificare la massima zona di invasione colpita da un fenomeno di caduta massi.

In particolare, scopo dei successivi capitoli sarà quello di identificare una procedura utile per stimare in modo speditivo il *Cone Angle*, attraverso semplici considerazioni sulla geometria del versante e su eventuali altri parametri di rapida valutazione.

CAPITOLO 3 - STUDI EFFETTUATI SULLA VAL GERMANASCA (TO)

Scopo di questo capitolo è quello di individuare una o più correlazioni caratteristiche che permettano di relazionare la geometria di un versante soggetto a crolli con l'inclinazione dell'*Energy Line (Geometric Angle)* al fine di stimare la zona di invasione del fenomeno di caduta massi tramite il *Cone Method*, con riferimento al codice QPROTO.

Innanzitutto, sono state valutate alcune delle più importanti correlazioni discusse nel capitolo 2. In particolare, si è deciso di confrontare tra di loro i tre modelli ipotizzati da Keylock e Domaas (1999) tramite l'applicazione degli stessi a 22 casi di crollo realmente accaduti in Val Germanasca (TO) e catalogati nella banca dati SIFraP (Sistema Informativo Frane Piemonte) di ARPA Piemonte, che raccoglie ed organizza i dati provenienti dal progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia), di cui risulta essere un'estensione tutt'ora costantemente aggiornata,

http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalserver_arpa/catalog/search/resource/details.page?uuid=ARLPA_TO%3A07.04.02-D_2011-03-24-11%3A43&title=Arpa%20Piemonte%20-%20SIFraP%20-%20Sistema%20Informativo%20Ofrane%20in%20Piemonte.

3.1 - INQUADRAMENTO DEL SITO DI INDAGINE

La Val Germanasca è una diramazione della Val Chisone sita a circa 40 Km ad Ovest da Torino, delimitata a nord dalla Val di Susa e dalla Val Sangone, ad ovest dalla Val di Susa, a sud dalla Val Pellice e ad est dalla pianura padana (fig. 3.1). Essa include i comuni di Pomaretto, Perrero, Salza di Pinerolo, Massello e Prali ed è inserita all'interno della catena montuosa della Alpi Cozie vantando il Gran Queyron (3060 metri) come cima più alta.

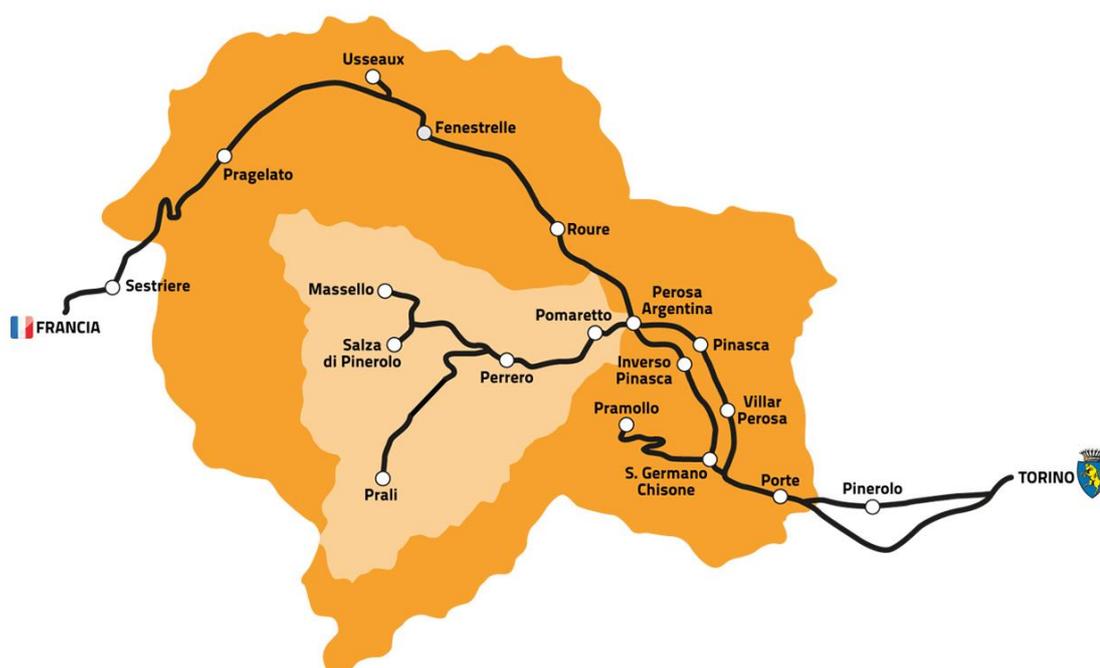


Fig. 3.1 – Ubicazione della Val Chisone (arancione scuro) e della Val Germanasca (arancione chiaro) rispetto alla città di Torino. (modificato da <http://www.ecomuseominiere.it/ecomuseo/progetto-ecomuseo-val-germanasca/>).

La valle è percorsa dal fiume Germanasca il cui bacino, contraddistinto da caratteristiche litostratigrafiche differenti a seconda della zona di esso considerata, si estende per circa 200 km². In particolare, da un punto di vista litologico, si individuano: rocce facenti parte dell'Unità Dora-Maira, metasedimenti carbonatico-pelitici e calcescisti con pietre verdi (Arpa Piemonte, 2008).

La Val Germanasca è, inoltre, contrassegnata dalla presenza di molteplici fenomeni franosi che la rendono un caso di studio molto appropriato per i fini che si vogliono raggiungere con questo elaborato.

3.2 - I FENOMENI DI CROLLO IN ROCCIA ANALIZZATI

La selezione e l'elaborazione dei dati riguardanti i 22 casi di crollo presenti nel dataset SIFraP è stata svolta a partire dal lavoro compiuto da Giulia Basile nella sua tesi di laurea specialistica (2017) dove sono state identificate differenti fasi utili alla definizione della geometria dei profili caratterizzanti ciascun crollo.

Innanzitutto, le informazioni inerenti alla zona in esame sono state determinate da Basile tramite i seguenti documenti:

- Carta degli ambiti amministrativi comunali, indispensabile al fine di delimitare in modo accurato l'area interessata.
- Carta tecnica regionale (CTR).
- Ortofotografie di periodi differenti; ad esempio in figura 3.2 è riportata quella del 2010.
- DTM della Regione Piemonte con risoluzione a 5 metri, ricavato da riprese aeree condotte tra il 2009 e il 2011 (fig. 3.3).

Dal DTM è stato possibile ottenere, tramite l'elaborazione dello stesso sul software QGis, le mappe hillshade (rappresentazione tridimensionale in scala di grigi che permette di visualizzare qualitativamente la topografia della zona oggetto di studio, fig. 3.4), le carte delle pendenze e le curve di livello rappresentative dell'area in esame.

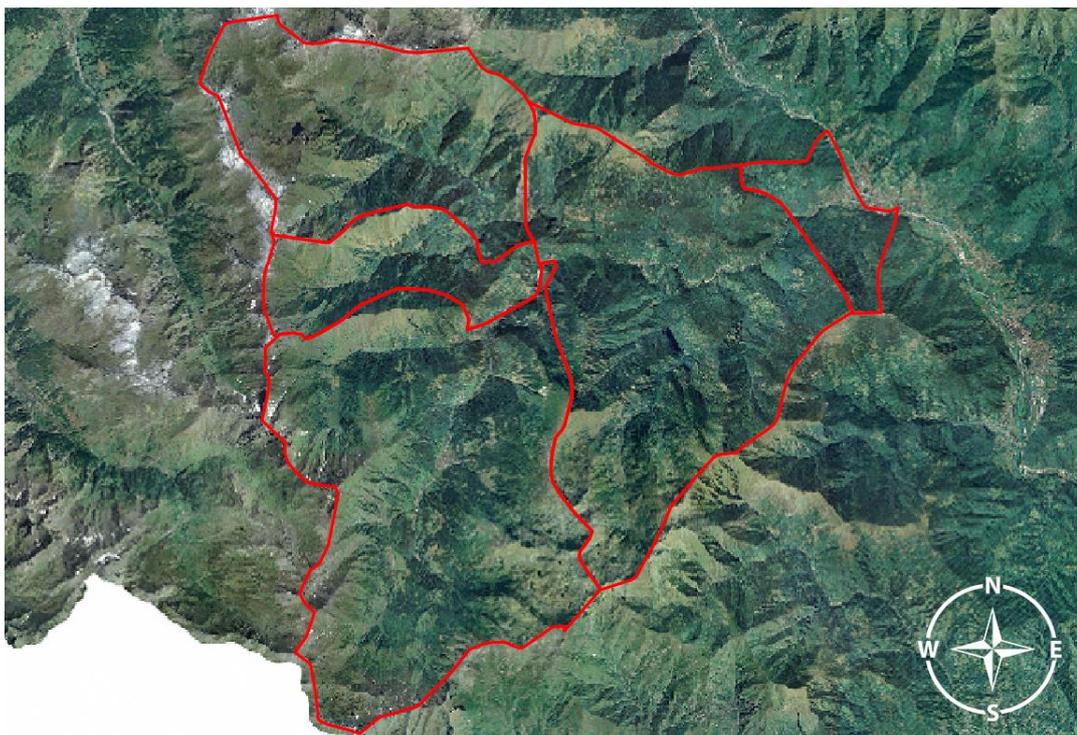


Fig. 3.2 – Ortofotografia della Val Germanasca (Geoportale Piemonte, 2010).

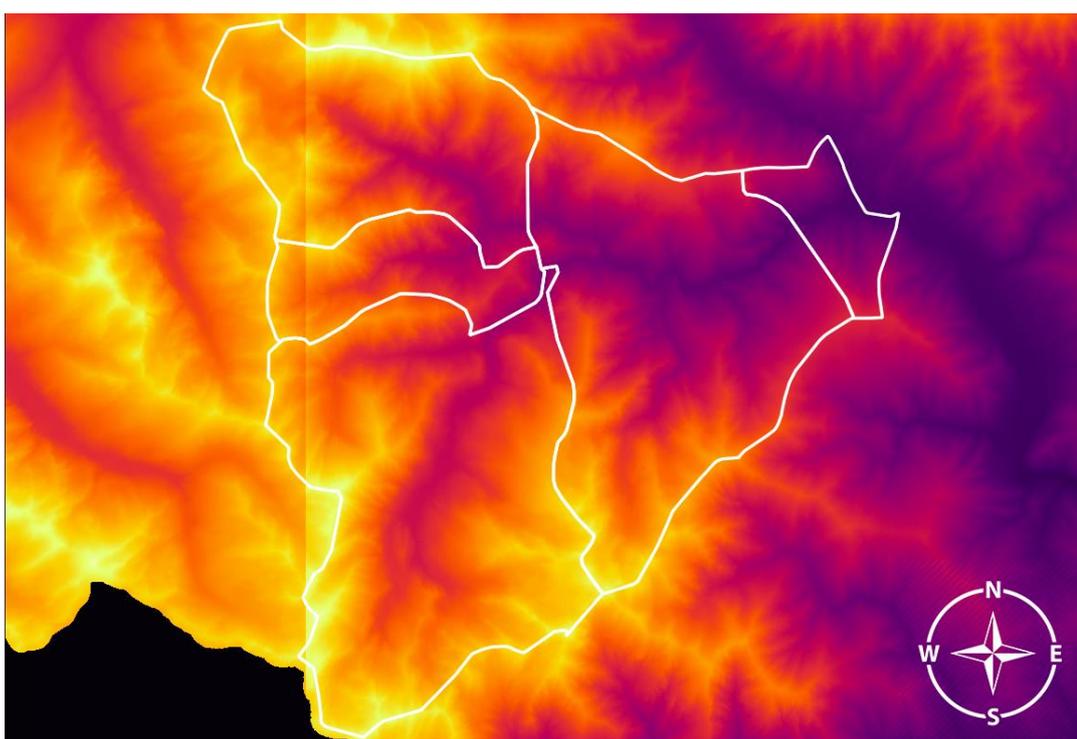


Fig. 3.3 – DTM della Val Germanasca. I colori più scuri evidenziano quote minori mentre i colori più chiari evidenziano quote maggiori.

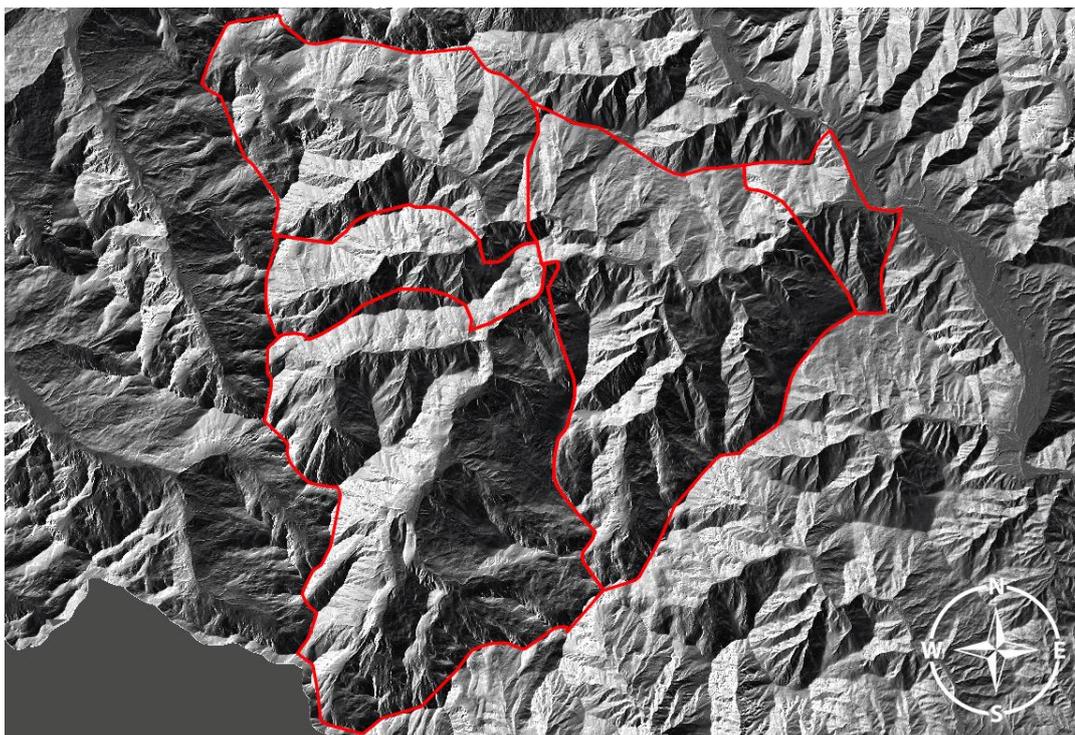


Fig. 3.4 – Mappa hillshade della Val Germanasca.

Successivamente, i documenti soprariportati sono stati correlati con i dati contenuti all'interno della banca dati SIFraP di Arpa Piemonte. Essa cataloga, in maniera sufficientemente dettagliata per lo scopo per il quale questo elaborato è stato pensato, gli eventi franosi che hanno colpito la regione in esame nel tempo.

Nel dettaglio, i fenomeni franosi catalogati sono suddivisi in:

- *Frane puntuali*: avvenimenti calamitosi di estensione ridotta rispetto alla scala di riferimento; vengono rappresentati graficamente come punti.
- *Frane lineari*: avvenimenti calamitosi di lunghezza apprezzabile e cartografabile e larghezza ridotta rispetto alla scala di riferimento; vengono disegnati come segmenti.
- *Frane poligonali*: avvenimenti calamitosi cartografabili alla scala di rilevamento, raffigurati tramite superfici di area variabile a seconda dell'estensione della zona di invasione interessata.

Dal punto di vista della tipologia del fenomeno, durante la sua evoluzione storica, la Val Germanasca è risultata essere soggetta prevalentemente a frane poligonali quali principalmente deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) e crolli/ribaltamenti (diffusi e non). Risultano, comunque, frequenti all'interno della regione in esame anche colamenti, scivolamenti rotazionali/traslativi, e, infine, fenomeni gravitativi complessi, ovvero non identificabili nelle categorie precedenti.

Per le analisi che si vogliono svolgere all'interno di questa trattazione, è stata considerata unicamente la macrocategoria delle frane areali e, in particolare, il sottogruppo dei *crolli e/o ribaltamenti*. È importante tenere presente che ogni crollo è rappresentato graficamente da un poligono la cui superficie coincide con l'area colpita dall'evento franoso.

In figura 3.5 viene mostrata l'ubicazione geografica dei 22 poligoni identificati che verranno di seguito descritti nel dettaglio sulla base delle informazioni presenti all'interno del dataset SIFraP.

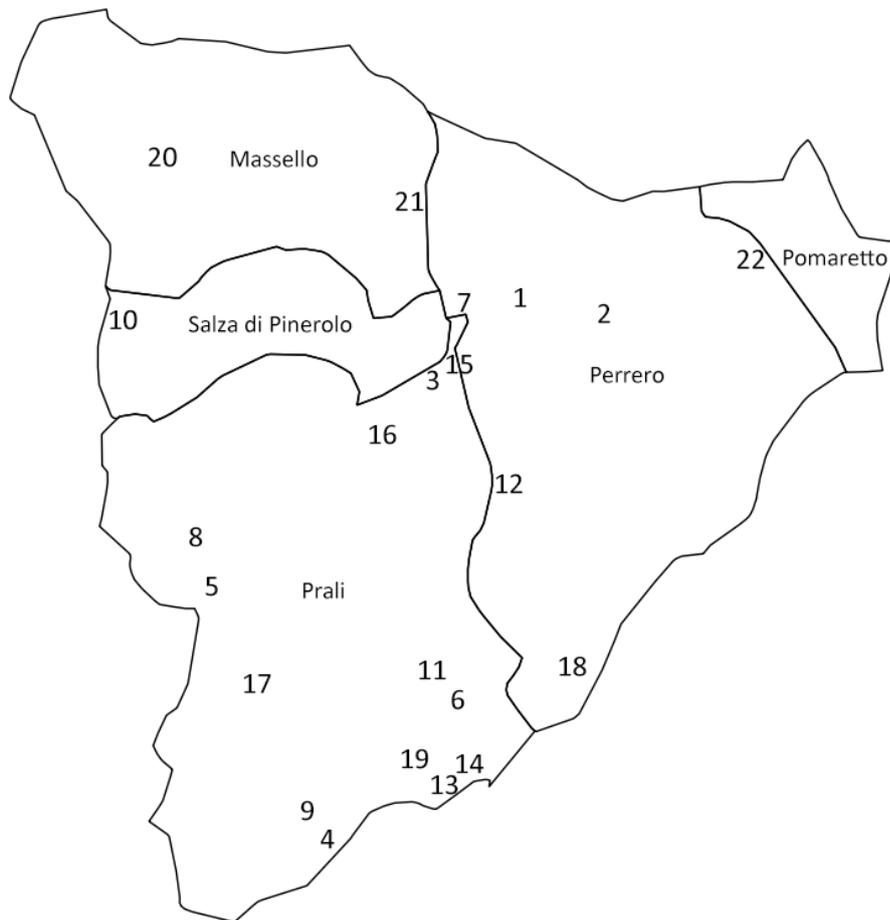


Fig. 3.5 – Inquadramento dei 22 crolli, oggetto di analisi, all'interno dei territori comunali in Val Germanasca.

Poligono 1 – Codice: 001-76464-00



Fig. 3.6 – Proiezione orizzontale del poligono 1 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 4 300 m² circa.

Data di osservazione: 2011.

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 750 e i 1250 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ad alto fusto (querceto misto a castagneto) omogeneamente distribuito lungo il versante. Il poligono intercetta una strada che è stata parzialmente investita dal crollo.

Poligono 2 – Codice: 001-76465-00



Fig. 3.7 – Proiezione orizzontale del poligono 2 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 3 080 m² circa.

Data di osservazione: 2011.

Il poligono è situato ad una quota inferiore ai 1000 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ceduo (castagneto) omogeneamente distribuito lungo il versante.

Il poligono intercetta una strada che è stata parzialmente investita dal crollo.

Poligono 3 – Codice: 001-76592-00



Fig. 3.8 – Proiezione orizzontale del poligono 3 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 470 m² circa.

Data di osservazione: 2011.

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 1000 e i 1500 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ad alto fusto (lariceto) omogeneamente distribuito lungo il versante.

Poligono 4 – Codice: 001-00012-00



Fig. 3.9 – Proiezione orizzontale del poligono 4 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 20 370 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione).

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri.

Il suolo è rivestito da un bosco omogeneamente distribuito lungo il versante.

Poligono 5 – Codice: 001-00050-00

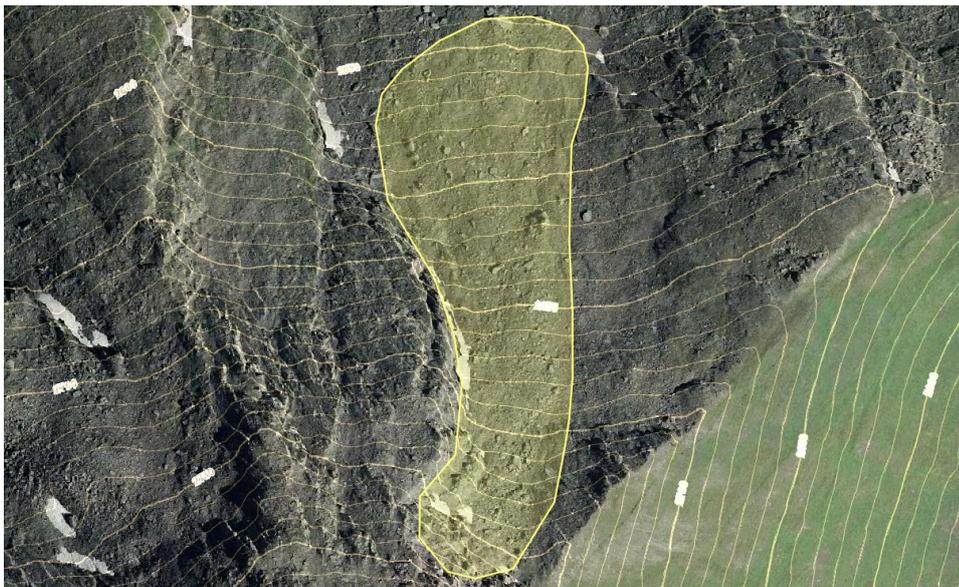


Fig. 3.10 – Proiezione orizzontale del poligono 5 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 30 250 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Il suolo è rivestito prevalentemente da roccia nuda.

Poligono 6 – Codice: 001-00046-00

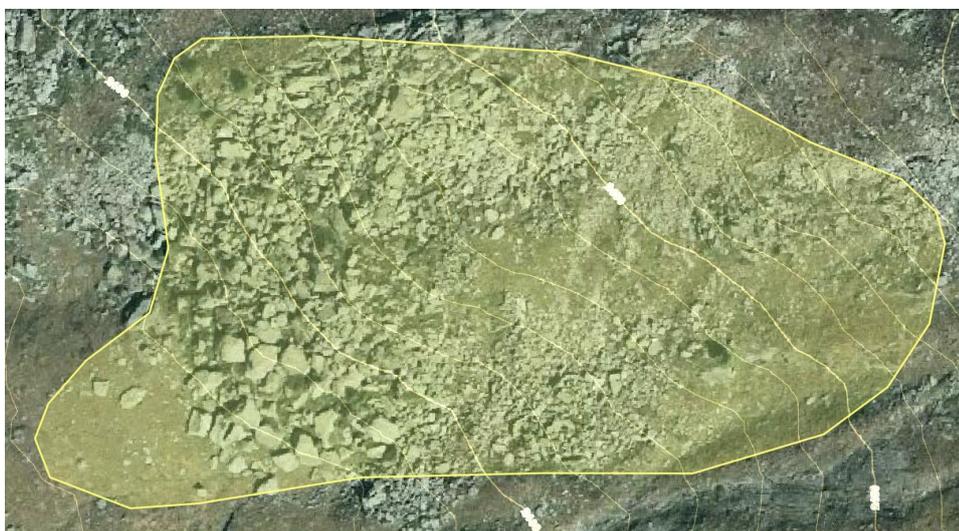


Fig. 3.11 – Proiezione orizzontale del poligono 6 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 24 200 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 7 – Codice: 001-00120-02



Fig. 3.12 – Proiezione orizzontale del poligono 7 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 7 300 m² circa.

Data di osservazione: 2001.

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 750 e i 1250 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ceduo presentante un'alternanza di vegetazione ad alto e basso fusto.

Il poligono intercetta una strada che è stata parzialmente investita dal crollo.

Poligono 8 – Codice: 001-02857-00

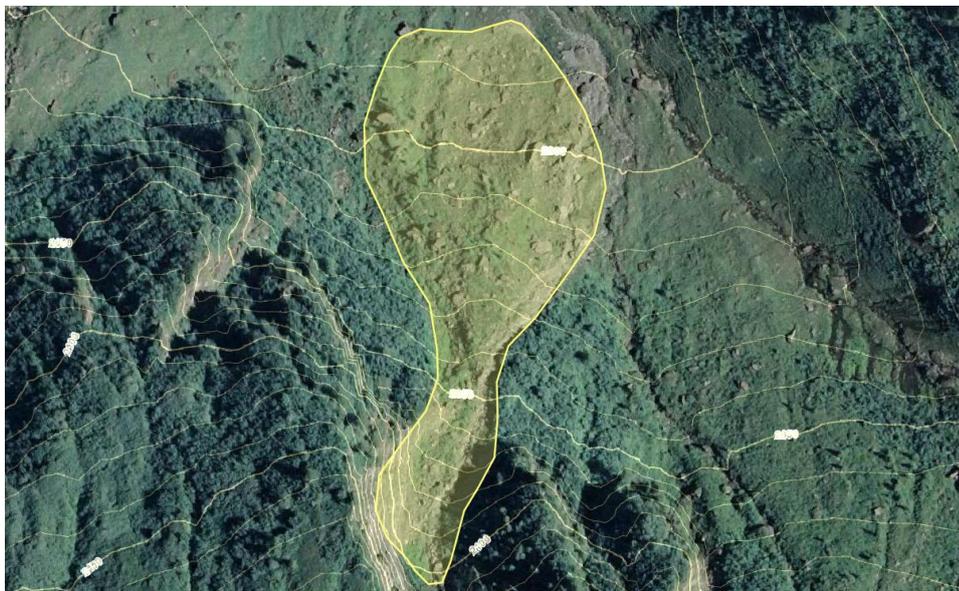


Fig. 3.13 – Proiezione orizzontale del poligono 8 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 14 000 m² circa.

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Il suolo presenta una densità di vegetazione medio-bassa.

Poligono 9 – Codice: 001-00014-00



Fig. 3.14 – Proiezione orizzontale del poligono 9 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 15 200 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Il suolo è risultato essere rivestito da vegetazione rada.

Poligono 10 – Codice: 001-75516-00

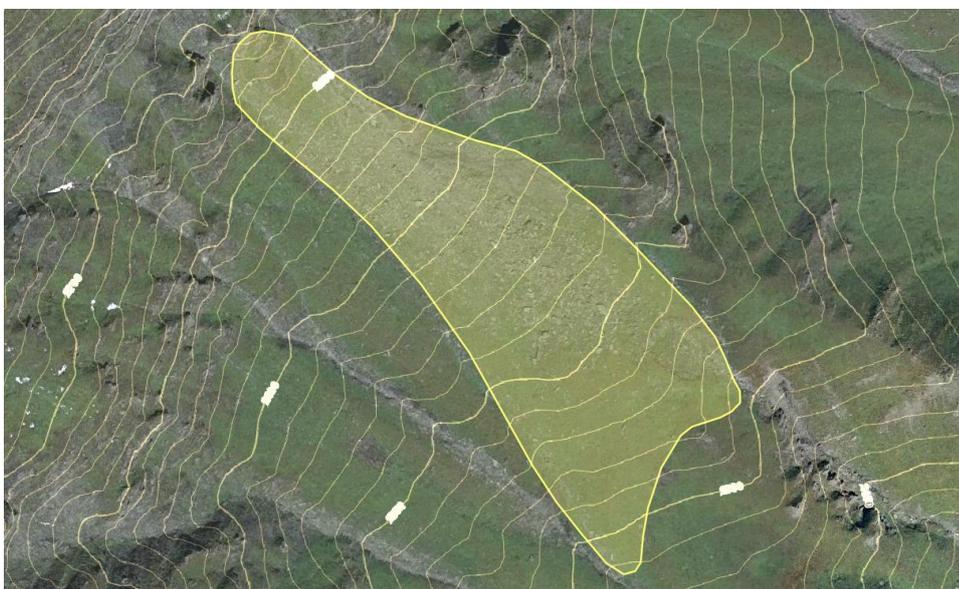


Fig. 3.15 – Proiezione orizzontale del poligono 10 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Salza di Pinerolo.

Superficie interessata: 20 700 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 11 – Codice: 001-00045-00

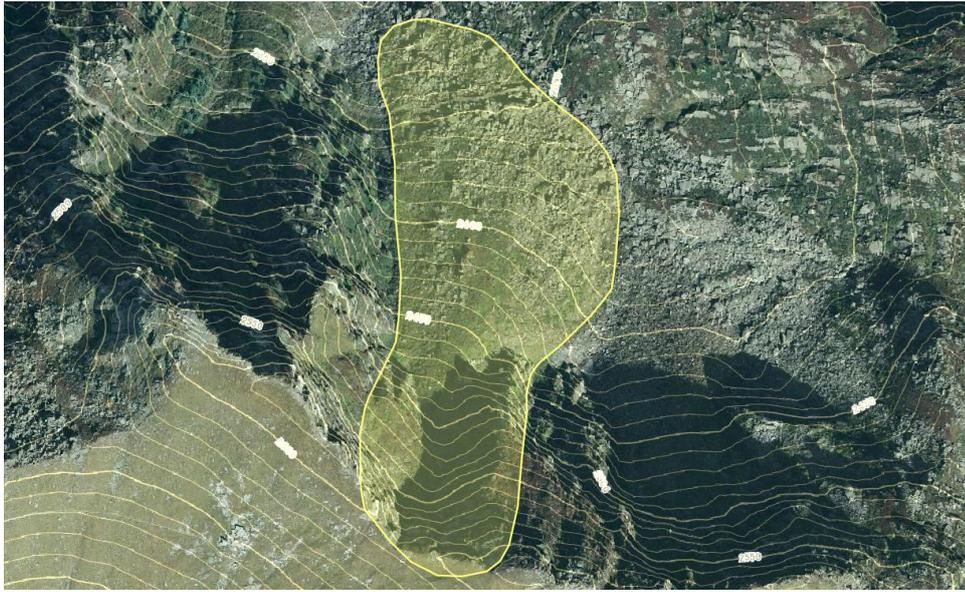


Fig. 3.16 – Proiezione orizzontale del poligono 11 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 45 800 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 12 – Codice: 001-00110-00

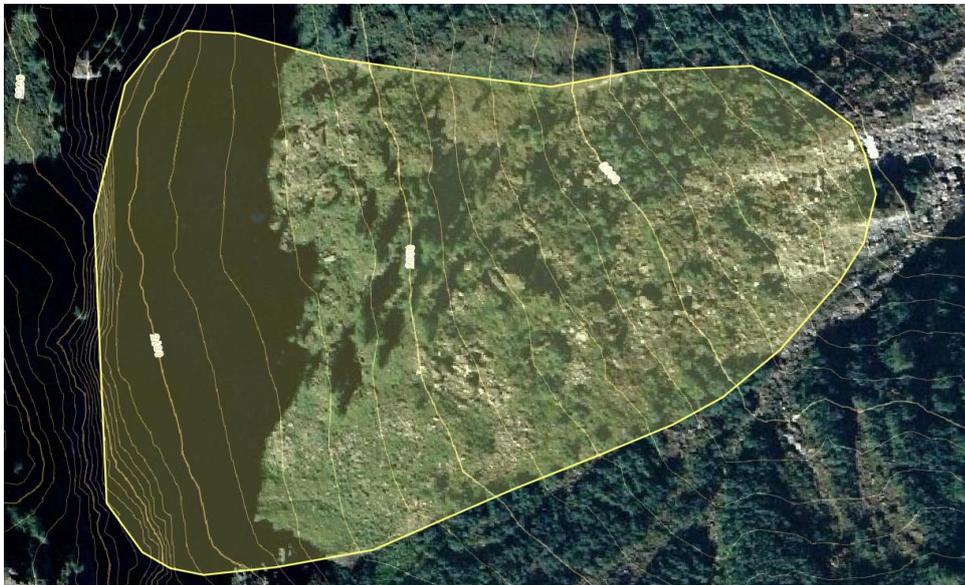


Fig. 3.17 – Proiezione orizzontale del poligono 12 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 26 400 m² circa.

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Il suolo, con densità di vegetazione medio-bassa, è rivestito da cespuglieti, disposti uniformemente nella zona di transito e di arresto.

Poligono 13 – Codice: 001-00042-00

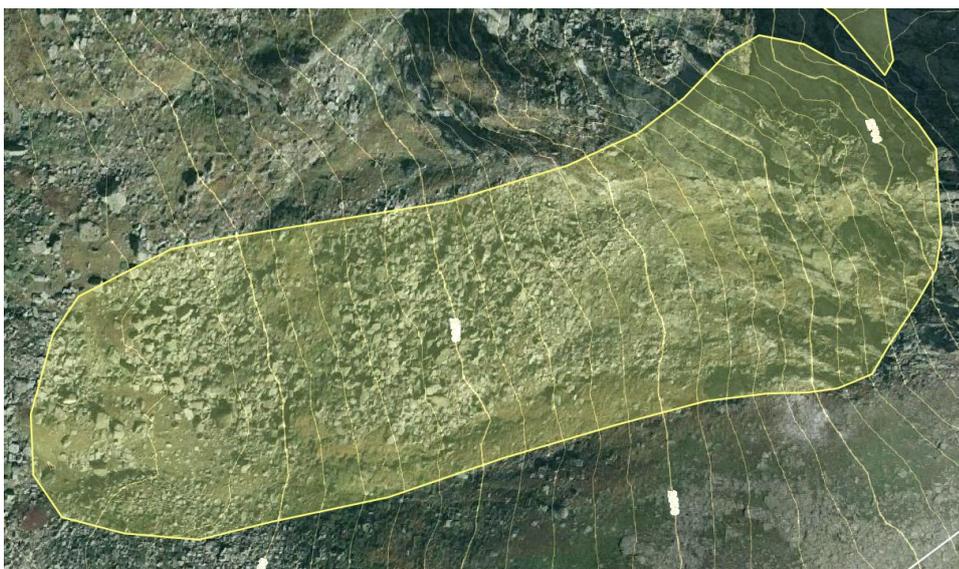


Fig. 3.18 – Proiezione orizzontale del poligono 13 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 42 800 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 14 – Codice: 001-00044-00

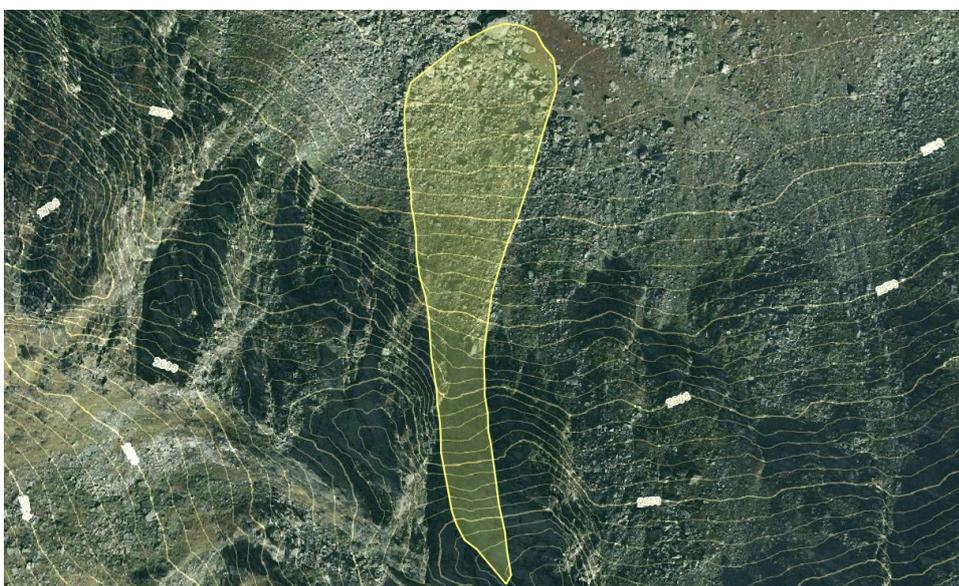


Fig. 3.19 – Proiezione orizzontale del poligono 14 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 20 800 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 15 – Codice: 001-75650-00

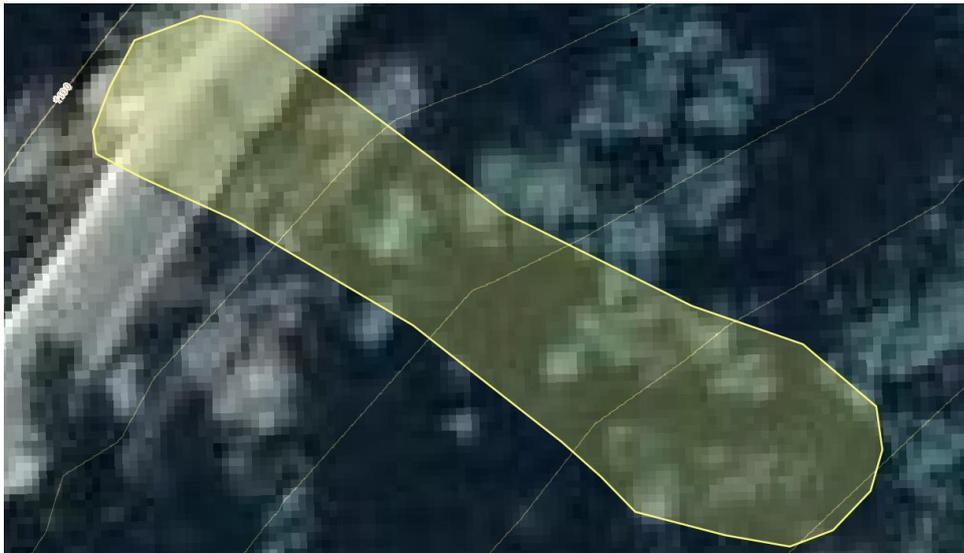


Fig. 3.20 – Proiezione orizzontale del poligono 15 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 400 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 1000 e i 1500 metri. Il suolo è prevalentemente vegetato e rivestito da un bosco ad alto fusto (lariceto).

Il poligono intercetta una strada che è stata parzialmente investita dal crollo.

Poligono 16 – Codice: 001-02897-00



Fig. 3.21 – Proiezione orizzontale del poligono 16 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 16 000 m² circa.

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 1000 e i 1500 metri. Il suolo, che presenta una densità di vegetazione medio-alta, è rivestito da un bosco ad alto fusto.

Il poligono intercetta una strada che è stata parzialmente investita dal crollo.

Poligono 17 – Codice: 001-00017-00



Fig. 3.22 – Proiezione orizzontale del poligono 17 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 29 500 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 1500 e i 2000 metri. Il suolo è rivestito da una vegetazione non omogeneamente distribuita. Si possono, infatti, distinguere dei lariceti nella parte alta della zona di transito e una vegetazione rada nella parte bassa.

Il poligono intercetta una strada ed un piccolo gruppo di edifici verso valle.

Poligono 18 – Codice: 001-02872-00

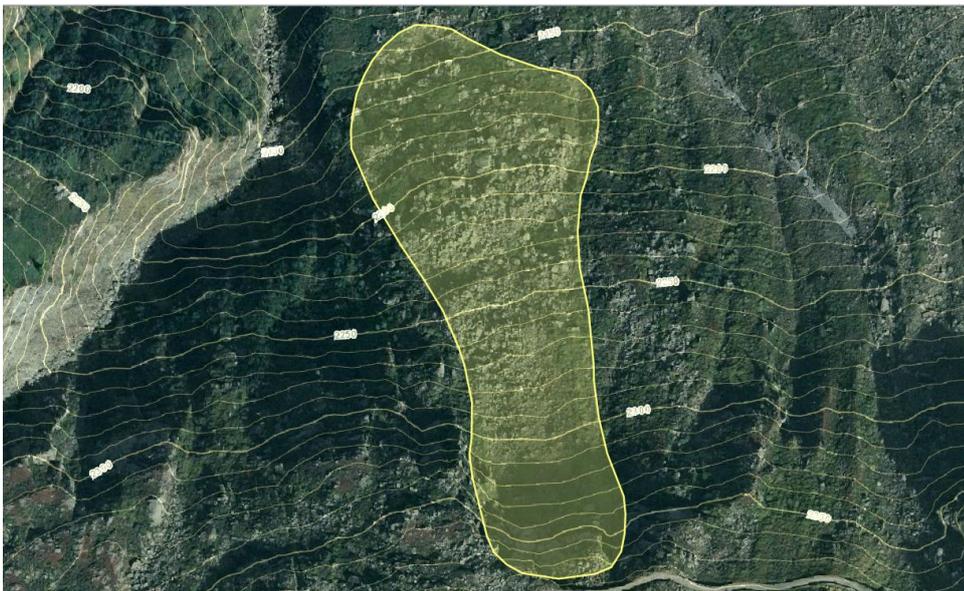


Fig. 3.23 – Proiezione orizzontale del poligono 18 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 29 000 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 19 – Codice: 001-00043-00

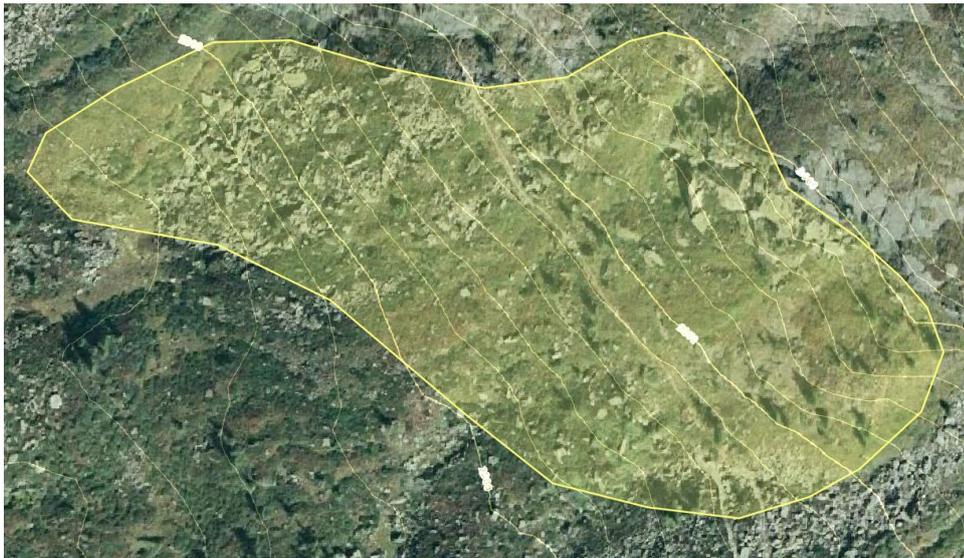


Fig. 3.24 – Proiezione orizzontale del poligono 19 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Prali.

Superficie interessata: 28 800 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 20 – Codice: 001-00101-00



Fig. 3.25 – Proiezione orizzontale del poligono 20 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Massello.

Superficie interessata: 29 600 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota maggiore di 2000 metri. Sul pendio non è presente vegetazione ad alto fusto.

Poligono 21 – Codice: 001-00076-00



Fig. 3.26 – Proiezione orizzontale del poligono 21 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Massello.

Superficie interessata: 11 200 m² circa.

Il poligono è situato ad una quota compresa tra i 1500 e i 2000 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ad alto fusto omogeneamente distribuito anche se risulta chiaro che l'evento franoso abbia contribuito ad una drastica riduzione della densità di vegetazione.

Poligono 22 – Codice: 001-75643-00



Fig. 3.27 – Proiezione orizzontale del poligono 22 sull'ortofotografia (2010) fornita dalla Regione Piemonte.

Comune: Perrero.

Superficie interessata: 1 200 m² circa.

Data di osservazione: n.d. (probabilmente osservato da fotointerpretazione)

Il poligono è situato ad una quota inferiore ai 1000 metri. Il suolo è rivestito da un bosco ad alto fusto (castagneto) omogeneamente distribuito lungo il versante.

È importante notare che solo un piccolo gruppo di questi poligoni ritrae l'effettiva area di invasione del crollo in roccia che ha colpito quella determinata regione. Infatti, all'interno del catalogo SIFraP, sono presenti le schede informative e i verbali riportanti le generalità (data dell'evento e volumetrie di distacco), l'inquadramento geologico (struttura, litotecnica, grado di degradazione dell'area di distacco, assetto delle discontinuità, litologia, esposizione del versante, uso del suolo, idrogeologia e classificazioni da un punto di vista fisico dell'evento franoso) e le cause del crollo dei soli poligoni 1, 2, 3, 7 e 15, ovvero gli unici ad essere stati individuati attraverso un rilevamento sul terreno. Per quanto riguarda le altre superfici trattate, esse sono state riconosciute e stimate tramite fotointerpretazioni condotte da geologi professionisti i quali non sono stati in grado, ovviamente, di risalire con precisione alla data della formazione dell'evento franoso piuttosto che alla definizione accurata del volume di distacco o dei confini che delimitano l'area colpita dall'avvenimento. Questo è il caso dei fenomeni calamitosi che si sviluppano in zone a rischio nullo (o quasi) dove, cioè, non c'è presenza di beni o persone che potrebbero essere lesi direttamente o indirettamente da questo tipo di episodio. È spesso impossibile, infatti, accorgersi del manifestarsi di un crollo in un terreno inabitato ed isolato se non dall'osservazione di foto aeree. Pur presentando un rischio nullo o quasi nullo, però, questi poligoni hanno un importante valore statistico poiché incrementano notevolmente il numero di campioni disponibili per studi o analisi e, per questo motivo, sono stati inclusi all'interno di questa tesi di laurea.

3.3 - DEFINIZIONE DI PROFILI ALL'INTERNO DELLE AREE DI INVASIONE

Dopo aver delimitato i poligoni, sono stati realizzati su di essi una serie di profili significativi (graficamente rappresentati da spezzate), utili per definire le sezioni necessarie al fine di esplicitare tutti i parametri geometrici caratterizzanti ogni singola regione colpita da un crollo. In particolare, su ogni poligono sono stati tracciati 3 profili, denominati 0, 1 e 2, coincidenti con le linee di massima pendenza. Infatti, dopo aver interpolato la carta delle pendenze derivante dal DTM con le curve di livello della zona in esame, sono state disegnate le spezzate perpendicolarmente a queste ultime, seguendo i cosiddetti *water flow paths*, ovvero i percorsi di massima pendenza che seguirebbe un ipotetico corso d'acqua, in discesa lungo il versante, con origine nella cella sorgente del crollo.

Il punto di inizio di ogni profilo è stato individuato sul perimetro del poligono corrispondente, all'interno della regione con quota maggiore.

Una volta tracciate tutte e 66 le spezzate, esse sono state "popolate" con una serie di punti equidistanti tra loro (chiamati di seguito *punti cardine*), con passo pari a 5,5 metri con lo scopo di avere, per ogni singola cella, uno ed un solo punto cardine (fig.3.28). Si consideri infatti il DTM, esso è composto da celle quadrate di lato pari a 5 metri; ogni punto, all'interno di una cella, è caratterizzato dalla stessa quota, quella del baricentro della cella stessa. È quindi evidente che, nel caso in cui due punti cardine consecutivi appartenenti allo stesso

profilo si trovino all'interno della stessa cella, ad essi sarebbe assegnata la medesima quota e ciò porterebbe a chiari errori nella definizione delle pendenze dei vari tratti identificati.

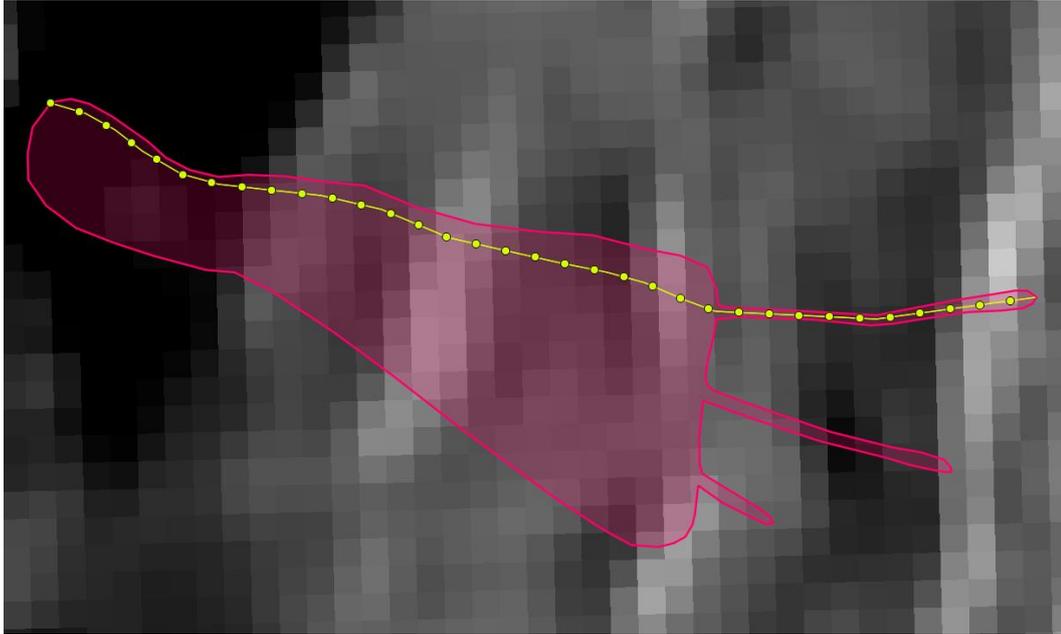


Fig. 3.28 – Inserimento dei punti cardine, con passo pari a 5,5 metri, sulla spezzata che identifica il profilo 0 del poligono 1.

Dopo aver identificato i punti cardine di ogni profilo, ad ognuno di essi è stata associata la quota di riferimento della cella da esso occupata, ricavata dal DTM, e la distanza (d) dal primo punto cardine del profilo stesso. È stato quindi possibile esportare su un foglio Excel queste coordinate che, in seguito all'applicazione di semplici relazioni trigonometriche, hanno portato alla definizione grafica di ogni sezione e alla conseguente determinazione della lunghezza e dell'inclinazione di tutti i tratti caratteristici del profilo (si veda per esempio la tab. 3.1).

In particolare, la lunghezza di ogni tratto è stata calcolata tramite la seguente formula:

$$l(a, b) = \sqrt{(d_b - d_a)^2 + (q_b - q_a)^2}$$

mentre l'inclinazione:

$$i(a, b) = \arctan\left(\frac{q_b - q_a}{d_b - d_a}\right)$$

dove,

- d_a rappresenta la distanza del *punto cardine a* dal *primo punto cardine*.
- d_b rappresenta la distanza del *punto cardine b* (consecutivo al *punto cardine a*) dal *primo punto cardine*.
- q_a rappresenta la quota del *punto cardine a* rispetto al livello del mare.
- q_b rappresenta la quota del *punto cardine b* rispetto al livello del mare.

Successivamente, proprio a partire dalla pendenza dei tratti caratteristici, si sono identificate le zone di distacco, di transito e di arresto di ogni sezione (fig. 3.29). Nel dettaglio:

- *Zona di distacco*: area del profilo con un'inclinazione maggiore di 40°. Alcuni autori (per esempio: Jaboyedoff e Labiouse, 2011) hanno proposto di utilizzare

come pendenza limite 45° ma, utilizzando questo valore, numerosi profili sarebbero stati esclusi dall'analisi.

- *Zona di transito*: area del profilo con un'inclinazione inferiore a 40° che si estende fino al *piede del pendio* dove avviene un evidente cambio di inclinazione, spesso visibilmente evidente.
- *Zona di arresto*: area del profilo con una pendenza più lieve rispetto alla zona di transito che si estende a partire dal *piede del pendio*, fino al bordo inferiore del poligono considerato. Numerosi profili analizzati non presentano l'evidente cambio di pendenza utile per identificare la zona di arresto e, per questo motivo, sono stati ritenuti composti unicamente da una *zona di distacco* e una *zona di transito*.

È importante specificare che per la determinazione delle suddette zone è stato utilizzato un criterio arbitrario, in accordo con numerosi altri autori, e che nel dataset SIFraP non vi sono informazioni che permettano di distinguere tali aree.

Distanza in Pianta	Quota	Lunghezza del Tratto	Inclinazione del Tratto
[m]	[m]	[m]	[°]
0.00	1053.20	18.65	72.85
5.50	1035.39	12.92	64.80
11.00	1023.70	8.27	48.30
16.50	1017.52	11.24	60.71
22.00	1007.72	8.63	50.42
27.50	1001.07	11.05	60.15
33.00	991.48	7.65	44.03
38.50	986.16	7.10	39.25
44.00	981.67	6.68	34.58
49.50	977.88	6.85	36.55
55.00	973.80	7.26	40.71
60.50	969.07	7.03	38.49
66.00	964.70	7.19	40.13
71.50	960.06	5.91	21.35
77.00	957.91	5.95	22.46
82.50	955.64	6.41	30.86
88.00	952.35	10.67	58.99
93.50	943.20	7.03	38.53
99.00	938.82	7.74	44.71
104.50	933.38	7.03	38.55
110.00	928.99	5.86	20.12
115.50	926.98	6.17	26.87
121.00	924.19	6.79	35.89
126.50	920.21	6.77	35.71
132.00	916.26	6.40	30.70
137.50	912.99	7.05	38.68
143.00	908.59	7.58	43.52
148.50	903.37	7.67	44.15
154.00	898.03	7.17	39.87
159.50	893.43	12.15	63.09
165.00	882.60	5.95	22.47
170.50	880.32	5.53	5.47
176.00	879.80	5.72	16.09
181.5	878.21	-	-

Tab. 3.1 – Tabella esemplificativa che riassume i principali parametri geometrici che contraddistinguono il profilo 0 del poligono 1.

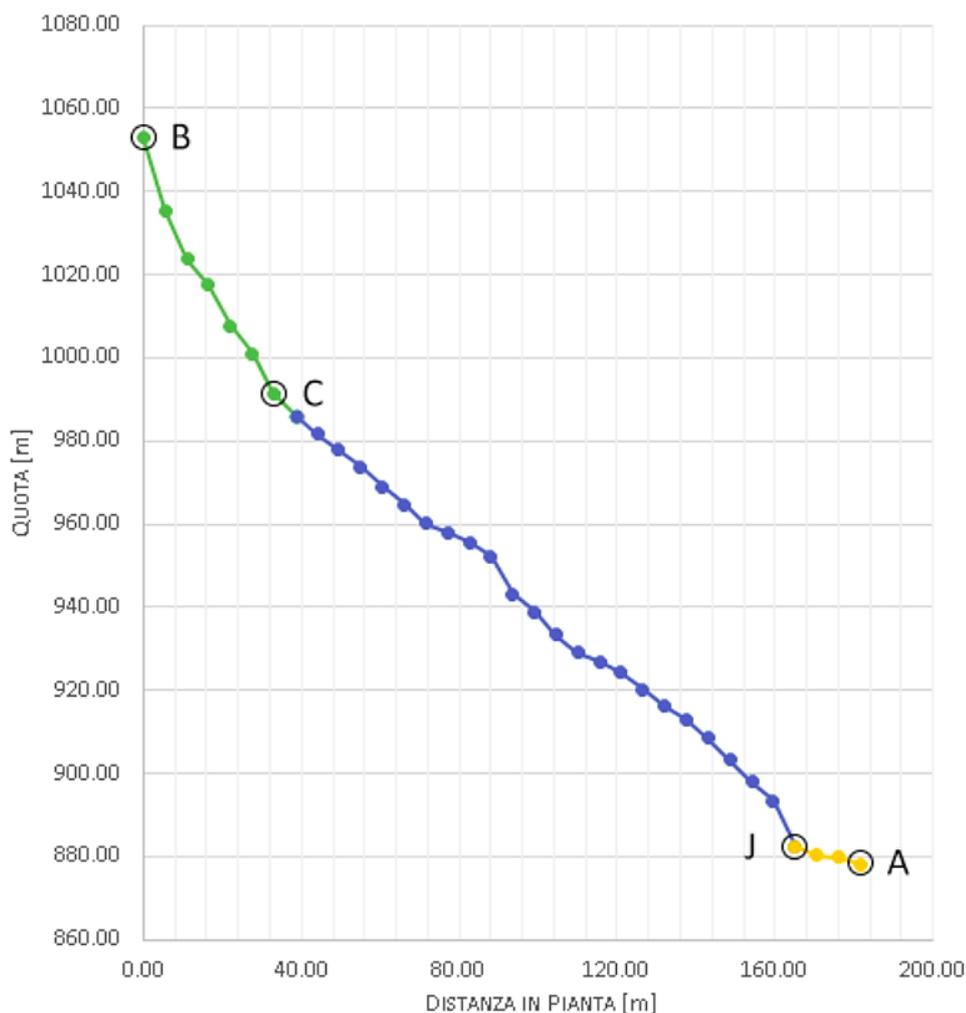


Fig. 3.29 – Esempificazione grafica del profilo 0 del poligono 1. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco; C - Apice del pendio; J - Piede del pendio; in verde (tratto BC) è raffigurata la zona di distacco, in blu (tratto CJ) la zona di transito, in giallo (tratto JA) la zona di arresto. Per la proiezione orizzontale del profilo si rimanda alla figura 3.28.

Il metodo adottato per distinguere le tre zone sopra descritte presenta, come facilmente intuibile, numerose incertezze determinate principalmente dalla risoluzione del DTM, che non permette di individuare con esattezza i punti di intersezione tra due zone differenti ma che, come citato in precedenza, assegna a tutti i punti all'interno di ogni cella la quota assunta dal baricentro della cella stessa. Inoltre, il riconoscimento delle zone (in particolare della zona di arresto) è spesso visivo e richiede una certa esperienza da parte dell'operatore. È quindi impossibile fornire una regola che semplifichi questo passaggio, anche perché se ci si basasse unicamente sullo studio delle pendenze dei vari tratti che compongono la sezione in esame si rischierebbe di incorrere in errori di stima anche grossolani. Infatti, come si può osservare dalla figura 3.29, esistono tratti all'interno della zona di transito con inclinazioni molto basse che, in caso si utilizzasse un software di riconoscimento implementato unicamente su questo parametro, sarebbero facilmente associabili alla zona di arresto invece che all'area di loro effettiva competenza.

D'altra parte, nonostante le incertezze appena evidenziate, il metodo proposto all'interno di questo paragrafo risulta comunque conservativo se destinato ai fini di un'analisi preliminare e, come sarà mostrato successivamente, le correlazioni caratterizzanti tengono conto di tutte le approssimazioni effettuate in tutti i vari passaggi del procedimento.

3.4 - ANALISI EFFETTUATE SUI PROFILI

Obiettivo di questo paragrafo sarà l'analisi dei profili identificati al paragrafo precedente e il loro confronto secondo le 3 differenti metodologie proposte da Keylock e Domaas (1999), descritte al capitolo 2.

In primo luogo, per ogni sezione dei 22 poligoni oggetto di studio, sono stati ricavati i seguenti parametri:

- Le dimensioni L_1 , L_2 e L_3 che rappresentano rispettivamente le proiezioni orizzontali delle lunghezze della *zona di arresto*, della *zona di transito* e della *zona di distacco*.
- Le grandezze H_1 , H_2 e H_3 che delineano rispettivamente le proiezioni verticali delle lunghezze della *zona di arresto*, della *zona di transito* e della *zona di distacco*.
- L'angolo α , che coincide con il *Geometric Angle*, ricavato attraverso la cotangente del rapporto tra la proiezione verticale e la proiezione orizzontale della retta che congiunge il punto di distacco con il punto di arresto.
- L'angolo β , cotangente del rapporto tra le distanze $(H_2 + H_3)$ e $(L_2 + L_3)$.
- L'angolo θ_1 , cotangente del rapporto tra H_1 e L_1 .

Al fine di rendere più chiaro quanto descritto, si rimanda alla figura 2.2 del capitolo 2, qui riportata per facilità di consultazione (fig. 3.30).

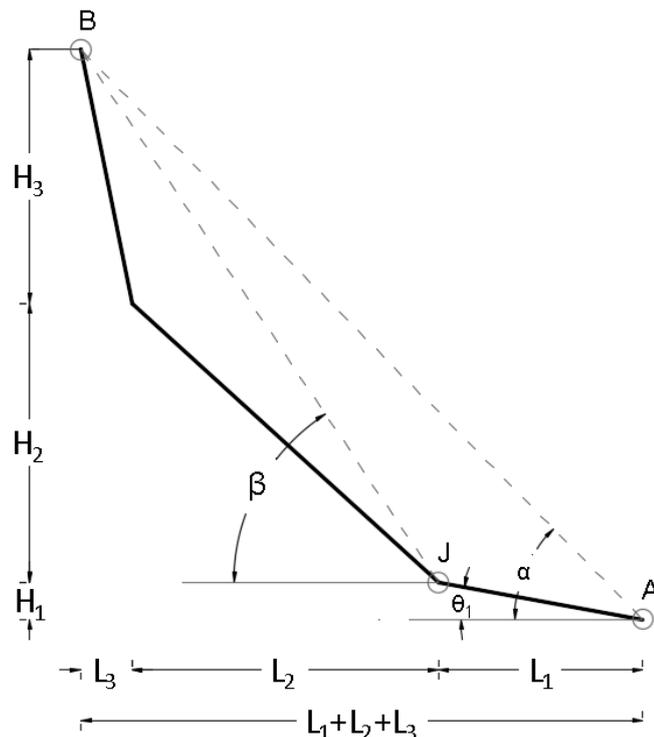


Fig. 3.30 – Illustrazione grafica dei parametri geometrici utilizzati nei metodi descritti da Keylock e Domaas. A - Punto di arresto; B - Punto di distacco; J - Base del pendio. (modificato da Keylock e Domaas, 1999).

In tabella 3.2 sono riportati i parametri geometrici caratteristici dei primi 3 poligoni in esame, mentre si rimanda all'appendice A per i dati degli altri 19 (tab. A.1a, tab. A.1b). Si è scelto di utilizzare a fini esemplificativi i primi tre poligoni in ordine numerico poiché essi rappresentano in maniera sufficientemente fedele l'intero campione di casi proposti. Essi sono caratterizzati, infatti, da geometrie differenti che permettono di osservare discordanze o similitudini apprezzabili a seconda della procedura d'analisi ad essi applicata.

È importante notare l'approssimazione legata alla discretizzazione del profilo, particolarmente evidente per la dimensione L_1 .

Poligono	Profilo	L_1 [m]	L_2 [m]	L_3 [m]	H_1 [m]	H_2 [m]	H_3 [m]	α [°]	β [°]	θ [°]
1	0	16.50	132.00	33.00	4.39	108.88	61.72	43.95	45.96	14.90
	1	0.00	143.00	33.00	0.00	111.65	62.29	44.66	44.66	-
	2	16.50	121.00	11.00	7.87	99.75	33.37	43.51	45.24	25.50
2	0	16.50	49.50	22.00	7.86	49.56	20.21	41.42	44.30	25.47
	1	16.50	33.00	38.50	5.43	29.29	41.46	40.88	44.70	18.23
	2	11.00	44.00	22.00	1.97	42.85	23.31	41.50	45.07	10.14
3	0	16.50	44.00	5.50	9.47	32.95	7.47	37.08	39.23	29.85
	1	22.00	38.50	5.50	12.20	32.67	7.47	38.42	42.37	29.00
	2	11.00	44.00	11.00	6.29	32.24	13.23	38.11	39.58	29.77

Tab. 3.2 – Tabella esemplificativa riportante i parametri geometrici calcolati per i primi 3 poligoni.

Saranno di seguito dedicati tre sottoparagrafi alla comparazione delle 3 differenti metodologie proposte da Keylock e Domaas (1999).

3.4.1 - HEIGHT FUNCTION MODEL

Per quanto riguarda l'*Height Function Model*, la correlazione ricavata da Keylock e Domaas nell'ambito dello studio di 121 crolli in roccia avvenuti in Norvegia e classificati dallo stesso Domaas è:

$$(\log(L_1))_* = 0.77 \cdot \log(H_2 + H_3). \quad (3.1)$$

In tabella 3.3 sono riportati i valori di $\log(L_1)$, ricavati tramite la scomposizione e lo studio geometrico delle sezioni dei poligoni 1, 2 e 3, e di $\log(L_1)_*$, derivanti dall'applicazione della correlazione (3.1). In appendice A saranno, poi, riportate tutte le dimensioni e i valori caratteristici degli altri 19 poligoni in esame (tab. A.2a, tab. A.2b).

Poligono	Profilo	H ₂ [m]	H ₃ [m]	Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante	Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1)
				log(L ₁)	log(L ₁)*
1	0	108.88	61.72	1.22	1.72
	1	111.65	62.29	-	1.73
	2	99.75	33.37	1.22	1.64
2	0	49.56	20.21	1.22	1.42
	1	29.29	41.46	1.22	1.42
	2	42.85	23.31	1.04	1.40
3	0	32.95	7.47	1.22	1.24
	1	32.67	7.47	1.34	1.23
	2	32.24	13.23	1.04	1.28

Tab. 3.3 – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1) ai primi 3 dei 22 poligoni in esame.

Come si può, ora, osservare dalla tabella 3.3, è evidente una notevole discrepanza tra i risultati derivanti da un'analisi geometrica del versante e quelli ricavati tramite l'applicazione della correlazione (3.1). Questi ultimi, inoltre, assumono spesso valori a sfavore di sicurezza in quanto sovrastimano la lunghezza della zona di arresto.

È, quindi, necessario definire un'altra correlazione lineare che risulti essere rappresentativa per i 22 poligoni oggetto di studio. In particolare, l'analisi dei dati ricavati dalle osservazioni geometriche sul versante (riportati in verde in tabella 3.3) ha portato alla definizione di una correlazione lineare che coincide con l'equazione della linea di tendenza ricavata correlando in scala logaritmica la lunghezza L_1 (proiezione orizzontale della reale estensione della zona di arresto) con l'altezza H_{2+3} (proiezione verticale della reale estensione delle zone di distacco e di transito), come suggerisce l'*Height Function Model* qui discusso (fig. 3.31).

La correlazione risulta perciò essere: $(\log(L_1))_* = 0.7922 \cdot \log(H_2 + H_3) - 0.2295$ e presenta un *coefficiente di determinazione* R^2 pari a 0.43 (il coefficiente di determinazione calcolato da Keylock e Domaas in relazione al loro caso studio fu, invece, di 0.56).

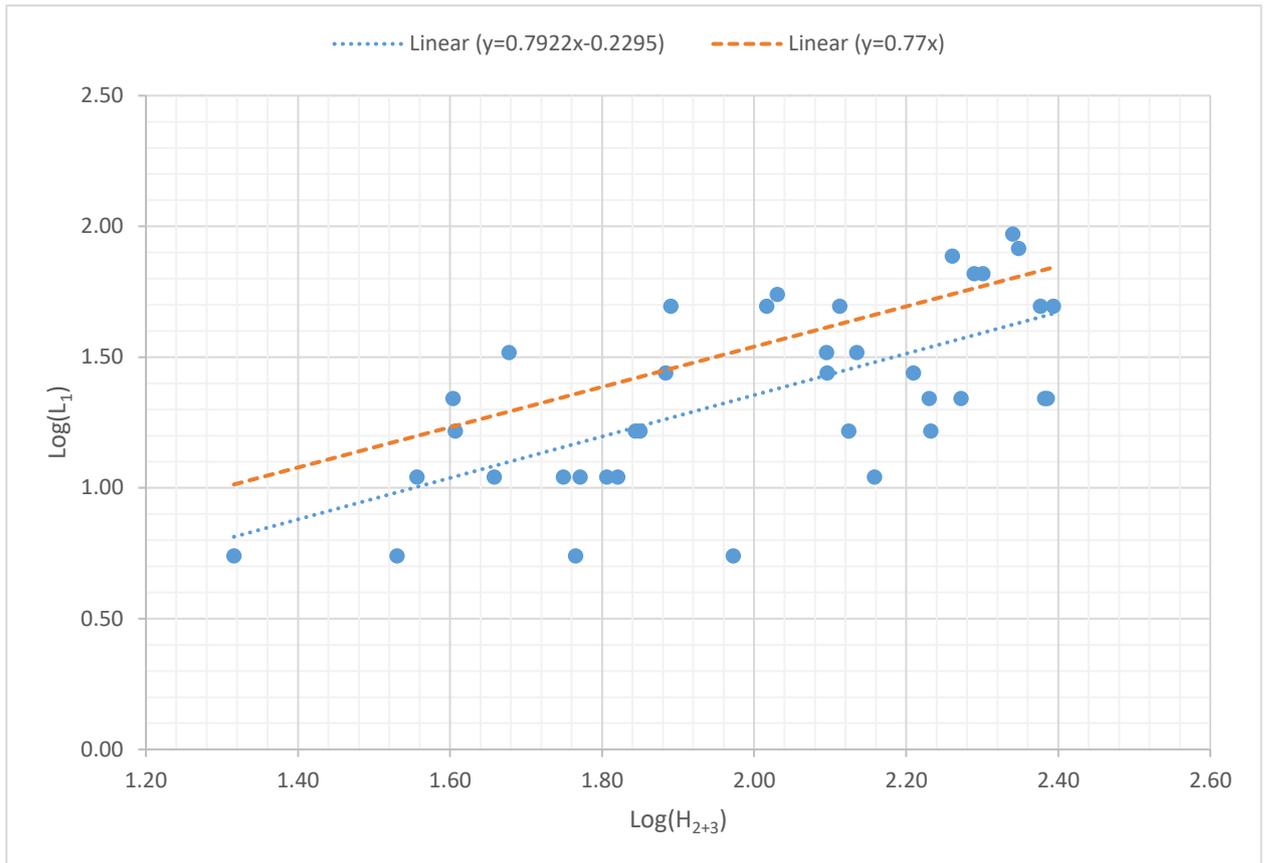


Fig. 3.31 – Grafico a dispersione che mostra i risultati ottenuti dall'applicazione dell'Height Function Model ai 22 poligoni in esame. In blu (tratteggio fine) è mostrata la reale distribuzione dei risultati e l'equazione della linea di tendenza a loro riferita. In arancione (tratteggio spesso) si può osservare la linea di tendenza con equazione pari a $y=0.77 \cdot x$ (quella determinata da Keylock e Domaas).

Si può ora osservare che:

- Il grafico in figura 3.31 mostra uno scostamento considerevole dei risultati dalla linea di tendenza di equazione $y = 0.7922 \cdot x - 0.2295$.
- Il *coefficiente di determinazione* R^2 ricavato da Keylock e Domaas, analizzando i casi di crolli avvenuti in Norvegia, risulta essere pari a 0.56 e cioè nettamente superiore rispetto a quello calcolato in questo paragrafo per i 22 poligoni oggetto di studio (pari a 0.43).
- L'Height Function Model non è significativo quando il blocco in caduta lungo il versante si arresta lungo la zona di transito (ovvero quando L_1 è pari a 0).

In conclusione, la correlazione $y = 0.7922 \cdot x - 0.2295$ risulta essere rappresentativa dei 22 poligoni oggetti di studio ma non per essi conservativa (dati reali troppo dispersi).

3.4.2 - α - β MODEL

Per quanto riguarda l' α - β Model, la correlazione ricavata da Keylock e Domaas è:

$$\alpha_* = 0.77 \cdot \beta + 4.24. \quad (3.2)$$

In tabella 3.4 sono riportati i valori di α e $\log(\alpha)$, ricavati tramite la scomposizione e lo studio geometrico delle sezioni dei poligoni 1, 2 e 3, e di α^* e $\log(\alpha)^*$, derivanti dall'applicazione

della correlazione (3.2). Per quello che concerne l' α - β *Model*, infatti, si è deciso di identificare, oltre alla correlazione (3.2) proposta dagli autori, anche una correlazione logaritmica che legasse gli angoli α e β , pur mantenendo uguali il coefficiente angolare e il termine noto suggeriti ($\log(\alpha)_* = 0.77 \cdot \log(\beta) + 4.24$).

In appendice A saranno, poi, riportate tutte le dimensioni e i valori caratteristici degli altri 19 poligoni in esame (tab. A.3a, tab. A.3b).

Poligono	Profilo	β [°]	Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante		Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2)	
			α [°]	$\log\alpha$	α^* [°]	$\log\alpha^*$
1	0	45.96	43.95	1.64	39.63	1.60
	1	44.66	44.66	1.65	38.63	1.59
	2	45.24	43.51	1.64	39.08	1.59
2	0	44.30	41.42	1.62	38.35	1.58
	1	44.70	40.88	1.61	38.66	1.59
	2	45.07	41.50	1.62	38.94	1.59
3	0	39.23	37.08	1.57	34.45	1.54
	1	42.37	38.42	1.58	36.87	1.57
	2	39.58	38.11	1.58	34.72	1.54

Tab. 3.4 – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2) ai primi 3 dei 22 poligoni in esame.

Come si può, ora, osservare dalla tabella 3.4, la correlazione (3.2) sembra interpolare bene i dati reali, con una dispersione apprezzabilmente inferiore rispetto a quella derivante dall'impiego dell'*Height Function Model*. Inoltre, i risultati individuati si dimostrano a favore di sicurezza nel 92,4% dei casi. Infatti, solamente 5 casi su 66 stimano un valore del *Geometric Angle* inferiore rispetto a quello reale, ma con uno scostamento rispetto alla retta di equazione (3.2) sempre minore del 2,7%. Perciò, tale retta risulta coincidere in maniera sufficientemente accurata con il limite inferiore della successione dei dati.

Al di là degli importanti risultati ottenuti, si è comunque deciso di delineare un'altra correlazione lineare che rappresentasse in modo più accurato i 22 poligoni oggetto di studio. In particolare, l'analisi dei dati ricavati dalle osservazioni geometriche sul versante (riportati in verde in tabella 3.4) ha portato alla definizione di:

- Una correlazione lineare in scala naturale che coincide con l'equazione della linea di tendenza ricavata correlando l'angolo α con l'angolo β , come suggerisce α - β *Model* qui discusso (fig. 3.32):

$$\alpha_* = 0.928 \cdot \beta + 1.1383 \quad (3.3)$$

- Una correlazione lineare in scala logaritmica che coincide con l'equazione della linea di tendenza ricavata correlando il logaritmo dell'angolo α con il logaritmo dell'angolo β (fig. 3.33):

$$\log(\alpha)_* = 0.9687 \cdot \log(\beta) + 0.0305 \quad (3.4)$$

Il coefficiente di determinazione R^2 dell'equazione (3.3) risulta essere pari a 0.90 mentre quello dell'equazione (3.4) risulta essere pari a 0.91 (il coefficiente di determinazione calcolato da Keylock e Domaas in relazione al loro caso studio fu, invece, di 0.86).

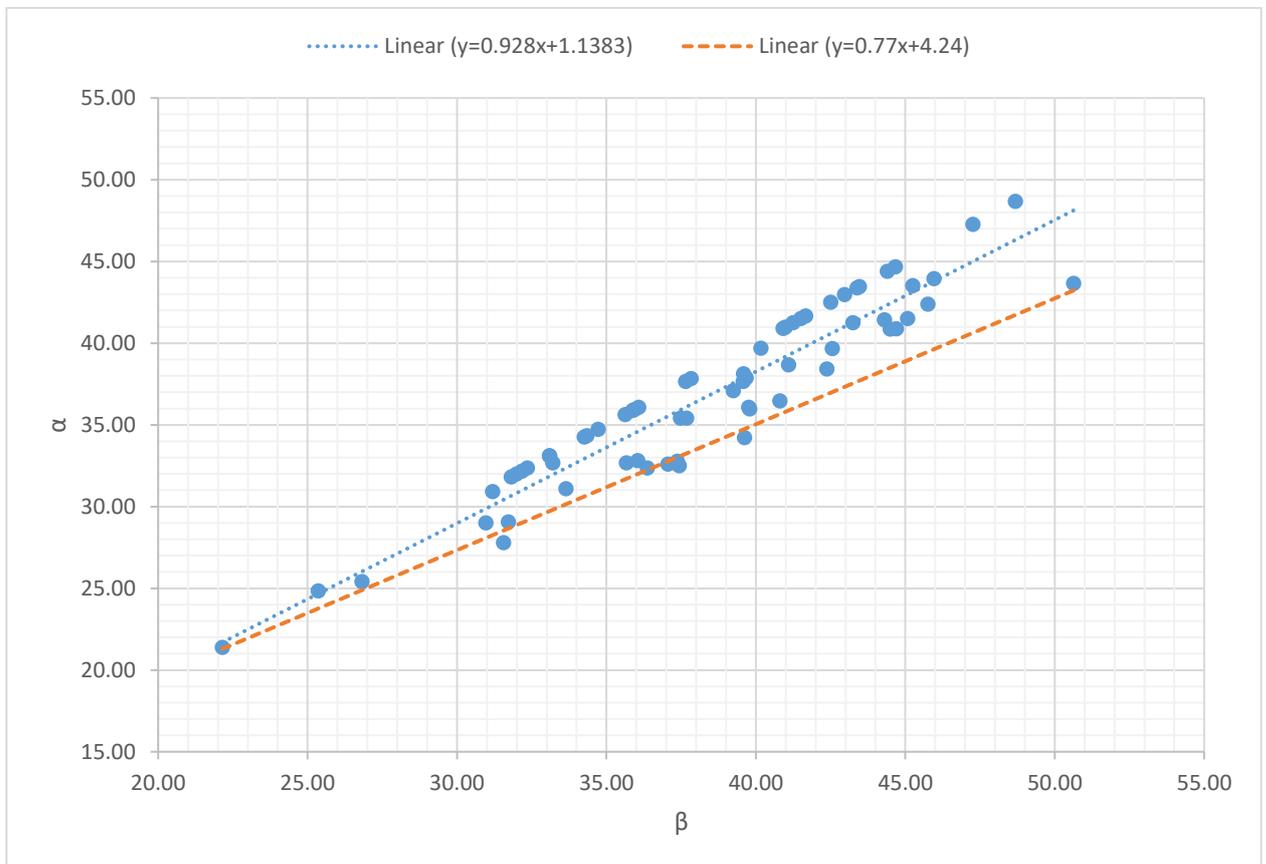


Fig. 3.32 – Grafico a dispersione in scala naturale che mostra i risultati ottenuti dall'applicazione dell' α - β Model. In blu (tratteggio fine) è mostrata la reale distribuzione dei risultati e l'equazione della linea di tendenza a loro riferita. In arancione (tratteggio spesso) si può osservare la linea di tendenza con equazione pari a $y = 0.77 \cdot x + 4.24$ (ovvero quella determinata da Keylock e Domaas).

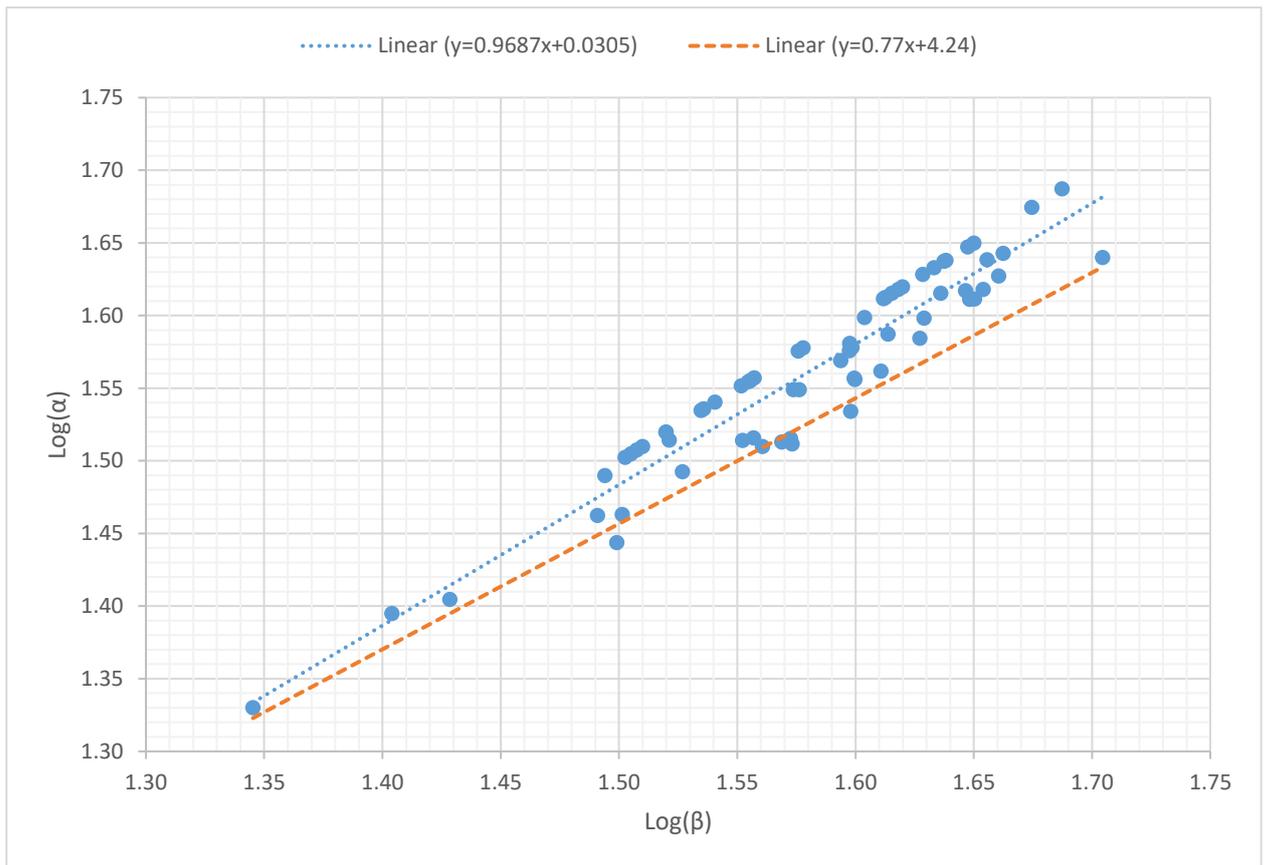


Fig. 3.33 – Grafico a dispersione in scala logaritmica che mostra i risultati ottenuti dall'applicazione dell' α - β Model. In blu (tratteggio fine) è mostrata la reale distribuzione dei risultati e l'equazione della linea di tendenza a loro riferita. In arancione (tratteggio spesso) si può osservare la linea di tendenza con equazione pari a $y = 0.77 \cdot x + 4.24$.

Si può ora osservare che:

- Sia il grafico in figura 3.32 che quello in figura 3.33 evidenziano rispettivamente uno scostamento minimo dei risultati dalla linea di tendenza di equazione (3.3) e da quella di equazione (3.4)
- Il *coefficiente di determinazione* R^2 ricavato da Keylock e Domaas, analizzando i casi di crolli avvenuti in Norvegia, risulta essere pari a 0.86 e cioè inferiore rispetto a quelli calcolati in questo paragrafo per i 22 poligoni oggetto di studio (pari a 0.90 in riferimento alla correlazione in scala naturale e pari a 0.91 in riferimento alla correlazione in scala logaritmica).

In conclusione, le correlazioni (3.3) e (3.4) risultano essere rappresentative dei 22 poligoni oggetti di studio e forniscono risultati conservativi nella quasi totalità dei casi. Inoltre, le correlazioni (3.3) e (3.4) risultano rappresentare in maniera più accurata il comportamento di un fenomeno di caduta massi che ha luogo in Val Germanasca, rispetto a quanto la correlazione (3.2) rappresenti un evento franoso nelle vallate norvegesi studiate da Keylock e Domaas.

3.4.3 - RUNOUT RATIO MODEL

Per quanto riguarda il *Runout Ratio Model*, la correlazione ricavata da Keylock e Domaas è:

$$\left(\frac{L_1}{L_2 + L_3}\right)_* = \frac{[\tan(\beta) - \tan(\alpha)]}{[\tan(\alpha) - \tan(\theta_1)]} \quad (3.5)$$

In tabella 3.5 sono riportati i valori di (L_1/L_{2+3}) , ricavati tramite la scomposizione e lo studio geometrico delle sezioni dei poligoni 1, 2 e 3, e di $(L_1/L_{2+3})_*$, derivanti dall'applicazione della correlazione (3.5). In appendice A saranno, poi, riportate tutte le dimensioni e i valori caratteristici degli altri 19 poligoni in esame (tab. A.4a, tab. A.4b).

Poligono	Profilo	L ₁ [m]	L ₂ [m]	L ₃ [m]	(L ₁ /L ₂₊₃)	(L ₁ /L ₂₊₃)*
1	0	16.50	132.00	33.00	0.10	-2.27
	1	0.00	143.00	33.00	0.00	-
	2	16.50	121.00	11.00	0.13	-4.05
2	0	16.50	49.50	22.00	0.23	-1.07
	1	16.50	33.00	38.50	0.23	1.09
	2	11.00	44.00	22.00	0.17	-12.01
3	0	16.50	44.00	5.50	0.33	0
	1	22.00	38.50	5.50	0.50	-1539.47
	2	11.00	44.00	11.00	0.20	0.28

Tab. 3.5 – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.3) ai primi 3 dei 22 poligoni in esame.

In figura 3.34 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del *Runout Ratio Model* ai 22 poligoni oggetto di studio.

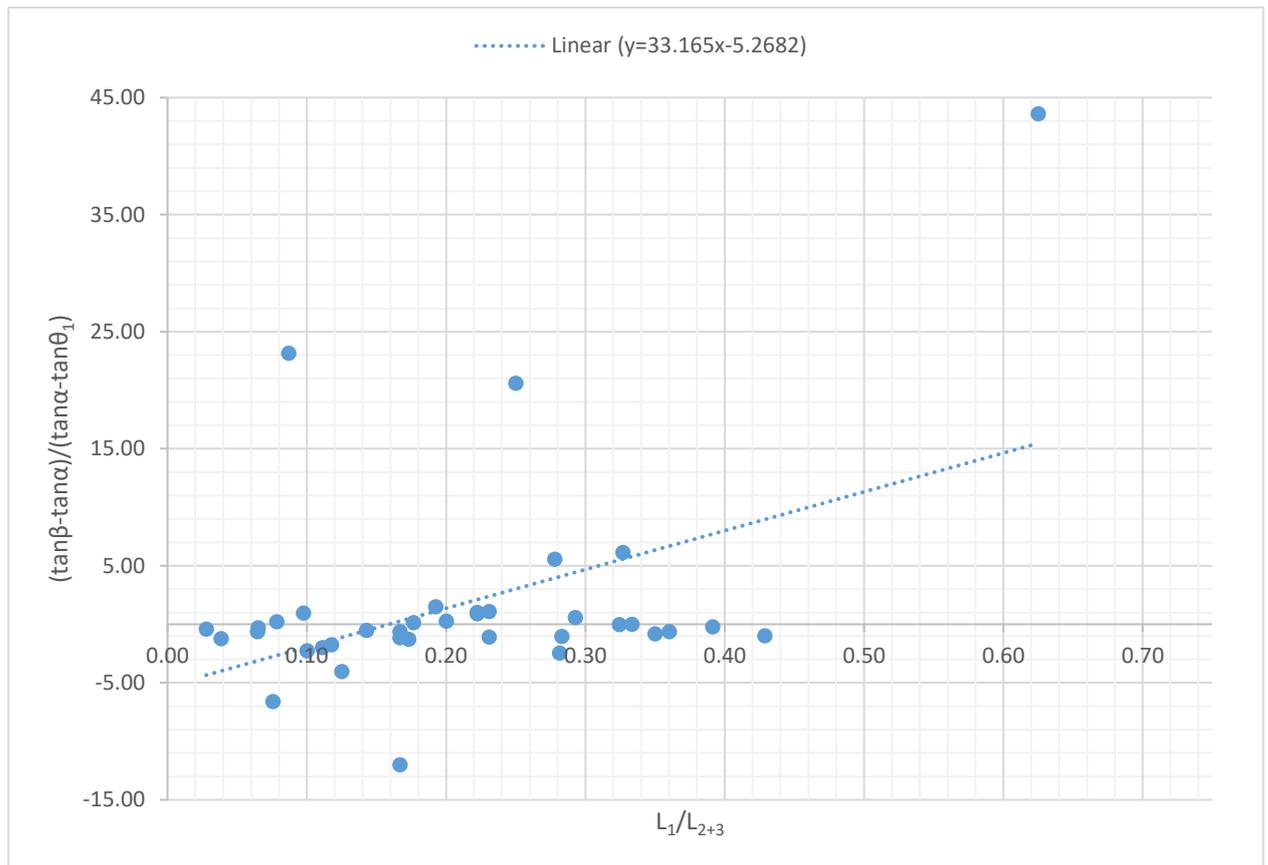


Fig. 3.34 – Grafico a dispersione che mostra i risultati ottenuti dall'applicazione del Runout Ratio Model.

Si può ora osservare che, facendo riferimento alla tabella 3.5 e alla figura 3.34, la correlazione individuata da Keylock e Domaas nell'ambito del *Runout Ratio Model* individua valori di $(L_1/L_{2+3})^*$ che risultano discostarsi notevolmente dai valori reali di (L_1/L_{2+3}) e che la linea di tendenza, identificata dalla distribuzione dei risultati, appare chiaramente non rappresentativa poiché la dispersione dei dati intorno ad essa è molto elevata (il coefficiente di determinazione è pari a 0.11). Inoltre, per tutti i profili per cui non è stata identificata una zona di arresto, ovvero quando il moto dei blocchi in movimento lungo il versante ha avuto fine all'interno della zona di transito, il *Runout Ratio Model* risulta totalmente inapplicabile. In questa situazione, infatti, la lunghezza L_1 viene assunta pari a zero e, perciò, l'angolo θ_1 risulta non individuabile, rendendo il secondo termine dell'equazione (3.5) impossibile da definirsi.

In conclusione, appare evidente che la metodologia che meglio interpreta le caratteristiche geometriche del versante (tra quelle proposte da Keylock e Domaas), fornendo risultati più fedeli rispetto a quelli reali, è l' α - β Model, ovvero la procedura che correla linearmente l'ampiezza dell'angolo α con quella dell'angolo β . In particolare, la correlazione (3.3), identificata nel paragrafo 3.4.2, appare rappresentativa per la vallata analizzata. È, però, importante sottolineare che tale equazione, definita dall'analisi dei 22 poligoni oggetto di studio, si discosta da quella individuata dagli autori (3.2) ed è, quindi, possibile ipotizzare che lo scostamento tra le correlazioni (3.2) e (3.3) sia influenzato da altri fattori propri di ogni

differente vallata. Questi possono essere, ad esempio, le caratteristiche litologiche e di copertura del versante, la presenza o assenza di vegetazione ad alto fusto e le sue proprietà (specie, dimensioni del tronco, distribuzione lungo il versante) e, infine, i fattori climatici e idrogeologici.

Al fine di esaminare queste discrepanze e di provare a determinare una legge che permetta di stimare in modo più preciso la massima distanza coperta da un fenomeno di caduta massi, si è perciò deciso di dedicare il capitolo 4 di questo elaborato all'analisi dell'influenza che la densità di vegetazione ad alto fusto ha sull'evoluzione di un crollo in roccia, sempre con riferimento ai casi della Val Germanasca. Tale parametro, infatti, risulta essere quello di più facile stima rispetto a tutti gli altri sopracitati, rientrando perciò negli obiettivi di rapidità imposti da procedura di calcolo preliminare.

CAPITOLO 4 - INFLUENZA DELLA VEGETAZIONE AD ALTO FUSTO

I 22 casi di frane poligonali che hanno avuto luogo in Val Germanasca, catalogati nel dataset SIFraP e analizzati nel capitolo 3, verranno qui esaminati sulla base della differente densità di vegetazione ad alto fusto che li contraddistingue. In particolare, scopo di questo capitolo è quello di identificare un'eventuale relazione tra la variazione della stessa e il comportamento del fenomeno di caduta massi in termini di massime distanze percorse, definite attraverso la valutazione del *Geometric Angle* α , in accordo con la metodologia di calcolo proposta da Keylock e Domaas nell'ambito dell' α - β Model.

Prima di iniziare ad approfondire le metodologie di analisi sviluppate, è opportuno sottolineare che la densità di vegetazione ad alto fusto a cui si fa riferimento in questo capitolo è una densità media, ovvero computata considerando la percentuale di alberi presenti sull'intero versante oggetto di studio, senza distinguere eventuali aree con concentrazioni di alberi più elevate da aree con concentrazioni minori. Infatti, la metodologia di identificazione delle aree vegetate di seguito proposta ha la necessità di essere svolta con una certa rapidità, per ricadere negli obiettivi imposti dalle procedure di calcolo preliminare.

4.1 - RILIEVO DELLA DENSITÀ DI VEGETAZIONE

Innanzitutto, sono state definite 5 differenti classi di densità di vegetazione ad alto fusto (tab. 4.1) che permettessero di analizzare in maniera completa i versanti oggetto di studio. Successivamente, ad ogni poligono è stata assegnata la classe ad esso più affine secondo due metodologie differenti, di seguito chiarite. È importante evidenziare che l'analisi è stata condotta sulla base dell'osservazione di fotografie aeree o delle ortofotografie disponibili.

Classe	Densità di Vegetazione
1	0%-20%
2	20%-40%
3	40%-60%
4	60%-80%
5	80%-100%

Tab. 4.1 – Definizione delle classi di densità della vegetazione

La prima metodologia è stata utilizzata nel caso in cui le ortofotografie consultate risalissero ad un periodo precedente al crollo in roccia. In questo caso, infatti, si hanno informazioni certe sulla reale distribuzione degli alberi sul pendio prima dell'evento franoso. Perciò:

- i. Per ogni poligono è stata creata una griglia di celle quadrate di lato 5 metri, in accordo con la risoluzione del DTM utilizzato.
- ii. Il perimetro di ogni poligono è stato discretizzato al fine di rendere quest'ultimo sovrapponibile alla griglia di celle precedentemente creata.

- iii. Si sono contrassegnate tutte le celle contenenti al loro interno almeno un albero. Infatti, recenti studi di tipo numerico hanno dimostrato che per un DTM con risoluzione a 5 metri, se la densità di vegetazioni è maggiore a un albero per cella, allora non ci è alcuna variazione del risultato in termini di aree di invasione (Castelli e Netti, 2016).
- iv. Si è provveduto a dividere il numero di celle identificate al punto (iii) con il numero di celle totali, ottenendo una percentuale che rappresenta in modo sufficientemente preciso la densità di vegetazione del poligono.

La seconda metodologia, invece, è stata applicata a quei poligoni dove è visibilmente chiara l'alterazione della vegetazione in seguito ad un crollo in roccia. Bisogna, infatti, tenere conto del fatto che l'evento franoso, in numerosi casi, altera alcune proprietà della zona che esso attraversa tra le quali anche la densità di vegetazione stessa.

In questo caso:

- i. Per ogni poligono è stata identificata una zona limitrofa ad esso, con proprietà geomorfologiche e litologiche affini e con un'estensione ad esso comparabile.
- ii. Per ogni zona così identificata è stata creata una griglia di celle quadrate di lato 5 metri, in accordo con la risoluzione del DTM utilizzato.
- iii. Il perimetro di ogni zona è stato discretizzato al fine di renderlo sovrapponibile alla griglia di celle precedentemente creata.
- iv. Si sono contrassegnate tutte le celle contenenti al loro interno almeno un albero.
- v. Si è provveduto a dividere il numero di celle identificate al punto (iv) con il numero di celle totali, ottenendo una percentuale che si assume rappresenti la densità di vegetazione ad alto fusto che caratterizzava il poligono prima che esso fosse coinvolto dall'evento franoso.

È di seguito riportata la tabella, sviluppata in accordo con le metodologie sopracitate, che mostra la classe di densità di vegetazione di ogni poligono e l'intervallo di quota altimetrica a cui esso si trova (tab. 4.2). Come si può osservare, circa il 50% dei poligoni analizzati ha una densità di vegetazione ad alto fusto che oscilla tra lo 0% e il 20% (classe 1), circa un quarto dei poligoni (6 su 23) sono di classe 5 (80%-100%), mentre la restante parte è equamente divisa tra le classi 2, 3 e 4 (2 poligoni per classe).

Poligoni	Classe	Intervalli di quota
1	3	750-1250 m
2	5	<1000 m
3	5	1000-1500 m
4	4	>2000 m
5	1	>2000 m
6	1	>2000 m
7	5	750-1250 m
8	2	>2000 m
9	1	>2000 m
10	1	>2000 m
11	1	>2000 m
12	2	>2000 m
13	1	>2000 m
14	1	>2000 m
15	5	1000-1500 m
16	4	1000-1500 m
17	3	1500-2000 m
18	1	>2000 m
19	1	>2000 m
20	1	>2000 m
21	5	1500-2000 m
22	5	<1000 m

Tab. 4.2 – Tabella che identifica, per ogni poligono in esame, la differente classe di vegetazione che lo contraddistingue e l'intervallo di quota in cui tale profilo si sviluppa.

Nell'ottica di trovare un nesso tra le correlazioni individuate nei capitoli precedenti e la variazione di densità di vegetazione ad alto fusto sul pendio, risulta chiaro che, considerando quanto appena riportato, per le classi 2,3 e 4 si possiede un numero troppo basso di campioni e ciò condurrebbe inevitabilmente ad una stima non significativa e poco dettagliata dell'influenza che potrebbe avere la concentrazione di alberi sulle correlazioni stesse. Per questo motivo si è, quindi, deciso di raggruppare le 5 classi in due macrocategorie, in particolare:

- *Macrocategoria A*: Densità di vegetazione ad alto fusto compresa tra lo 0% e il 60% (classi 1, 2 e 3).
- *Macrocategoria B*: Densità di vegetazione ad alto fusto compresa tra il 60% e il 100% (classi 4 e 5).

Come si può notare, si è deciso di introdurre la classe 3 all'interno della Macrocategoria A poiché, in seguito a numerose prove ed elaborazioni, si è notato che, così facendo, l'analisi risulta sempre a favore di sicurezza.

Per quanto riguarda la macrocategoria A, si riportano in tabella 4.3a e 4.3b i valori degli angoli α e β caratteristici di ciascun profilo di ogni poligono. I due suddetti angoli sono stati, quindi, correlati linearmente tra di loro, al fine di determinare un'equazione che definisse in modo univoco la massima distanza coperta da un fenomeno di caduta massi su di un versante con una densità di vegetazione ad alto fusto compresa tra lo 0% e il 60%. L'analisi del rapporto tra gli angoli α e β ha portato a definire la seguente correlazione (coefficiente di determinazione pari a 0.891), mostrata graficamente in figura 4.1:

$$\alpha = 0.9665 \cdot \beta - 0.3835 \quad (4.1)$$

Poligoni	Profili	α [°]	Log α	β [°]	Log β
1	0	43.95	1.64	45.96	1.66
	1	44.66	1.65	44.66	1.65
	2	43.51	1.64	45.24	1.66
5	0	34.71	1.54	34.71	1.54
	1	35.62	1.55	35.62	1.55
	2	34.34	1.54	34.34	1.54
6	0	27.78	1.44	31.55	1.50
	1	33.10	1.52	33.10	1.52
	2	32.81	1.52	36.04	1.56
8	0	24.84	1.40	25.35	1.40
	1	31.08	1.49	33.64	1.53
	2	32.59	1.51	37.05	1.57
9	0	21.39	1.33	22.14	1.35
	1	25.40	1.40	26.82	1.43
	2	29.05	1.46	31.72	1.50
10	0	32.68	1.51	33.20	1.52
	1	31.98	1.50	31.98	1.50
	2	32.35	1.51	32.35	1.51
11	0	41.66	1.62	41.66	1.62
	1	36.07	1.56	36.07	1.56
	2	32.35	1.51	36.36	1.56
12	0	37.82	1.58	37.82	1.58
	1	41.24	1.62	41.24	1.62
	2	43.46	1.64	43.46	1.64
13	0	34.21	1.53	39.61	1.60
	1	32.76	1.52	37.37	1.57
	2	32.49	1.51	37.42	1.57
14	0	37.66	1.58	39.57	1.60
	1	36.06	1.56	39.76	1.60
	2	35.98	1.56	39.78	1.60
17	0	40.85	1.61	44.49	1.65
	1	36.45	1.56	40.80	1.61
	2	37.86	1.58	39.67	1.60

Tab. 4.3a – Valori degli angoli α e β dei poligoni appartenenti alla macrocategoria A.

Poligoni	Profili	α [°]	Log α	β [°]	Log β
18	0	35.94	1.56	35.94	1.56
	1	37.65	1.58	37.65	1.58
	2	35.86	1.55	35.86	1.55
19	0	29.01	1.46	30.96	1.49
	1	35.40	1.55	37.68	1.58
	2	35.41	1.55	37.47	1.57
20	0	42.96	1.63	42.96	1.63
	1	40.98	1.61	40.98	1.61
	2	40.90	1.61	40.90	1.61

Tab. 4.3b – Valori degli angoli α e β dei poligoni appartenenti alla macrocategoria A.

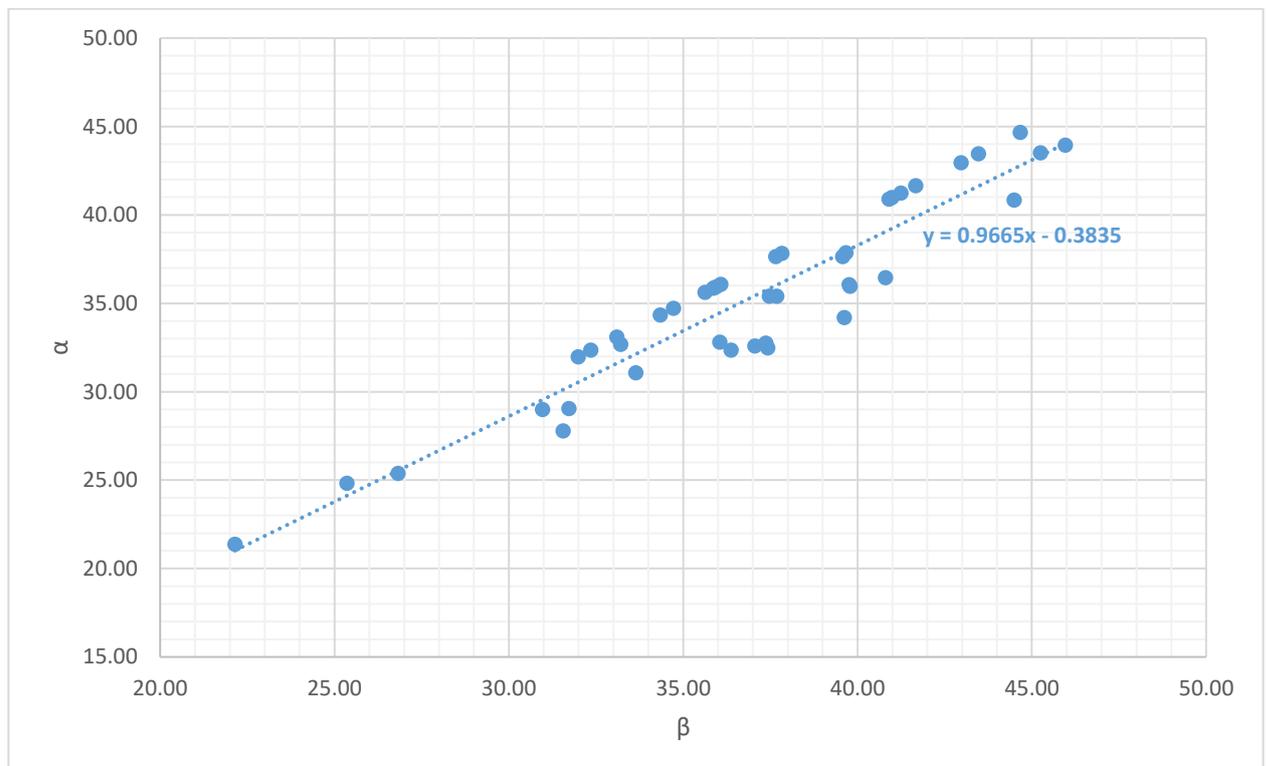


Figura 4.1 – Distribuzione sul piano cartesiano dei dati che hanno permesso di determinare la correlazione caratteristica per la Macrocategoria A.

Si può ora osservare dall'equazione 4.1 che l'angolo α così determinato risulterebbe essere sempre minore dell'angolo β ad esso riferito. Quindi, questa considerazione porterebbe a concludere che se la densità di vegetazione ad alto fusto è minore del 60%, la massima distanza percorsa dai massi in movimento lungo il versante supera sempre il *pie' del pendio*, andando ad invadere la *zona di arresto*.

Per quanto riguarda, invece, la macrocategoria B, si riportano in tabella 4.4 i valori degli angoli α e β caratteristici di ciascun profilo di ogni poligono.

I due suddetti angoli sono stati, quindi, correlati linearmente tra di loro, al fine di determinare un'equazione che definisse in modo univoco la massima distanza coperta da un fenomeno di caduta massi su di un versante con una densità di vegetazione ad alto fusto

compresa tra lo 60% e il 100%. L'analisi del rapporto tra gli angoli α e β ha portato a definire la seguente correlazione (coefficiente di determinazione pari a 0.883), mostrata graficamente in figura 4.2:

$$\alpha = 0.8393 \cdot \beta + 4.9573 \quad (4.2)$$

Poligoni	Profili	α [°]	Log α	β [°]	Log β
2	0	41.42	1.62	44.3	1.65
	1	40.88	1.61	44.7	1.65
	2	41.5	1.62	45.07	1.65
3	0	37.08	1.57	39.23	1.59
	1	38.42	1.58	42.37	1.63
	2	38.11	1.58	39.58	1.6
4	0	32.66	1.51	35.67	1.55
	1	32.17	1.51	32.17	1.51
	2	30.91	1.49	31.19	1.49
7	0	39.69	1.6	40.16	1.6
	1	39.66	1.6	42.56	1.63
	2	38.67	1.59	41.09	1.61
15	0	41.25	1.62	43.24	1.64
	1	42.39	1.63	45.75	1.66
	2	41.5	1.62	41.5	1.62
16	0	43.65	1.64	50.63	1.7
	1	48.67	1.69	48.67	1.69
	2	47.26	1.67	47.26	1.67
21	0	31.81	1.5	31.81	1.5
	1	33.1	1.52	33.1	1.52
	2	34.25	1.53	34.25	1.53
22	0	43.38	1.64	43.38	1.64
	1	44.4	1.65	44.4	1.65
	2	42.5	1.63	42.5	1.63

Tab. 4.4 – Valori degli angoli α e β dei poligoni appartenenti alla macrocategoria B.

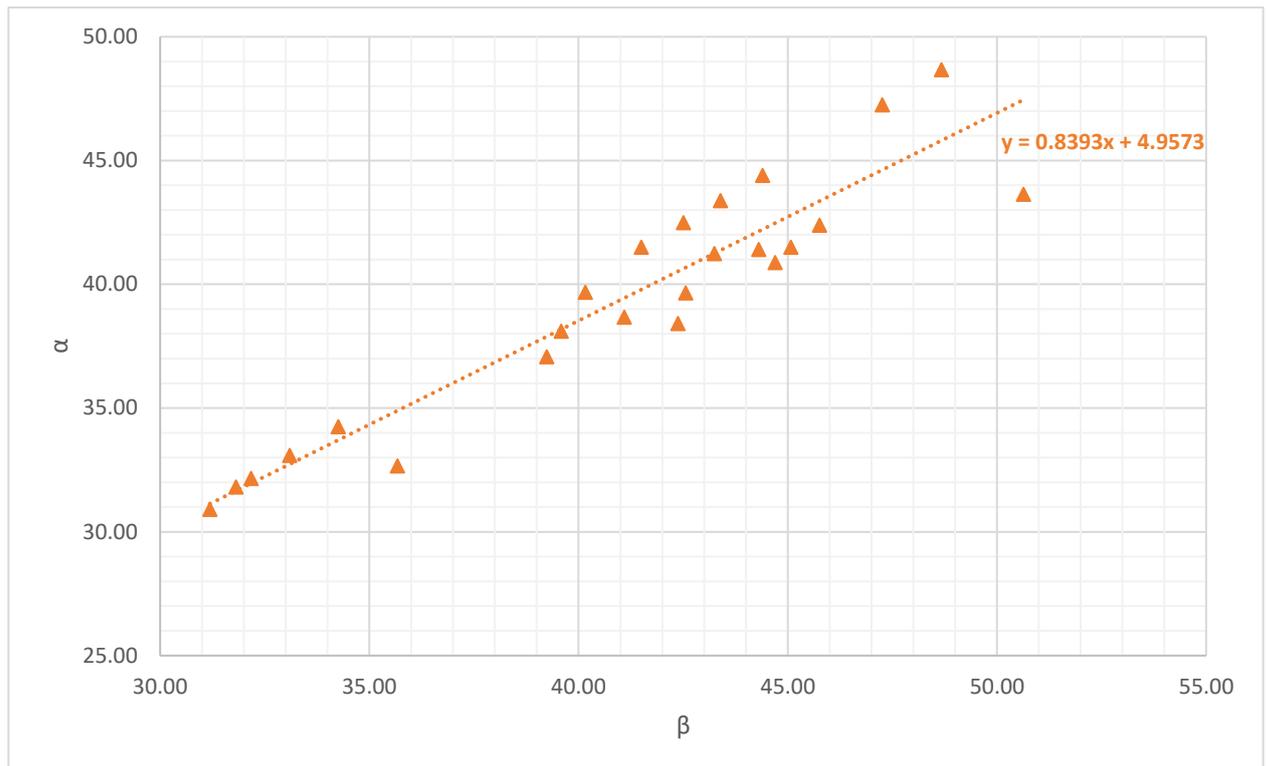


Figura 4.2 – Distribuzione sul piano cartesiano dei dati che hanno permesso di determinare la correlazione caratteristica per la Macrocategoria B.

Dall'equazione 4.2, si può osservare che:

- Per $\beta < 30.85^\circ$, l'angolo α risulterebbe essere sempre maggiore dell'angolo β . In questa condizione, perciò, il fenomeno gravitativo si arresterebbe nella zona di transito del versante.
- Per $\beta > 30.85^\circ$, l'angolo α risulterebbe essere sempre minore dell'angolo β . Perciò, la massima distanza percorsa dai massi in movimento lungo il versante supera sempre il *piede del pendio*, andando ad invadere la *zona di arresto*.
- Per $\beta = 30.85^\circ$, l'angolo α risulterebbe essere anch'esso pari a 30.85° .

In ogni caso, tutti i profili rientranti nella macrocategoria B presentano valori degli angoli β maggiori di 30.85° e ciò presuppone che i punti di arresto dei fenomeni franosi che hanno coinvolto tali profili, siano localizzati all'interno delle aree di arresto e non sulle zone di transito.

4.2 - RISULTATI OTTENUTI

Andando ad unire i grafici in figura 4.1 e 4.2 (fig. 4.3), e sovrapponendo ad essi la correlazione caratteristica della totalità dei dati analizzati: $\alpha = 0.928 \cdot \beta + 1.1383$ (3.3), si può constatare, in prima approssimazione, che le due linee di tendenza delle macrocategorie A e B non presentano deviazioni di pendenza significative rispetto alla correlazione lineare caratteristica. Questo risultato è particolarmente interessante in quanto evidenzia che la correlazione che lega l'angolo α con l'angolo β rimane invariata, nonostante la differenza di densità di vegetazione che si è riscontrata nei vari poligoni studiati.

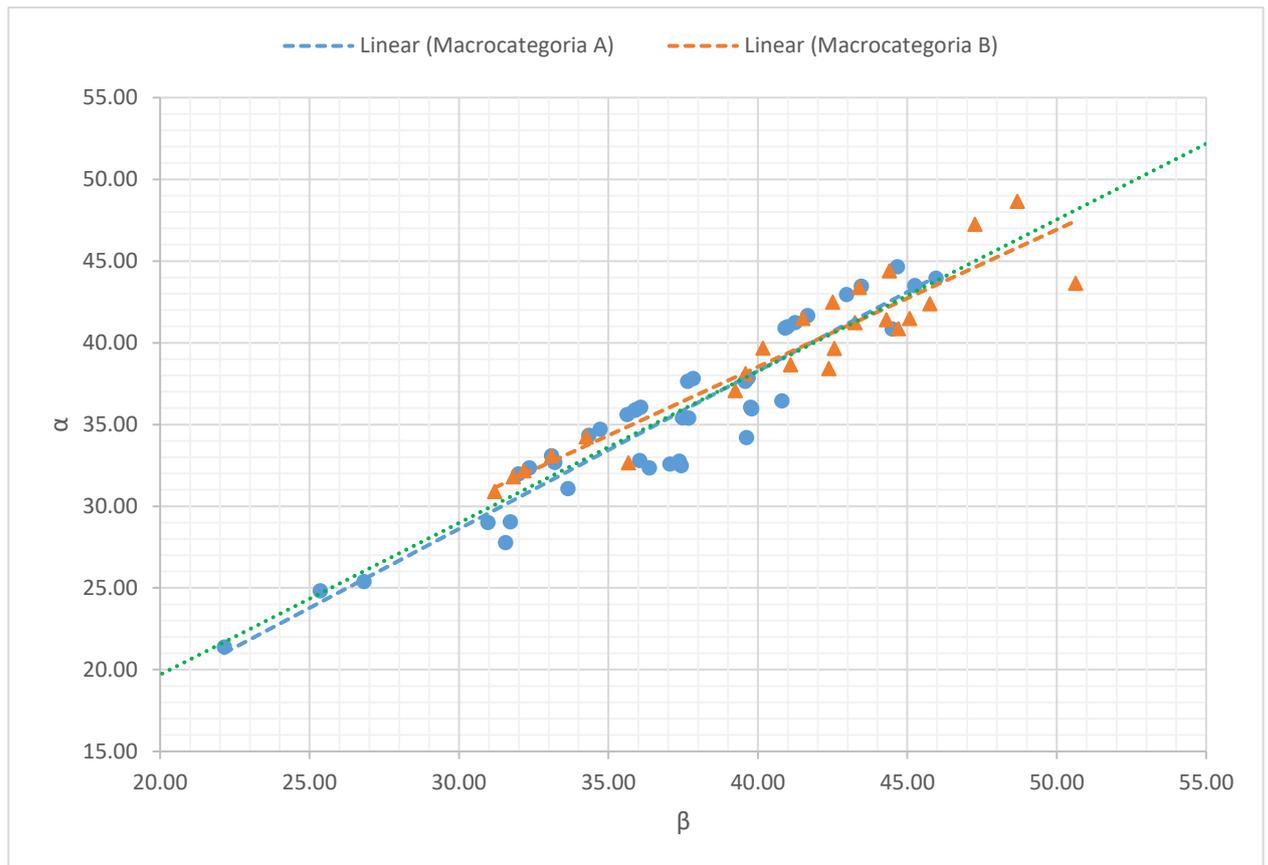


Figura 4.3 – Unione dei grafici in figura 4.1 (in blu) e 4.2 (in arancione). In verde (tratteggio fine) - Correlazione (3.3).

Un'altra considerazione, derivante dall'osservazione del grafico in figura 4.3, è che gli angoli α e β caratteristici dei profili appartenenti alla macrocategoria B risultano essere in media numericamente maggiori rispetto a quelli dei profili che costituiscono la macrocategoria A. La fitta presenza di vegetazione ad alto fusto sul pendio comporta, quindi, un maggior numero di impatti tra il masso distaccatosi e gli alberi stessi, con conseguente diminuzione dell'energia cinetica dell'elemento in movimento e della sua velocità. Questo scenario porta alla definizione di una zona di invasione minore (angolo α maggiore) rispetto a quella che si sarebbe determinata in assenza e/o scarsità di vegetazione sul versante.

Inoltre, è importante osservare che, all'interno del caso di studio, tutti i poligoni con densità di vegetazione compresa tra 0% e il 40% (classi 1 e 2) sono localizzati ad una quota maggiore di 2000 metri e che non esistono poligoni a basse quote (<1000 metri) che presentino una densità di vegetazione inferiore al 40% (tab. 4.2).

Questi dati, che sono rappresentativi unicamente della Val Germanasca, combinati con le caratteristiche litologiche e geometriche, tipiche della zona in esame, potrebbero perciò avere influenzato la stima dei parametri sopracitati e potrebbero essere indicativi unicamente all'interno della vallata analizzata.

Al fine di approfondire questi aspetti si è quindi deciso di dedicarvici il capitolo 5 di questo elaborato.

In conclusione, in riferimento al caso in esame, la presenza o l'assenza di alberi sul pendio non altera in modo significativo le leggi identificate nel capitolo 3. Rimane, però, chiara l'influenza della vegetazione sulla lunghezza della zona percorsa dai blocchi distaccatosi. Ad aree meno vegetate, infatti, corrispondono angoli α (e β) minori (i massi percorreranno un percorso di lunghezza maggiore prima di arrestarsi) mentre, al contrario, ad aree con una consistente presenza di alberi corrispondono angoli α (e β) maggiori.

CAPITOLO 5 - VERIFICA E RIELABORAZIONE DELLE CORRELAZIONI IDENTIFICATE

Le analisi condotte nei capitoli precedenti, relative alla relazione tra l'area di invasione di un crollo in roccia e le caratteristiche geometriche e di densità di vegetazione del versante su cui si propaga, hanno fornito risultati importanti soprattutto nell'identificazione di una metodologia di calcolo (α - β *Model*) utile per stimare in modo speditivo la massima distanza coperta da un fenomeno di caduta massi. D'altra parte, però, le correlazioni individuate nell'ambito della stessa metodologia di studio risultano essere discordanti tra di loro (dal punto di vista del coefficiente angolare e del termine noto). Ciò presuppone, quindi, che l'equazione (3.2) rappresenti compiutamente solo i crolli in roccia che hanno luogo nelle zone della Norvegia soggette alle indagini compiute da Keylock e Domaas nel 1999, mentre che l'equazione (3.3) fornisca risultati comparabili con quelli reali unicamente per i fenomeni gravitativi di versante che si sviluppano in Val Germanasca. È, infatti, importante osservare che la geometria della parete rocciosa e la densità di vegetazione che la contraddistingue non sono gli unici parametri che influiscono sulla propagazione dell'evento franoso; al contrario, esistono numerosi altri fattori che possono portare ad una variazione apprezzabile della lunghezza della zona di arresto quali, ad esempio, le caratteristiche fisiche e litologiche del masso distaccatosi, la tipologia di arbusti e le caratteristiche meccaniche del suolo. Ovviamente, gli elementi appena citati non sono computabili nell'ottica di un'analisi preliminare in quanto la loro determinazione è complicata e presuppone un notevole impiego di tempo. D'altra parte, però, questi parametri assumono valori generalmente molto simili all'interno della stessa macrozona di esame e per questo potrebbero avere influenzato i risultati ottenuti.

Scopo di questo capitolo è quindi quello di valutare, sempre nell'ambito dell' α - β *Model*, se le equazioni (3.2) e (3.3) possano identificare il comportamento di un fenomeno di caduta massi localizzato all'interno della Val di Susa, ovvero un'area differente dalla Val Germanasca e dalle valli norvegesi studiate da Keylock e Domaas. In aggiunta, considerando che l' α - β *Model* stima l'angolo α a partire dalla definizione del solo angolo β , che però può assumere lo stesso valore in pendii con una *zona di transito* di differente estensione, si vuole studiare il ruolo di quest'ultima sul fenomeno gravitativo di versante. In particolare, si valuterà se l'applicazione della procedura proposta da Keylock e Domaas (1999) a molteplici pendii con β uguale ma con una lunghezza della *zona di transito* differente, fornirà come risultato lo stesso valore di α . Per fare ciò verranno creati tre differenti versanti virtuali, popolati tramite il software QGis, che saranno analizzati tramite il software di dettaglio RockyFor3D (paragrafo 5.2).

5.1 - APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI ANALISI AD UN EVENTO IN VAL DI SUSÀ

Il 21 Maggio 2010, nei pressi di Bardonecchia, in Val di Susa, si è verificato un ingente fenomeno di caduta massi che ha coinvolto blocchi di dimensioni maggiori o uguali a 50 m³, per un volume complessivo di circa 2000 m³ (fig. 5.1). L'enorme quantità di materiale roccioso in movimento lungo il versante ha, inoltre, completamente distrutto una grande

parte delle reti paramassi preesistenti nella zona (di lunghezza pari a 100 m, altezza pari a 5 m), danneggiando la strada provinciale e diverse abitazioni a fondo valle, evitando, fortunatamente, il coinvolgimento di persone data la tarda ora in cui ha avuto luogo (fig 5.2). L'area di invasione fu di circa 34 000 m².



Fig. 5.1 – Foto del fenomeno franoso avvenuto il 21 Maggio 2010 a Bardonecchia. (Fonte: Regione Piemonte).

* DANNI					n.d. <input type="checkbox"/>
Tipo di danno <input checked="" type="radio"/> diretto <input type="radio"/> caduta in un invaso <input type="radio"/> sbarramento corso d'acqua <input type="radio"/> sbarramento e rottura diga di frana <input type="radio"/> rottura diga o argine					
Persone <input type="radio"/>		<input type="radio"/> morti n. 0	<input type="radio"/> feriti n. 0	<input type="radio"/> evacuati n. 0	<input type="radio"/> a rischio n. 0
Edifici <input checked="" type="radio"/>		<input checked="" type="radio"/> privati n. 2	<input type="radio"/> pubblici n. 0	<input checked="" type="radio"/> privati a rischio n. 4	<input type="radio"/> pubblici a rischio n. 0
Costo (€)		Beni	Attività	Totale	
Corso d'acqua <input checked="" type="checkbox"/> Denominazione					
Danno: <input type="radio"/> potenziale <input type="radio"/> deviazione <input type="radio"/> sbarramento parziale <input type="radio"/> sbarramento totale					
Codice	Danno	Dettaglio Danno	Grado	Descrizione	
1940	Nuclei/centri abitati	case sparse	grave	Un blocco di dimensioni superiori a 15 metri cubi ha colpito un edificio (ex-ristorante) provocando la distruzione della facciata e di parte degli interni.	
1941	Nuclei/centri abitati	gruppo di case/nucleo rurale	lieve	Diversi blocchi di rilevanti proporzioni (oltre 15 metri cubi) hanno raggiunto il giardino degli edifici di nuova costruzione a pochi passi dagli edifici stessi. Altri massi di dimensioni minori (30-50 cm) hanno colpito gli edifici fino al primo piano fuori terra. Danneggiate parti della facciata, parapetti dei balconi, infissi esterni e persiane in legno, staccionate dei giardini antistanti, piazzale di pertinenza delle abitazioni. Gli edifici sono stati evacuati.	
1938	Nuclei/centri abitati	case sparse	grave	Blocco di rilevanti dimensioni(dell'ordine di 15 metri cubi) ha colpito e gravemente danneggiato un caseggiato adibito ad attività sportive invernali ed estive.	
1939	Strade	provinciale	medio	Crollo di rilevante dimensioni ha danneggiato il tratto di provinciale segnalato causandone la chiusura temporanea. Blocchi di dimensioni massime superiori a 20 metri cubi sono caduti sulla sede stradale danneggiandone seriamente il fondo.	
1942	Opere di sistemazione	opere di protezione	grave	Reti paramassi completamente distrutte e vallo paramassi sormontato da numerosi blocchi e parzialmente sfondato nella sua parte superiore	

Fig. 5.2 – Report dei danni in seguito al fenomeno franoso avvenuto il 21 Maggio 2010 a Bardonecchia. (Fonte: Regione Piemonte).

Al fine di osservare se le equazioni (3.2) e (3.3) possano risultare rappresentative per il comportamento di un fenomeno di caduta massi localizzato all'interno di un'area differente da quelle per le quali sono state sviluppate, inizialmente, si sono individuate la zona di distacco, quella di transito e quella di arresto del poligono in esame, attraverso lo studio delle sue linee di livello. Successivamente, sono state tracciate tre sezioni significative (profili), parallele alla linea di massima pendenza, utilizzando lo stesso metodo enuciato nel capitolo 3 (fig. 5.3). Si sono, quindi, determinate le proiezioni orizzontali e verticali delle lunghezze caratteristiche di ogni zona (tab. 5.1) con lo scopo di valutare gli angoli α e β , utili per l'impiego e la verifica della metodologia proposta da Keylock e Domaas nel 1999 (α - β Model).

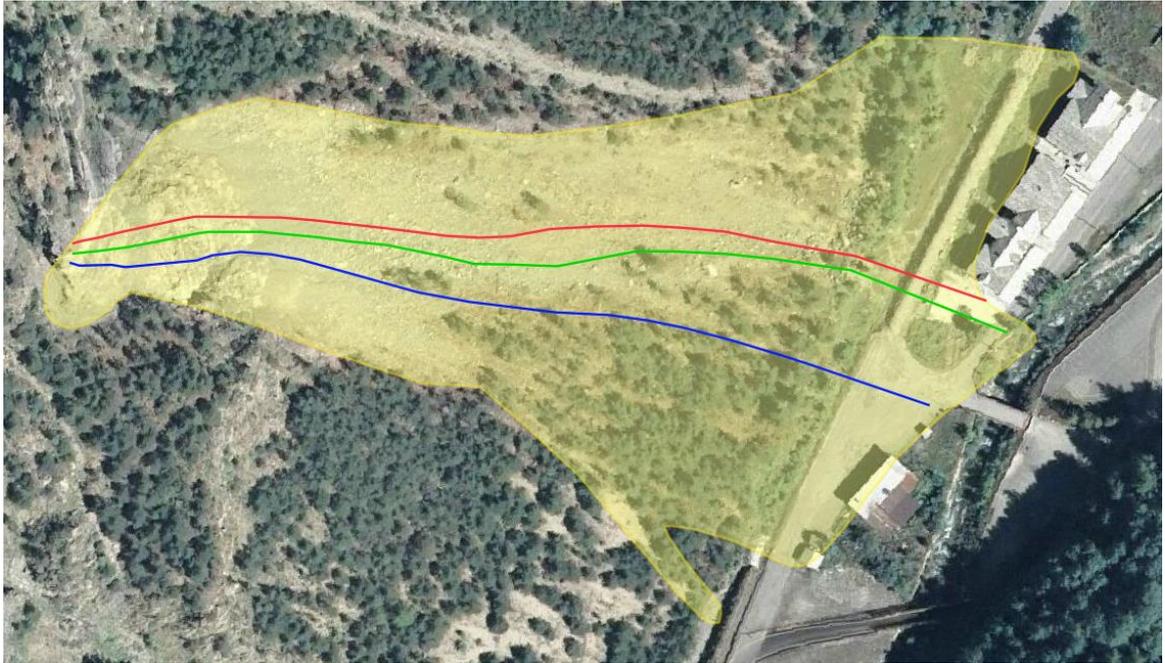


Fig. 5.3 – Proiezione orizzontale del poligono, sito a Bardonecchia, sulle ortofotografie (2010) fornite dalla Regione Piemonte. La spezzata blu rappresenta il Profilo 1, la spezzata verde il Profilo 2, la spezzata rossa il Profilo 3.

	L ₁ [m]	L ₂ [m]	L ₃ [m]	H ₁ [m]	H ₂ [m]	H ₃ [m]	β [°]	α [°]
Profilo 1	52.52	185.58	43.86	6.00	132.00	77.00	42.30	37.30
Profilo 2	69.38	208.13	40.66	10.00	152.00	73.00	42.10	36.50
Profilo 3	90.70	172.78	45.55	25.00	126.00	84.00	43.90	37.30

Tab. 5.1 – Tabella che riporta i parametri geometrici caratteristici dei tre profili in esame.

Facendo riferimento alla tabella 5.1, si può immediatamente notare che i *Geometric Angles* α , risultano assumere valori molto simili tra di loro (valore medio: 37,0°) e ciò è come ci si aspetta se si considerano, come in questo caso, tre profili appartenenti allo stesso poligono e quindi con β simile.

Si procede, ora, alla determinazione degli angoli α^* applicando ai valori di β sopraindicati le correlazioni (3.2) e (3.3), al fine di identificare quale delle due risulti essere più rappresentativa per i profili oggetto di studio (fig. 5.5).

	$\alpha^* = 0.77 \cdot \beta + 4.24$ (3.2)	$\alpha^* = 0.928 \cdot \beta + 1.1383$ (3.3)
Profilo 1	36.8°	40.4°
Profilo 2	36.7°	40.2°
Profilo 3	38.0°	41.9°

Tab. 5.2 – Tabella che mostra i valori assunti dall'angolo α^* in seguito all'applicazione della correlazione (3.2) (in giallo) e della correlazione (3.3) (in fucsia).

Come si può osservare rapportando la tabella 5.2 con la tabella 5.1, è evidente che:

- I risultati derivanti dall'impiego della correlazione (3.2) sono simili ai valori reali assunti dall'angolo α e il loro scostamento massimo da tale angolo è circa pari a 0.7° .
- I risultati derivanti dall'impiego della correlazione (3.3) appaiono apprezzabilmente differenti rispetto ai valori reali assunti dall'angolo α , con uno scostamento massimo di 4.6° , inaccettabile in termini di accuratezza. Inoltre, la correlazione proposta sovrastima il *Geometric Angle* e, di conseguenza, sottostima la lunghezza della zona di arresto; situazione, chiaramente, a sfavore di sicurezza.

In conclusione, si è confermato che l'equazione (3.3), che interpola la massima distanza percorsa da un crollo in roccia all'interno dei poligoni ubicati in Val Germanasca, non è rappresentativa se applicata ad un contesto geografico differente. D'altra parte, la correlazione (3.2) proposta da Keylock e Domaas (1999) risulta essere affidabile anche per il caso studio qui proposto.

5.2- CREAZIONE ED ANALISI DI VERSANTI VIRTUALI

Con lo scopo di verificare ulteriormente l'attendibilità dell' α - β *Model* per pendii con β costante ma con differente estensione della zona di transito e di indagare su come influisce la densità di vegetazione ad alto fusto lungo una parete rocciosa interessata da un crollo in roccia, il presente capitolo sarà così di seguito organizzato:

- Il paragrafo 5.2.1 chiarirà tutti gli aspetti relativi alla costruzione e all'implementazione sul software RockyFor3D di un versante virtuale.
- Il paragrafo 5.2.2 sarà utilizzato per indagare sui risultati derivanti dall'applicazione della correlazione (3.2) ad un versante virtuale, di seguito indicato come *Versante Standard*, al fine di valutare se tale correlazione risulti essere rappresentativa.
- Il paragrafo 5.2.3 tratterà il confronto dei risultati ottenuti dall'applicazione dell' α - β *Model* al *Versante Standard* con quelli ricavati dall'impiego della stessa procedura su altri due versanti virtuali, creati a partire dal *Versante Standard* ma con caratteristiche geometriche differenti, di seguito evidenziate.

5.2.1 - CREAZIONE DEI VERSANTI VIRTUALI

La creazione di un versante virtuale e la sua implementazione sul software RockyFor3D può presentare numerose difficoltà e complicazioni a seconda della precisione che si ricerca e, di conseguenza, dell'affidabilità dei risultati voluta.

Come enunciato nel capitolo 1 di questo elaborato, la prima fase di costruzione di un versante virtuale è contrassegnata dalla realizzazione del DTM che, in questo caso, è stato ottenuto implementando su QGIS una griglia di coordinate x, y e z.

Il software RockyFor3D necessita, poi, di diversi dati di input (forniti come mappe raster) al fine di determinare correttamente l'interazione del fenomeno gravitativo con la parete rocciosa. In particolare, è indispensabile indicare: i) la posizione di ogni cella sorgente in relazione alle coordinate assegnate al DTM; ii) le dimensioni, la forma e la densità dei blocchi in ogni cella sorgente; iii) la scabrezza del versante in ogni suo punto; iv) la tipologia di suolo, espressa come elasticità del terreno; v) il numero di alberi per ettaro all'interno di ogni cella e il loro diametro medio.

Ognuno di questi elementi viene definito graficamente tramite uno shapefile e le sue caratteristiche vengono ad esso assegnate attraverso un coefficiente numerico intero o decimale, a seconda del parametro considerato.

In aggiunta a quanto appena evidenziato, è importante valutare attentamente la larghezza del versante e la lunghezza della zona di arresto al fine di evitare situazioni critiche quali la caduta di massi al di fuori della superficie. Questo, infatti, potrebbe indurre il software ad errori. Per far fronte a tale problema è necessario osservare il grafico di output, restituito da RockyFor3D alla fine di ognuna simulazione, e verificare che nessuna traiettoria sia troppo vicina al perimetro del pendio sintetico o, addirittura, fuori da esso.

5.2.2 - RISULTATI OTTENUTI SUL VERSANTE STANDARD

Il primo versante virtuale ad essere stato creato è il *Versante Standard* (fig. 5.4) che presenta le seguenti caratteristiche geometriche:

- Lunghezza della zona di distacco pari a 398.8 metri.
- Lunghezza della zona di transito pari a 2455.9 metri.
- Larghezza dell'intero versante pari a 1400 metri.
- Angolo β pari a 45°.

Per l'avvio della simulazione con RockyFor3D, è stato considerato un DTM con risoluzione a 5 metri, creato tramite un foglio di calcolo Excel, e una sola *cella sorgente* da cui si immagina che avvenga il distacco di tutti i blocchi fittizi. Tale cella è stata posizionata centralmente alla zona di distacco, a 10 metri dal bordo superiore del DTM poiché le righe e le colonne più esterne di esso non vengono prese in considerazione dal programma. Naturalmente, l'angolo β è stato calcolato come l'arcotangente del rapporto tra la proiezione verticale e la proiezione orizzontale del segmento che unisce il baricentro della cella sorgente con il piede del pendio.

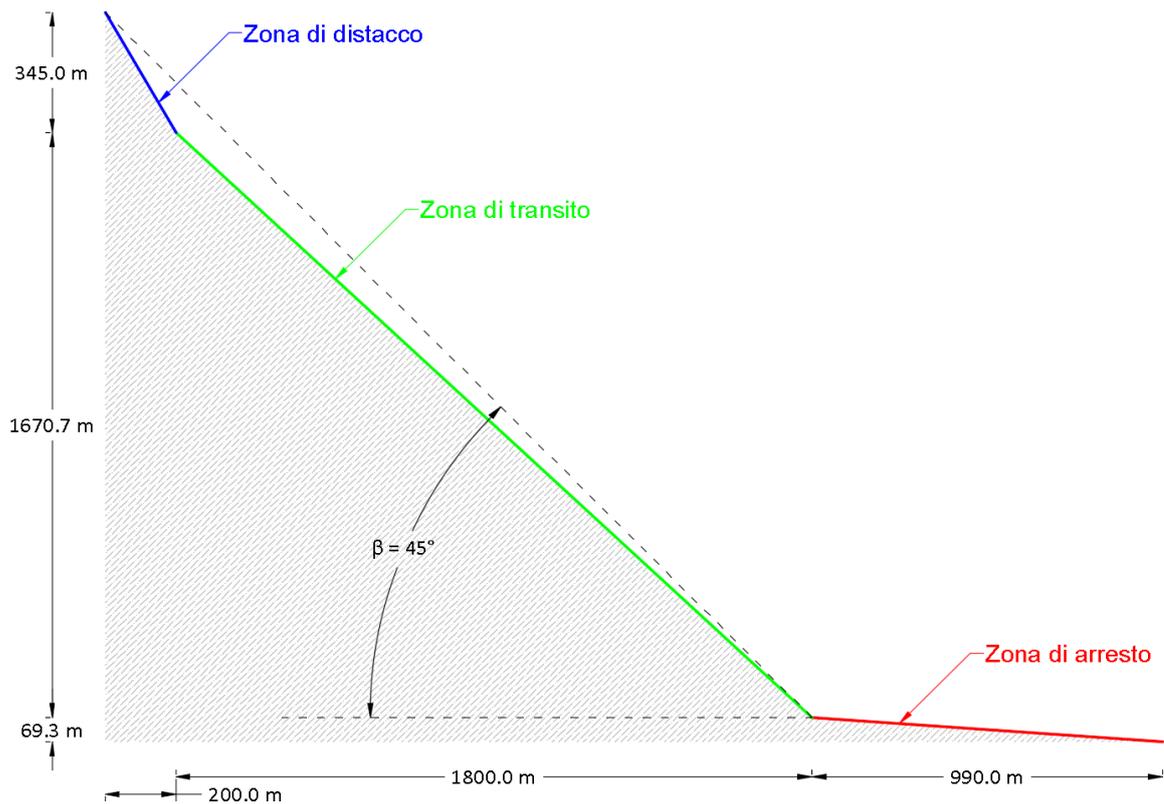


Fig. 5.4 – Dimensioni geometriche del “Versante Virtuale”.

Facendo riferimento al capitolo 1.3.1.1 per la spiegazione dettagliata di tutti i file base di input utili per l’avvio del software RockyFor3D, in tabella 5.3 sono riportati i valori che sono stati ad essi assegnati per la creazione del *Versante Standard*.

Mappa raster	Valori	U.M.	Note	
<i>rockdensity.asc</i>	2500	[kg/m ³]	-	
<i>d1.asc</i>	1	[m]	-	
<i>d2.asc</i>	1	[m]	-	
<i>d3.asc</i>	1	[m]	-	
<i>blshape.asc</i>	1	-	Blocco parallelepipedo	
<i>rg70.asc</i>	0.05	[m]	-	
<i>rg20.asc</i>	0.05	[m]	-	
<i>rg10.asc</i>	0.05	[m]	-	
<i>soiltype.asc</i>	<u>Area di distacco</u>	4	-	Suolo compatto con detriti di diametro > 10 cm
	<u>Area di transito</u>	4	-	Suolo compatto con detriti di diametro > 10 cm
	<u>Area di arresto</u>	1	-	Suolo con granulometria fine

Tab. 5.3 – Dati base di input che per l’avvio della simulazione di RockyFor3D sul versante standard.

È ora importante introdurre il discorso inerente alla vegetazione.

Innanzitutto, si è deciso di considerare la zona di transito come unica superficie ricoperta da alberi poiché l'influenza che la vegetazione ad alto fusto ha sui massi in movimento è maggiore all'interno di questa zona rispetto a quella di distacco (che a causa dell'elevata pendenza risulta raramente e scarsamente vegetata) o a quella di arresto (dove i blocchi in movimento arrivano con velocità ridotte che non sono sensibilmente alterate dagli eventuali impatti con i tronchi degli alberi).

Facendo riferimento al capitolo 1.3.1.2 per la spiegazione dettagliata di tutti i file di input utili per l'avvio di una simulazione che tenga conto della presenza di alberi al di sopra del versante in esame, in tabella 5.4 sono riportati i valori che sono stati ad essi assegnati per la creazione del *Versante Standard*.

Mappa raster	Valori	U.M.
<i>nrtrees.asc</i>	VARIABILE	-
<i>conif_percent.asc</i>	100	[%]
<i>dbhmean.asc</i>	35	[cm]
<i>dbhstd.asc</i>	1	[cm]

Tab. 5.4 – Dati di input che per l'avvio della simulazione con foresta di RockyFor3D sul versante standard

Per quanto riguarda il parametro *nrtrees.asc*, esso non ha un valore fisso poiché si è scelto di svolgere differenti simulazioni assumendo una differente densità di vegetazione, in modo da evidenziare possibili variazioni dell'angolo α per effetto di essa, mantenendo fissa la geometria del versante. In particolare, sono stati simulati 20 000 lanci fittizi per ogni classe di densità di vegetazione, in accordo a quelle definite nel capitolo 4.

Infine, per quanto concerne le reti paramassi, è stata ipotizzata la presenza di una sola rete di estensione pari 1400 metri, disposta perpendicolarmente alla linea di massima pendenza, con altezza pari a zero metri e con capacità di assorbimento pari a 0 KJ.

Sono di seguito riportati i risultati prodotti dal software di calcolo di dettaglio inerenti all'angolo α (tab. 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11), che saranno successivamente discussi, e l'istogramma che rappresenta la cumulata della totalità dei risultati (fig. 5.5).

Densità di vegetazione		0.00%	
Classe		0	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
37°	2	0.01%	0
38°	53	0.27%	0
39°	459	2.30%	0.03
40°	2937	14.69%	0.17
41°	8175	40.88%	0.58
42°	7219	36.10%	0.94
43°	1149	5.75%	1
44°	6	0.03%	1

Tab. 5.5 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, in caso di assenza di arbusti sulla zona di transito del versante.

Densità di vegetazione		10.00%	
Classe		1	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
37	1	0.01%	0
38	45	0.23%	0
39	402	2.01%	0.02
40	2473	12.37%	0.15
41	7845	39.23%	0.54
42	7607	38.04%	0.92
43	1615	8.08%	1
44	12	0.06%	1

Tab. 5.6 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 10%.

Densità di vegetazione		25.00%	
Classe		2	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
38	17	0.09%	0
39	208	1.04%	0.01
40	1707	8.54%	0.1
41	6312	31.56%	0.41
42	8404	42.02%	0.83
43	3211	16.06%	0.99
44	141	0.71%	1

Tab. 5.7 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 25%.

Densità di vegetazione		50.00%	
Classe		3	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
38	6	0.03%	0
39	51	0.26%	0
40	538	2.69%	0.03
41	2887	14.44%	0.17
42	6660	33.30%	0.51
43	7429	37.15%	0.88
44	2349	11.75%	1
45	38	0.19%	1
46	19	0.10%	1
47	9	0.05%	1
48	11	0.06%	1
49	2	0.01%	1

Tab. 5.8 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 50%.

Densità di vegetazione		75.00%	
Classe		4	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
39	9	0.05%	0
40	56	0.28%	0
41	482	2.42%	0.03
42	1820	9.13%	0.12
43	5427	27.23%	0.39
44	8482	42.56%	0.82
45	1763	8.85%	0.91
46	1106	5.55%	0.96
47	474	2.38%	0.98
48	221	1.11%	1
49	89	0.45%	1

Tab. 5.9 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 75%.

Densità di vegetazione		87.50%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
40	18	0.09%	0
41	118	0.60%	0.01
42	615	3.11%	0.04
43	2632	13.31%	0.17
44	7696	38.91%	0.56
45	3618	18.29%	0.74
46	2787	14.09%	0.88
47	1376	6.96%	0.95
48	618	3.12%	0.98
49	300	1.52%	1

Tab. 5.10 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia paria al 87.5%.

Densità di vegetazione		100.00%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
40	2	0.01%	0
41	18	0.09%	0
42	140	0.72%	0.01
43	844	4.33%	0.05
44	4232	21.74%	0.27
45	4345	22.32%	0.49
46	4709	24.19%	0.73
47	2876	14.77%	0.88
48	1538	7.90%	0.96
49	766	3.93%	1

Tab. 5.11 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia paria al 100%.

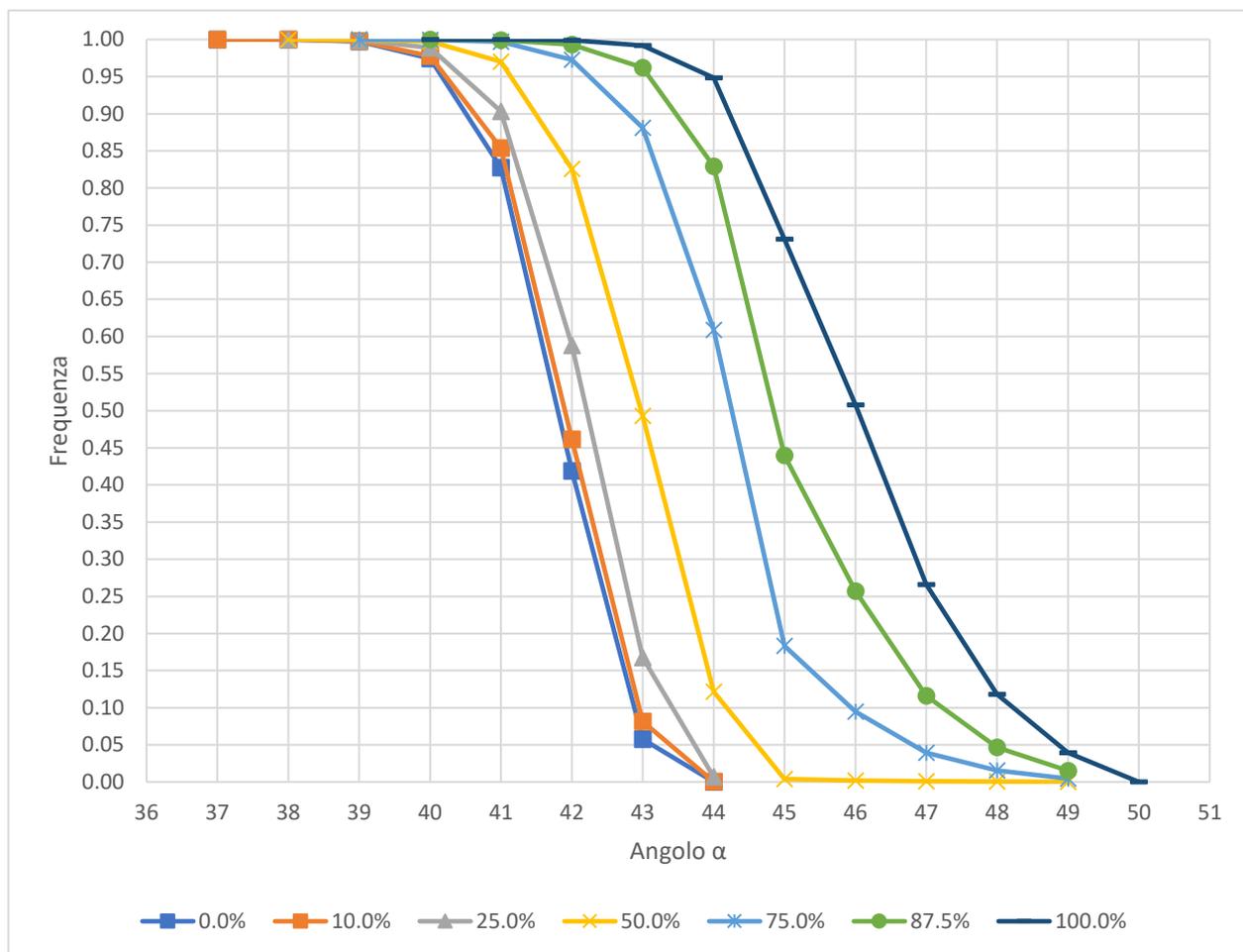


Fig. 5.5 – Grafico che rapporta, per diverse classi di densità di vegetazione, i valori assunti dall'angolo α (asse delle ascisse) con la cumulata di frequenza (asse delle ordinate).

Osservando le tabelle soprariportate, in riferimento alla geometria del *Versante Virtuale*, si evince che:

- In assenza di vegetazione ad alto fusto, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 39° per il 99.7% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 1, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 39° per il 99.8% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 2, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 40° per il 98.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 3, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 40° per il 99.7% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 4, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 41° per il 99.7% delle traiettorie simulate.

- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 5, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 42° per il 99.3% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto del 100%, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 43° per il 99.2% delle traiettorie simulate.

È quindi evidente che, più è alta la concentrazione di arbusti lungo la zona di transito di un poligono colpito da un crollo in roccia, maggiore sarà l'energy line angle (α) che contraddistingue il poligono stesso e, di conseguenza, minore sarà la massima distanza percorsa dal fenomeno gravitativo di versante (fig. 5.6). Quanto appena enunciato è, chiaramente, attribuibile al ruolo degli alberi sul fenomeno di caduta massi che, in seguito agli impatti che i blocchi in movimento hanno con essi, tendono ad attenuare l'energia cinetica dei blocchi stessi e a ridurre la velocità, con conseguente riduzione dello spazio da loro percorso.

Applicando, ora, la correlazione (3.2) proposta da Keylock e Domaas (1999) al *Versante Standard*, l'angolo α risulta essere pari a 39° .

Confrontando tale risultato con i risultati esposti nelle tabelle 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, è chiaro che la correlazione $\alpha^* = 0.77 \cdot \beta + 4.24$ risulta identificare in maniera estremamente accurata il valore dell'angolo α in assenza di alberi lungo il versante e ciò è chiaramente a favore di sicurezza. Infatti, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto risulti essere maggiore di zero, l'angolo in esame assumerebbe valori sempre maggiori, andando a ridurre, perciò, la lunghezza della zona di arresto caratteristica del poligono.

Al fine di fornire una trattazione più completa e chiara si è deciso di testare ulteriormente la correlazione (3.3), ottenuta con riferimento ai poligoni della Val Germanasca, nonostante essa fosse già risultata non rappresentativa per il caso in Val di Susa.

Applicando tale equazione, l'angolo α risulta essere pari a 43° e, perciò, è evidente che la correlazione $\alpha^* = 0.928 \cdot \beta + 1.1383$ sovrastima l'angolo in esame essendo largamente a sfavore di sicurezza e dimostrandosi, per tale motivo, ancora una volta non esportabile in altri contesti.

5.2.3 - RISULTATI OTTENUTI AL VARIARE DELLA LUNGHEZZA DEL PENDIO

La creazione degli altri due versanti virtuali sopracitati, di seguito nominati *Versante Breve* e *Versante Lungo*, è stata condotta a partire dalla geometria del *Versante Standard*. In particolare, sia per il *Versante Breve* che per il *Versante Lungo*, si è deciso di mantenere fissi e costanti i valori assunti dall'angolo β e dalle inclinazioni della zona di distacco, di transito e di arresto caratteristici del *Versante Standard* e di variare alcune caratteristiche geometriche.

Per quanto riguarda il *Versante Breve*:

- La lunghezza della zona di transito è stata dimezzata, risultando perciò essere pari a 1227.9 metri.

- La lunghezza della zona di distacco è stata anch'essa ridotta alla metà del valore di partenza (199.4 metri) al fine di mantenere costante l'angolo β , pari a 45°.
- La larghezza dell'intero versante è rimasta invariata e pari a 1400 metri.

Per quanto concerne, invece, il *Versante Lungo*:

- La lunghezza della zona di transito è stata raddoppiata, risultando perciò essere pari a 4911.7 metri.
- La lunghezza della zona di distacco è stata anch'essa raddoppiata (797.6 metri) al fine di mantenere costante l'angolo β , pari a 45°.
- La larghezza dell'intero versante è rimasta invariata e pari a 1400 metri.

In aggiunta, sia per il *Versante Breve* che per il *Versante Lungo*, tutti i dati di input quali le dimensioni, il volume, la forma e la densità dei massi in movimento, la posizione delle celle sorgenti, la scabrezza e la tipologia di suolo della parete rocciosa e, infine, la specie e il diametro degli alberi, sono rimasti invariati rispetto ai valori impiegati per la caratterizzazione del *Versante Standard*.

Inoltre, per ognuno dei due versanti virtuali esaminati, si è deciso di svolgere, in conformità con quanto fatto per il *Versante Standard*, 20 000 lanci fittizi per ogni classe di densità di vegetazione ad alto fusto, in modo da confrontare i risultati ottenuti con quelli individuati nel paragrafo 5.2.2.

Sono di seguito riportate le tabelle che mostrano i valori che l'angolo α ha assunto per ogni versante virtuale, a seconda della densità di alberi del versante stesso.

Densità di vegetazione		0.00%	
Classe		0	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
32	2	0.01%	0
33	7	0.04%	0
34	45	0.23%	0
35	214	1.07%	0.01
36	732	3.66%	0.05
37	2000	10.00%	0.15
38	4216	21.08%	0.36
39	6245	31.23%	0.67
40	4948	24.74%	0.92
41	1510	7.55%	1
42	81	0.41%	1

a)

Densità di vegetazione		0.00%	
Classe		0	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
40	1	0.01%	0
41	26	0.13%	0
42	1448	7.24%	0.07
43	15498	77.49%	0.85
44	3027	15.14%	1

b)

Tab. 5.12 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, in caso di assenza di arbusti sulla zona di transito del versante. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		10.00%	
Classe		1	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
32	1	0.01%	0
33	7	0.04%	0
34	25	0.13%	0
35	155	0.78%	0.01
36	637	3.19%	0.04
37	1790	8.95%	0.13
38	3966	19.83%	0.33
39	5856	29.28%	0.62
40	5362	26.81%	0.89
41	2031	10.16%	0.99
42	167	0.84%	1
43	3	0.02%	1

a)

Densità di vegetazione		10.00%	
Classe		1	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
41	18	0.09%	0
42	1239	6.20%	0.06
43	15123	75.62%	0.82
44	3620	18.10%	1

b)

Tab. 5.13 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia paria al 10%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		25.00%	
Classe		2	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
32	2	0.01%	0
33	4	0.02%	0
34	26	0.13%	0
35	96	0.48%	0.01
36	420	2.10%	0.03
37	1275	6.38%	0.09
38	3048	15.24%	0.24
39	5386	26.93%	0.51
40	5875	29.38%	0.81
41	3192	15.96%	0.97
42	651	3.26%	1
43	25	0.13%	1

a)

Densità di vegetazione		25.00%	
Classe		2	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
41	11	0.06%	0
42	817	4.09%	0.04
43	13875	69.38%	0.74
44	5297	26.49%	1

b)

Tab. 5.14 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia paria al 25%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		50.00%	
Classe		3	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
33	1	0.01%	0
34	5	0.03%	0
35	25	0.13%	0
36	121	0.61%	0.01
37	468	2.34%	0.03
38	1416	7.08%	0.1
39	2916	14.58%	0.25
40	5070	25.36%	0.5
41	5580	27.91%	0.78
42	3378	16.89%	0.95
43	915	4.58%	0.99
44	46	0.23%	1
45	25	0.13%	1
46	23	0.12%	1
47	5	0.03%	1
48	1	0.01%	1
49	1	0.01%	1

a)

Densità di vegetazione		50.00%	
Classe		3	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
41	2	0.01%	0
42	272	1.36%	0.01
43	8265	41.33%	0.43
44	11318	56.60%	0.99
45	80	0.40%	1
46	30	0.15%	1
47	16	0.08%	1
48	6	0.03%	1
49	7	0.04%	1

b)

Tab. 5.15 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia paria al 50%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		75.00%	
Classe		4	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
34	1	0.01%	0
35	5	0.03%	0
36	20	0.10%	0
37	98	0.49%	0.01
38	331	1.66%	0.02
39	940	4.70%	0.07
40	2299	11.50%	0.18
41	4423	22.12%	0.41
42	5845	29.24%	0.7
43	4288	21.45%	0.91
44	666	3.33%	0.95
45	611	3.06%	0.98
46	241	1.21%	0.99
47	139	0.70%	1
48	61	0.31%	1
49	23	0.12%	1

a)

Densità di vegetazione		75.00%	
Classe		4	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
42	25	0.13%	0
43	2013	10.19%	0.1
44	12457	63.05%	0.73
45	2280	11.54%	0.85
46	1452	7.35%	0.92
47	805	4.07%	0.96
48	472	2.39%	0.99
49	254	1.29%	1

b)

Tab. 5.16 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 75%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		87.50%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
35	2	0.01%	0
36	8	0.04%	0
37	26	0.13%	0
38	139	0.70%	0.01
39	463	2.32%	0.03
40	1324	6.64%	0.1
41	3071	15.40%	0.25
42	5298	26.57%	0.52
43	5496	27.56%	0.79
44	1296	6.50%	0.86
45	1640	8.22%	0.94
46	683	3.42%	0.98
47	277	1.39%	0.99
48	153	0.77%	1
49	66	0.33%	1

a)

Densità di vegetazione		87.50%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
42	8	0.04%	0
43	500	2.61%	0.03
44	6993	36.52%	0.39
45	4067	21.24%	0.6
46	3241	16.92%	0.77
47	2131	11.13%	0.88
48	1366	7.13%	0.96
49	844	4.41%	1

b)

Tab. 5.17 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 87.50%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

Densità di vegetazione		100.00%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
36	4	0.02%	0
37	7	0.04%	0
38	44	0.22%	0
39	216	1.09%	0.01
40	613	3.08%	0.04
41	1848	9.30%	0.14
42	4044	20.34%	0.34
43	5751	28.93%	0.63
44	1809	9.10%	0.72
45	2916	14.67%	0.87
46	1438	7.23%	0.94
47	666	3.35%	0.97
48	351	1.77%	0.99
49	171	0.86%	1

a)

Densità di vegetazione		100.00%	
Classe		5	
α Angle [°]	Frequenza [-]	Frequenza [%]	Cumulata
42	1	0.01%	0
43	60	0.34%	0
44	2045	11.51%	0.12
45	3243	18.26%	0.3
46	4204	23.67%	0.54
47	3741	21.06%	0.75
48	2730	15.37%	0.9
49	1737	9.78%	1

b)

Tab. 5.18 – Tabella che mostra i risultati derivanti dall'analisi con RockyFor3D, nel caso in cui la densità di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito del versante sia pari al 100%. a) 'Versante Breve'; b) 'Versante Lungo'.

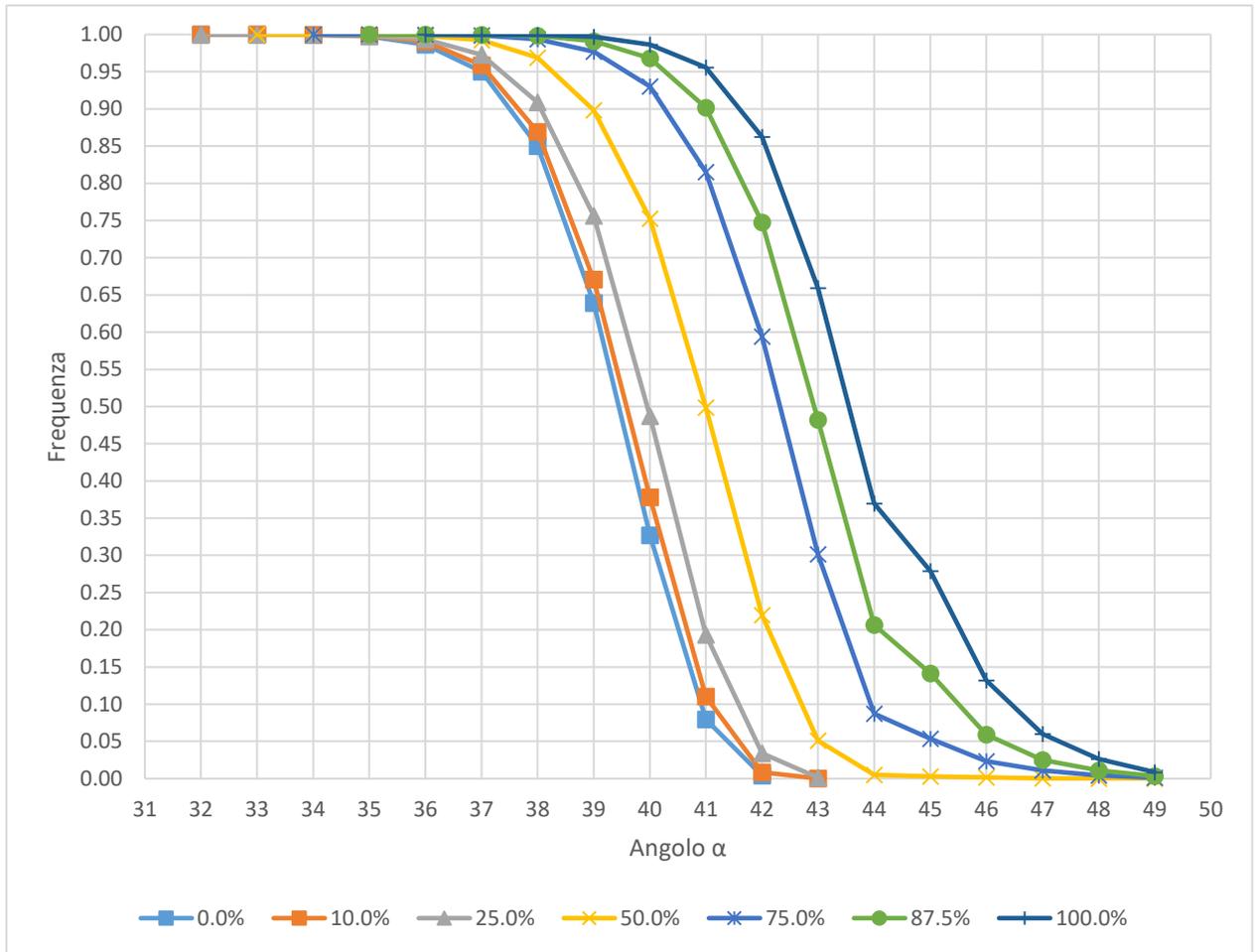


Fig. 5.6 – Grafico che rapporta, per diverse classi di densità di vegetazione, i valori assunti dall'angolo α (asse delle ascisse) con la cumulata di frequenza (asse delle ordinate) nel caso del 'Versante Breve'.

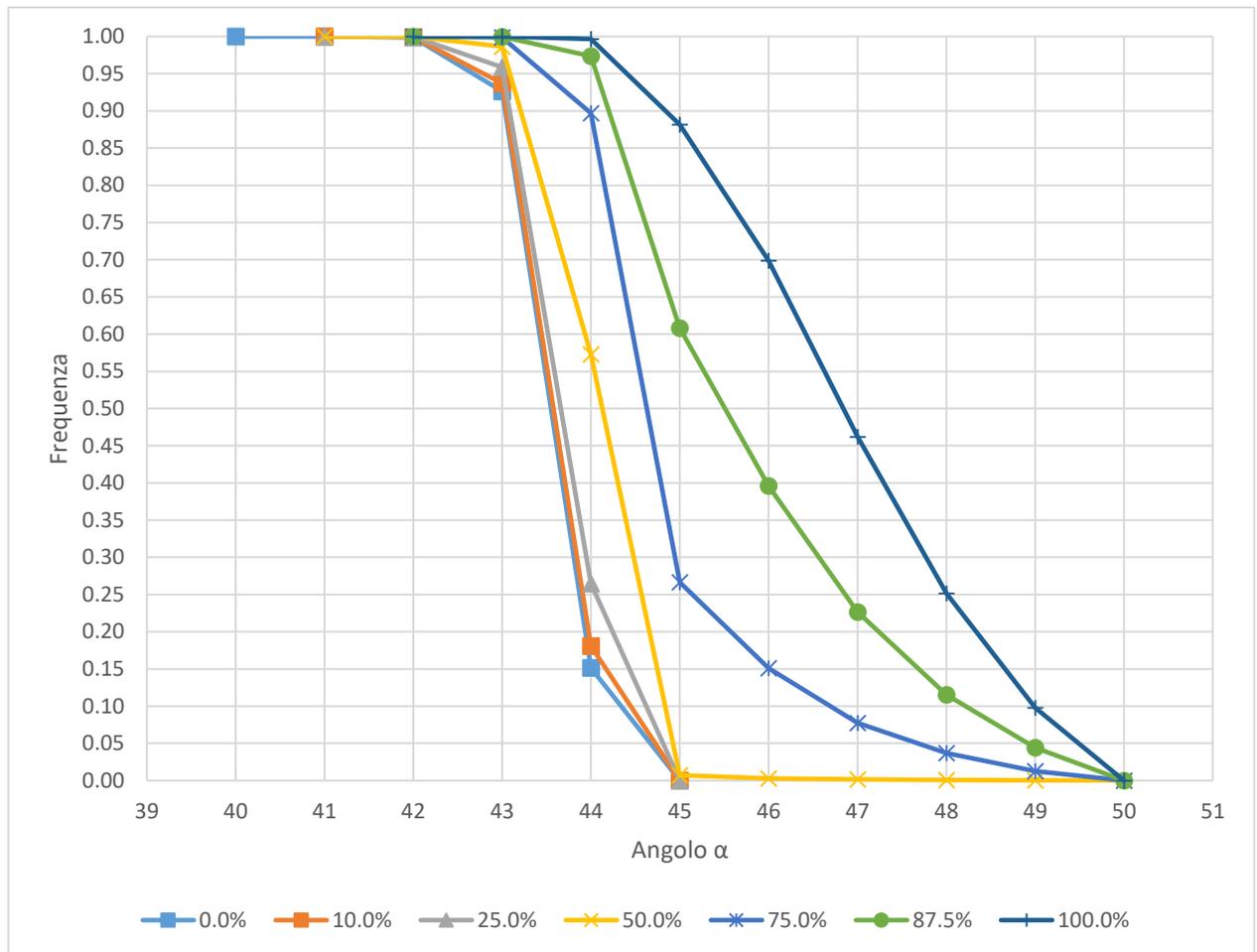


Fig. 5.7 – Grafico che rapporta, per diverse classi di densità di vegetazione, i valori assunti dall'angolo α (asse delle ascisse) con la cumulata di frequenza (asse delle ordinate) nel caso del 'Versante Lungo'.

Osservando le tabelle soprariportate e la figura 5.6, in riferimento alla geometria del *Versante Breve*, si evince che:

- In assenza di vegetazione ad alto fusto, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 36° per il 98.7% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 1, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 36° per il 99.1% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 2, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 36° per il 99.4% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 3, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 37° per il 99.2% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 4, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 38° per il 99.4% delle traiettorie simulate.

- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 5, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 39° per il 99.1% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto del 100%, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 40° per il 98.6% delle traiettorie simulate.

Per quanto riguarda il *Versante Lungo*, invece (fig. 5.7):

- In assenza di vegetazione ad alto fusto, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 42° per il 99.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 1, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 42° per il 99.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 2, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 42° per il 99.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 3, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 43° per il 98.6% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 4, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 43° per il 99.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto di classe 5, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 43° per il 99.9% delle traiettorie simulate.
- Se il pendio è caratterizzato da una densità di vegetazione ad alto fusto del 100%, l'angolo α risulta essere maggiore o pari a 44° per il 99.7% delle traiettorie simulate.

Come emerge dall'osservazione dei risultati soprariportati e dal loro confronto con il valore dell'angolo α ricavato dall'applicazione della correlazione (3.2) ai casi in esame (si ricorda che il calcolo dell'angolo α^* , tramite l' α - β Model, si basa sulla determinazione di un'unica variabile, l'angolo β . Perciò, essendo esso costante per tutti e tre i versanti virtuali discussi all'interno di questo capitolo, anche il valore di α^* rimane invariabile e pari a 39°), si evince che:

- Per quanto concerne il *Versante Breve*, la correlazione $\alpha^* = 0.77 \cdot \beta + 4.24$ non risulta essere conservativa, tranne che per pendii con densità di vegetazione ad alto fusto di classe 5. Ciò è attribuibile principalmente al fatto che i massi in movimento, considerando la breve lunghezza della zona di transito da essi percorsa, non dissipano una gran quantità di energia cinetica e, di conseguenza, raggiungono il piede del pendio con una velocità maggiore rispetto a quella dei blocchi in moto sul *Versante Standard*.

- Il *Versante Lungo*, invece, data l'importante lunghezza della zona di transito che lo contraddistingue, risulta essere ampiamente rappresentato dalla correlazione proposta da Keylock e Domaas, nonostante il risultato di questa non sia molto preciso poiché sottostima l'angolo α ($\alpha^* = 39^\circ$, $\alpha_{reale} = 42^\circ$ in assenza di arbusti sul pendio) e, di conseguenza, sovrastima la lunghezza della zona di arresto (rimanendo comunque a favore di sicurezza). Al contrario di quanto enunciato per il *Versante Breve*, questo comportamento è riconducibile al fatto che una gran parte dell'energia cinetica dei blocchi in moto viene dissipata lungo la zona di transito che, come precedentemente enunciato, ha un'estensione notevole.
- La variabilità dei risultati che caratterizza il *Versante Breve* ($\Delta = 4^\circ$) risulta essere maggiore rispetto a quella che contraddistingue il *Versante Lungo* ($\Delta = 2^\circ$).

Dalle considerazioni appena condotte si deduce che la correlazione $\alpha^* = 0.77 \cdot \beta + 4.24$ non risulta sempre rappresentativa o conservativa. È, perciò, probabilmente necessario identificare nuove o differenti equazioni che mettano in relazione la geometria del versante in esame con la lunghezza della zona d'arresto. Sarà perciò opportuno, nel seguito della ricerca, creare una vasta serie di nuovi versanti virtuali e di definire differenti classi di angoli β e di lunghezze della zona di transito in modo da ricercare un'eventuale correlazione caratteristica per ciascuna classe. Inoltre queste ipotetiche equazioni dovranno poi essere esaminate a fondo in maniera tale da poterle correlare non solo con la geometria del pendio ma anche con le classi di densità di vegetazione ad alto fusto definite in questa tesi di laurea.

CONCLUSIONI

Scopo di questa tesi di laurea è stato quello di identificare ed analizzare alcuni dei fattori principali che influiscono sulla definizione dell'area di invasione colpita da un fenomeno di caduta massi, con l'intento di determinare i parametri utili per migliorare la precisione di calcolo del codice QPROTO (Castelli et al., 2018) e di fornire agli operatori uno strumento per la definizione di tali parametri.

QPROTO prevede la creazione di un cono virtuale utilizzando come principali dati di input due angoli (*Energy Line Angle* e *angolo di dispersione laterale*), di ampiezza prefissata, che definiscono le dimensioni di cono di invasione, la cui intersezione con la superficie del versante determina la possibile zona colpita dal fenomeno franoso. Nel dettaglio, tale cono si svilupperà a partire dal proprio vertice, localizzato in un *punto di distacco* prestabilito, e si svilupperà in base ai suddetti parametri ricorrendo, unicamente, a considerazioni sulla topografia del pendio.

Basandosi su quanto appena enunciato, si è quindi svolta un'indagine dettagliata sulle procedure di calcolo preliminare presenti in letteratura, con particolare attenzione ai cosiddetti *metodi empirici* (ad esempio: *Height Function Model*, *α - β Model* e *Runout Ratio Model*) al fine di individuare una metodologia speditiva che permettesse di identificare l'*Energy Line Angle*. Tali metodi propongono correlazioni tra dati reali, quali la geometria del versante, il volume di distacco o le dimensioni fisiche del blocco in movimento lungo il versante, e l'estensione dell'area di invasione interessata da un fenomeno di caduta massi.

Le analisi svolte all'interno di questa tesi di Laurea Magistrale, sono state condotte su 22 casi di frane poligonali, rappresentati graficamente da poligoni la cui superficie coincide con l'area colpita dall'evento, che hanno avuto luogo in Val Germanasca (TO) e che sono state catalogate nel dataset SIFraP.

In riferimento al caso in esame, è apparso evidente che la procedura di calcolo che meglio interpreta le caratteristiche geometriche del versante, fornendo risultati più fedeli rispetto a quelli reali, è l' *α - β Model* (Keylock e Domaas, 1999), ovvero la metodologia che correla linearmente l'ampiezza dell'angolo α con quella dell'angolo β . Nel dettaglio, l'angolo α coincide con l'*Energy Line Angle*, definito dalla cotangente del rapporto tra la proiezione verticale e la proiezione orizzontale del segmento che congiunge il *punto di distacco* con il *punto di arresto*. L'angolo β , invece, è determinato attraverso la cotangente del rapporto tra la proiezione verticale e la proiezione orizzontale del segmento che unisce il *punto di distacco* con il *piè del pendio*.

In particolare, l'applicazione dell' *α - β Model* alle 22 frane poligonali della Val Germanasca ha permesso di individuare la correlazione $\alpha = 0.928 \cdot \beta + 1.1383$ (3.3) che risulta essere rappresentativa dei casi oggetto di studio. È, però, importante evidenziare che tale equazione si discosta da quella individuata dagli autori: $\alpha = 0.77 \cdot \beta + 4.24$ (3.2) ed è, quindi, possibile ipotizzare che la differenza tra le due correlazioni sia influenzata da altri fattori propri di ogni differente vallata e diversi da quelli geometrici su cui si è basata l'analisi.

Questi possono essere, ad esempio, la presenza o assenza di vegetazione ad alto fusto lungo la parete rocciosa considerata e le sue proprietà (specie, dimensioni del tronco, distribuzione lungo il versante), aspetti litologici e di copertura del versante e, infine, i fattori climatici e idrogeologici che caratterizzano la macroarea in esame.

Inoltre, l'equazione (3.2) appare coincidere in maniera sufficientemente accurata con il limite inferiore della successione dei risultati ricavati correlando i valori reali degli angoli α e β , in riferimento al caso in esame. Essa, è quindi rappresentativa per i crolli in roccia che interessano il territorio esaminato da Keylock e Domaas e conservativa per i fenomeni di caduta massi della Val Germanasca.

Infine, proprio per valutare l'influenza di aspetti differenti dalla geometria del pendio sulle correlazioni (3.2) e (3.3), si è deciso di applicare le due equazioni ad un caso studio localizzato in una vallata differente rispetto alla Val Germanasca, la Val di Susa, sottolineando che l'equazione (3.3) non è rappresentativa se applicata ad un contesto geografico differente. La correlazione (3.2), invece, risulta essere conservativa anche per questo caso studio.

Al fine di esaminare questi aspetti in maniera più accurata, si è quindi deciso di relazionare l' α - β Model ad un altro parametro: la densità di vegetazione ad alto fusto presente sul versante, la cui incidenza sull'evento franoso è stata ritenuta fondamentale. Per fare ciò si è definita, per ognuna delle 22 frane poligonali della Val Germanasca, una concentrazione media di alberi all'interno della sua area di invasione. Successivamente, sono state identificate 5 differenti classi di densità di vegetazione e, infine, ognuna delle classi è stata popolata con i poligoni ad essa corrispondenti ed analizzata per individuare eventuali variazioni della correlazione (3.3) in funzione della concentrazione di alberi. Dagli studi condotti, si è quindi rilevato che, in riferimento ai casi della Val Germanasca studiati, la densità di vegetazione ad alto fusto non altera in modo significativo la correlazione (3.3) ma rimane, però, chiara l'influenza della vegetazione stessa sulla lunghezza della zona percorsa dai blocchi distaccatosi. Ad aree meno vegetate, infatti, corrispondono angoli α (e β) minori (i massi percorreranno un percorso di lunghezza maggiore prima di arrestarsi) mentre, al contrario, ad aree con una consistente presenza di alberi corrispondono angoli α (e β) maggiori.

Come precedentemente citato, è importante osservare che la geometria della parete rocciosa e la densità di vegetazione che la contraddistingue non sono gli unici parametri che influiscono sulla propagazione dell'evento franoso; al contrario, esistono numerosi altri fattori che possono portare ad una variazione apprezzabile della lunghezza della zona di arresto. Per tale motivo si è quindi deciso di procedere con un'ulteriore studio che relazionasse direttamente la geometria di una parete rocciosa con la sua densità di vegetazione, attraverso analisi parametriche di tre versanti virtuali, creati attraverso il software di dettaglio RockyFor3D.

I risultati di tali analisi hanno evidenziato che la correlazione (3.2) non risulta essere sempre rappresentativa e/o conservativa ma che è necessario identificare nuove o differenti

equazioni che mettano in relazione la geometria del versante in esame con la lunghezza della zona d'arresto.

È ora opportuno sottolineare che la densità di vegetazione ad alto fusto, a meno che non si disponga di una cartografia specifica, risulta di più complicata stima rispetto alle caratteristiche geometriche del pendio; infatti, al fine di valutarlo, è necessario applicare una delle seguenti procedure:

- Se si ha a disposizione, oltre al DTM, anche un DSM (Digital Surface Model) dell'area in esame, ovvero una rappresentazione digitale della superficie terrestre comprensiva di tutti gli oggetti su di essa presenti, è possibile determinare la densità di vegetazione ad alto fusto semplicemente sottraendo il DTM dal DSM e calcolando la percentuale di spazio occupato dagli arbusti così identificati rispetto alla totalità dello spazio oggetto di studio.
- Se non si ha a disposizione un DSM o una cartografia specifica, come per i casi esaminati all'interno di questo elaborato, la definizione della densità di alberi è più incerta. In questa tesi, infatti, la regione interessata è stata suddivisa in celle ed è stata individuata, tramite la consultazione di ortofotografie, la quantità di celle al cui interno vi è visivamente presente vegetazione ad alto fusto. La densità di suolo vegetato è stata, quindi, calcolata in percentuale tramite una semplice divisione tra la quantità di celle caratterizzate dalla presenza di alberi e la totalità delle celle in esame.

Nonostante quanto appena dichiarato, la stima a priori del parametro sopra discusso risulta, comunque, non troppo complessa soprattutto in confronto alla determinazione di altri fattori quali, ad esempio, il volume della massa distaccatosi o le sue caratteristiche chimico-fisiche. Perciò, nell'ottica di un futuro in cui cartografie specifiche e i DSM delle regioni montuose a medio ed alto rischio siano disponibili, facilmente implementabili sui principali software GIS e sempre più precisi, si ritiene possibile che la densità di vegetazione ad alto fusto sia di più facile valutazione, permettendo così di incrementare la precisione delle metodologie preliminari, senza accrescerne i tempi di calcolo.

Sebbene la semplicità nell'individuazione dei termini caratteristici per la determinazione della massima distanza coperta da un crollo in roccia sia un fattore determinante, è importante definire gli errori che essa può generare.

In primis, il DTM non fornisce informazioni precise e dettagliate sull'area oggetto di studio ma presenta, invece, una risoluzione caratteristica il cui valore indica la dimensione del lato delle differenti celle quadrate che lo compongono. Si ricorda, infatti, che ad ogni cella è assegnata una sola quota che corrisponde alla quota del baricentro della cella stessa. È, ora, ovvio che il cambiamento di pendenza che evidenzia la divisione tra la zona di distacco, di transito e di arresto, non corrisponde necessariamente al baricentro di una cella. Ciò, chiaramente, può condurre a degli errori di calcolo che sono tanto maggiori quanto più è breve l'estensione del profilo considerato. Infatti, per un profilo con una lunghezza elevata, l'eventuale errore di valutazione dei confini delle tre aree caratteristiche ha una bassa

incidenza rispetto alle dimensioni delle aree stesse mentre, nel caso in cui si consideri una sezione con un'estensione ridotta, l'errore inciderebbe notevolmente sul risultato finale.

In aggiunta, è bene sottolineare che le metodologie di calcolo preliminare sono generalmente sviluppate tramite l'utilizzo di back-analyses su casi realmente avvenuti e documentati da geologi professionisti. Essi, però, non hanno spesso la possibilità di ricreare perfettamente il reale svolgimento dell'evento franoso e di stimare precisamente tutti i parametri che influenzano il fenomeno di caduta massi in esame quali ad esempio i volumi coinvolti o la forma degli elementi in moto poiché, in seguito agli urti lungo il pendio, essi si frammentano rendendo così impossibile risalire alla loro configurazione iniziale.

Ovviamente questi errori sono in gran parte computati e tenuti in considerazione dalle correlazioni caratteristiche ma è bene, comunque, conoscerli e tenerne conto nella valutazione del risultato finale, soprattutto per versanti con una lunghezza molto ridotta o con volumi di distacco molto estesi.

A partire da questa affermazione e dagli esiti dei calcoli sui versanti virtuali analizzati nel capitolo 5, si è deciso di proseguire il lavoro qui iniziato al fine di individuare una correlazione generale o più correlazioni specifiche che risultino rappresentative e sufficientemente precise per la totalità dei versanti a cui vengono applicate.

Per fare ciò è necessario, innanzitutto, portare avanti i calcoli iniziati nel capitolo 5 creando numerosi altri versanti virtuali (tramite un software di dettaglio), caratterizzati da aspetti in comune e da parametri chiaramente differenti. Una volta creato un ampio database di essi, si potrà poi procedere con l'analisi dei differenti casi nell'ottica di riconoscere e catalogare all'interno di una stessa classe tutti quei versanti sintetici che sono contraddistinti da un'unica equazione che metta in relazione la geometria della parete con la massima distanza coperta da un crollo in roccia ipotizzato su di essa. Una volta raggiunto questo obiettivo sarà di primaria importanza valutare l'influenza della densità di vegetazione sui risultati trovati e determinare eventuali variazioni nelle correlazioni identificate al fine di migliorarne l'accuratezza, senza aumentare apprezzabilmente il tempo impiegato nella valutazione preliminare del fenomeno di caduta massi.

Infine, si suggerisce di esaminare la possibilità di creare un'unica correlazione che tenga conto di quanto appena evidenziato o, qualora questo non fosse possibile, di implementare differenti correlazioni per le differenti classi determinate.

APPENDICE A

Poligono	Profilo	L ₁	L ₂	L ₃	H ₁	H ₂	H ₃	α	β	θ
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[°]	[°]
1	0	16.50	132.00	33.00	4.39	108.88	61.72	43.95	45.96	14.90
	1	0.00	143.00	33.00	0.00	111.65	62.29	44.66	44.66	-
	2	16.50	121.00	11.00	7.87	99.75	33.37	43.51	45.24	25.50
2	0	16.50	49.50	22.00	7.86	49.56	20.21	41.42	44.30	25.47
	1	16.50	33.00	38.50	5.43	29.29	41.46	40.88	44.70	18.23
	2	11.00	44.00	22.00	1.97	42.85	23.31	41.50	45.07	10.14
3	0	16.50	44.00	5.50	9.47	32.95	7.47	37.08	39.23	29.85
	1	22.00	38.50	5.50	12.20	32.67	7.47	38.42	42.37	29.00
	2	11.00	44.00	11.00	6.29	32.24	13.23	38.11	39.58	29.77
4	0	22.00	335.50	3.00	7.39	220.43	22.50	32.66	35.67	18.57
	1	0.00	330.00	44.00	0.00	203.48	31.76	32.17	32.17	-
	2	22.00	258.50	22.00	11.29	151.11	18.68	30.91	31.19	27.17
5	0	0.00	330.00	22.00	0.00	211.86	32.01	34.71	34.71	-
	1	0.00	308.00	22.00	0.00	205.23	31.18	35.62	35.62	-
	2	0.00	165.00	5.50	0.00	102.99	13.49	34.34	34.34	-
6	0	49.50	121.00	5.50	15.05	71.42	6.25	27.78	31.55	16.91
	1	0.00	93.50	22.00	0.00	55.67	19.61	33.10	33.10	-
	2	11.00	38.50	11.00	2.98	26.30	9.72	32.81	36.04	15.17
7	0	11.00	148.50	22.00	6.74	119.26	24.61	39.69	40.16	31.49
	1	33.00	99.00	49.50	14.13	78.68	57.66	39.66	42.56	23.18
	2	27.50	93.50	49.50	11.76	76.16	48.54	38.67	41.09	23.15
8	0	5.50	148.50	49.50	0.38	58.73	35.08	24.84	25.35	3.92
	1	33.00	170.50	16.50	8.21	87.26	37.15	31.08	33.64	13.97
	2	49.50	104.50	33.00	15.74	60.90	42.90	32.59	37.05	17.64
9	0	5.50	121.00	22.00	0.00	36.99	21.20	21.39	22.14	0.00
	1	11.00	99.00	27.50	1.32	33.97	29.98	25.40	26.82	6.86
	2	33.00	60.50	16.50	13.52	30.20	17.39	29.05	31.72	22.28
10	0	27.50	231.00	16.50	14.41	137.34	24.64	32.68	33.20	27.66
	1	0.00	247.50	27.50	0.00	138.75	32.98	31.98	31.98	-
	2	0.00	286.00	11.00	0.00	179.13	8.98	32.35	32.35	-
11	0	0.00	297.00	16.50	0.00	230.66	48.30	41.66	41.66	-
	1	0.00	308.00	77.00	0.00	202.02	78.41	36.07	36.07	-
	2	49.50	115.50	60.50	13.25	62.56	67.03	32.35	36.36	14.98
12	0	0.00	165.00	27.50	0.00	121.72	27.73	37.82	37.82	-
	1	0.00	214.50	11.00	0.00	149.86	47.85	41.24	41.24	-
	2	0.00	209.00	27.50	0.00	137.00	87.11	43.46	43.46	-

Tab. A.1a – Tabella riportante i parametri geometrici dei 22 poligoni in esame.

Poligono	Profilo	L ₁	L ₂	L ₃	H ₁	H ₂	H ₃	α	β	θ
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[°]	[°]
13	0	77.00	170.50	49.50	19.81	116.14	65.94	34.21	39.61	14.43
	1	82.50	220.00	71.50	18.07	149.15	73.47	32.76	37.37	12.35
	2	93.50	187.00	99.00	22.81	118.80	100.05	32.49	37.42	13.71
14	0	22.00	225.50	66.00	1.02	153.88	87.01	37.66	39.57	2.66
	1	49.50	192.50	93.50	6.37	130.57	107.36	36.06	39.76	7.33
	2	49.50	192.50	104.50	4.21	127.52	119.79	35.98	39.78	4.86
15	0	5.50	11.00	11.00	3.42	14.61	6.08	41.25	43.24	31.87
	1	5.50	22.00	11.00	1.26	25.08	8.80	42.39	45.75	12.87
	2	0.00	16.50	16.50	0.00	12.23	16.96	41.50	41.50	-
16	0	55.00	66.00	22.00	29.15	60.72	46.53	43.65	50.63	27.92
	1	0.00	93.50	27.50	0.00	80.26	57.33	48.67	48.67	-
	2	0.00	88.00	38.50	0.00	74.42	62.46	47.26	47.26	-
17	0	66.00	159.50	44.00	33.17	118.56	81.32	40.85	44.49	26.69
	1	66.00	176.00	49.50	20.68	86.96	107.67	36.45	40.80	17.40
	2	22.00	181.50	44.00	5.40	87.92	99.07	37.86	39.67	13.80
18	0	0.00	181.50	60.50	0.00	120.73	54.68	35.94	35.94	-
	1	0.00	275.00	38.50	0.00	190.24	51.60	37.65	37.65	-
	2	0.00	209.00	66.00	0.00	141.70	57.10	35.86	35.86	-
19	0	11.00	71.50	22.00	1.84	40.60	15.49	29.01	30.96	9.52
	1	27.50	88.00	11.00	13.45	59.81	16.65	35.40	37.68	26.06
	2	11.00	60.50	16.50	3.55	40.78	18.25	35.41	37.47	17.86
20	0	0.00	137.50	38.50	0.00	99.20	64.71	42.96	42.96	-
	1	0.00	154.00	49.50	0.00	101.07	75.71	40.98	40.98	-
	2	0.00	181.50	22.00	0.00	132.94	43.35	40.90	40.90	-
21	0	0.00	104.50	5.50	0.00	63.11	5.12	31.81	31.81	-
	1	0.00	77.00	16.50	0.00	48.90	12.04	33.10	33.10	-
	2	0.00	60.50	27.50	0.00	37.70	22.22	34.25	34.25	-
22	0	0.00	38.50	27.50	0.00	37.73	24.65	43.38	43.38	-
	1	0.00	55.00	11.00	0.00	50.26	14.37	44.40	44.40	-
	2	0.00	49.50	11.00	0.00	43.08	12.36	42.50	42.50	-

Tab. A.1b – Tabella riportante i parametri geometrici dei 22 poligoni in esame.

				Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante	Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1)
Poligono	Profilo	H ₂ [m]	H ₃ [m]	log(L ₁)	log(L ₁)*
1	0	108.88	61.72	1.22	1.72
	1	111.65	62.29	-	1.73
	2	99.75	33.37	1.22	1.64
2	0	49.56	20.21	1.22	1.42
	1	29.29	41.46	1.22	1.42
	2	42.85	23.31	1.04	1.4
3	0	32.95	7.47	1.22	1.24
	1	32.67	7.47	1.34	1.23
	2	32.24	13.23	1.04	1.28
4	0	220.43	22.50	1.34	1.84
	1	203.48	31.76	-	1.83
	2	151.11	18.68	1.34	1.72
5	0	211.86	32.01	-	1.84
	1	205.23	31.18	-	1.83
	2	102.99	13.49	-	1.59
6	0	71.42	6.25	1.69	1.46
	1	55.67	19.61	-	1.45
	2	26.30	9.72	1.04	1.20
7	0	119.26	24.61	1.04	1.66
	1	78.68	57.66	1.52	1.64
	2	76.16	48.54	1.44	1.61
8	0	58.73	35.08	0.74	1.52
	1	87.26	37.15	1.52	1.61
	2	60.90	42.90	1.69	1.55
9	0	36.99	21.20	0.74	1.36
	1	33.97	29.98	1.04	1.39
	2	30.20	17.39	1.52	1.29
10	0	137.34	24.64	1.44	1.70
	1	138.75	32.98	-	1.72
	2	179.13	8.98	-	1.75
11	0	230.66	48.30	-	1.88
	1	202.02	78.41	-	1.88
	2	62.56	67.03	1.69	1.63
12	0	121.72	27.73	-	1.67
	1	149.86	47.85	-	1.77
	2	137.00	87.11	-	1.81

Tab. A.2a – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1) ai 22 poligoni in esame.

				Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante	Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1)
Poligono	Profilo	H ₂ [m]	H ₃ [m]	log(L ₁)	log(L ₁)*
13	0	116.14	65.94	1.89	1.74
	1	149.15	73.47	1.92	1.81
	2	118.80	100.05	1.97	1.80
14	0	153.88	87.01	1.34	1.83
	1	130.57	107.36	1.69	1.83
	2	127.52	119.79	1.69	1.84
15	0	14.61	6.08	0.74	1.01
	1	25.08	8.80	0.74	1.18
	2	12.23	16.96	-	1.13
16	0	60.72	46.53	1.74	1.56
	1	80.26	57.33	-	1.65
	2	74.42	62.46	-	1.64
17	0	118.56	81.32	1.82	1.77
	1	86.96	107.67	1.82	1.76
	2	87.92	99.07	1.34	1.75
18	0	120.73	54.68	-	1.73
	1	190.24	51.60	-	1.84
	2	141.70	57.10	-	1.77
19	0	40.60	15.49	1.04	1.35
	1	59.81	16.65	1.44	1.45
	2	40.78	18.25	1.04	1.36
20	0	99.20	64.71	-	1.71
	1	101.07	75.71	-	1.73
	2	132.94	43.35	-	1.73
21	0	63.11	5.12	-	1.41
	1	48.90	12.04	-	1.37
	2	37.70	22.22	-	1.37
22	0	37.73	24.65	-	1.38
	1	50.26	14.37	-	1.39
	2	43.08	12.36	-	1.34

Tab. A.2b – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.1) ai 22 poligoni in esame.

Poligono	Profilo	β [°]	Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante		Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2)	
			α [°]	$\log\alpha$	α^* [°]	$\log\alpha^*$
1	0	45.96	43.95	1.64	39.63	1.60
	1	44.66	44.66	1.65	38.63	1.59
	2	45.24	43.51	1.64	39.08	1.59
2	0	44.3	41.42	1.62	38.35	1.58
	1	44.7	40.88	1.61	38.66	1.59
	2	45.07	41.50	1.62	38.94	1.59
3	0	39.23	37.08	1.57	34.45	1.54
	1	42.37	38.42	1.58	36.87	1.57
	2	39.58	38.11	1.58	34.72	1.54
4	0	35.67	32.66	1.51	31.70	1.50
	1	32.17	32.17	1.51	29.01	1.46
	2	31.19	30.91	1.49	28.25	1.45
5	0	34.71	34.71	1.54	30.97	1.49
	1	35.62	35.62	1.55	31.67	1.50
	2	34.34	34.34	1.54	30.68	1.49
6	0	31.55	27.78	1.44	28.53	1.46
	1	33.10	33.10	1.52	29.72	1.47
	2	36.04	32.81	1.52	31.99	1.51
7	0	40.16	39.69	1.60	35.16	1.55
	1	42.56	39.66	1.60	37.01	1.57
	2	41.09	38.67	1.59	35.88	1.55
8	0	25.35	24.84	1.40	23.76	1.38
	1	33.64	31.08	1.49	30.14	1.48
	2	37.05	32.59	1.51	32.77	1.52
9	0	22.14	21.39	1.33	21.29	1.33
	1	26.82	25.40	1.40	24.89	1.40
	2	31.72	29.05	1.46	28.66	1.46
10	0	33.20	32.68	1.51	29.81	1.47
	1	31.98	31.98	1.50	28.87	1.46
	2	32.35	32.35	1.51	29.15	1.46
11	0	41.66	41.66	1.62	36.32	1.56
	1	36.07	36.07	1.56	32.01	1.51
	2	36.36	32.35	1.51	32.24	1.51
12	0	37.82	37.82	1.58	33.36	1.52
	1	41.24	41.24	1.62	36.00	1.56
	2	43.46	43.46	1.64	37.70	1.58

Tab. A.3a – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2) ai 22 poligoni in esame.

Poligono	Profilo	β [°]	Parametri ricavati da analisi geometriche sul versante		Parametri ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2)	
			α [°]	$\log\alpha$	α^* [°]	$\log\alpha^*$
13	0	39.61	34.21	1.53	34.74	1.54
	1	37.37	32.76	1.52	33.01	1.52
	2	37.42	32.49	1.51	33.06	1.52
14	0	39.57	37.66	1.58	34.71	1.54
	1	39.76	36.06	1.56	34.85	1.54
	2	39.78	35.98	1.56	34.87	1.54
15	0	43.24	41.25	1.62	37.54	1.57
	1	45.75	42.39	1.63	39.47	1.60
	2	41.50	41.50	1.62	36.19	1.56
16	0	50.63	43.65	1.64	43.23	1.64
	1	48.67	48.67	1.69	41.72	1.62
	2	47.26	47.26	1.67	40.63	1.61
17	0	44.49	40.85	1.61	38.49	1.59
	1	40.80	36.45	1.56	35.65	1.55
	2	39.67	37.86	1.58	34.78	1.54
18	0	35.94	35.94	1.56	31.91	1.50
	1	37.65	37.65	1.58	33.23	1.52
	2	35.86	35.86	1.55	31.85	1.50
19	0	30.96	29.01	1.46	28.08	1.45
	1	37.68	35.40	1.55	33.25	1.52
	2	37.47	35.41	1.55	33.09	1.52
20	0	42.96	42.96	1.63	37.32	1.57
	1	40.98	40.98	1.61	35.80	1.55
	2	40.90	40.90	1.61	35.73	1.55
21	0	31.81	31.81	1.50	28.73	1.46
	1	33.10	33.10	1.52	29.72	1.47
	2	34.25	34.25	1.53	30.61	1.49
22	0	43.38	43.38	1.64	37.65	1.58
	1	44.40	44.40	1.65	38.43	1.58
	2	42.50	42.50	1.63	36.96	1.57

Tab. A.3b – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.2) ai 22 poligoni in esame.

Poligono	Profilo	L ₁ [m]	L ₂ [m]	L ₃ [m]	(L ₁ /L ₂₊₃)	(L ₁ /L ₂₊₃)*
1	0	16.50	132.00	33.00	0.10	-2.27
	1	0.00	143.00	33.00	0.00	-
	2	16.50	121.00	11.00	0.13	-4.05
2	0	16.50	49.50	22.00	0.23	-1.07
	1	16.50	33.00	38.50	0.23	1.09
	2	11.00	44.00	22.00	0.17	-12.01
3	0	16.50	44.00	5.50	0.33	0.00
	1	22.00	38.50	5.50	0.50	-1539.47
	2	11.00	44.00	11.00	0.20	0.28
4	0	22.00	335.50	3.00	0.06	-0.29
	1	0.00	330.00	44.00	0.00	-
	2	22.00	258.50	22.00	0.08	0.23
5	0	0.00	330.00	22.00	0.00	-
	1	0.00	308.00	22.00	0.00	-
	2	0.00	165.00	5.50	0.00	-
6	0	49.50	121.00	5.50	0.39	-0.22
	1	0.00	93.50	22.00	0.00	-
	2	11.00	38.50	11.00	0.22	1.01
7	0	11.00	148.50	22.00	0.06	-0.62
	1	33.00	99.00	49.50	0.22	0.91
	2	27.50	93.50	49.50	0.19	1.50
8	0	5.50	148.50	49.50	0.03	-0.41
	1	33.00	170.50	16.50	0.18	0.15
	2	49.50	104.50	33.00	0.36	-0.62
9	0	5.50	121.00	22.00	0.04	-1.22
	1	11.00	99.00	27.50	0.09	23.18
	2	33.00	60.50	16.50	0.43	-0.98
10	0	27.50	231.00	16.50	0.11	-2.00
	1	0.00	247.50	27.50	0.00	-
	2	0.00	286.00	11.00	0.00	-
11	0	0.00	297.00	16.50	0.00	-
	1	0.00	308.00	77.00	0.00	-
	2	49.50	115.50	60.50	0.28	-2.46
12	0	0.00	165.00	27.50	0.00	-
	1	0.00	214.50	11.00	0.00	-
	2	0.00	209.00	27.50	0.00	-

Tab. A.4a – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.3) ai 22 poligoni in esame.

Poligono	Profilo	L ₁ [m]	L ₂ [m]	L ₃ [m]	(L ₁ /L ₂₊₃)	(L ₁ /L ₂₊₃)*
13	0	77.00	170.50	49.50	0.35	-0.81
	1	82.50	220.00	71.50	0.28	-1.03
	2	93.50	187.00	99.00	0.33	6.16
14	0	22.00	225.50	66.00	0.08	-6.61
	1	49.50	192.50	93.50	0.17	-1.28
	2	49.50	192.50	104.50	0.17	-0.62
15	0	5.50	11.00	11.00	0.25	20.60
	1	5.50	22.00	11.00	0.17	-1.14
	2	0.00	16.50	16.50	0.00	-
16	0	55.00	66.00	22.00	0.63	43.63
	1	0.00	93.50	27.50	0.00	-
	2	0.00	88.00	38.50	0.00	-
17	0	66.00	159.50	44.00	0.32	-0.01
	1	66.00	176.00	49.50	0.29	0.57
	2	22.00	181.50	44.00	0.10	0.95
18	0	0.00	181.50	60.50	0.00	-
	1	0.00	275.00	38.50	0.00	-
	2	0.00	209.00	66.00	0.00	-
19	0	11.00	71.50	22.00	0.12	-1.74
	1	27.50	88.00	11.00	0.28	5.57
	2	11.00	60.50	16.50	0.14	-0.52
20	0	0.00	137.50	38.50	0.00	-
	1	0.00	154.00	49.50	0.00	-
	2	0.00	181.50	22.00	0.00	-
21	0	0.00	104.50	5.50	0.00	-
	1	0.00	77.00	16.50	0.00	-
	2	0.00	60.50	27.50	0.00	-
22	0	0.00	38.50	27.50	0.00	-
	1	0.00	55.00	11.00	0.00	-
	2	0.00	49.50	11.00	0.00	-

Tab. A.4b – Tabella che confronta i parametri ricavati da analisi geometriche sul versante con quelli ricavati dall'applicazione della correlazione (3.3) ai 22 poligoni in esame.

BIBLIOGRAFIA

Agliardi F., Crosta G., 2003. High Resolution Three-dimensional Numerical Modelling of Rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, pp. 455-471.

Aricò A., 2015. *Analisi di un fenomeno di caduta massi con un modello traiettografico tridimensionale: il caso di Melezet (Bardonecchia, TO)*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino, Italia.

ARPA Piemonte, Politecnico di Torino, 2008. *Progetto n°165 PROVIALP, Protezione della Viabilità Alpina*, pp.136-151.

Basile G., 2017. *Analisi dei Parametri per la Modellazione su Piccola Scala dei Crolli*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino, Italia.

Bozzolo D., Pamini R., 1986. Simulation of Rock Falls down a Valley Side. *Acta Mechanica* Vol. 63, pp. 113-130

Burrough P. A., McDonnell R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York.

Campus S., Castelli M., Grisolia M. et al., 2016. QPROTO - Una procedura in ambiente GIS per la stima a piccola scala della propagazione di crolli in roccia. *IX GFOSS DAY - Conferenza Italiana sul software geografico e sui dati geografici liberi*, Cagliari, pp. 38-39.

Castelli M., Pisani G., Scavia C., 2011. Geomechanical and Numerical Analysis of the Large Rosone Landslide. *IWL 2011 - The second Italian Workshop on Landslides*, Napoli, pp. 37-44.

Castelli M., Grisolia M., Barbero M. et al., 2018 (in pubblicazione). A New Procedure to Estimate Rockfall Hazard at a Regional Scale: the QPROTO tool.

Copons R., 2004. *Avaluacio de la perillositat de caigudes de blocs a 'Andorra la Vella (Principat d'Andorra)*, Ph.D. thesis, University of Barcelona, Barcelona, Spain.

Copons R., Vilaplana J. M., 2008. Rockfall Susceptibility Zoning at a Large Scale: From Geomorphological Inventory to Preliminary Land Use Planning. *Engineering Geology*, Vol. 102, pp. 142-151.

Copons R., Vilaplana J. M., Linares R., 2009. Rockfall Travel Distance Analysis by Using Empirical Models (Solà d'Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, No. 6, pp. 2107-2118.

Corominas J., 1996a. The Angle of Reach as a Mobility Index for Small and Large Landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 260-271.

Corominas J., 1996b. The Angle of Reach as a Mobility Index for Small and Large Landslides: Reply. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp. 1029-1031.

Del Maschio L., Gozza G., Piacentini D., Pizziolo M., Soldati M., 2007. Previsione delle Traiettorie di Blocchi Mobilizzati da Frane di Crollo: Applicazione e Confronto di Modelli. *Giornale di Geologia Applicata*, Vol. 6, pp. 33-44.

- Dorren L. K. A., 2003. A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approaches. *Progress in Physical Geography*, Vol.27, No. 1, pp. 69-87.
- Dorren L. K. A., Seijmonsbergen A. C., 2003. Comparison of Three GIS-based Models for Predicting Rockfall Runout Zones at a Regional Scale. *Geomorphology*, Vol. 56, pp. 49-64.
- Dorren L. K. A., 2010. *Rockyfor3D Revealed: Description of the Complete 3D Rockfall Model*. ecorisQ, Saint Hilaire du Touvet, France. <http://www.ecorisq.org>.
- Dorren L. K. A., Domaas U., Kronholm K., Labiouse V., 2013. Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones. *Rockfall Engineering* (Lambert S., Nicot F., eds.), Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons Inc., pp. 143-173.
- Duarte R. M., Marquínez J., 2002. The Influence of Environmental and Lithologic Factors on Rockfall at a Regional Scale: An Evaluation Using GIS. *Geomorphology*, Vol.43, pp. 117-136.
- Evans S. G., Hungr O., 1993. The Assessment of Rockfall Hazard at the Base of Talus Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 4, pp. 620-636.
- Ghazipour N., Uromeihy A., Entezam I., Ansari F., Pirouz M., 2008. The use of Cone-Fall Theory for Evaluation of Rock-Fall Hazard along the Chaloos-Road (Pol-e-Zanguleh – Marzan-Abad). *Journal of Geosciences*, Vol. 17, No. 66, pp. 160-169.
- Goodman R. E., Kieffer S. D., 2000. Behavior of Rock in Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 8, pp. 675-684.
- Guzzetti F., Reichenbach P., Wieczorek G. F., 2003. Rockfall Hazard and Risk Assessment in the Yosemite Valley, California USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, No. 6, pp. 491-503.
- Heron D., Lukovic B., Massey C., Ries W., McSaveney M., 2014. GIS Modelling in Support of Earthquake-Induced Rockfall and Cliff Collapse Risk Assessment in the Port Hills, Christchurch. *Journal of Spatial Science*, Vol. 59, No. 2, pp. 313-332.
- Hudson J. A., Harrison J. P., 1997. *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Elsevier Science, Oxford, United Kingdom.
- Hungr O., Corominas J., Eberhardt E., 2005. Estimating Landslide Motion Mechanism, Travel Distance and Velocity. *Landslide Risk Management* (Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E., eds.), pp. 99-128.
- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., 2014. The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. *Landslides*, Vol. 11, No. 2, pp. 167–194.
- Jaboyedoff M., 2003b. *CONEFALL 1.0 User's Guide*. Open Report Soft-01. Quanterra, Lausanne, Switzerland. http://www.quanterra.org/Manual_conefall.pdf.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., 2003. Preliminary Assessment of Rockfall Hazard Based on GIS Data. *International Society for Rock Mechanics 2003 - Technology Roadmap for Rock Mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 575-578.

- Jaboyedoff M., Dudt J.-P., Labiouse V., 2005. An Attempt to Refine Rockfall Hazard Zoning Based on the Kinetic Energy, Frequency and Fragmentation Degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5, No. 5, pp. 621-632.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., 2011. Technical Note: Preliminary Estimation of Rockfall Runout Zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 3, pp. 819-828.
- Keylock C., Domaas U., 1999. Evaluation of Topographic Models of Rockfall Travel Distance for Use in Hazard Applications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, pp. 312-320.
- Körner H. J., 1980. The Energy Line Method in the Mechanics of Avalanches. *Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94.
- Lied K., 1977. Rockfall Problems in Norway. *Proceedings of the Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Work Effectiveness*. Bergamo, Italy, pp. 51-53.
- Loye A., Pedrazzini A., Jaboyedoff M., 2008. Preliminary regional Rockfall Hazard Mapping Using LiDAR-Based Slope Frequency Distribution and CONEFALL Modelling. *Proc., 4th Canadian Conference on Geohazards* (Locat J., Perret D., Turmel D., Demmers D., Leroueil, eds.), Quebec City, Quebec, Canada, Laval University Press, pp. 445-452.
- Manzella I., Labiouse V., 2013. Empirical and Analytical Analyses of Laboratory Granular Flows to Investigate Rock Avalanche Propagation. *Landslides*, Vol. 10, No. 1, pp. 22-36.
- Meissl G., 1998. *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GISgestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum*. Ph.D. Thesis, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.
- Meissl G., 2001. Modelling the Runout Distances of Rockfalls Using a Geographic Information System. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 125, pp. 129-137.
- McClung D. M., Lied K., 1987. Statistical and Geometrical Definition of Snow Avalanche Runout. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 13, pp. 107-119.
- Moos C., Dorren L., Stoffel M., 2017. Quantifying the Effect of Forests on Frequency and Intensity of Rockfalls. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 2, pp. 291-304.
- Nappi M., Budetta P., Lombardi G., Minotta C., 2013. Rockfall Run-Out Estimate Comparing Empirical and Trajectory Approaches. *Landslide Science and Practice* (Margottini C., Canuti P., Sassa K., eds.), pp. 177-182.
- Netti T., Castelli M., De Biagi V., 2016. Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis. *Procedia Engineering*, Vol. 158, pp. 464-469.
- Nilsen M. W., 2008. *Modelling of Rockfall Runout Range, Employing Empirical and Dynamical Methods*. Master Thesis, University of Oslo, Oslo, Norway.
- Onofri R., Candian C., 1979. *Indagine sui Limiti di Massima Invasione dei Blocchi Rocciosi Franati Durante il Sisma del Friuli del 1976*, CLUET, Regione Autonoma Friuli-Venezia-Giulia.

- Parise M., 2002. Landslide Hazard Zonation of Slopes Susceptible to Rock Falls and Topples. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 2, Nos. 1-2, pp. 37-49.
- Petje U., Ribičič M., Matja` Mikoš M., 2005. Computer Simulation of Stone Falls and Rockfalls. *Acta Geographica Slovenica*, Vol. 45, No 2, pp. 93-120.
- Piacentini D., 2006. Metodi per la Valutazione della Pericolosità da Frana di Crollo: Casi Studio nelle Dolomiti e nell'Appennino Modenese. *Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena*, Vol. 137.
- Piacentini D., Soldati M., 2008. Application of Empiric Models for the Analysis of Rock-fall Runout at a Regional Scale in Mountain Areas: Examples from the Dolomites and the Northern Apennines (Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Vol. 31, No. 2, pp. 215-223.
- Piacentini D., Ercolessi G., Pizziolo M., Troiani F., 2015. Rockfall Runout, Mount Cimone Area, Emilia-Romagna Region, Italy. *Journal of Maps*, Vol. 11, No 4, pp. 598-605.
- Rickenmann D., 2005. Runout Prediction Methods. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer, pp. 305-324.
- Ritchie A. M., 1963. Evaluation of Rockfall and its Control. *Highway Research Record*, Vol. 17, pp. 13-28. Highway Research Board, National Research Council, Washington DC, USA.
- Saroglou H., Berger F., Bourrier F., Asteriou P., Tsiambaos G., Tsagkas D., 2015. Effect of Forest Presence on Rockfall Trajectory. An Example from Greece. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2* (Lollino G., Giordan D., Crosta G., Corominas J., eds.), Springer, pp. 1899-1903.
- Scheidegger A. E., 1973. On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics*, Vol. 5, pp. 231-236.
- Tianchi L., 1983. A Mathematical Model for Predicting the Extent of a Major Rockfall. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, Vol. 27, No. 4, pp. 473-482.
- Toppe R., 1987. Terrain Models: A Tool for Natural Hazard Mapping. *Avalanche Formation, Movement and Effects*, IAHS Publ., Vol. 162, pp.629-638.
- Turner, A. K., Schuster R. L., 2012. *Rockfall: Characterization and Control*. Transportation and Road Research Board, Washington DC, USA.
- Urciuoli G., 2012. Mitigazione del Rischio di Frana. *Ambiente Rischio Comunicazione*, Vol. 3, pp. 44-53.
- Van Dijke J. J., Van Westen C. J., 1990. Rockfall Hazard: A Geomorphologic Application of Neighbourhood Analysis with ILWIS. *ITC Journal*, Vol. 1.
- Varnes D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes. *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control*. Transportation and Road Research Board, Washington DC, USA.
- Varnes D. J., IAEG, 1984. Commission on Landslide and Other Mass Movement on Slopes. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. The UNESCO Press, Paris.

- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., et al., 2011. Rockfall Characterisation and Structural Protection - A Review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 2617-2651.
- Wei L.-W., Chen H., Lee C.-F., Huang W.-K., Lin M.-L., Chi C.-C., Lin H.-H., 2014. The Mechanism of Rockfall Disaster: A Case Study for Badouzi, Keelung, in Northern Taiwan. *Engineering Geology*, Vol. 183, pp. 116-126.
- Wieczorek G. F., Stock G. M., Reichenbach P., Snyder J. B., Borchers J. W., Godt J. W., 2008. Investigation and Hazard Assessment of the 2003 and 2007 Staircase Falls Rock Falls, Yosemite National Park, California, USA. *Natural Hazards and Earth Sciences*, Vol. 8, pp. 421-432.
- Wyllie D. C., 2015. *Rock Fall Engineering*. CRC Press, Francis & Taylor Group, Broken Sound Parkway, Boca Raton, USA.
- Wyllie D. C., Mah C. W., 2004. *Rock Slope Engineering*, 4th ed. Spon Press, New York, USA.
- Zampedri G., 2012. Paramount improved Accessibility: Reliability and Security of Alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate. *WP6 guidelines Rockfall and Forecast systems*. <http://paramount-project.eu>.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla conclusione di questo percorso.
In particolare,

La Prof.ssa *Marta Castelli* per i preziosi consigli ed insegnamenti e per il tempo dedicatomi durante la realizzazione di questo elaborato.

La mia *famiglia* e *Giorgia* per l'affetto, il supporto morale e gli incoraggiamenti ricevuti durante questi anni.