

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

La modellazione del fenomeno di caduta massi a piccola scala:
valutazione dei parametri necessari per analisi speditive.



Relatore

Prof.ssa Marta Castelli

Candidato

Giulia Torsello

Aprile 2019

A mio padre.

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE..... | 4 |
| CAPITOLO 1 | 6 |
| GENERALITÀ DEL FENOMENO..... | 6 |
| 1.1 Classificazione dei movimenti franosi | 6 |
| 1.2 I crolli in roccia | 10 |
| 1.3 Modellazioni di dettaglio del fenomeno..... | 13 |
| 1.3.1 Il software Rockyfor3D..... | 14 |
| 1.4 Modellazioni speditive del fenomeno | 18 |
| 1.4.1 QPROTO..... | 21 |
| 1.4.2 Parametri di input..... | 22 |
| 1.4.3 Parametri di output | 23 |
| 1.4.4 Parametri dell'analisi..... | 24 |
| CAPITOLO 2 | 25 |
| GLI SCENARI DI SIMULAZIONE..... | 25 |
| 2.1 Creazione dei file raster di input | 25 |
| 2.2 Il versante virtuale 1 ($\beta = 30^\circ$) | 28 |
| 2.2.1 Blocco di forma cubica | 29 |
| 2.2.2 Blocco di forma ellissoidale..... | 32 |
| 2.2.3 Blocco di forma sferica | 35 |
| 2.2.4 Blocco di forma discoidale..... | 38 |
| 2.3 Il versante virtuale 2 ($\beta = 45^\circ$) | 41 |
| 2.3.1 Blocco di forma cubica | 42 |
| 2.3.2 Blocco di forma ellissoidale..... | 45 |
| 2.3.3 Blocco di forma sferica | 48 |
| 2.3.4 Blocco di forma discoidale..... | 51 |
| 2.4 Il versante virtuale 3 ($\beta = 60^\circ$) | 54 |
| 2.4.1 Valori di energy line angle ϕ_p ed effetto della forma del blocco | 55 |
| 2.5 Il versante virtuale 4 ($\beta = 85^\circ$) | 60 |
| 2.5.1 Valori di energy line angle ϕ_p ed effetto della forma del blocco | 61 |
| CAPITOLO 3 | 66 |
| DISCUSSIONE DEI RISULTATI..... | 66 |
| 3.1 Introduzione | 66 |
| 3.2 Confronto fra gli scenari analizzati | 67 |
| 3.3 Influenza del volume..... | 70 |
| 3.3.1 Versante virtuale 1 ($\beta = 30^\circ$)..... | 70 |
| 3.3.2 Versante virtuale 2 ($\beta = 45^\circ$)..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| CAPITOLO 4 | 74 |
| ESEMPIO DI APPLICAZIONE | 74 |
| 4.1 Il sito di studio..... | 74 |
| 4.2 L'evento di caduta massi del 9 Novembre 2011 | 75 |
| 4.3 Back Analysis dell'evento tramite Rockyfor3D | 79 |
| 4.4 Back Analysis dell'evento tramite QPROTO | 85 |
| 4.4.1 Prima implementazione: affinamento della direzione di immersione | 88 |
| 4.4.2 Seconda implementazione: valutazione dell'influenza delle reti | 90 |
| 4.5 Discussione dei risultati | 92 |
| CONCLUSIONI..... | 93 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 95 |
| SITOGRAFIA | 98 |
| RINGRAZIAMENTI | 100 |

INTRODUZIONE

La necessità di prevenire e limitare i danni alle infrastrutture e alle persone è alla base degli studi riguardanti il fenomeno di caduta massi. Nel corso degli anni, prove in sito ed in laboratorio, hanno consentito la definizione di una vasta gamma di metodologie, correlazioni e software che hanno come obiettivo lo studio dei parametri caratterizzanti il fenomeno al fine di consentire la valutazione della pericolosità e un'adeguata strategia di protezione nei confronti del problema.

Attraverso metodologie qualitative o quantitative è possibile effettuare delle valutazioni sulla potenziale vulnerabilità delle aree soggette ad un fenomeno di caduta massi. Esse si basano sul concetto di rischio, definito come la misura della probabilità e della severità con cui un evento avverso può colpire le persone, le strutture, le infrastrutture e l'ambiente; sul concetto di pericolosità, definita come la probabilità che si verifichi un particolare evento dannoso, di una certa entità, in un determinato arco temporale e sul concetto di vulnerabilità, intesa come il grado di perdita all'interno dell'area colpita dall'evento (Fell, 2005).

Una volta identificato il rischio associato a una specificata area, è necessario scegliere le strategie di gestione, di prevenzione e di protezione dal rischio più adeguate, attraverso l'identificazione dei fattori che concorrono alla determinazione dell'entità di un crollo in roccia. Tradizionalmente le misure adottate per la prevenzione dei rischi derivanti da un crollo in roccia si possono individuare nelle opere ingegneristiche di stabilizzazione e di protezione dei pendii, mirate alla riduzione della pericolosità e in opere destinate alla riduzione della vulnerabilità.

Le opere di stabilizzazione dei pendii hanno l'obiettivo di agire in maniera preventiva nei confronti dei fenomeni di caduta massi, ad esempio attraverso il disaggancio controllato dei blocchi identificati come pericolanti o assicurando i blocchi all'ammasso mediante funi o tiranti in acciaio.

Le opere di protezione invece, si collocano nell'arco temporale successivo all'attivazione del cinematismo di collasso nella matrice rocciosa del versante; l'obiettivo di tali opere è quello di decelerare o frenare i blocchi in movimento sul versante, impedendo la loro interazione con le aree sensibili quali abitazioni o infrastrutture. Opere di questo tipo sono reti e barriere paramassi.

Nell'ampio panorama di metodologie di valutazione della pericolosità del fenomeno di caduta massi, è possibile distinguere fra metodologie qualitative e metodologie quantitative.

Le metodologie qualitative rientrano in genere nel campo delle analisi preliminari o speditive, basate su dati di facile reperibilità, non richiedono la conoscenza di parametri di dettaglio e hanno l'obiettivo di definire l'area di invasione di un crollo in roccia e la conseguente definizione delle aree maggiormente esposte al rischio. Alcuni esempi sono PROVIALP (Arpa Piemonte e Cemagref, 2008), MASSA (Arpa Piemonte, 2003), Rockfall Hazard Rating System-RHRS (Turner et al, 2012).

Le metodologie quantitative rientrano invece nel campo delle analisi di dettaglio; esse richiedono la perfetta conoscenza dei parametri che influenzano il fenomeno di caduta massi in termini di velocità, energie, possibili meccanismi cinetici e caratterizzazione dettagliata del versante e del punto di distacco.

Non tutti i metodi speditivi sono qualitativi, ad esempio il lavoro di tesi proposto in questo elaborato fa riferimento al metodo dei coni sviluppato da Jaboyedoff e Labiouse nel 2011. L'obiettivo è quello di valutare l'area di invasione di un crollo in roccia modellando il fenomeno

di caduta massi tramite il Plugin QPROTO, sviluppato dal Politecnico di Torino per il software geografico libero QGIS.

QPROTO consente di identificare l'area di invasione di un crollo in roccia attraverso analisi speditive e preliminari. Per l'avvio della simulazione sono necessari infatti, solamente un Digital Terrain Model, uno shape file contenente l'area di distacco a cui sono associati alcuni attributi relativi al blocco in caduta e i valori di angolo di energy line φ_p e dell'angolo di dispersione laterale α ; tali angoli costituiscono il fulcro del programma e definiscono un cono di invasione del fenomeno che consente di visualizzare un'analisi in termini di aree di suscettibilità e in termini di energie cinetiche e di velocità.

Al fine di mettere tali parametri in relazione con le caratteristiche del pendio e del masso in caduta e fornire agli utilizzatori del plugin indicazioni per la loro definizione, si è condotto uno studio parametrico su versanti 'virtuali' semplificati, ottenuti dall'unione di tre piani inclinati che definiscono la zona di distacco, la zona di transito e la zona di arresto. Su questi versanti sono state condotte simulazioni delle traiettorie di caduta massi con il software di dettaglio Rockyfor3D, al variare dell'inclinazione della zona di transito, della densità di vegetazione, della forma e del volume del blocco, che hanno permesso di valutare l'influenza di tali fattori sugli angoli φ_p e α . L'affidabilità dei risultati dello studio è stata infine verificata tramite la back analysis di un caso reale di caduta massi effettuata ricorrendo al Plugin QPROTO.

L'elaborato è quindi suddiviso in un primo capitolo in cui si fornisce un richiamo teorico ai concetti riguardanti il fenomeno di caduta massi; successivamente viene definito un quadro riassuntivo sullo stato dell'arte circa le principali metodologie di modellazione del fenomeno in termini di analisi di dettaglio e di analisi speditive.

Il secondo capitolo riguarda le simulazioni di dettaglio che sono state svolte attraverso il software Rockyfor3D sui quattro versanti virtuali e si cerca di indagare sull'evoluzione del fenomeno in relazione ai differenti scenari di simulazione; i parametri presi in considerazione riguardano l'angolo di inclinazione del pendio β , la densità di vegetazione e la forma del blocco. Il terzo capitolo riassume e implementa i risultati ottenuti nel capitolo 2, aggiungendo un'ulteriore indagine sull'influenza del volume del punto di distacco.

Nel quarto capitolo infine, vengono testati i risultati ottenuti nelle analisi di dettaglio condotte sui versanti virtuali tramite l'applicazione al sito di Cels-Exilles, interessato da un fenomeno di caduta massi nel Novembre del 2011. A seguito dell'evento, tre abitazioni sono state coinvolte e una barriera paramassi progettata agli inizi degli anni '70 è stata distrutta.

GENERALITÀ DEL FENOMENO

1.1 Classificazione dei movimenti franosi

La caduta di massi è un fenomeno geomorfologico che interessa i pendii naturali ed artificiali. Il fenomeno è imprevedibile e può essere costituito dal distacco di un singolo blocco roccioso o da ammassi rocciosi caratterizzati da elevate volumetrie.

Si definisce (Rochet, 1987):

- *Single block falls*: volumi compresi tra 0,01 e 100 m³;
- *Mass falls*: volumi compresi fra 100 e 100000 m³;
- *Very large mass falls*: volumi compresi fra 100000 e 10 milioni m³;
- *Mass displacements*: volumi maggiori di 10 milioni m³.

La magnitudo dei crolli è molto importante, soprattutto in zone dove sono presenti infrastrutture ed insediamenti umani e poiché le conseguenze di un impatto dipendono fortemente da essa. Risulta molto difficile o addirittura impossibile, fornire un quadro esaustivo delle cause che possono innescare un crollo in roccia poiché i fattori che concorrono all'avvio del movimento sono molteplici e legati da una continua relazione di causa-effetto.

Varnes (1978) fornisce un quadro esaustivo dei possibili movimenti di un pendio, dei materiali coinvolti e dei possibili fattori scatenanti. In termini generali, la Fig. 1.1 illustra la classificazione dei movimenti franosi.

| TYPE OF MOVEMENT | | | TYPE OF MATERIAL | | |
|------------------|---------------|----------------------|--|--------------------------|-------------------------|
| | | | BEDROCK | ENGINEERING SOILS | |
| | | Predominantly coarse | | Predominantly fine | |
| FALLS | | | Rock fall | Debris fall | Earth fall |
| TOPPLES | | | Rock topple | Debris topple | Earth topple |
| SLIDES | ROTATIONAL | FEW UNITS | Rock slump | Debris slump | Earth slump |
| | TRANSLATIONAL | MANY UNITS | Rock block slide | Debris block slide | Earth block slide |
| | | | Rock slide | Debris slide | Earth slide |
| LATERAL SPREADS | | | Rock spread | Debris spread | Earth spread |
| FLOWS | | | Rock flow (deep creep) | Debris flow (soil creep) | Earth flow (soil creep) |
| COMPLEX | | | Combination of two or more principal types of movement | | |

Figura 1.1: classificazione abbreviata dei movimenti franosi (Varnes, 1978).

Si distinguono sei tipi di movimento:

- Caduta (*fall*): movimento rapido di un blocco o di un ammasso roccioso sulla superficie di un pendio che può essere di caduta libera, di rotolamento, di rimbalzo. Il materiale viene rilasciato dal pendio a causa dell'erosione o della presenza di discontinuità sulla matrice rocciosa.

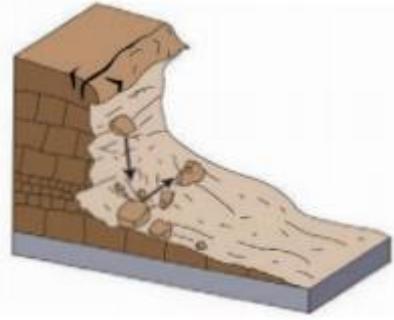


Figura 1.2: fall (Shanmugam, 2015).

- Ribaltamento (*topple*): rotazione di un blocco o di un ammasso roccioso intorno ad un centro di rotazione. Affinché si verifichi un ribaltamento, il centro di gravità del blocco o dell'ammasso roccioso deve collocarsi oltre la posizione del centro di rotazione.

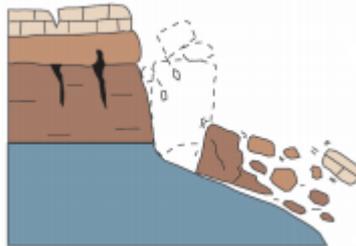


Figura 1.3: topple (Shanmugam, 2015).

- Scorrimento (*slide*): movimento causato da uno sforzo di taglio che provoca un movimento lungo un piano di rottura. In base alla forma della superficie di rottura si identifica uno scorrimento rotazionale, se il movimento avviene lungo la superficie concava generata dalla rottura del materiale e uno scorrimento traslazionale, nel caso in cui la superficie di rottura sia pressoché piana e presenti discontinuità poco scabre.

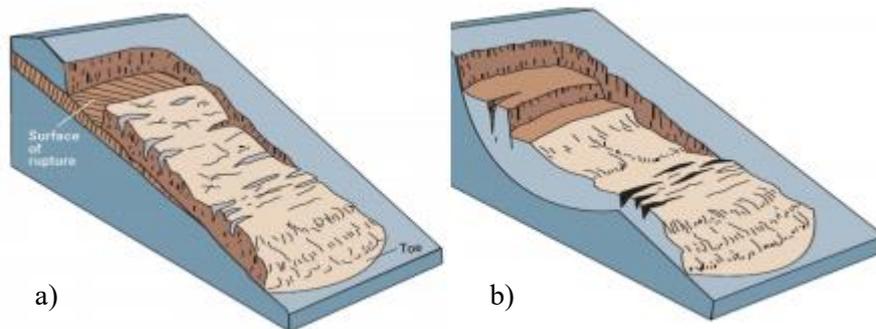


Figura 1.4: slide: a) translational slide, b) rotational slide (Shanmugam, 2015).

- Espansione laterale (*lateral spread*): movimento di estensione laterale del materiale, dovuto principalmente allo sviluppo di fratture conseguenti all'azione di uno sforzo di taglio. È un fenomeno che riguarda principalmente i terreni a grana fine come quelli argillosi ed i pendii con un basso angolo di inclinazione.

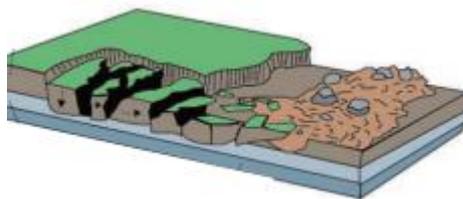


Figura 1.5: lateral spread (Shanmugam, 2015).

- Colata (*flow*): movimento franoso che interessa i terreni non consolidati. La propagazione del materiale può essere simile al comportamento di un fluido viscoso.

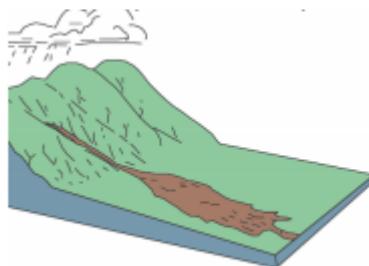


Figura 1.6: flow (Shanmugam, 2015).

- Combinato (*complex*): il moto è caratterizzato dalla compresenza di più fenomeni descritti in precedenza.

I sei scenari di movimento sono correlati con la tipologia di materiale coinvolto; adottando la classificazione di Varnes (Fig. 1.1) si distinguono le rocce (*bedrocks*) ed il terreno “ingegneristico” (*engineering soil*), a sua volta suddiviso in detrito (*debris*) e terra (*earth*).

La ricerca dei fattori scatenanti è condotta da Varnes partendo dal presupposto che il meccanismo di rottura di una parete rocciosa sia innescato da uno sforzo di taglio. Vari fattori possono instaurare un aumento dello sforzo di taglio o una diminuzione della resistenza al taglio.

Nel primo caso rientrano fattori naturali ed antropici che Varnes (1978) identifica in:

- azione erosiva di fiumi, corsi d’acqua, ghiacciai, onde marine e correnti di marea, piogge intense, periodi di gelo e disgelo, movimenti rocciosi quali slittamenti o la propagazione di faglie in larga scala, la costruzione di pozzi, cave per l’estrazione dei materiali, canali, bacini artificiali;
- sovraccarichi del pendio dovuto ad agenti atmosferici, accumulo di materiale da frana, vegetazione, collasso di materiale vulcanico accumulato che provoca valanghe e flussi di detriti, carico delle costruzioni, infrastrutture, bacini artificiali, scarica ed accumulo di materiali, costruzioni di contenimento;
- terremoti, eruzioni vulcaniche, vibrazioni provenienti da trivellazioni, macchinari, traffico e crolli in pendii adiacenti;
- alterazioni di ritiro e rigonfiamento del terreno;
- erosione sotterranea, erosione di fiumi e corsi d’acqua, estrazione di materiali ad opera dell’uomo;
- pressione dell’acqua, sia allo stato solido sia allo stato liquido, intrappolata nelle fratture rocciose e nelle grotte, mobilitazione di stress residui, rigonfiamenti del terreno.

Nel secondo gruppo invece rientrano i fattori che diminuiscono o riducono la resistenza al taglio. Secondo Varnes (1978), essi possono ulteriormente essere classificati in un gruppo che

fa riferimento alle caratteristiche sviluppate dalla roccia o dal terreno durante l'iniziale processo di formazione geomorfologica ed in un gruppo che comprende i cambiamenti che possono provocare una diminuzione della resistenza allo sforzo di taglio.

Il primo gruppo include:

- La composizione e la struttura dei materiali che compongono la roccia o il terreno;
- La struttura macroscopica dei materiali e la geometria del pendio: discontinuità, difetti, cricche, esposizione del pendio, alternanza di strati di materiale a differente permeabilità.

Il secondo gruppo include:

- I cambiamenti dovuti all'azione climatica ed alle reazioni chimico-fisiche che si instaurano tra i materiali: fenomeni di corrosione, rigonfiamenti, flussi capillari d'acqua, periodi di disidratazione.
- I cambiamenti nei legami intergranulari a causa della presenza di acqua e pressione nelle fratture.
- I cambiamenti nella struttura: propagazione di fratture, fessurazioni.
- Altre cause: creep, azione delle radici degli alberi e di animali.

1.2 I crolli in roccia

Dopo aver fornito una classificazione generica del fenomeno di movimento di un pendio, si pone particolare attenzione al fenomeno di caduta massi oggetto di questa tesi.

Il distacco dei blocchi si può imputare ad un ampio spettro di cause che richiedono un'adeguata raccolta di informazioni relative alla caratterizzazione del versante (inclinazione, lunghezza, orientamento), dei materiali che lo compongono (rugosità delle superfici, tipologia di suolo, presenza di ostacoli, vegetazione) e dell'ammasso roccioso fratturato (volume, forma, massa, fratture, discontinuità).

In particolare, la caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso comprende lo studio della roccia intatta (campione rappresentativo di un volume elementare dell'ammasso roccioso) e lo studio delle discontinuità (piani e/o superfici di debolezza), dalle quali dipende il comportamento instabile dell'ammasso roccioso (Barla, 2010).

Le discontinuità sono descritte da quattro fattori principali:

- l'orientazione definisce la giacitura nello spazio di una discontinuità. Può essere descritta tramite la direzione di immersione α (*dip direction*) che rappresenta l'angolo, misurato sul piano orizzontale, compreso fra la proiezione orizzontale della linea di massima pendenza della discontinuità e il Nord geografico; l'inclinazione ψ (*dip*) rappresenta l'angolo, misurato sul piano verticale, compreso fra la linea di massima pendenza e il piano orizzontale (Fig. 1.7).

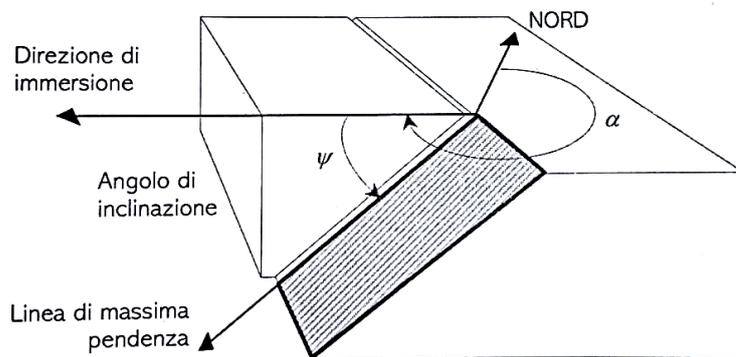


Figura 1.7: esempio di individuazione degli angoli α e ψ (Barla, 2010).

- la spaziatura definisce la distanza fra due discontinuità adiacenti;
- la continuità o persistenza definisce l'estensione di una discontinuità nell'ammasso;
- la scabrezza o rugosità definisce l'andamento irregolare delle pareti di una discontinuità.

Con l'obiettivo di ottenere una sufficiente caratterizzazione del sito, è necessario inoltre identificare e descrivere le aree del pendio in cui si svolgono i principali movimenti di un fenomeno di caduta massi. In un generico versante si possono distinguere:

- la zona di distacco: porzione del pendio generalmente caratterizzata da un'inclinazione notevole e in cui potenzialmente può prendere avvio il fenomeno di caduta di blocchi generati dall'intersezione di discontinuità;
- la zona di transito: area in cui avviene il movimento dei blocchi che si distaccano dalla zona sorgente.
- La zona di accumulo: area caratterizzata da basse pendenze, in cui i blocchi decelerano e di fermano.

Successivamente al distacco, il blocco inizia a muoversi lungo il pendio; i meccanismi di moto sono strettamente correlati con l'angolo di inclinazione del pendio (Fig. 1.8).

Per angoli maggiori di 76° , il moto è prevalentemente di caduta libera e la traiettoria è rappresentata da una parabola (Ritchie, 1963). Durante la caduta libera si possono verificare un movimento di traslazione del centro di massa ed una rotazione intorno al centro di massa (Azzoni et al, 1995). Quando un masso in caduta libera incontra un ostacolo, il moto diventa di rimbalzo e come conseguenza può verificarsi una collisione, con una dissipazione di energia ed un'eventuale rottura del blocco in parti minori (Ritchie, 1963). Per angoli approssimativamente di 45° il moto diventa di rotolamento o di scivolamento o di un misto tra i due. Il blocco si arresta quando la sua velocità raggiunge un valore nullo.

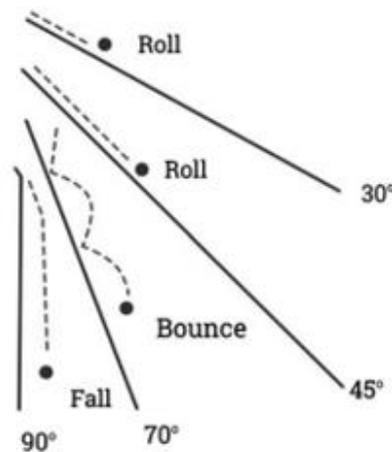


Figura 1.8: meccanismi cinematici al variare dell'angolo di inclinazione del pendio (Ritchie, 1963).

Il comportamento di un blocco roccioso in movimento lungo un versante è fisicamente descritto dalle leggi della cinematica, attraverso le quali è possibile ricavare la velocità del blocco:

$$x = x_0 + v_0 t \quad (1)$$

$$v = v_0 + at \quad (2)$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (3)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad (4)$$

Dove:

- x_0 è la posizione iniziale;
- v_0 è la velocità iniziale;
- x è l'istante al tempo t ;
- v è la velocità al tempo t ;
- a è l'accelerazione;
- t è il tempo.

La componente dinamica invece, è definita dall'applicazione delle leggi di Newton:

- un corpo non soggetto a forze persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme;

- l'azione di una forza F determina l'accelerazione a di un punto materiale, di massa m , secondo la legge:

$$F = ma \quad (5)$$

- ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria.

Conseguenza diretta della seconda legge di Newton è il principio di conservazione dell'energia meccanica; quando un corpo è in caduta libera infatti, una parte della sua energia potenziale si trasforma in energia cinetica.

Il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione del momento trovano applicazione nell'analisi degli urti che si instaurano fra il blocco in caduta e gli oggetti che incontra lungo il suo percorso. Durante gli urti il blocco perde una parte dell'energia cinetica e la velocità diminuisce; la quantità di energia cinetica dissipata durante la collisione viene di solito definita nella modellazione dal coefficiente di restituzione.

Esistono due tipologie di coefficiente di restituzione, distinti in base al meccanismo dissipativo che prende atto: il coefficiente di restituzione normale (R_N) misura la resistenza incontrata dal blocco nella direzione normale al pendio, il coefficiente di restituzione tangenziale (R_T) misura la resistenza nella direzione parallela al pendio.

La definizione degli obiettivi da raggiungere è il primo passo verso la scelta della metodologia più adeguata per la modellazione del fenomeno.

I concetti fisici descritti in precedenza, sono alla base delle metodologie di modellazione utilizzate nelle analisi di dettaglio, che consentono di valutare il fenomeno su grande scala, attraverso la conoscenza e la raccolta di un ampio dataset di parametri caratteristici del sito. I risultati ottenuti attraverso le metodologie di dettaglio sono espressi in termini di traiettorie, massime distanze raggiunte dai blocchi, altezze di rimbalzo, velocità ed energie.

Le analisi speditive invece, consentono di definire l'estensione e le aree di suscettibilità di un crollo in roccia su piccola scala attraverso semplici considerazioni riguardanti la geometria del pendio e i volumi di distacco coinvolti.

1.3 Modellazioni di dettaglio del fenomeno

Allo stato dell'arte, esistono numerosi software dedicati alle modellazioni di dettaglio dei fenomeni di caduta massi in 2-D e in 3-D. Per completezza della trattazione si forniscono a grandi linee le caratteristiche di tali software e i principi fondamentali:

- metodi numerici di analisi basati su modelli *continui* e *discontinui*: i primi vengono utilizzati quando l'innescarsi di un meccanismo di collasso è governato da una deformazione del materiale che può essere considerato continuo, i secondi vengono invece utilizzati quando la stabilità di un versante è controllata dal comportamento meccanico delle discontinuità e modellano l'ammasso roccioso come somma di materiale e piani di debolezza (Coggan et al, 1998). Si possono citare alcuni esempi come UDEC - Universal Distinct Element Code (ITASCA), PFC – Particle Flow Code (ITASCA);
- metodi basati sull'analisi del moto di un blocco attraverso i principi della meccanica newtoniana; questi metodi sono riferiti unicamente alla fase di caduta e si distinguono in: i modelli *rigid body* prendono in considerazione la forma e la dimensione del blocco e, attraverso i principi della meccanica newtoniana, definiscono con esattezza tutte le caratteristiche del moto, l'energia cinetica e la velocità rotazionale e traslazionale. Si possono citare alcuni esempi come HY-STONE (CSPFEA Engineering Solutions). I metodi *lumped mass* ignorano le caratteristiche del punto di distacco, assimilandolo ad un singolo punto di massa m e velocità v . Permettono di calcolare la sola componente traslazionale del moto. Si possono citare alcuni esempi come ROCKSIM (Apogee Components), ROTOMAP (geo&soft international). I metodi *ibridi* sono la combinazione dei due metodi precedenti. Si possono citare alcuni esempi come Rockfall (Rockscience).

Un'ulteriore distinzione permette di distinguere in metodi *probabilistici*, in cui i parametri adottati per la simulazione delle traiettorie variano sulla base di una serie di valori derivanti da una distribuzione delle probabilità e metodi *deterministici*, in cui i parametri adottati sono definiti da proprietà fisse e dalle leggi della meccanica newtoniana (Turner et al, 2012);

- alcuni dei metodi precedenti sono metodi *GIS-based* e si basano sull'utilizzo dei dati processati attraverso un Geographic Information System (GIS), che consente di descrivere la topografia di un versante costruendo una griglia contenente le informazioni circa l'elevazione del sito in un digital elevation model (Dorren, 2003).

Un esempio è il software rigid body Rockyfor3D (ecorisQ) che verrà descritto nel paragrafo successivo.

1.3.1 Il software Rockyfor3D

Il software utilizzato in questa tesi per la simulazione delle traiettorie tridimensionali di caduta di un blocco è Rockyfor3D, che rientra nella categoria dei software rigid body. Il modello traiettografico tridimensionale combina algoritmi deterministici con approcci stocastici; per questo motivo il modello si definisce fisicamente basato, in relazione alla descrizione dei processi di caduta massi e probabilistico in quanto, date le incertezze connesse alla determinazione dei parametri, questi sono determinati in maniera stocastica, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili. Rockyfor3D può essere usato per simulazioni di caduta di massi su scala regionale, su scala locale e di versante (Dorren, 2014).

Il software simula le traiettorie di caduta attraverso un vettore che memorizza i valori tridimensionali di posizione e velocità, calcola le sequenze di caduta libera del masso, di rimbalzo sulla superficie del pendio e, se presenti, di urto contro gli alberi (Dorren, 2014).

I file di input richiesti sono costituiti da mappe raster in formato ESRI ASCII Grid che contengono la descrizione della morfologia e della geometria del pendio, della zona di distacco e delle caratteristiche del blocco di cui si vuole simulare la caduta. Il numero minimo di file di input per l'avvio delle simulazioni è di 10 mappe raster che devono presentare un'uguale estensione e risoluzione.

Le 10 mappe raster di input sono (Dorren, 2014):

- *dem.asc*: il digital elevation model è la rappresentazione topografica del versante oggetto della simulazione. I dati sono in formato double type raster [m]. I valori numerici contenuti nel file raster sono preceduti dalle seguenti righe di intestazione:

```
"ncols      600
nrows      281
xllcorner  -2.5
yllcorner  -2.5
cellsize   5
NODATA_value -9999"
```

I parametri *ncols* e *nrows* indicano rispettivamente il numero di colonne e di righe che formano la mappa raster, *xllcorner* e *yllcorner* indicano la collocazione spaziale della mappa tramite le coordinate del vertice inferiore sinistro, *cellsize* è la risoluzione della mappa e *NODATA value* rappresenta il valore attribuito in caso di assenza di dati;

- *rockdensity.asc*: contiene la densità dei massi in ogni cella indicata come sorgente. Ogni cella di questa mappa con un valore > 0 sarà considerata come un punto di distacco e sarà caratterizzata da un valore di densità espresso dal valore della cella. I dati sono in formato integer type raster [kg/m^3];
- *d1.asc*, *d2.asc*, *d3.asc*: rappresentano le tre dimensioni del blocco, cioè altezza, lunghezza e larghezza. Ogni cella con un valore > 0 rappresenterà la sorgente di un blocco con le dimensioni definite dal valore descritto in queste tre mappe raster. I dati sono definiti in formato double type raster [m];
- *blshape.asc*: descrive la forma del blocco che si distacca dalla cella. I possibili valori sono 0 per assenza di sorgente, 1 per blocco parallelepipedo, 2 per blocco ellissoidale, 3 per blocco sferico e 4 per blocco discoidale;
- *rg70.asc*, *rg20.asc*, *rg10.asc*: le mappe raster descrivono la scabrezza della superficie del versante. Tale scabrezza è definita dall'altezza in metri di un ostacolo

rappresentativo (Mean Obstacle Height) che il masso incontra durante il tragitto di caduta sul versante nel 70%, 20% e 20% dei casi. I dati sono in formato double type raster [m];

- *soiltype.asc*: la mappa raster definisce la tipologia di suolo. I dati sono in formato integer type raster. I possibili valori da attribuire ad ogni poligono caratterizzante il versante sono riportati in Fig. 1.9. Ad ogni categoria di tipo di suolo il software associa una distribuzione del coefficiente di restituzione normale R_N ; il coefficiente di restituzione tangenziale R_T è calcolato invece a partire di parametri *rg.10*, *rg.20*, *rg.70* riferiti alla scabrezza della superficie;

| 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 (\varnothing < ~10 cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali | 0,33 | 0,30 - 0,36 |
| 4 | Detrito di versante (\varnothing > ~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 |

Figura 1.9: descrizione dei possibili valori da inserire nel raster *soiltype.asc* (Dorren,2014).

Il software permette di analizzare le traiettorie di caduta massi in presenza di vegetazione (alberi); in questo caso la procedura di realizzazione dei file di input è duplice (Dorren, 2014):

- La prima alternativa prevede la creazione di un file denominato *treefile.txt*, privo di intestazione, in cui sono riportate le coordinate di ogni albero e il diametro del fusto DBH (Diameter at Breast Height) misurato all'altezza del petto [cm] e di una mappa raster *conif_percent.asc* in cui è indicata la percentuale di conifere presenti in ogni cella. I dati di quest'ultima mappa raster sono in formato integer type raster.
- La seconda alternativa consiste nella creazione di quattro mappe raster, con la medesima risoluzione ed estensione del file *dem.asc*:
 - o *nrtrees.asc*: ogni cella rappresenta il numero di alberi per ettaro. I dati sono in formato integer type raster [ha^{-1}];
 - o *dbhmean.asc*: i valori delle celle indicano il diametro del fusto di ogni albero misurato all'altezza del petto, DBH. I dati sono in formato integer type raster [cm];
 - o *dbhstd.asc*: i valori delle celle indicano la deviazione standard di DBH per ogni cella. I dati sono in formato integer type raster [cm];
 - o *conif_percent.asc*: i valori indicano la percentuale di conifere in ogni cella. I dati sono in formato integer type raster [%].

È possibile inoltre dotare il versante di una o più reti paramassi mediante la creazione di tre mappe raster, della medesima risoluzione ed estensione del file *dem.asc* (Dorren, 2014):

- *net_number.asc*: ogni singola cella che contiene una rete paramassi deve essere caratterizzata dallo stesso *net_number*. I dati sono in formato integer type raster;

- *net_energy.asc*: descrive la capacità di assorbimento di energia della rete. I dati sono in formato integer type raster [kJ];
- *net_height.asc*: descrive l'altezza della rete paramassi, misurata nella direzione perpendicolare alla superficie del versante. I dati sono in formato integer type raster [m].

I file di output creati al termine della simulazione (in formato raster e con la stessa risoluzione, dimensione e formato dei file di input) sono (Dorren, 2014):

- *E_mean.asc*: restituisce la media dei massimi valori di energia cinetica (rotazionale e traslazionale) in tutti i blocchi simulati in quella. I dati sono espressi in kJ;
- *E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc*: restituiscono il 50, 90, 95, 98, 99 percentile di energia cinetica registrati in ogni cella. I dati sono espressi in kJ;
- *E_95CI.asc*: restituisce l'intervallo di confidenza pari al 95% (CI) di tutti i massimi di energia cinetica registrati in ogni cella, dove $95\%CI = E_mean + 2 * deviazione\ standard$ del massimo valore in una cella, assumendo una distribuzione normale. I dati sono espressi in kJ;
- *Ph_mean.asc*: restituisce la media della massima altezza di passaggio (misurata in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie) di tutti i blocchi che passano attraverso la cella;
- *Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc*: restituiscono il 50, 90, 95 e 98 percentile di altezza di passaggio registrata in ogni cella. I dati sono espressi in m;
- *Ph_95.asc*: restituisce tutti i valori massimi di altezza di passaggio registrata in ogni cella, misurata in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie;
- *Nr_passages.asc*: restituisce il numero di blocchi passati in ogni cella;
- *Nr_sourcecells.asc*: restituisce il numero di celle sorgenti che alimentano una data cella [-];
- *Reach_probability.asc*: la mappa mostra se è probabile (valori più elevati nella mappa) o improbabile (valori più bassi nella mappa ma sempre maggiori di zero) che un masso arrivi in una data cella [%];
- *Nr_deposited.asc*: restituisce numero di blocchi fermati in ogni cella. Questa mappa è una fonte eccellente per delineare le zone di arresto di una caduta massi su un'area di studio come base per una mappa di pericolosità;
- *Rvol_deposit.asc*: restituisce il massimo volume del blocco arrestato in ogni cella. I dati sono espressi in m^3 ;
- *EL_angles.asc*: restituisce gli angoli minimi sottesi dalla linea dell'energia ricalcolata per cella; questa mappa raster può essere utilizzata per comparare gli angoli di energy line calcolati dalle simulazioni di Rockyfor3D con i valori di angoli energy line usati comunemente (27° - 33° per pendii senza vegetazione e valori più alti per pendii con vegetazione). I dati sono espressi in gradi [$^{\circ}$];
- *Traj_time.asc*: restituisce il tempo minimo necessario per raggiungere una cella raster dalle aree sorgenti definite. I dati sono espressi in s;
- *V_max.asc*: restituisce la massima velocità simulata in valore assoluto per cella raster. I dati sono espressi in m/s;
- *Tree_impact_heights.asc* (in caso di presenza di vegetazione): restituisce la massima altezza di impatto sull'albero per cella raster. I dati sono in m;
- *Nr_tree_impacts.asc* (in caso di presenza di vegetazione): restituisce il numero di impatti sull'albero per cella raster [-].

Al termine di ogni simulazione viene inoltre generato un file di testo *Rockyfor3D_v50_logfile_dd-mm-yyyy_HHMM.txt* che contiene le informazioni necessarie per la ricostruzione dello scenario di simulazione e le statistiche relative alla frequenza degli angoli di energy line calcolati per ogni traiettoria.

Quando si effettua una simulazione con una barriera paramassi, i risultati vengono salvati in un file di testo denominato *Rockyfor3D_v50_Calc_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt*. Esso fornisce indicazioni sui calcoli cinematici in corrispondenza della barriera stessa in termini di:

- *E*: energia cinetica di traslazione e di rotazione. I dati sono espressi in kJ;
- *Ph*: altezza del passaggio calcolata in metri nella direzione normale alla superficie del pendio;
- *V*: velocità. I dati sono in m/s;
- *Vrot*: velocità rotazionale. I dati sono in rad/s;
- *Imp_a*: angolo di impatto compreso tra il piano orizzontale e la traiettoria del masso all'istante in cui arriva nella rete. I valori negativi indicano un blocco che sta cadendo, i valori positivi indicano un masso che si allontana dalla rete, verso l'alto;
- *n*: numero totale di blocchi che arrivano nella rete (o barriera di calcolo);
- *scr_nr*: identifica il numero di rete paramassi.

La definizione dei raster necessari per l'avvio delle indagini parametriche sui versanti virtuali verrà trattata nel Cap. 2 e si prefissa l'obiettivo di indagare sulla distribuzione e sul comportamento dell'angolo di energy line φ_p attraverso l'analisi del file di output *EL_angles.asc*.

1.4 Modellazioni speditive del fenomeno

Lo stato dell'arte delle analisi speditive di pericolosità presenta numerosi modelli di valutazione di un fenomeno di caduta massi. Questi metodi si basano su considerazioni empiriche e su semplici assunzioni riguardanti la geometria del versante.

Il primo fra tutti è il metodo *Fahrböschung* o di *travel angle*, proposto da Heim nel 1932; tale metodo mette in relazione una grandezza orizzontale L con quella verticale H di un'area colpita dal fenomeno di caduta massi, attraverso la definizione di un angolo β che consente di individuare la massima distanza percorsa dai blocchi in caduta (Fig. 1.10).

Negli anni seguenti numerosi autori (Hsü, 1975; Lied, 1977; Onofri e Candian, 1979; Hungr e Evans, 1988) hanno implementato il metodo di Heim, ottenendo quattro distinte tipologie di angolo (Fig. 1.10).

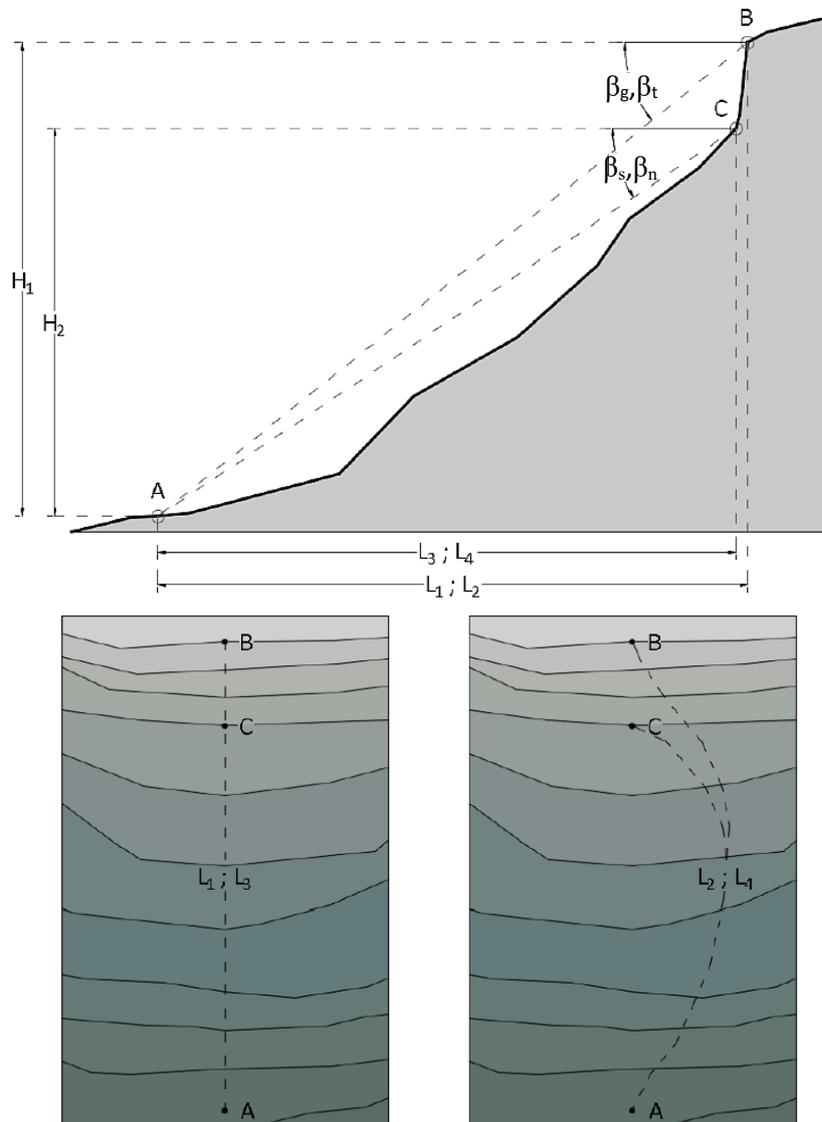


Figura 1.10: a) rappresentazione degli angoli caratteristici di caduta massi sulla sezione verticale, b) e c) rappresentazione sul piano orizzontale. A: punto di arresto, B: punto di distacco, C: apice del pendio, β_g : geometric angle in riferimento alla proiezione orizzontale L_1 , β_t : travel angle in riferimento alla proiezione orizzontale L_2 , β_s : minimum shadow angle in riferimento alla proiezione orizzontale L_3 , β_n : average gradient angle in riferimento alla proiezione orizzontale L_4 (Cremona, 2018).

In base alla definizione della distanza orizzontale e verticale, si indentificano:

- *geometric angle* (β_g) è rappresentato dalla proiezione verticale H_1 ed orizzontale L_1 del segmento che unisce il punto sorgente con il punto di arresto;
- *travel angle* (β_t), o *Fahrböschung*, è rappresentato dalla proiezione verticale H_1 del segmento che unisce il punto sorgente con il punto di arresto e dalla proiezione orizzontale L_2 del segmento che corrisponde alla reale distanza percorsa dal blocco;
- *minimum shadow angle* (β_s), formulato da Hungr e Evans (1988), Evans e Hungr (1993), Meiβl (1998), basandosi sugli studi condotti in precedenza da Lied (1977), consente di eliminare le difficoltà imputate alla determinazione di ogni punto sorgente del fenomeno di caduta. Esso è rappresentato dalla proiezione verticale H_2 del segmento che unisce l'apice del pendio con il punto di arresto e dalla proiezione orizzontale L_3 del segmento che indica la distanza percorsa dal blocco;
- *average gradient angle* (β_n), è definito dalla proiezione verticale H_2 del segmento che unisce l'apice del pendio con il punto di arresto e dalla proiezione orizzontale L_4 della massima distanza reale percorsa dal blocco.

Vari autori suggeriscono una variazione del *travel angle* compresa fra $28,5^\circ$ e $47,5^\circ$ (Onofri e Candian, 1979; Meiβl, 1998) e una variazione del *minimum shadow angle* compresa fra 22° e 30° (Lied, 1977; Hungr and Evans, 1988; Evans and Hungr, 1993).

Partendo dalle considerazioni proposte da Heim (1932), nel 1979 Onofri e Candian hanno teorizzato il *metodo dei coni* che permette di valutare la massima distanza percorsa da un blocco a partire dal punto in cui avviene il distacco del blocco dal versante. La successiva implementazione del metodo dei coni è avvenuta ad opera di Jaboyedff e Labiouse (2011), i quali hanno sviluppato il software CONEFALL (Jaboyedoff, 2003).

Il metodo si basa sul concetto di *energy line*, illustrato in Fig. 1.11: empiricamente è definito nel piano verticale dalla retta che connette la sorgente con il punto di arresto più lontano raggiunto da un blocco in caduta. L'inclinazione della retta di *energy line* rispetto all'orizzontale, definisce l'angolo $\phi_p(\gamma)$ e rappresenta, in modo semplificato, le perdite di energia subite da un masso lungo la traiettoria del moto e assume quindi il significato di angolo di attrito equivalente masso-pendio (Jaboyedff e Labiouse, 2011).

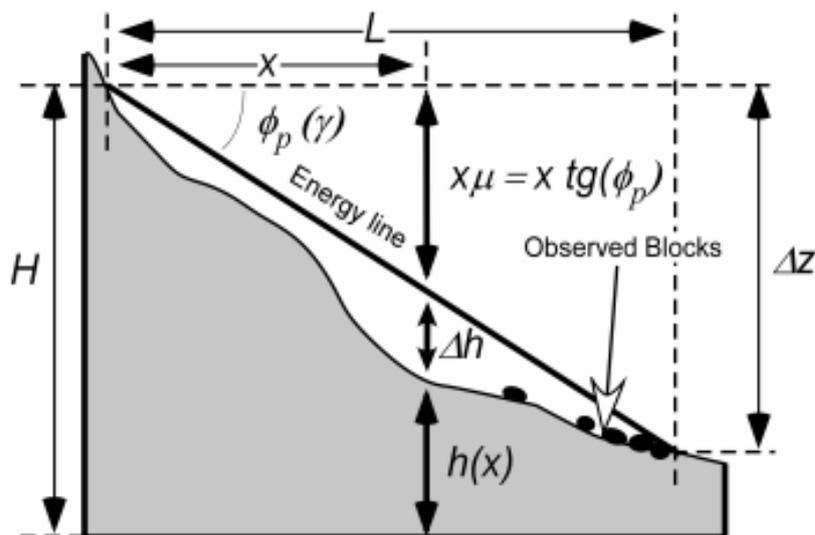


Figura 1.11: variabili utilizzate nel software CONEFALL (Jaboyedoff e Labiouse, 2011).

I principi fisici utilizzati per la creazione del software CONEFALL, come descritto da Jaboyedff e Labiouse, consentono perciò di effettuare un bilancio energetico in un punto generico x della traiettoria di caduta del masso (eq. 6):

$$mgH = mgh(x) + \frac{1}{2}mv(x)^2 + mgx\mu \quad (6)$$

Con:

- H : quota del punto di distacco;
- m : massa del blocco;
- g : accelerazione gravitazionale;
- $h(x)$: quota della superficie topografica;
- $v(x)$: velocità del masso nel punto x ;
- μ : coefficiente di attrito equivalente calcolato come $\mu = tg\varphi_p$;
- mgH : energia potenziale totale;
- $mgh(x)$: energia potenziale nel punto x ;
- $\frac{1}{2}mv(x)^2$: energia cinetica nel punto x ;
- $mgx\mu$: energia dissipata nel punto x ;

Dall'equazione 6 si ricava la velocità, che può quindi essere espressa in termini di altezze (eq. 7):

$$v(x) = \sqrt{2g(H - h(x) - xtg\varphi_p)} \quad (7)$$

1.4.1 QPROTO

Il metodo dei coni proposto da Jaboyedff e Labiouse, è stato recentemente implementato attraverso la creazione del Plugin QPROTO (QGIS Predictive ROckfall Tool, Castelli et al. 2019), per il software open source QGIS 3.4.

QPROTO permette di identificare l'area di invasione e stimare la suscettibilità e la pericolosità relativa (spaziale) di un crollo in roccia per analisi speditive, che tengano conto delle caratteristiche geometriche e topografiche del versante e di alcune considerazioni empiriche.

Il punto focale di QPROTO è costituito dalla creazione di un cono di visibilità, utilizzando la funzione *r.viewshed* inclusa in GRASS 7; la funzione analizza l'area di visibilità e identifica tutti i punti visibili della superficie topografica, a partire da un punto in cui è situato un osservatore (Castelli et al, 2019). Tale punto diventa l'apice di un cono di visibilità, la cui estensione è associata alla definizione di tre angoli fondamentali (inclinazione, apertura, orientazione). Assumendo che all'apice del cono sia collocata una sorgente di caduta massi, il cono di visibilità può assumere il significato di cono di invasione e tutte le aree visibili della superficie topografica possono essere raggiunte da un masso in caduta.

Con questa interpretazione, gli angoli caratteristici del cono sono (Fig. 1.12):

- φ_p : angolo di energy line;
- α : angolo di dispersione laterale;
- ω : angolo di immersione del versante (*dip direction*).

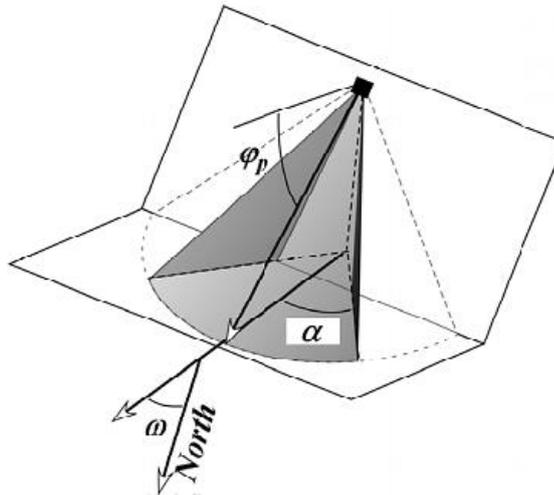


Figura 1.12: definizione dell'angolo verticale di energy line φ_p , dell'angolo di dispersione laterale α e dell'angolo di immersione ω (Jaboyedff e Labiouse, 2011).

Come descritto in precedenza, la massima distanza percorsa da un blocco può essere stimata, in un sistema di riferimento bidimensionale, dall'intersezione della linea di energy line con la superficie topografica del pendio; in questo caso il valore di φ_p rappresenta la dissipazione dell'energia durante il moto del blocco. In un sistema di riferimento tridimensionale, la linea di energy line definisce nel piano verticale il cono di invasione mentre l'angolo α definisce la dispersione laterale delle traiettorie generate dal software.

Dopo aver definito così il cono di invasione, attraverso un approccio energetico (Jaboyedff e Labiouse, 2011) è possibile stimare la velocità di un blocco in caduta per ogni punto della superficie topografica del pendio che ricade nel cono attraverso l'equazione 8:

$$v(x) = \sqrt{2g[H(x_0, y_0) - h(x, y) - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \cdot tg \varphi_p]} \quad (8)$$

L'eq. 8 è valida solo per i punti che si trovano al di sotto dell'energy line e che soddisfano la seguente disequazione:

$$H(x_0, y_0) - h(x, y) - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \cdot tg\phi_p \geq 0 \quad (9)$$

In questo modo, conoscendo la velocità e la massa del blocco, si può ricavare l'energia cinetica $E(x, y)$ per ogni punto posto al di sotto dell'energy line (eq. 10):

$$E(x, y) = \frac{1}{2}mv^2(x, y) \quad (10)$$

I valori di energia cinetica ottenuti tramite QPROTO trascurano la combinazione di caduta libera, rimbalzi, rotolamenti e scivolamenti che avvengono in un moto reale di un punto; tali fenomeni sono simulati attraverso un moto equivalente di scivolamento lungo un piano con angolo di inclinazione ϕ_p . In aggiunta, l'energia cinetica non risulta pesata ma presenta la stessa probabilità di occorrenza per ogni punto compreso nell'area di invasione.

Per far fronte al problema, è stato inserito il parametro *propensity to detachment index* I_D che rappresenta un peso associato ad ogni punto sorgente, attraverso il quale è possibile definire la probabilità relativa che avvenga un distacco da quella sorgente. L'indice I_D permette inoltre di calcolare le frequenze pesate rappresentate dalla mappa *susceptibility.tif* e due mappe di pericolosità relativa *w_en.tif* e *w_tot_en.tif* (Castelli et al, 2019).

1.4.2 Parametri di input

I parametri di input necessari per l'avvio delle simulazioni tramite QPROTO sono identificati da un DTM e da uno shape file contenente i punti di distacco. Ogni punto di distacco (sorgente di blocchi) è caratterizzato da (Castelli et al, 2019):

- *ID*: numero di identificazione del punto sorgente;
- *ELEVATION*: altezza in metri rispetto al livello del mare;
- *ASPECT*: direzione di immersione ω del pendio nel punto sorgente. Valori espressi in gradi ($^\circ$), in un intervallo compreso fra 0-360 $^\circ$.
- *PROPENSITY TO DETACHEMENT INDEX* I_D : esprime la probabilità di distacco associata ad ogni punto sorgente. Tale indice può essere definito con un differente livello di dettaglio, in funzione delle informazioni ricavabili dall'area oggetto di studio (dati storici, mappe che forniscono informazioni sulla densità delle fratture, inclinazione del pendio nella zona di distacco, ecc.) o in funzione dei risultati di indagini speditive condotte sul versante in esame. I valori possibili ricadono in un intervallo compreso fra 0-1.
- *BOULDER MASS*: massa del blocco. Valori espressi in kg.
- *ENERGY LINE ANGLE*: angolo di energy line ϕ_p del cono con apice nel punto sorgente. Valori espressi in gradi ($^\circ$), in un intervallo compreso fra 0-90 $^\circ$.
- *LATERAL SPREADING ANGLE*: angolo di dispersione laterale α del cono con apice nel punto sorgente. Valori espressi in gradi ($^\circ$), in un intervallo compreso fra 0-90 $^\circ$.
- *VISIBILITY DISTANCE*: massima distanza di estensione dell'analisi. Valori espressi in m.

1.4.3 Parametri di output

I parametri di output sono contenuti in 10 mappe raster che rappresentano per ogni cella dell'area di invasione (Castelli et al, 2019):

- *count.tif* (frequenza non pesata): restituisce il numero di punti sorgenti che raggiungono quella cella, cioè la frequenza di passaggio dei coni nella cella;
- *v_min.tif*: restituisce il valore minimo di velocità di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in m/s;
- *v_max.tif*: restituisce il valore massimo di velocità di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in m/s;
- *v_mean.tif*: restituisce la media della velocità di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in m/s;
- *e_min.tif*: restituisce il valore minimo di energia cinetica di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in J;
- *e_max.tif*: restituisce il valore massimo di energia cinetica di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in J;
- *e_mean.tif*: restituisce la media dell'energia cinetica di tutti i coni che “vedono” la cella. I dati sono espressi in J;
- *susceptibility.tif* (frequenza pesata): descrive in che modo è distribuito il fenomeno di caduta massi nella zona di invasione, evidenziando le zone maggiormente colpite in termini di probabilità relativa (spaziale) di occorrenza;
- *w_en.tif*: restituisce la probabilità relativa (spaziale) che un evento, di una determinata magnitudo (energia), possa interessare quella determinata cella. È ottenuto dal prodotto fra l'indice I_D associato a ogni cella sorgente e l'energia cinetica di ogni i -esimo cono di visibilità che raggiunge la cella:

$$w_{en} = [I_{D,i} \cdot E(x, y)_i]_{Max} \quad (11)$$

- *w_tot_en.tif*: restituisce la probabilità relativa (spaziale) che un evento, di una determinata magnitudo (energia), possa interessare quella determinata cella. È ottenuto sommando tutti i prodotti fra l'indice I_D associato a ogni cella sorgente e l'energia cinetica di ogni i -esimo cono di visibilità che raggiunge la cella:

$$w_{tot,en} = \sum_1^n [I_{D,i} \cdot E(x, y)_i] \quad (12)$$

La mappa può essere interpretata in termini di cinetica totale pesata.

1.4.4 Parametri dell'analisi

L'utilizzo di QPROTO richiede che a priori vengano definiti i parametri di input semi-empirici φ_p e α che permettono di definire il cono di visibilità. Per la valutazione dell'angolo di energy line φ_p , nel Par. 1.4 sono stati forniti valori di riferimento reperibili in letteratura; tali valori tuttavia, basati sull'individuazione delle grandezze geometriche che contraddistinguono un fenomeno di caduta massi, non tengono in considerazione le condizioni al contorno che influenzano l'evoluzione di un crollo in roccia.

Osservando che un crollo in roccia è strettamente correlato con una vasta gamma di fattori che possono influenzarne l'evoluzione, risulta necessario indagare su come tali fattori possano modificare l'area di invasione e definire il livello di pericolosità del fenomeno. Per l'angolo di dispersione laterale α non esistono valori di riferimento.

In relazione a queste considerazioni, lo scopo del presente lavoro di tesi è quello di fornire agli utilizzatori del plugin QPROTO, un insieme di valori di φ_p e α che siano calibrati in modo tale da racchiudere al loro interno tutte le informazioni necessarie per una corretta analisi dell'evento. Attraverso le simulazioni delle traiettorie di caduta analizzate con un software di dettaglio quale Rockyfor3D, si cerca di fornire un dataset di angoli che possano risultare ben tarati in relazione alla complessità del fenomeno.

GLI SCENARI DI SIMULAZIONE

2.1 Creazione dei file raster di input

Il lavoro contenuto in questa tesi di Laurea Magistrale si pone in continuità con la preliminare analisi svolta nella tesi di Laurea Magistrale di Cremona (2018).

Il punto di partenza è costituito dall'analisi del fenomeno di caduta massi su versanti semplificati "virtuali", ottenuti cioè dall'unione di tre piani inclinati. Un generico versante virtuale è schematizzato in Fig. 2.1 dove si possono distinguere in rosso la zona di distacco, in verde la zona di transito, in blu la zona di arresto. I punti A e B individuano rispettivamente il punto di distacco e il piede del pendio.

Le simulazioni parametriche hanno lo scopo di evidenziare eventuali correlazioni fra l'angolo di inclinazione del pendio β , la forma del blocco e la densità di vegetazione ad alto fusto attraverso lo studio dei valori contenuti nei raster di output di Rockyfor3D, relativi all'angolo di energy line φ_p (*EL_angle.asc*), al numero di blocchi depositati (*nr_deposited.asc*), alla media della massima energia cinetica (*E_mean.asc*) e ai valori registrati in corrispondenza del "collettore" paramassi (*Rockyfor3D_v50_CalC_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt*).

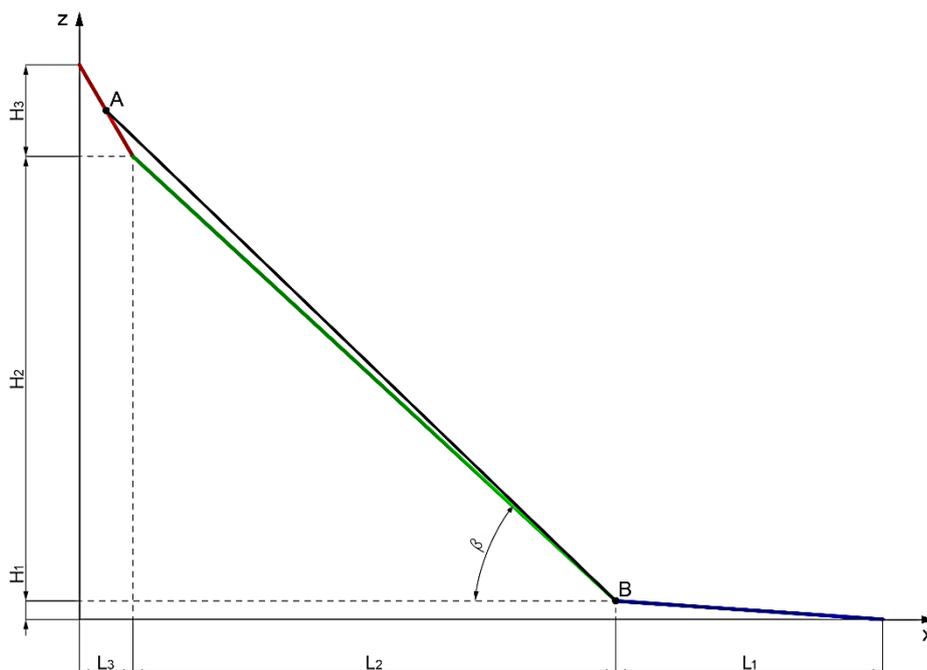


Figura 2.1: elementi di un generico versante virtuale.

Ogni versante è generato a partire da una griglia Excel contenente i valori di x, y, z. Successivamente il file Excel, convertito in un file di testo, è importato in QGIS e discretizzato nella prima mappa raster *dem.asc* con risoluzione 5 m x 5 m.

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

I versanti virtuali oggetto del presente studio risultano accomunati da una vasta gamma di assunzioni di base, necessarie per un'analisi comparabile dei risultati conseguiti nei diversi casi:

- il punto di distacco è individuato da una singola cella posizionata al centro della zona di distacco; la cella non deve essere allocata nelle due righe e due colonne più esterne del raster dal momento che potrebbe risentire degli effetti di bordo;
- il volume di riferimento associato al punto di distacco è di 1 m³ e i valori comuni adottati per D₁, D₂ e D₃ sono indicati in Fig. 2.2. I volumi sono calcolati come segue (Dorren, 2016):

Blshape 1: parallelepipedo o cubo (le tre dimensioni possono essere differenti fra di loro)

$$V = d1 \cdot d2 \cdot d3 \quad (1)$$

Blshape 2: ellissoide (i tre diametri possono essere differenti fra di loro)

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d1}{2} \cdot \frac{d2}{2} \cdot \frac{d3}{2} \quad (2)$$

Blshape 3: sfera (i tre diametri sono identici)

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d1}{2} \cdot \frac{d1}{2} \cdot \frac{d1}{2} \quad (3)$$

Blshape 4: disco (il diametro più piccolo è massimo 1/3 degli altri due, che sono comparabili in termini di grandezze; assumendo che in D_arr[0] sia allocato il valore minore fra d1, d2 e d3 e in D_arr[2] sia allocato il valore maggiore fra d1, d2 e d3)

$$V = \pi \cdot \frac{(D_{arr[1]} + D_{arr[2]}) \cdot (D_{arr[1]} + D_{arr[2]})}{16} \cdot D_{arr[0]} \quad (4)$$

- la variazione percentuale del volume del blocco di distacco è impostata a 0 in modo tale da ottenere un volume di distacco confrontabile per ogni simulazione, rappresentato da un blocco di 1 m³ di volume.

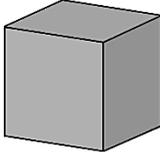
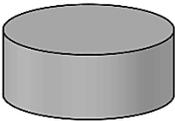
| blshape: 1 | blshape: 2 | blshape: 3 | blshape: 4 |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| D ₁ = 1 m D ₂ = 1 m D ₃ = 1 m | D ₁ = 2 m D ₂ = 1 m D ₃ = 1 m | D ₁ = 1,25 m D ₂ = 1,25 m D ₃ = 1,25 m | D ₁ = 1,60 m D ₂ = 1,60 m D ₃ = 0,50 m |

Figura 2.2: valori adottati per le simulazioni con i diversi block shape.

Tabella 2.1: valori adottati per la creazione dei file di input richiesti dal software Rockyfor3D in riferimento alla zona di distacco, alla zona di transito e alla zona di arresto.

| FILE RASTER | ZONA DI DISTACCO | ZONA DI TRANSITO | ZONA DI ARRESTO |
|---|--|--|---|
| <i>rockdensity.asc</i> [kg/m ³] | 2500 | - | - |
| <i>rg70.asc</i> [m] | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| <i>rg20.asc</i> [m] | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| <i>rg10.asc</i> [m] | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| <i>soiltype.asc</i> [-] | 4: detrito di versante ($\varnothing > \approx 10$ cm) o suolo compatto con grandi massi. | 4: detrito di versante ($\varnothing > \approx 10$ cm) o suolo compatto con grandi massi. | 1: materiale fine (spessore $> \approx 100$ cm) |

Tabella 2.2: valori adottati per la creazione dei file di input richiesti dal software Rockyfor3D.

| CLASSI DI VEGETAZIONE | DENSITÀ DI VEGETAZIONE [trees/ha] | DBH [cm] | DBHSTD [cm] |
|-----------------------|-----------------------------------|----------|-------------|
| 0% | 0 | - | - |
| 25% | 100 | 35 | 1 |
| 50% | 200 | 35 | 1 |
| 75% | 300 | 35 | 1 |
| 100% | 400 | 35 | 1 |

- i valori comuni adottati nei raster caratterizzanti la morfologia del pendio e del punto di distacco sono riportati in Tab. 2.1;
- la vegetazione è concentrata nella sola zona di transito; a favore di sicurezza e valutando la scarsa resistenza meccanica delle conifere nei confronti dei fenomeni di rockfall (Stokes et al., 2005), si assume che la vegetazione sia costituita da 100 % conifere;
- i valori comuni adottati nei raster caratterizzanti la vegetazione sono riportati in Tab. 2.2. Si assume che per un DTM con risoluzione 5 m x 5 m, una classe di vegetazione del 100% corrisponda a 400 alberi/ha e cioè 1 albero per ogni cella del DTM, considerando che i risultati delle analisi sembrano non essere sensibili all'aumentare del valore massimo del numero di alberi presenti in ogni cella del DTM (Netti et al, 2016);
- i versanti sono dotati di un "collettore" paramassi posizionato a circa 50 m dalla fine della zona di transito ed esteso per l'intera dimensione y dei versanti. I collettori sono modellati come reti con una funzione puramente fittizia infatti, *net_energy* e *net_height* sono impostati a 0; in questo modo è possibile valutare il numero di blocchi che lo superano, senza tener conto della capacità di assorbimento di energia e dell'eventuale trattenuta dei blocchi in movimento che impattano sullo stesso;
- i diversi versanti virtuali sono stati modificati nelle simulazioni variando l'angolo β (Fig. 2.1) ma mantenendo inalterate le grandezze H_1 , H_2 e H_3 (dislivelli);
- l'estensione dei versanti nella direzione y è fissata a 1400 m, un valore elevato che permette di considerare tutte le possibili traiettorie di caduta generate al software Rockyfor3D;
- le impostazioni per l'avvio delle simulazioni sono definite tramite l'interfaccia grafica del software Rockyfor3D e prevedono un numero di simulazioni per cella sorgente pari a 20000 traiettorie indipendenti.

2.2 Il versante virtuale 1 ($\beta = 30^\circ$)

La creazione dello scenario di simulazione per il versante virtuale 1 segue le assunzioni definite nel Par. 2.1 ed è rappresentato in Fig. 2.3. Le dimensioni geometriche del versante e l'inclinazione della zona di distacco, di transito e di deposito sono indicate in Fig. 2.4.

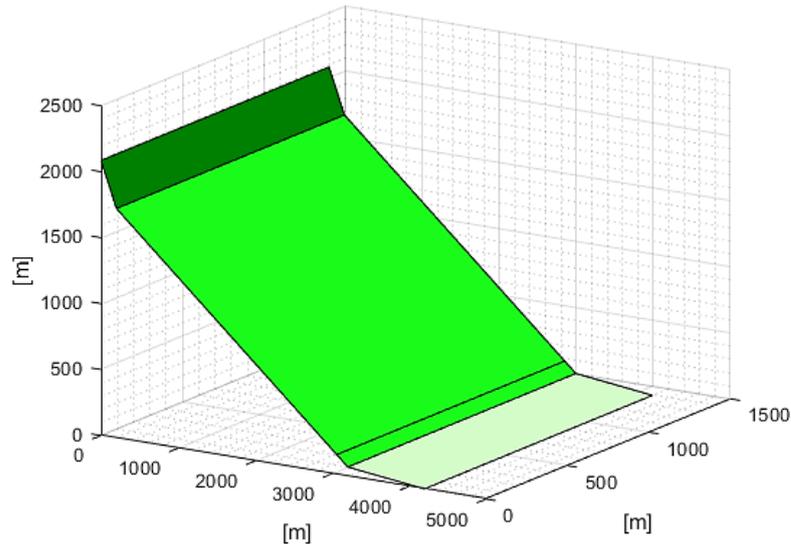


Figura 2.3: schematizzazione del versante virtuale 1 con $\beta = 30^\circ$ ed indicazione della posizione della rete paramassi fittizia.

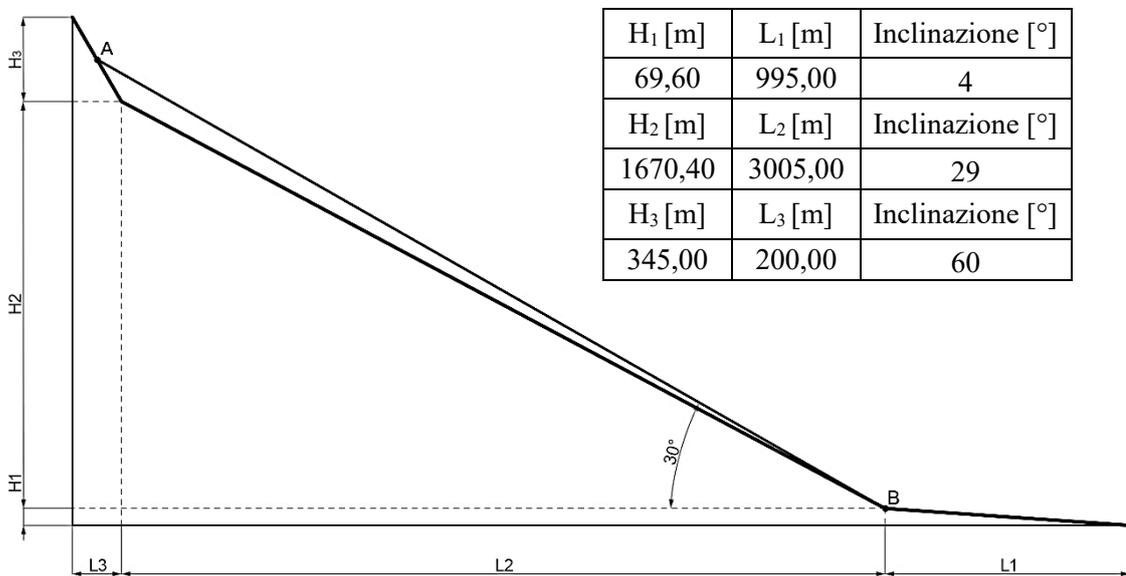


Figura 2.4: sezione del versante con indicazione delle dimensioni e calcolo dell'inclinazione di ogni tratto.

2.2.1 Blocco di forma cubica

I risultati delle traiettorie simulate dal software Rockyfor3D sono riportati in Fig. 2.5 che rappresenta la funzione cumulata della distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto. Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate (ved. Cap. 3).

In riferimento ad un blocco cubico (blshape:1), dalla Fig. 2.5 si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 100% che l'angolo ϕ_p sia uguale a 30° (unico valore ottenuto);
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 41° , del 50% che sia superiore a 35° e del 98% che sia superiore a 31° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 46° , del 50% che sia superiore a 38° e del 98% che sia superiore a 33° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 48° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 36° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 49° , del 50% che sia superiore a 43° e del 98% che sia superiore a 38° ;

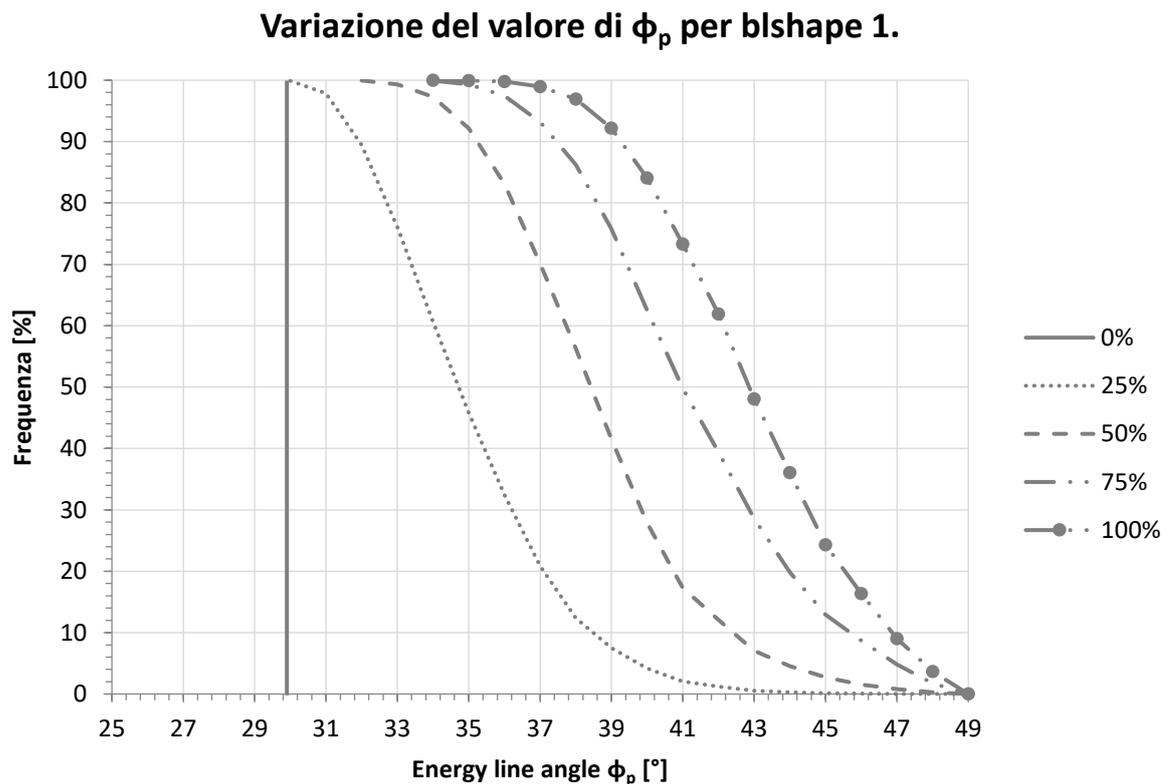


Figura 2.5: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 1 e per un blocco di forma cubica.

In Tab. 2.3 sono riassunti i valori individuati per l'angolo ϕ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo ϕ_p è illustrata in Fig. 2.6. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% l'unico valore è 30° e per tutte le traiettorie il calcolo dell'angolo è riferito al piede del pendio; per una densità di vegetazione del 100% invece la distribuzione degli angoli è concentrata nella zona di transito.

I valori contenuti nel raster *EL_angles.asc* forniscono una classe di valori maggiori di 50° che invece risultano esclusi dalle statistiche relative all'angolo ϕ_p , ricalcolate per ogni traiettoria e riportate nel *Rockyfor3D_v50_logfile_dd-mm-yyyy_HHMM.txt*. I risultati riportati nei grafici delle cumulate di frequenza escludono in prima approssimazione tale classe di valori, facendo riferimento a quanto descritto nel *logfile*.

La limitazione imposta sul calcolo delle statistiche di frequenza associate all'angolo ϕ_p sarà indagata in futuro.

Tabella 2.3: valori di ϕ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | ϕ_{p_2} [°] | ϕ_{p_50} [°] | ϕ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 0% | 30 | 30 | 30 | 4 |
| 25% | 41 | 35 | 31 | 2 |
| 50% | 46 | 38 | 33 | 1 |
| 75% | 48 | 41 | 36 | 1 |
| 100% | 49 | 43 | 38 | 1 |



Figura 2.6: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari a 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari a 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.7. Per un blocco di forma cubica, appare evidente che ad un elevato valore di densità di vegetazione ad alto fusto corrisponde una maggiore capacità degli alberi di frenare o fermare i massi in movimento sul pendio: nello scenario 2.7 a) relativo ad una classe di densità di vegetazione dello 0%, i blocchi percorrono una lunghezza massima (misurata in pianta) di circa 3000 m mentre nello scenario 2.7 b) relativo ad una classe di densità di vegetazione del 100%, i blocchi raggiungono una distanza nettamente minore, pari a circa 900 m.

L'effetto dovuto alla presenza di vegetazione si può valutare ad esempio attraverso l'analisi dei raster *E_mean.asc* e *nr_deposited.asc* che contengono rispettivamente la media dei valori massimi di energia cinetica (considerando il contributo rotazionale e traslazionale) in tutti i blocchi simulati in una determinata cella (Dorren, 2014) e il numero di blocchi depositati per ogni cella. Negli scenari in Fig. 2.7 a) e b) i massimi valori di energia (1660 – 2070 kJ) sono localizzati appena sotto la zona di distacco; successivamente al primo rimbalzo e al cambiamento di pendenza della zona di transito, l'energia cinetica diminuisce fino a raggiungere un valore nullo individuato in corrispondenza del piede del pendio per lo scenario a) e in corrispondenza della zona di transito per lo scenario b).

I valori registrati in corrispondenza del collettore fittizio (Tab. 2.4), disponibili per lo scenario a), indicano che 20000 blocchi impattano contro il collettore con un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 526 kJ e con una velocità al 95esimo percentile di circa 17 m/s, proseguendo verso la zona di deposito con un moto discendente (valore negativo dell'angolo di impatto).

Tabella 2.4: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 525,90 | 16,80 | 0,60 | 31,00 | -28,50 |

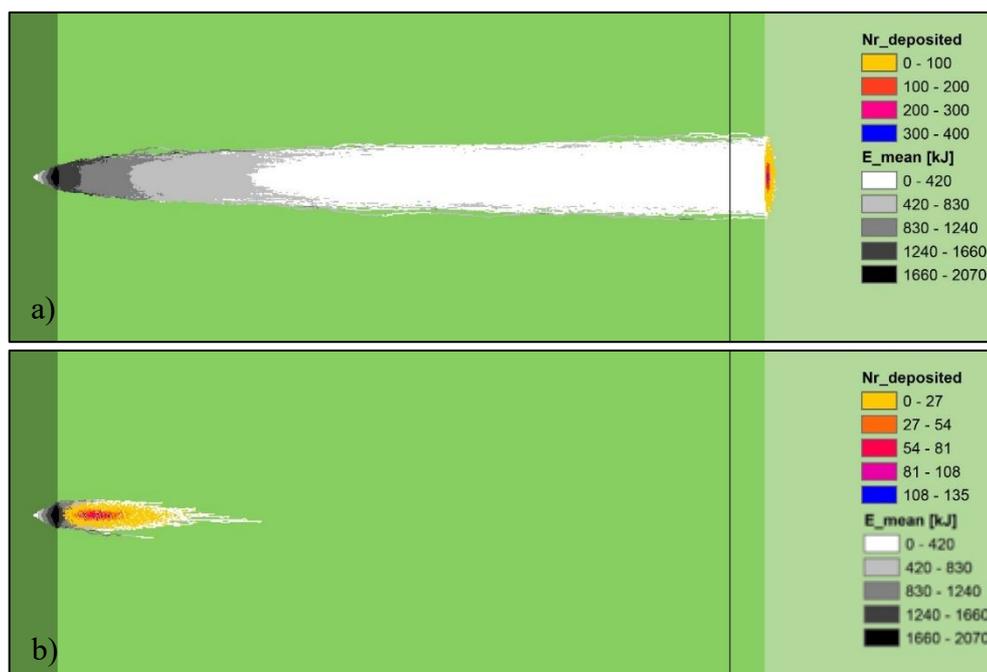


Figura 2.7: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.2.2 Blocco di forma ellissoidale

La Fig. 2.8 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco ellissoidale (blshape:2). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate (ved. Cap. 3).

Analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 29° , del 50% che sia superiore a 28° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 30° , del 50% che sia superiore a 29° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 37° , del 50% che sia superiore a 31° e del 98% che sia superiore a 29° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 34° e del 98% che sia superiore a 31° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 45° , del 50% che sia superiore a 37° e del 98% che sia superiore a 33° ;

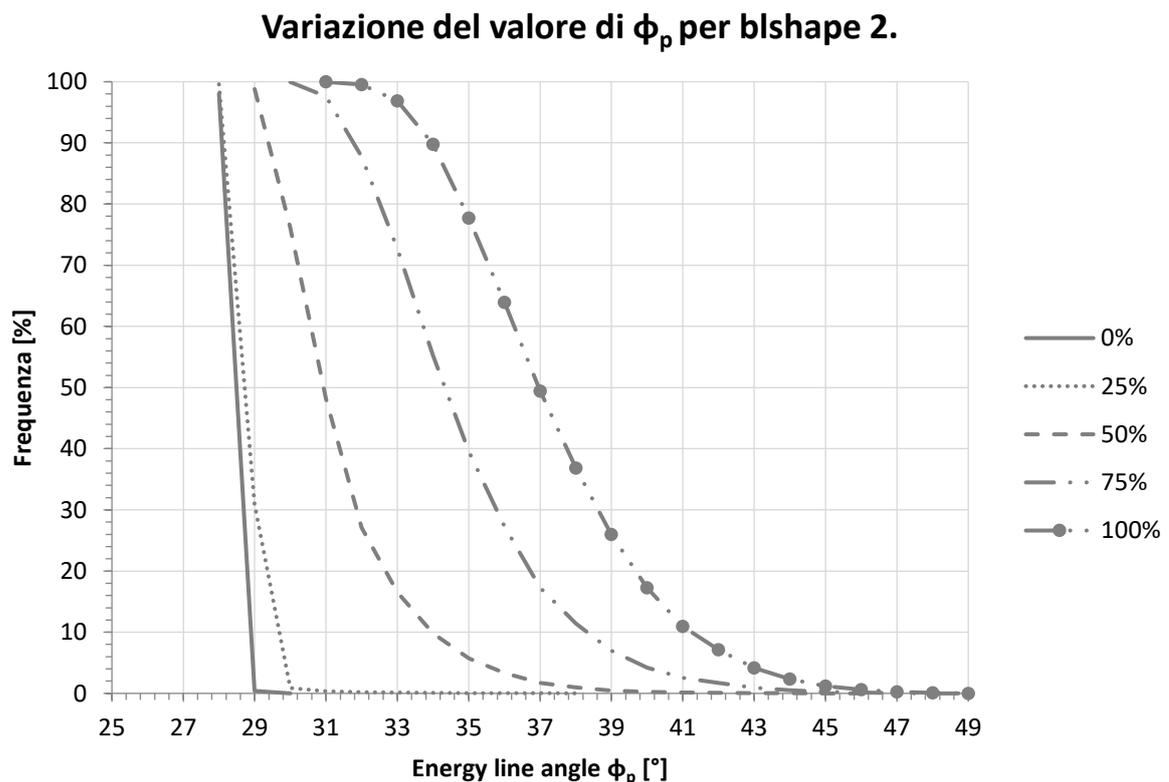


Figura 2.8: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 1 e per un blocco di forma ellissoidale.

In Tab. 2.5 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.9. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 28°; nel caso di una densità di vegetazione del 100% la distribuzione è localizzata nella zona di transito, in cui si registra il valore minimo di 31°. I valori di angolo raggruppati nella classe > 50°, sono stati trascurati (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata) e si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.5: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 29 | 28 | 28 | 8 |
| 25% | 30 | 29 | 28 | 6 |
| 50% | 37 | 31 | 29 | 4 |
| 75% | 42 | 34 | 31 | 2 |
| 100% | 45 | 37 | 33 | 2 |



Figura 2.9: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari a 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari a 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.10. Per un blocco di forma ellissoidale, appare evidente che ad un elevato valore di densità di vegetazione ad alto fusto corrisponde una maggiore capacità degli alberi di frenare o fermare i massi in movimento sul pendio: nello scenario 2.10 a) relativo ad una classe di densità di vegetazione dello 0%, i blocchi percorrono una lunghezza massima (misurata in pianta) di circa 3300 m mentre nello scenario 2.10 b) relativo ad una classe di densità di vegetazione del 100%, i blocchi raggiungono una distanza nettamente minore, pari a circa 1700 m.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento differente. Nello scenario a) il valore della media della massima energia cinetica aumenta nella zona di transito, raggiungendo l'intervallo massimo di 3520 – 4390 kJ nelle zone più esterne dell'area di invasione; in corrispondenza del piede del pendio e della differenza di inclinazione fra la zona di transito e la zona di deposito, essa diminuisce fino a 0 kJ. Nello scenario b) invece, il massimo intervallo di 1600 – 2580 kJ si registra appena sotto la zona di distacco e raggiunge un valore nullo nella zona di transito.

I valori registrati in corrispondenza del collettore fittizio (Tab. 2.6), disponibili per lo scenario a), indicano che 20000 blocchi impattano contro il collettore con un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 4088 kJ e con una velocità al 95esimo percentile di circa 42 m/s, proseguendo verso la zona di deposito con un moto discendente (valore negativo dell'angolo di impatto).

Tabella 2.6: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 4087,60 | 41,80 | 2,20 | 53,50 | -24,40 |

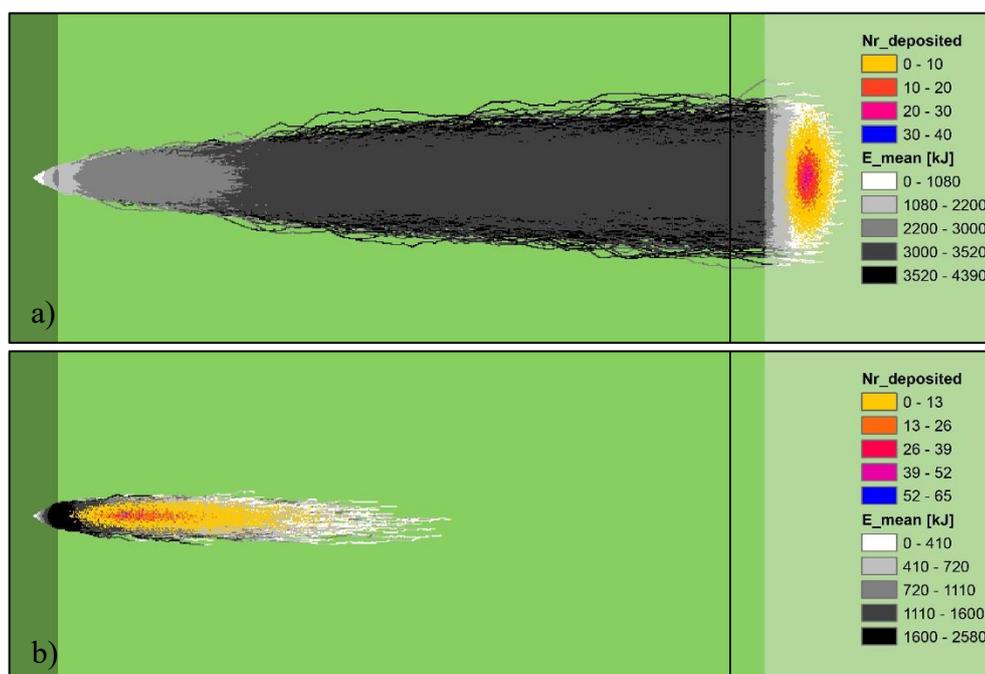


Figura 2.10: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.2.3 Blocco di forma sferica

La Fig. 2.11 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco sferico (blshape:3). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate (ved. Cap. 3).

Analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 30° , del 50% che sia superiore a 29° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 37° , del 50% che sia superiore a 30° e del 98% che sia superiore a 29° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 44° , del 50% che sia superiore a 36° e del 98% che sia superiore a 31° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 47° , del 50% che sia superiore a 39° e del 98% che sia superiore a 34° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 48° , del 50% che sia superiore a 42° e del 98% che sia superiore a 36° ;

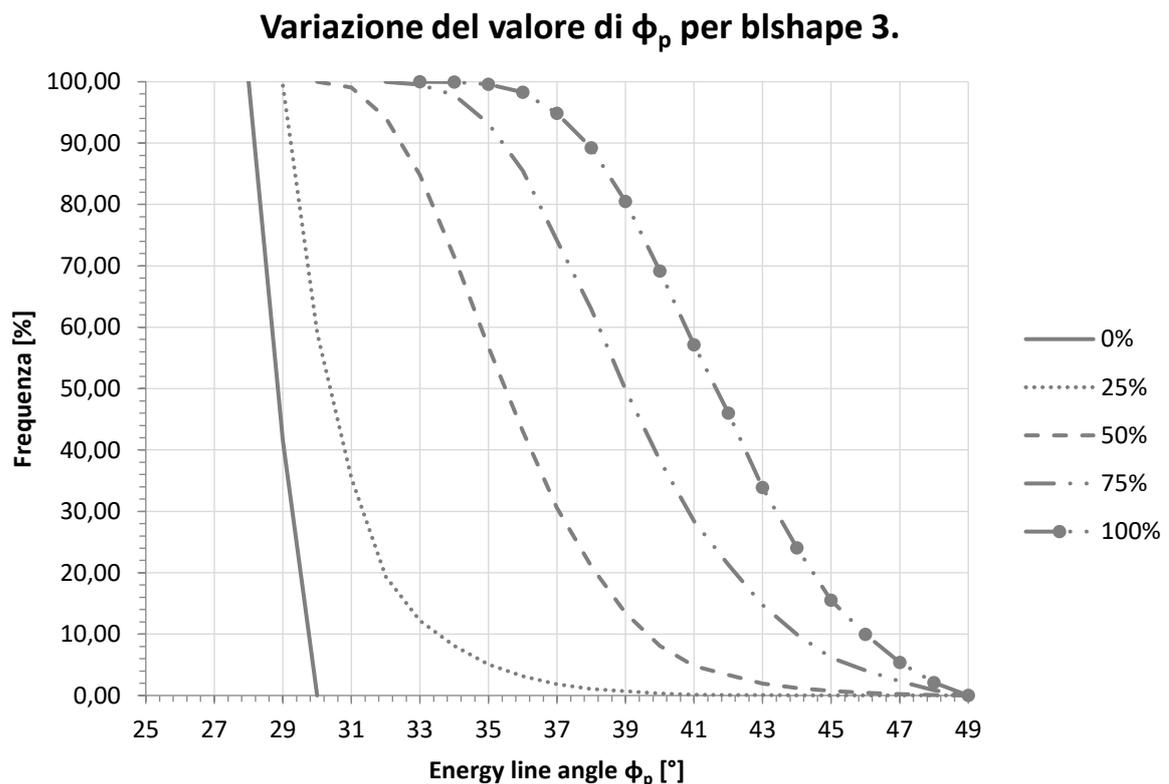


Figura 2.11: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 1 e per un blocco di forma sferica.

In Tab. 2.7 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.12. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 28°; nel caso di una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata nella zona di transito, in cui si registra un valore minimo di 33°. I valori raggruppati nella classe > 50°, sono stati trascurati (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata) e si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.7: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 30 | 29 | 28 | 7 |
| 25% | 37 | 30 | 29 | 4 |
| 50% | 44 | 36 | 31 | 3 |
| 75% | 47 | 39 | 34 | 2 |
| 100% | 48 | 42 | 36 | 2 |

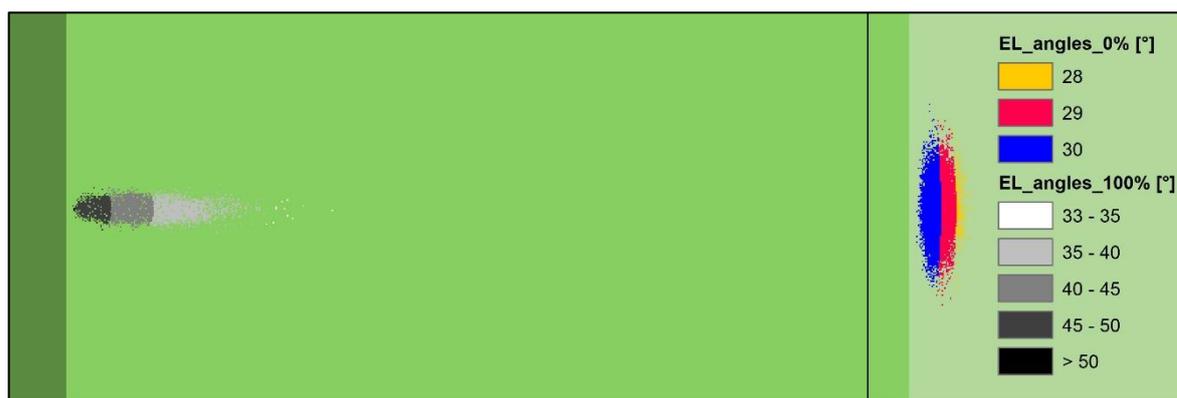


Figura 2.12: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.13. Per un blocco di forma sferica, appare evidente che ad un elevato valore di densità di vegetazione ad alto fusto corrisponde una maggiore capacità degli alberi di frenare o fermare i massi in movimento sul pendio: nello scenario 2.13 a) relativo ad una classe di densità di vegetazione dello 0%, i blocchi percorrono una lunghezza massima (misurata in pianta) di circa 3300 m mentre nello scenario 2.13 b) relativo ad una classe di densità di vegetazione del 100%, i blocchi raggiungono una distanza nettamente minore, pari a circa 1000 m.

In termini di energia cinetica nello scenario a) il massimo intervallo di 1920 - 2740 kJ è localizzato sotto alla zona di distacco; il primo rimbalzo provoca una diminuzione dell'energia che torna ad aumentare nella zona di transito, raggiungendo il massimo nelle zone più esterne dell'area di invasione. In corrispondenza del cambiamento di pendenza relativo al passaggio tra la zona di transito e quella di deposito, i valori diminuiscono fino a raggiungere 0 kJ. Nello scenario b) il massimo intervallo di 1500 - 2150 kJ si registra sotto alla zona di distacco per poi diminuire fino a raggiungere un valore nullo nella zona di transito.

I valori registrati in corrispondenza del collettore fittizio (Tab. 2.8), disponibili per lo scenario a), indicano che 20000 blocchi impattano contro il collettore con un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 2410 kJ e con una velocità al 95esimo percentile di circa 40 m/s, proseguendo verso la zona di deposito con un moto discendente (valore negativo dell'angolo di impatto).

Tabella 2.8: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 2407,00 | 40,00 | 1,80 | 63,80 | -24,60 |

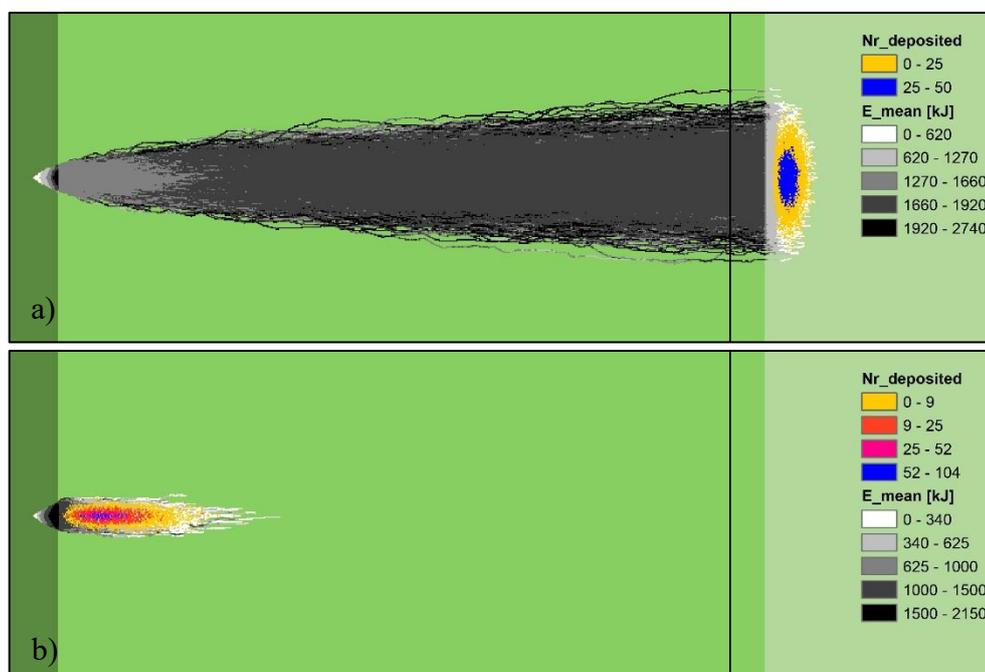


Figura 2.13: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.2.4 Blocco di forma discoidale

La Fig. 2.14 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco discoidale (blshape:4). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate (ved. Cap. 3).

Analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 29° , del 50% che sia superiore a 28° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 29° , del 50% che sia superiore a 28° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 30° , del 50% che sia superiore a 28° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 34° , del 50% che sia superiore a 29° e del 98% che sia superiore a 28° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia inferiore a 38° , del 50% che sia inferiore a 31° e del 98% che sia inferiore a 29° ;

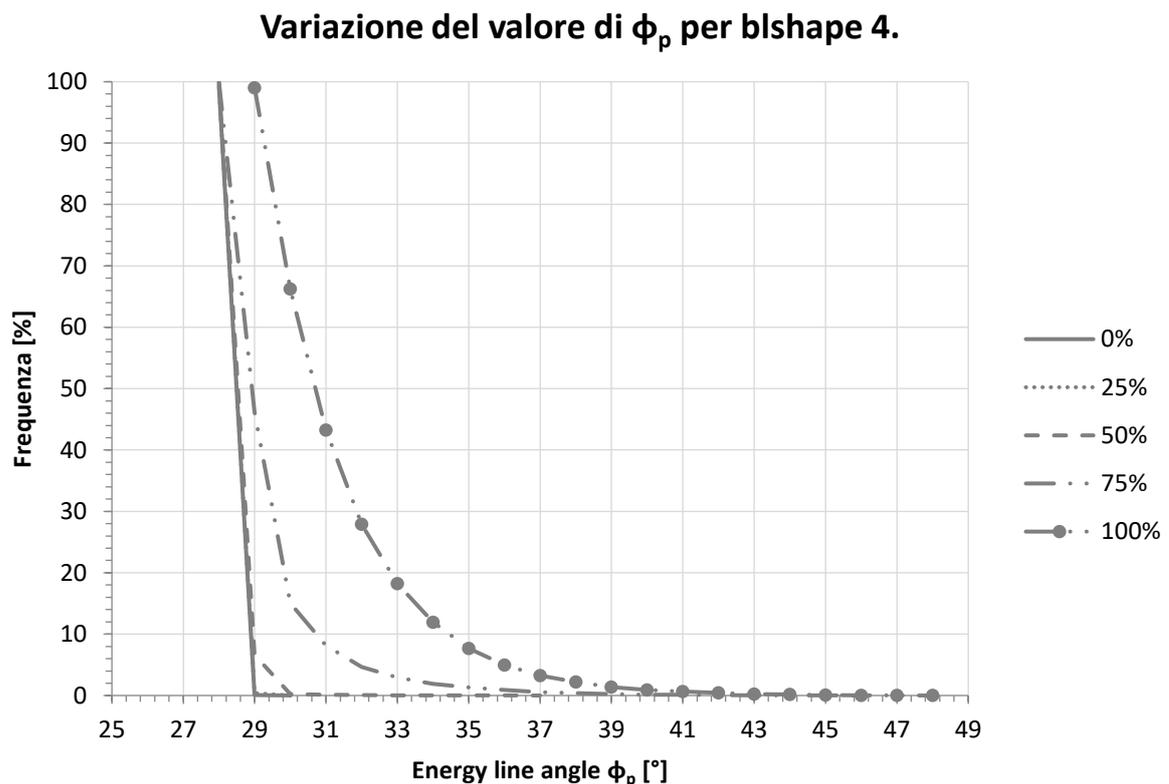


Figura 2.14: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 1 e per un blocco di forma discoidale.

In Tab. 2.9 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.15. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 28°; nel caso di una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata nella zona di transito e nella zona di deposito, in cui si registra un valore minimo di 29°. I valori raggruppati nella classe > 50°, sono stati trascurati (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata) e si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.9: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 29 | 28 | 28 | 8 |
| 25% | 29 | 28 | 28 | 7 |
| 50% | 30 | 28 | 28 | 6 |
| 75% | 34 | 29 | 28 | 5 |
| 100% | 38 | 31 | 29 | 4 |

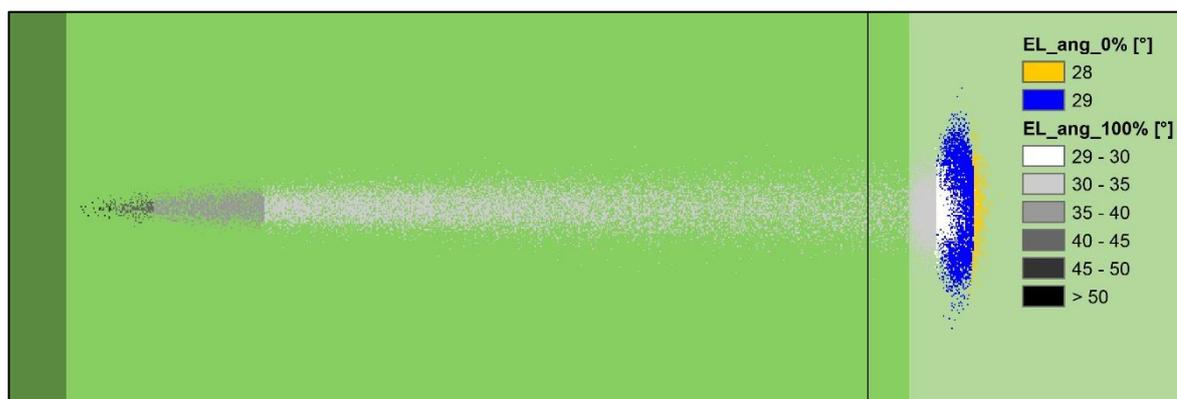


Figura 2.15: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.16. Nel caso di un blocco di forma discoidale si riscontra un'anomalia rispetto agli scenari precedenti infatti la morfologia della zona di invasione, definita dalle traiettorie simulate da Rockyfor3D, è pressoché simile in termini di estensione longitudinale ma non in termini di ampiezza. In Fig. 2.16 a) e b) la massima distanza percorsa dai blocchi è di 3300 m, indipendentemente dalla classe di vegetazione associata allo scenario. Appare tuttavia evidente che nello scenario b) i blocchi vengono fermati dagli alberi nella zona di transito.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento differente nei due scenari. Nello scenario in Fig. 2.16 a) a partire dal punto di distacco si nota un aumento dell'energia cinetica fino ad un massimo compreso nell'intervallo 2500 - 2940 kJ e situato sotto al punto di distacco; in seguito al primo rimbalzo, il blocco perde una parte dell'energia cinetica che si attesta nell'intervallo 1990 - 2500 kJ per poi aumentare nuovamente e raggiungere

l'intervallo massimo di 2500 – 2940 kJ in tutta la zona. Al piede del pendio i valori decrescono fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito. Lo scenario in Fig. 2.16 b) invece presenta il massimo valore 1950 – 2900 kJ sotto la zona di distacco; i valori diminuiscono nella porzione centrale dell'area di invasione fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito.

In entrambi gli scenari i blocchi impattano contro il collettore fittizio e proseguono il moto verso la zona di deposito. I 20000 blocchi che incontrano il collettore presentano un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 2880 kJ e una velocità al 95esimo percentile di circa 42 m/s, nello scenario riferito all'assenza di alberi (Tab. 2.10); all'aumentare della densità di vegetazione il numero di blocchi che raggiungono il collettore diminuisce a 5418, l'energia cinetica al 95esimo percentile diminuisce a 2245 kJ e la velocità al 95esimo percentile diminuisce a 38 m/s, nel caso di una classe di densità di vegetazione del 100% (Tab. 2.11).

Tabella 2.10: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 2876,50 | 41,90 | 2,50 | 50,90 | -24,30 |

Tabella 2.11: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 5418 | 2243,20 | 37,70 | 1,80 | 44,70 | -24,70 |

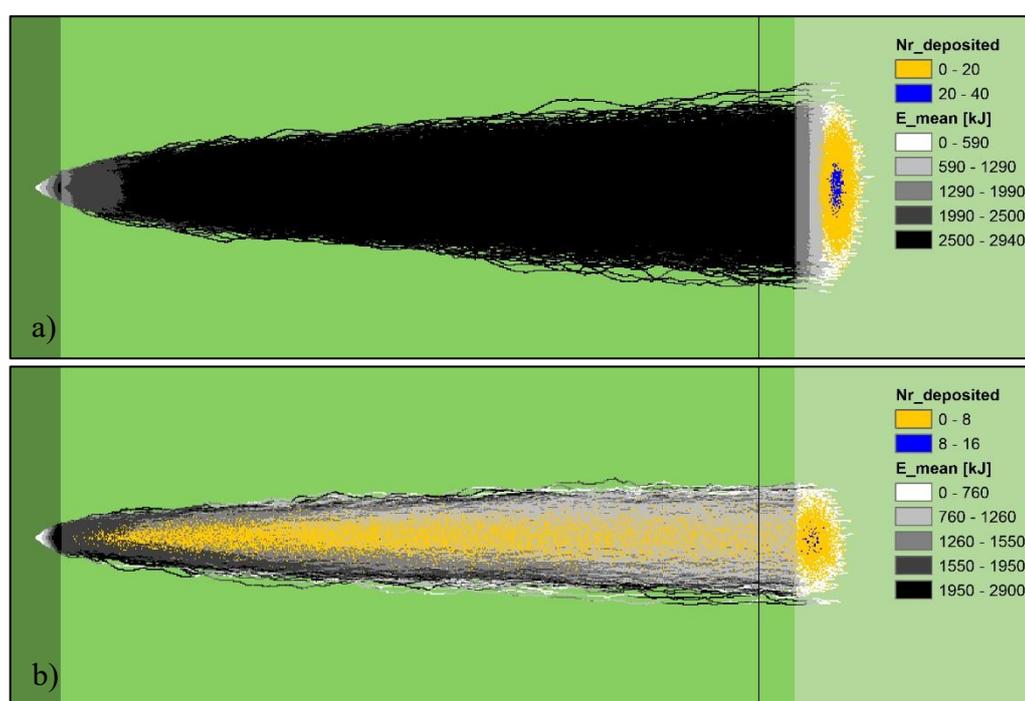


Figura 2.16: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.3 Il versante virtuale 2 ($\beta = 45^\circ$)

Il versante virtuale 2 (Fig. 2.17) è geometricamente determinato dalle dimensioni assunte da Cremona L. P. (2018) nella sua tesi di Laurea Magistrale ed indicate in Fig. 2.18.

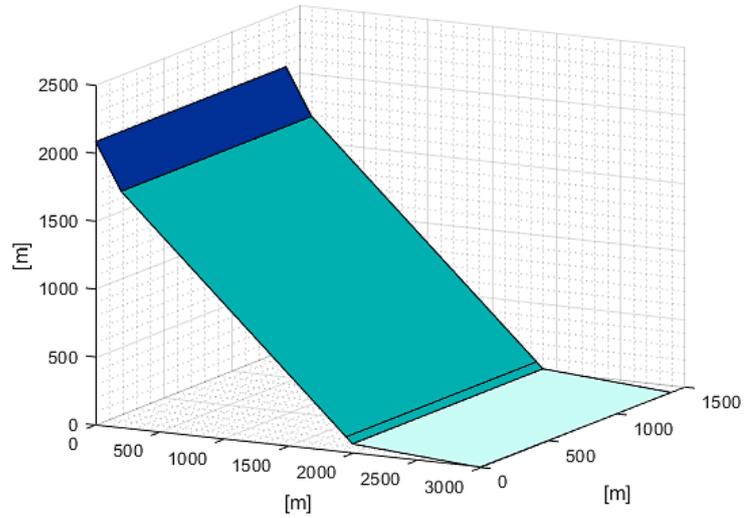


Figura 2.17: schematizzazione del versante virtuale 2 con $\beta = 45^\circ$ ed indicazione della posizione della rete paramassi fittizia.

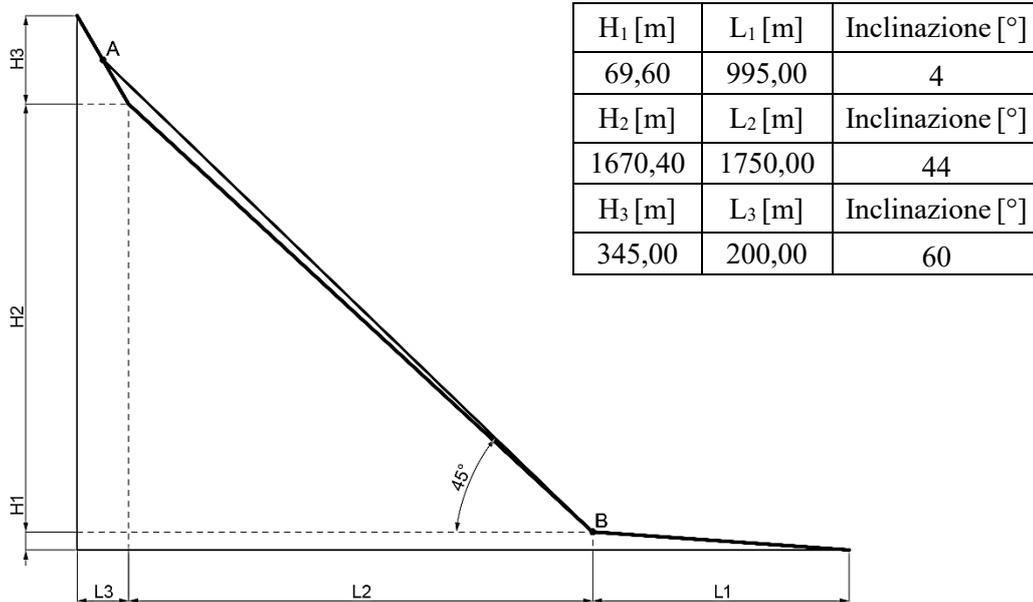


Figura 2.18: sezione del versante con indicazione delle dimensioni e calcolo dell'inclinazione di ogni tratto.

2.3.1 Blocco di forma cubica

I risultati delle traiettorie simulate dal software Rockyfor3D sono riportati in Fig. 2.19 che rappresenta la funzione cumulata della distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto. Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate.

In riferimento ad un blocco cubico (blshape:1), dalla Fig. 2.19 si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 43° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 43° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 43° , del 50% che sia superiore a 42° e del 98% che sia superiore a 41° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 47° , del 50% che sia superiore a 43° e del 98% che sia superiore a 41° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 48° , del 50% che sia superiore a 44° e del 98% che sia superiore a 42° ;

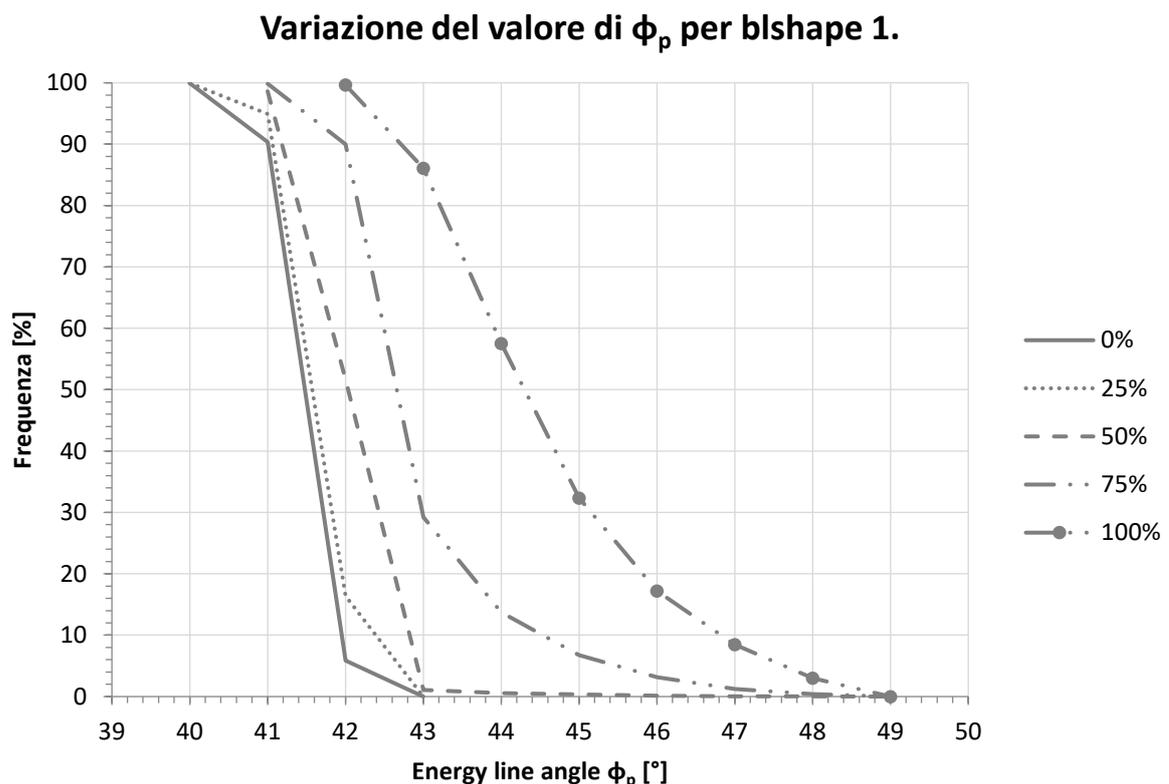


Figura 2.19: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 2 e per un blocco di forma cubica.

In Tab. 2.12 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.20. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 40°; nel caso di una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata nella zona di transito e nella zona di deposito, in cui si registra un valore minimo di 42°. I valori raggruppati nella classe $> 50^\circ$, sono stati trascurati (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata) e si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.12: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 43 | 41 | 40 | 10 |
| 25% | 43 | 41 | 40 | 9 |
| 50% | 43 | 42 | 41 | 7 |
| 75% | 47 | 43 | 41 | 6 |
| 100% | 48 | 44 | 42 | 4 |

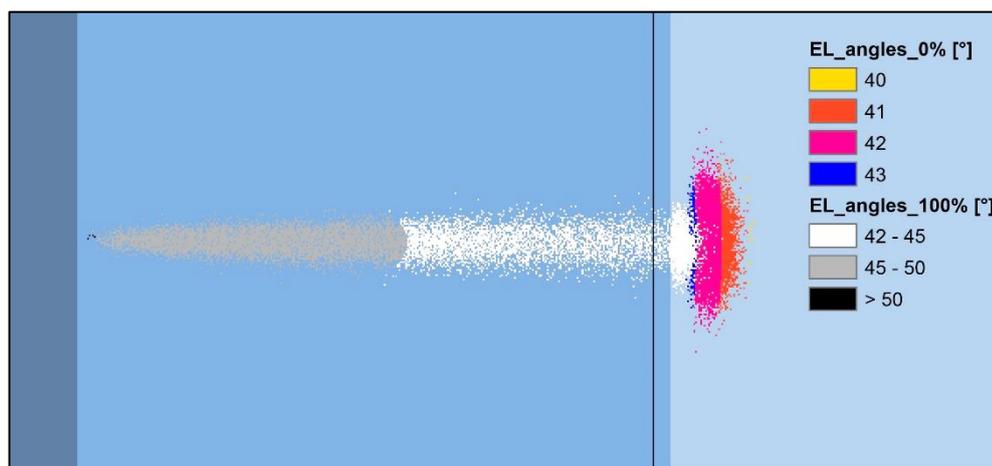


Figura 2.20: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.21. Nel caso di un blocco di forma cubica in movimento lungo un versante con $\beta=45^\circ$ la morfologia dell'area di invasione, definita dalle traiettorie simulate da Rockyfor3D, è pressoché simile in termini di estensione longitudinale ma non in termini di ampiezza. In Fig. 2.21 a) la massima distanza percorsa dai blocchi (misurata in pianta) è di circa 2100 m, in b) la massima distanza è di poco differente ed è di circa 2000 m. Appare tuttavia evidente che nello scenario b) i blocchi vengono fermati dagli alberi nella zona di transito.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento differente nei due scenari. Nello scenario in Fig. 2.21 a) si nota un aumento dell'energia cinetica fino ad un massimo compreso nell'intervallo 2830 - 3700 kJ nella zona di transito. Al piede del pendio e cioè in corrispondenza del cambiamento di pendenza fra la zona di transito e la zona di deposito, i valori decrescono fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito. Lo scenario in Fig. 2.21 b)

invece presenta il massimo valore 1930 – 3270 kJ sotto la zona di distacco; i valori diminuiscono nella porzione centrale dell'area di invasione fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito.

In entrambi gli scenari i blocchi impattano contro il collettore fittizio e proseguono il moto verso la zona di deposito. I 20000 blocchi che incontrano il collettore presentano un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 3480 kJ e una velocità al 95esimo percentile di circa 43 m/s, nel caso di assenza di vegetazione (Tab. 2.13); all'aumentare della densità di vegetazione il numero di blocchi che raggiunge il collettore diminuisce a 3036, l'energia cinetica al 95esimo percentile diminuisce a 1895 kJ e la velocità al 95esimo percentile diminuisce a 32 m/s, nel caso di una classe di densità di vegetazione del 100% (Tab. 2.14).

Tabella 2.13: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 3477,70 | 42,50 | 3,90 | 80,70 | -35,30 |

Tabella 2.14: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 3036 | 1894,80 | 32,30 | 2,20 | 57,10 | -36,30 |

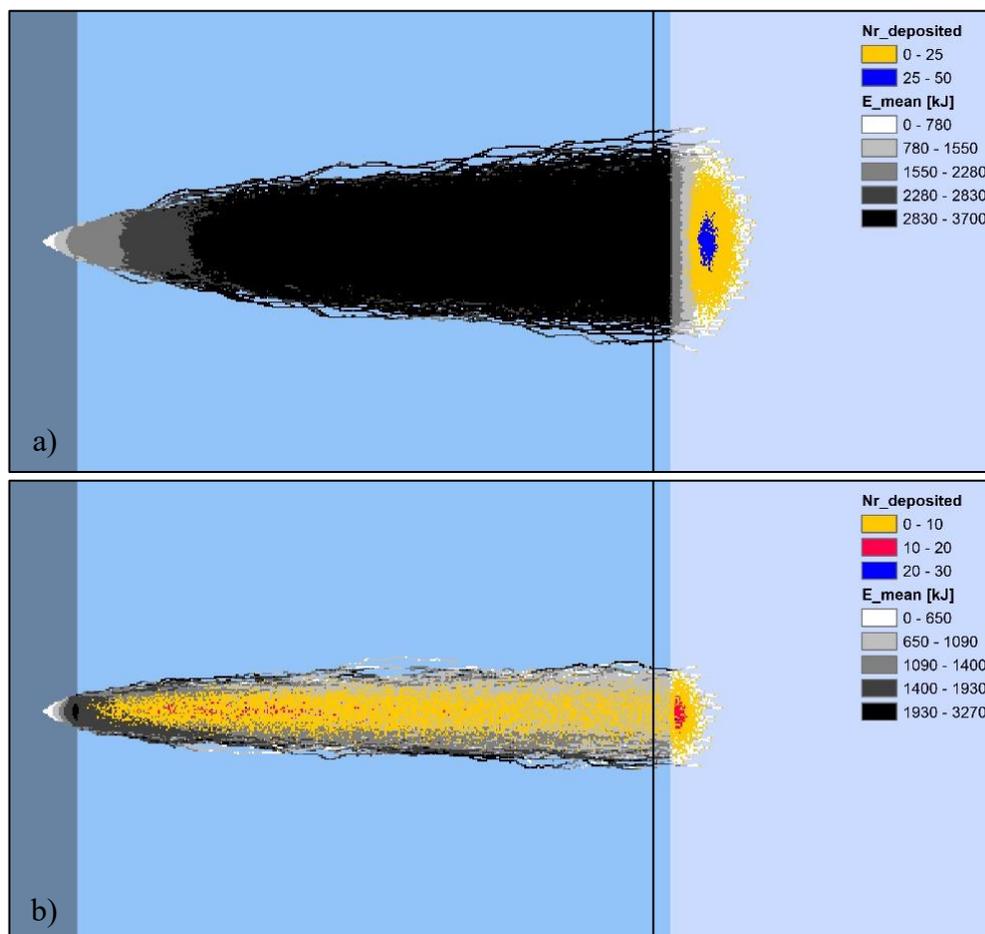


Figura 2.21: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.3.2 Blocco di forma ellissoidale

La Fig. 2.22 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco ellissoidale (blshape:2). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate.

È evidente una minore variabilità dell'angolo ϕ_p in relazione all'aumento della vegetazione infatti i valori si attestano nell'intervallo 39°-42°; analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42°, del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 39°;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42°, del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 39°;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42°, del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 39°;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42°, del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40°;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42°, del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40°;

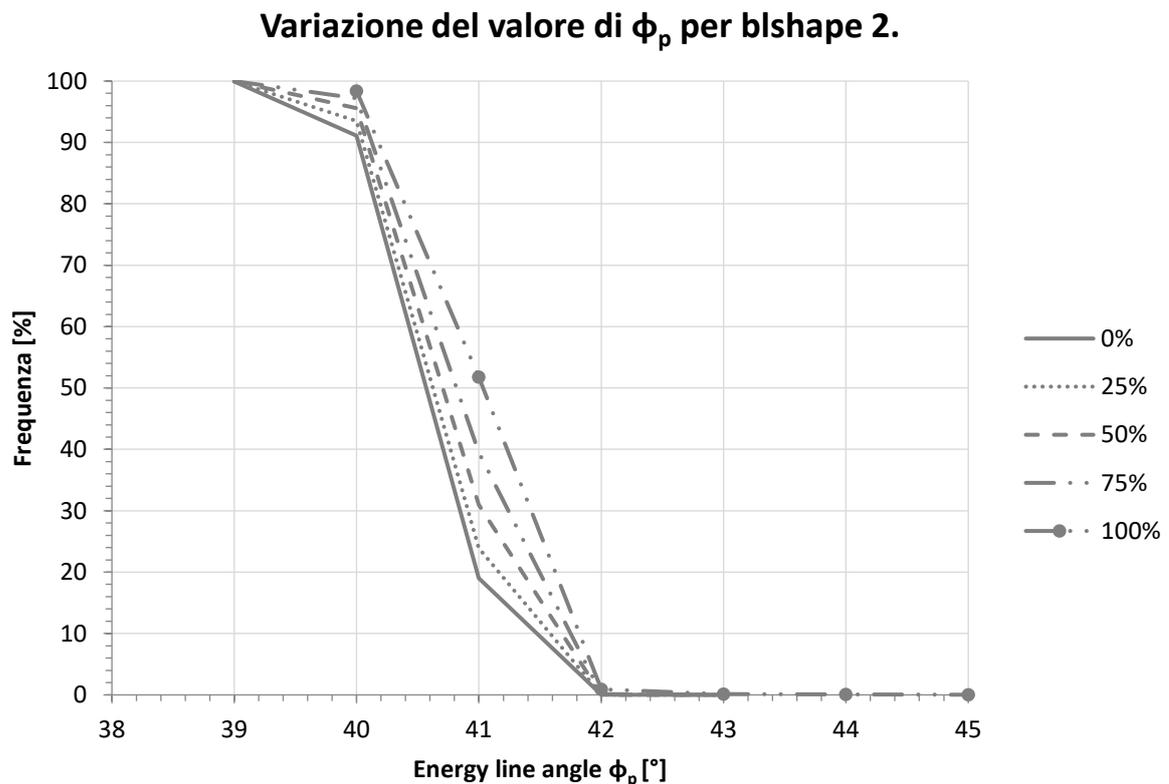


Figura 2.22: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 2 e per un blocco di forma ellissoidale.

In Tab. 2.15 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.23. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 39°; nel caso di una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata nella zona di deposito mentre nella zona di transito si possono individuare alcuni valori maggiori di 50°. Tali valori sono stati trascurati e non rientrano nei diagrammi delle frequenze cumulate (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata); si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.15: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 42 | 41 | 39 | 11 |
| 25% | 42 | 41 | 39 | 10 |
| 50% | 42 | 41 | 39 | 9 |
| 75% | 42 | 41 | 40 | 8 |
| 100% | 42 | 41 | 40 | 7 |

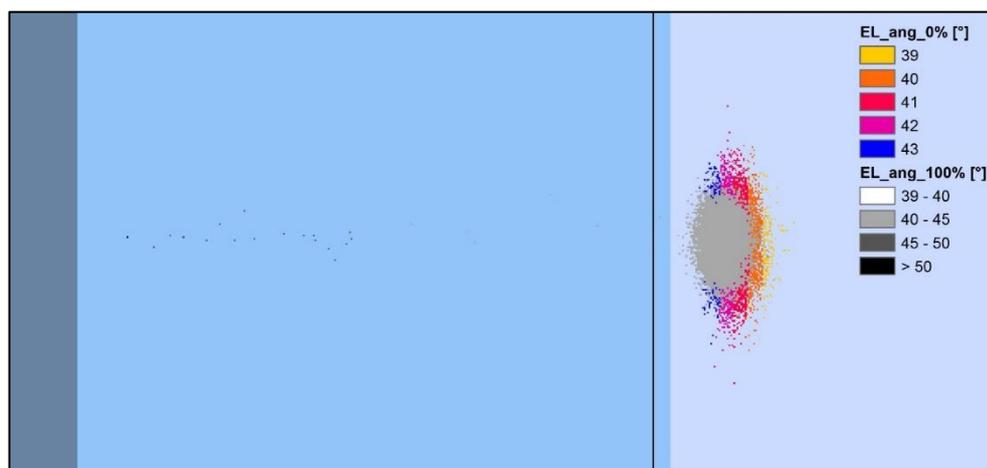


Figura 2.23: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.24. Nel caso di un blocco di forma ellissoidale in movimento lungo un versante con $\beta=45^\circ$ la morfologia dell'area di invasione, definita dalle traiettorie simulate da Rockyfor3D, è pressoché simile in termini di estensione longitudinale ma non in termini di ampiezza. In Fig. 2.24 a) e b) la massima distanza percorsa dai blocchi (misurata in pianta) è di circa 2200 m.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento simile. In entrambi gli scenari l'energia cinetica dei blocchi aumenta dopo il distacco e raggiunge un massimo nella zona di transito rispettivamente compreso nell'intervallo 3670 – 4480 kJ per lo scenario in Fig. 2.24 a) e 3210 – 4250 kJ per lo scenario in Fig. 2.24 b). Al piede del pendio e cioè in corrispondenza del cambiamento di pendenza fra la zona di transito e la zona di deposito, i valori decrescono fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito.

In entrambi gli scenari i blocchi impattano contro il collettore fittizio e proseguono il moto verso la zona di deposito. I 20000 blocchi che incontrano il collettore presentano un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 4282 kJ e una velocità al 95esimo percentile di circa 43 m/s, nel caso di assenza di vegetazione (Tab. 2.16); all'aumentare della densità di vegetazione il numero di blocchi che raggiungono il collettore diminuisce a 19977, l'energia cinetica al 95esimo percentile diminuisce a 3990 kJ e la velocità al 95esimo percentile diminuisce a 42 m/s, nello scenario con una classe di densità di vegetazione del 100% (Tab. 2.17).

Il numero di blocchi che non raggiungono il collettore è pari a 23; in accordo con la distribuzione del numero di depositati riportata in Fig. 2.24 b) si può notare che la maggioranza dei blocchi si ferma nella zona di deposito.

Tabella 2.16: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 4281,30 | 42,80 | 4,60 | 55,00 | -35,20 |

Tabella 2.17: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 19977 | 3989,30 | 42,40 | 5,50 | 51,90 | -34,40 |

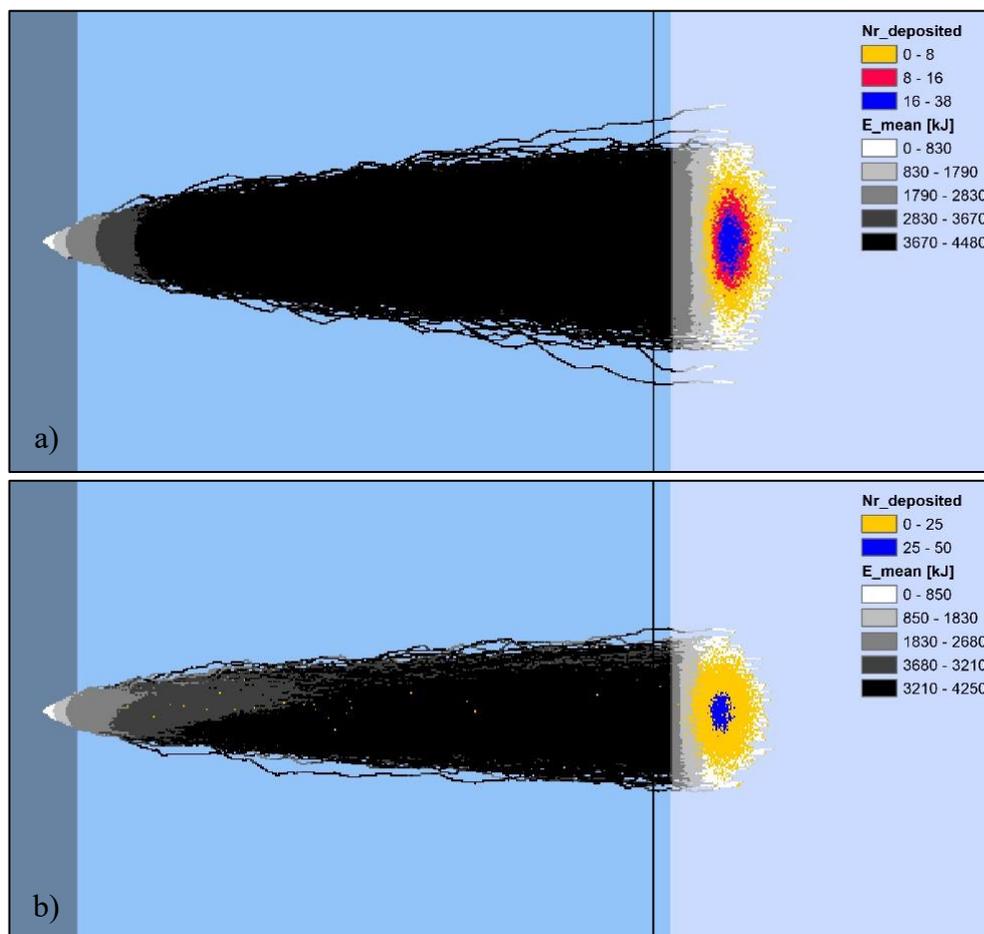


Figura 2.24: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.3.3 Blocco di forma sferica

La Fig. 2.25 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco sferico (blshape:3). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate.

Analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 41° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 43° , del 50% che sia superiore a 42° e del 98% che sia superiore a 41° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 44° , del 50% che sia superiore a 42° e del 98% che sia superiore a 41° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 48° , del 50% che sia superiore a 43° e del 98% che sia superiore a 41° ;

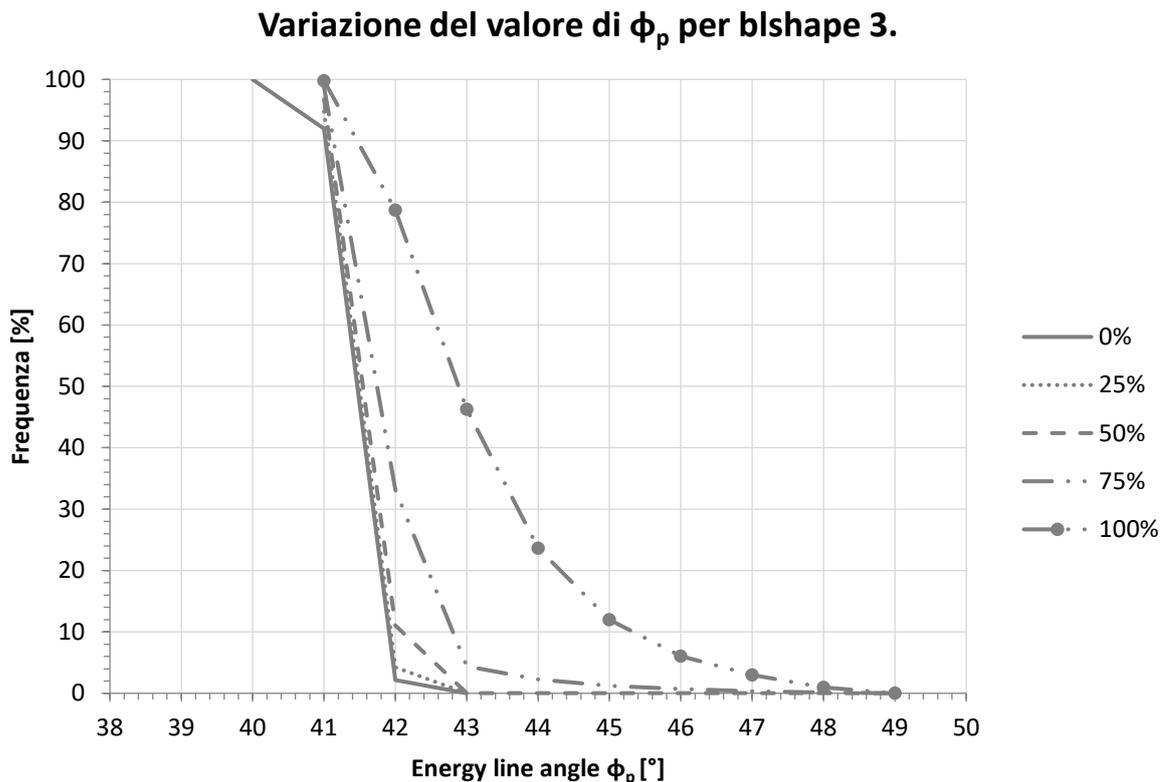


Figura 2.25: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 2 e per un blocco di forma sferica.

In Tab. 2.18 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza dei percentili pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.26. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 40°; nel caso di una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata anche nella zona di transito e si possono individuare alcuni valori maggiori di 50°. Essi sono stati trascurati e non rientrano nei diagrammi delle frequenze cumulate (Par. 2.2.1 per la spiegazione dettagliata); si rimanda ai futuri sviluppi della ricerca l'approfondimento su questi aspetti.

Tabella 2.18: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 42 | 41 | 40 | 10 |
| 25% | 42 | 41 | 41 | 9 |
| 50% | 43 | 42 | 41 | 8 |
| 75% | 44 | 42 | 41 | 7 |
| 100% | 48 | 43 | 41 | 6 |

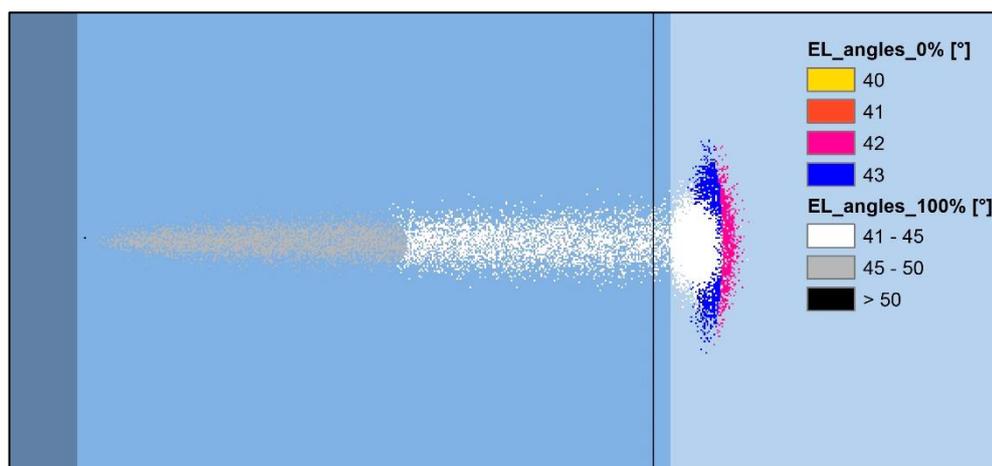


Figura 2.26: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.27. Nel caso di un blocco di forma sferica in movimento lungo un versante con $\beta=45^\circ$ la morfologia dell'area di invasione, definita dalle traiettorie simulate da Rockyfor3D, è pressoché simile in termini di estensione longitudinale ma non in termini di ampiezza. In Fig. 2.27 a) e b) la massima distanza percorsa dai blocchi (misurata in pianta) è di circa 2100 m. Appare tuttavia evidente che nello scenario b) i blocchi vengono fermati dagli alberi nella zona di transito.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento differente nei due scenari. Nello scenario in Fig. 2.27 a) si nota un aumento dell'energia cinetica fino ad un massimo compreso nell'intervallo 2330 - 2910 kJ nella zona di transito. Al piede del pendio e cioè in corrispondenza del cambiamento di pendenza fra la zona di transito e la zona di deposito,

i valori decrescono fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito. Lo scenario in Fig. 2.27 b) invece presenta il massimo valore 1925 – 2730 kJ sotto la zona di distacco; i valori diminuiscono nella parte centrale dell'area di invasione e si annullano nella zona di deposito. In entrambi gli scenari i blocchi impattano contro il collettore fittizio e proseguono il moto verso la zona di deposito. Nel caso di assenza di vegetazione, i 20000 blocchi che incontrano il collettore presentano un'energia cinetica al 95esimo percentile di circa 2760 kJ e una velocità al 95esimo percentile di circa 43 m/s (Tab. 2.19); nel caso di una classe di densità di vegetazione del 100%, il numero di blocchi che raggiunge il collettore diminuisce a 10933, l'energia cinetica al 95esimo percentile diminuisce a 2420 kJ e la velocità al 95esimo percentile diminuisce a 41 m/s (Tab. 2.20).

Tabella 2.19: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 2760,40 | 42,70 | 4,30 | 68,30 | -35,40 |

Tabella 2.20: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 10933 | 2417,10 | 41,20 | 4,00 | 61,30 | -35,30 |

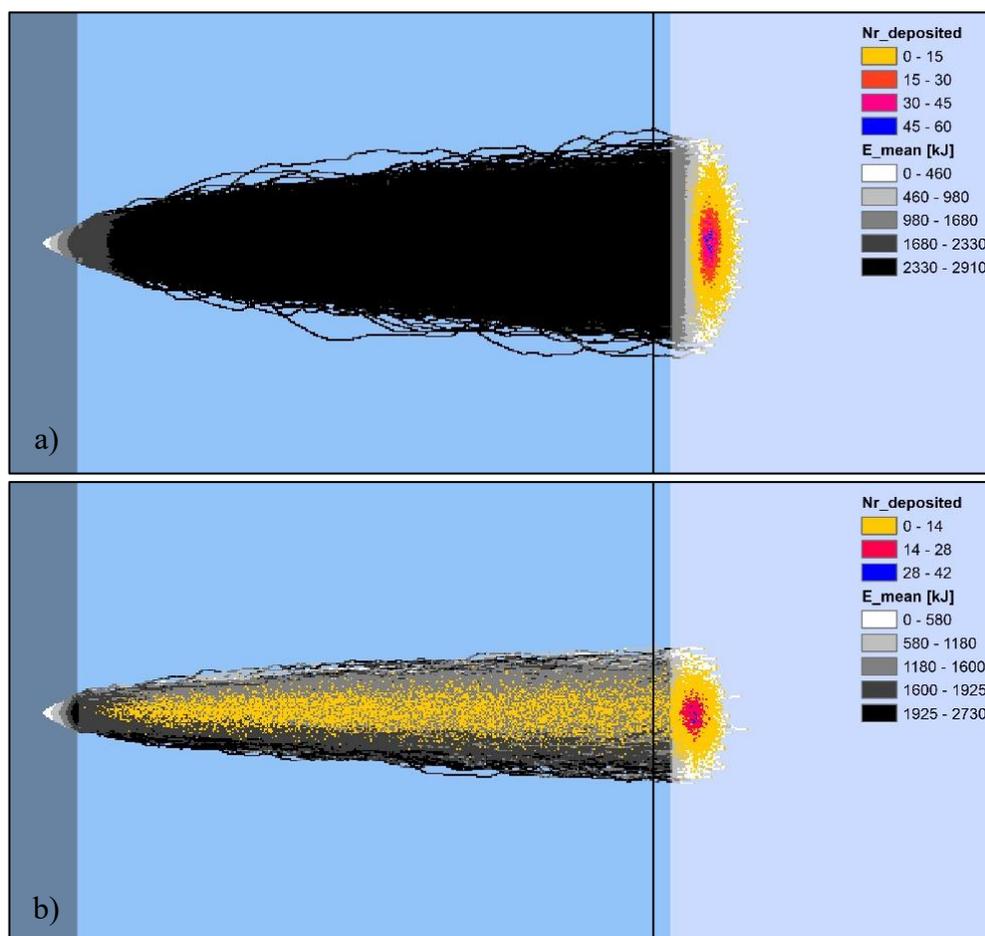


Figura 2.27: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.3.4 Blocco di forma discoidale

La Fig. 2.28 sintetizza attraverso la funzione cumulata la distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco discoidale (blshape:4). Per evitare di incorrere in errori di valutazione degli angoli, per il confronto con gli altri scenari analizzati si individua un valore rappresentativo per ogni distribuzione che corrisponda ad una percentuale del 98% delle traiettorie simulate.

È evidente una minore variabilità dell'angolo ϕ_p in relazione all'aumento della vegetazione infatti i valori si attestano nell'intervallo 40° - 42° ; analizzando il grafico si desume che:

- in assenza di vegetazione ad alto fusto sulla zona di transito, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione ad alto fusto del 25%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione del 50%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione del 75%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;
- per una densità di vegetazione del 100%, la probabilità è del 2% che l'angolo ϕ_p sia superiore a 42° , del 50% che sia superiore a 41° e del 98% che sia superiore a 40° ;

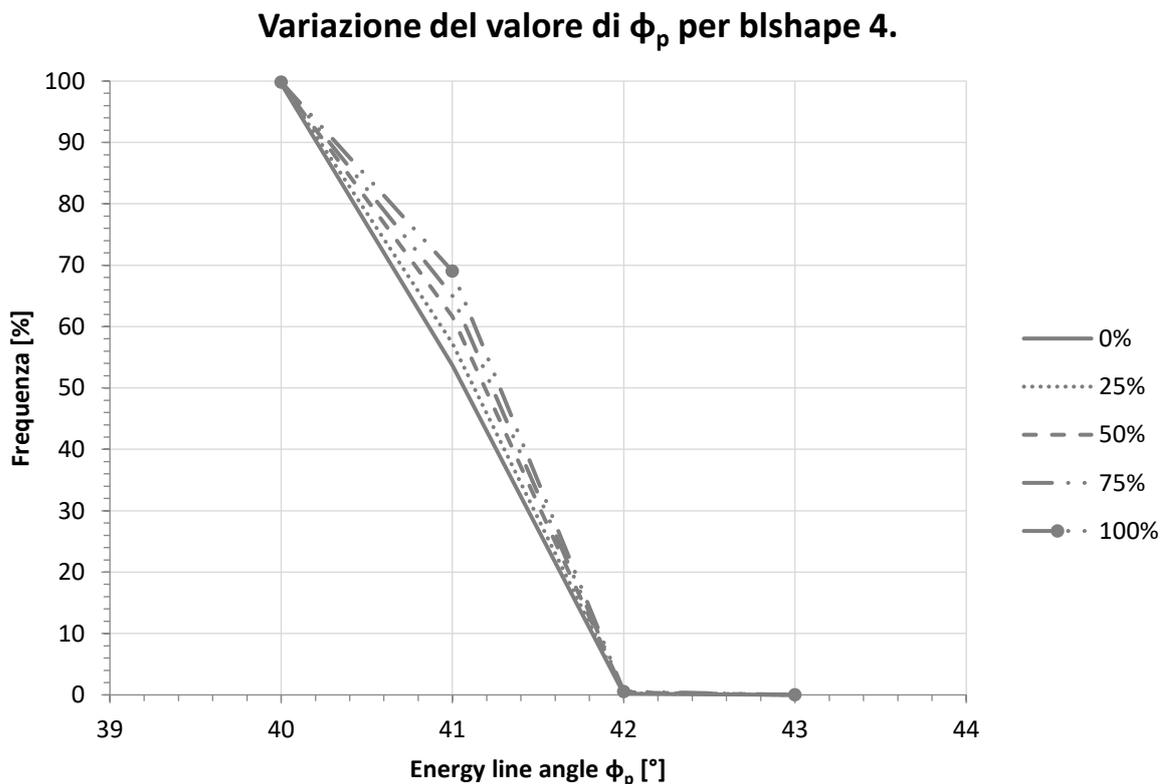


Figura 2.28: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p in funzione della densità di vegetazione per il versante virtuale 2 e per un blocco di forma discoidale.

In Tab. 2.21 sono riassunti i valori individuati per l'angolo φ_p in corrispondenza di un percentile pari al 2% (valori massimi), 50% (valori medi), 98% (valori minimi e più cautelativi) e i valori di angolo di dispersione laterale α , definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione.

La distribuzione spaziale dell'angolo φ_p è illustrata in Fig. 2.29. Come si può notare, in corrispondenza di una densità di vegetazione pari a 0% la distribuzione degli angoli è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 40°; analogamente anche per una densità di vegetazione del 100%, la distribuzione è localizzata nella zona di deposito, in cui si registra il valore minimo di 40°.

Tabella 2.21: valori di φ_p in corrispondenza di un percentile del 2%, del 50% e del 98% e di α .

| | φ_{p_2} [°] | φ_{p_50} [°] | φ_{p_98} [°] | α [°] |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| 0% | 42 | 41 | 40 | 10 |
| 25% | 42 | 41 | 40 | 9 |
| 50% | 42 | 41 | 40 | 9 |
| 75% | 42 | 41 | 40 | 9 |
| 100% | 42 | 41 | 40 | 8 |

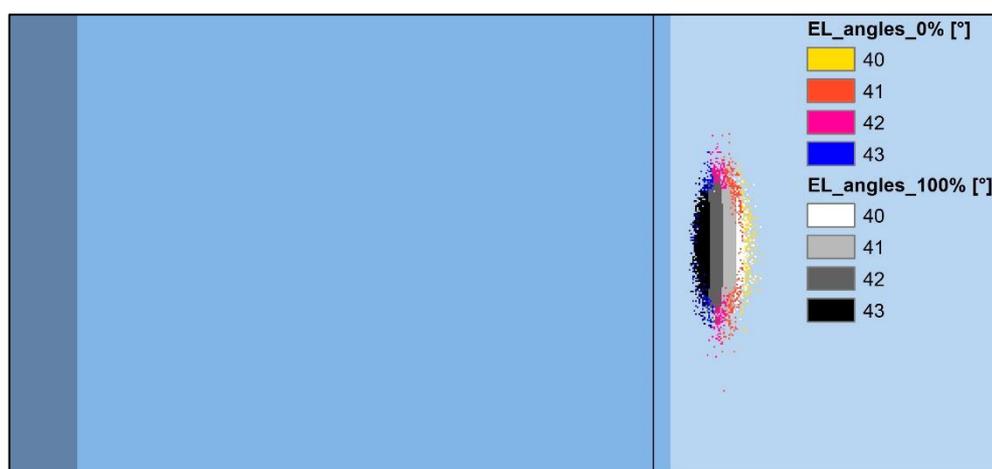


Figura 2.29: distribuzione spaziale degli angoli di energy line per una distribuzione di densità di vegetazione pari allo 0% (assenza di vegetazione) e per una distribuzione pari al 100% (1 albero per ogni cella del DTM).

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.30. Analogamente al caso di un blocco ellissoidale, per un blocco di forma discoidale in movimento lungo un versante con $\beta=45^\circ$ la morfologia dell'area di invasione, definita dalle traiettorie simulate da Rockyfor3D, è pressoché simile in termini di estensione longitudinale ma non in termini di ampiezza. In Fig. 2.30 a) e b) la massima distanza percorsa dai blocchi (misurata in pianta) è di circa 2100 m.

In termini di energia cinetica, la distribuzione assume un comportamento simile. In entrambi gli scenari l'energia cinetica dei blocchi aumenta dopo il distacco e raggiunge un massimo nella zona di transito corrispondente ad un intervallo di energie di circa 2500 – 3000 kJ. Al piede del pendio e cioè in corrispondenza del cambiamento di pendenza fra la zona di transito e la zona di deposito, i valori decrescono fino a raggiungere 0 kJ nella zona di deposito.

Si evince inoltre che sulla zona di transito non si verifica un accumulo di blocchi; la presenza della vegetazione non influenza la traiettoria dei blocchi e tale affermazione trova riscontro in un valore minimo costante dell'angolo di energy line φ_p pari a 40° .

In entrambi gli scenari il numero di blocchi che impatta contro il collettore fittizio è di 20000 e nessun blocco si ferma nella zona di transito; essi presentano valori di energia cinetica al 95esimo percentile nell'ordine di circa 3000 kJ e di velocità al 95esimo percentile nell'ordine di 43 m/s (Tab. 2.22 e 2.23).

Tabella 2.22: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 2987,20 | 42,80 | 4,60 | 52,10 | -35,10 |

Tabella 2.23: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 2931,40 | 42,70 | 5,70 | 51,00 | -34,30 |

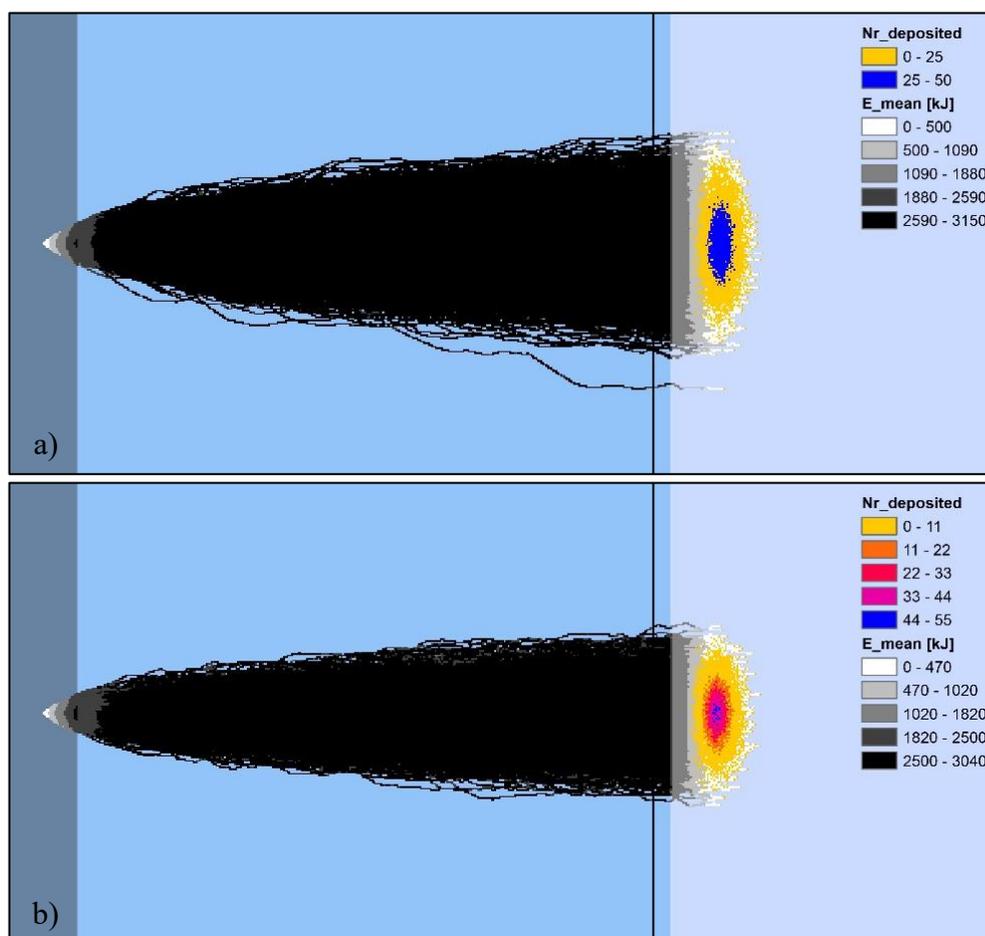


Figura 2.30: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.4 Il versante virtuale 3 ($\beta = 60^\circ$)

Il versante virtuale 3 è rappresentato in Fig. 2.31. Le dimensioni geometriche del versante e l'inclinazione della zona di distacco, di transito e di deposito sono indicate in Fig. 2.32.

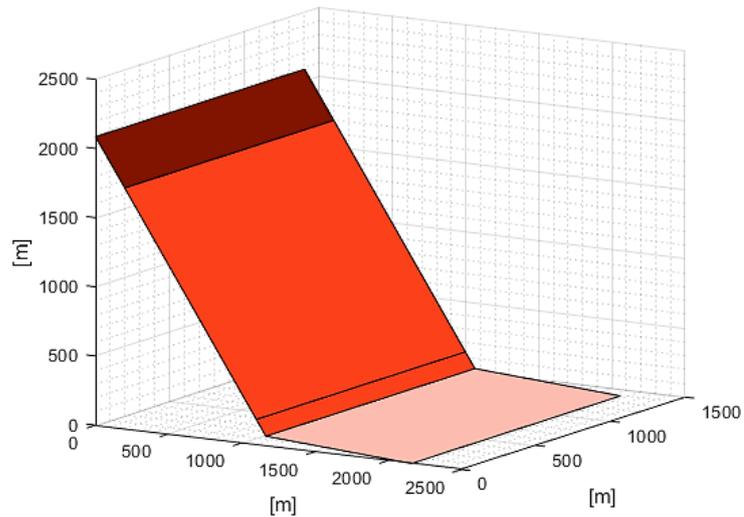
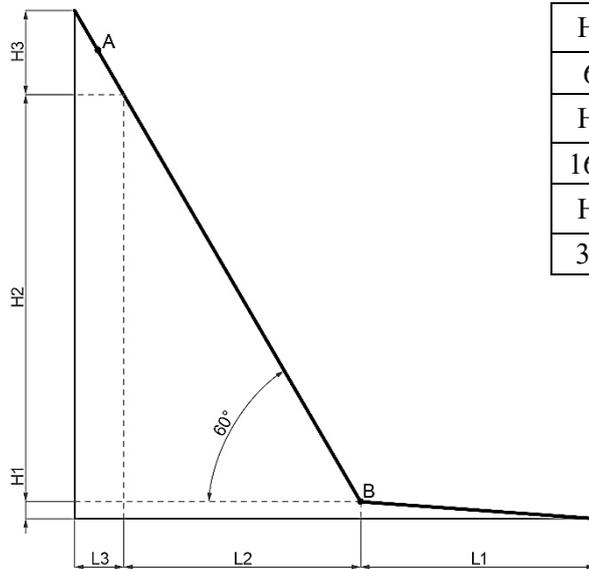


Figura 2.31: schematizzazione del versante virtuale 3 con $\beta = 60^\circ$ ed indicazione della posizione della rete paramassi fittizia.



| | | |
|-----------|-----------|---------------------------|
| H_1 [m] | L_1 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
| 69,60 | 995,00 | 4 |
| H_2 [m] | L_2 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
| 1670,40 | 965,00 | 60 |
| H_3 [m] | L_3 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
| 345,00 | 200,00 | 60 |

Figura 2.32: sezione del versante con indicazione delle dimensioni e calcolo dell'inclinazione di ogni tratto.

Come specificato nelle simulazioni precedenti, per angoli di inclinazione del pendio β maggiori di 50° , nel *logfile.txt* creato al termine di ogni simulazione non vengono visualizzate le statistiche relative alla frequenza dei valori di energy line angle φ_p ed associate ad ogni traiettoria.

Si è scelto di inserire comunque le simulazioni effettuate per i versanti virtuali 3 e 4 (Par. 2.5) al fine di fornire un quadro completo sul possibile valore assunto dagli angoli φ_p e α anche nel caso di pendii caratterizzati da valori notevoli di β .

La comparazione dei valori assunti da φ_p con i versanti virtuali descritti in precedenza, avverrà sulla base del valore minimo di energy line angle φ_p ricavato dal file raster *EL_angles.asc*.

2.4.1 Valori di energy line angle φ_p ed effetto della forma del blocco

○ BLOCCO DI FORMA CUBICA

La Tab. 2.24 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc* e i valori dell'angolo di dispersione laterale α (definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione), suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma cubica. I valori massimi si attestano a 59° per tutti gli scenari; tale valore, inferiore all'angolo di inclinazione del pendio $\beta=60^\circ$, è correlato con l'assenza di blocchi depositati nella zona di transito come evidenziato in Fig. 2.33 e 2.34. Ad una maggiore distanza percorsa dai blocchi è associato un minor valore dell'angolo di energy line φ_p .

La distribuzione dell'angolo φ_p è concentrata nella zona di deposito e presenta una distribuzione simile, indipendentemente dalla classe di vegetazione considerata (Fig. 2.33).

Tabella 2.24: valori di energy line angles φ_p e di dispersione laterale α per il versante virtuale 3 e per un blocco di forma cubica.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] | α [°] |
|----------|------------------|------------------|--------------|
| 0% | 54 | 59 | 15 |
| 25% | 54 | 59 | 13 |
| 50% | 54 | 59 | 11 |
| 75% | 55 | 59 | 10 |
| 100% | 55 | 59 | 10 |

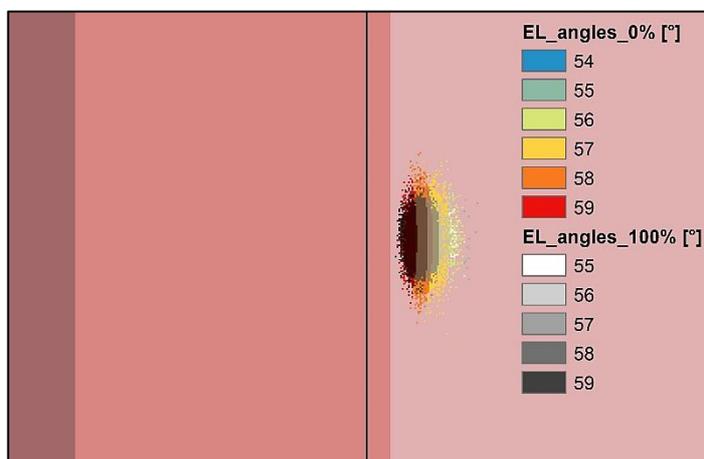


Figura 2.33: distribuzione degli angoli di energy line φ_p per un blocco di forma cubica.

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.34. Gli scenari riferiti al versante virtuale 3 non mettono in evidenza significativi cambiamenti nell'estensione longitudinale dell'area di invasione del crollo né sembra che la presenza e la densità di vegetazione influenzino la traiettoria di caduta in questo caso. In tutti gli scenari i blocchi raggiungono la zona di deposito, percorrendo una distanza massima (misurata in pianta) di circa 1300 m.

I valori registrati in corrispondenza del collettore fittizio evidenziano che nelle 20000 traiettorie simulate, tutti i blocchi impattano contro di esso e proseguono il moto verso la zona di deposito (Tab. 2.25 e 2.26).

Gli scenari di simulazione riferiti ai versanti virtuali 1 e 2 hanno evidenziato che in molti casi si può individuare un valore massimo di energia cinetica in corrispondenza del cambiamento di pendenza relativo al passaggio fra la zona di distacco e la zona di transito. Tale eventualità non si verifica mai nel caso del versante virtuale 3 per il quale un'inclinazione costante di 60° delle zone di distacco e di transito, produce un aumento graduale di energia cinetica con picchi concentrati nella zona di transito.

I massimi valori presentano un picco di circa 4400 kJ nella zona di transito nello scenario 2.34 a) e nelle parti più esterne dell'area di invasione nello scenario 2.34 b). In seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, le energie diminuiscono fino a raggiungere un valore nullo nella zona di deposito.

Tabella 2.25: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 3921,50 | 46,20 | 12,30 | 84,90 | -46,70 |

Tabella 2.26: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 20000 | 3762,30 | 46,60 | 12,50 | 84,00 | -45,90 |

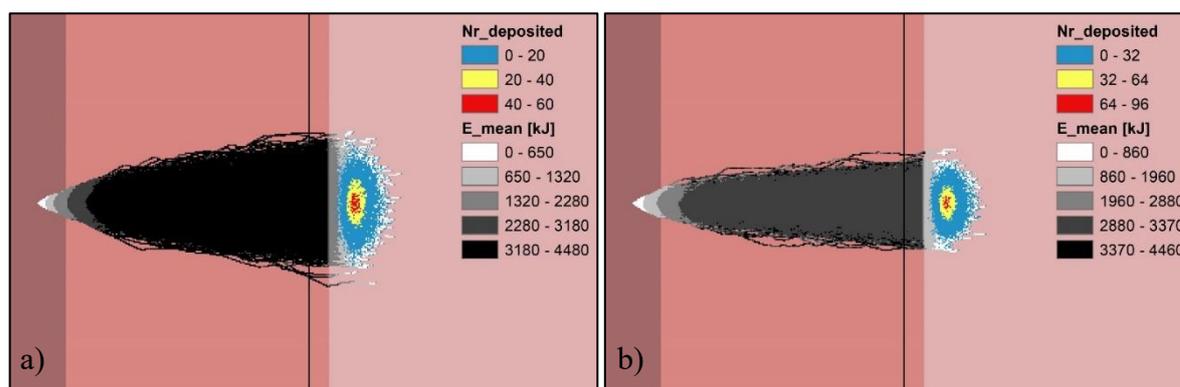


Figura 2.34: distribuzione del numero di blocchi cubici depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA ELLISSOIDALE

La Tab. 2.27 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc* e i valori dell'angolo di dispersione laterale α (definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione), suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma ellissoidale. I valori minimi passano da 52° a 53° in relazione all'aumento della densità di vegetazione mentre quelli massimi si attestano sul valore costante di 59°.

In termini di energia cinetica, il massimo valore si registra in corrispondenza della zona di transito sia per lo scenario indicato in 2.35 a) sia per lo scenario indicato in 2.35 b) e si attesta nell'ordine di grandezza di 5000 kJ. I valori decrescono al piede del pendio e si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.27: valori di energy line angles φ_p e di dispersione laterale α per il versante virtuale 3 e per un blocco di forma ellissoidale.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] | α [°] |
|----------|------------------|------------------|--------------|
| 0% | 52 | 59 | 15 |
| 25% | 53 | 59 | 12 |
| 50% | 53 | 59 | 12 |
| 75% | 53 | 59 | 11 |
| 100% | 53 | 59 | 10 |

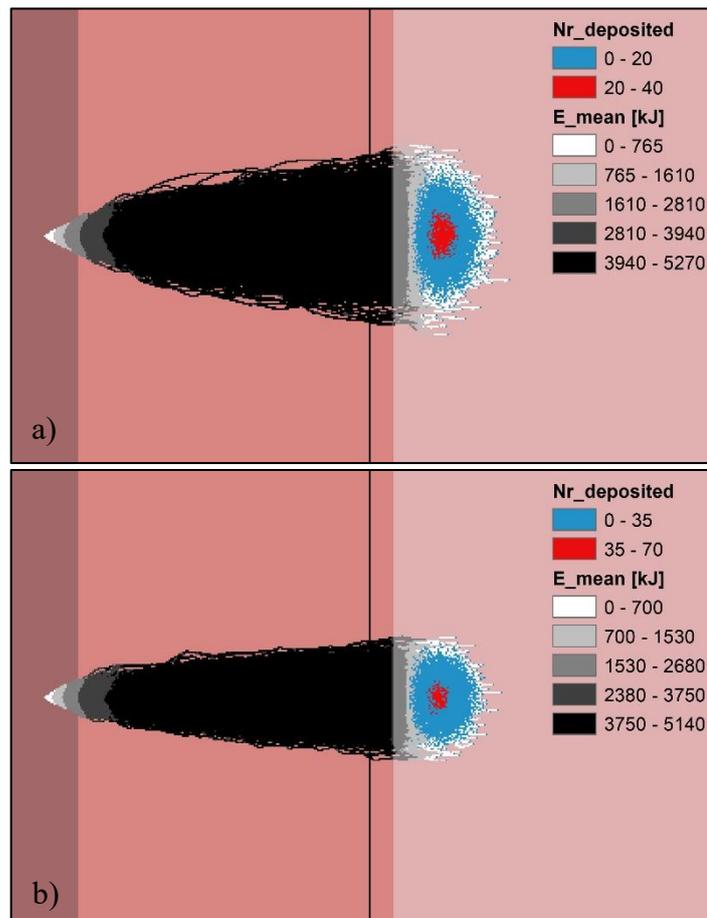


Figura 2.35: distribuzione del numero di blocchi ellissoidali depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA SFERICA

La Tab. 2.28 riassume i valori di energy line angle ϕ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc* e i valori dell'angolo di dispersione laterale α (definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione), suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma sferica. I valori minimi passano da 55° a 56° in relazione all'aumento della densità di vegetazione mentre quelli massimi si attestano sul valore costante di 59°.

In termini di energia cinetica, i massimi valori presentano un picco di circa 3700 kJ nella zona di transito in Fig. 2.36 a) e nelle parti più esterne dell'area di invasione in Fig. 2.36 b). I valori decrescono al piede del pendio e si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.28: valori di energy line angles ϕ_p e di dispersione laterale α per il versante virtuale 3 e per un blocco di forma sferica.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] | α [°] |
|----------|------------------|------------------|--------------|
| 0% | 55 | 59 | 16 |
| 25% | 55 | 59 | 14 |
| 50% | 55 | 59 | 11 |
| 75% | 56 | 59 | 11 |
| 100% | 56 | 59 | 10 |

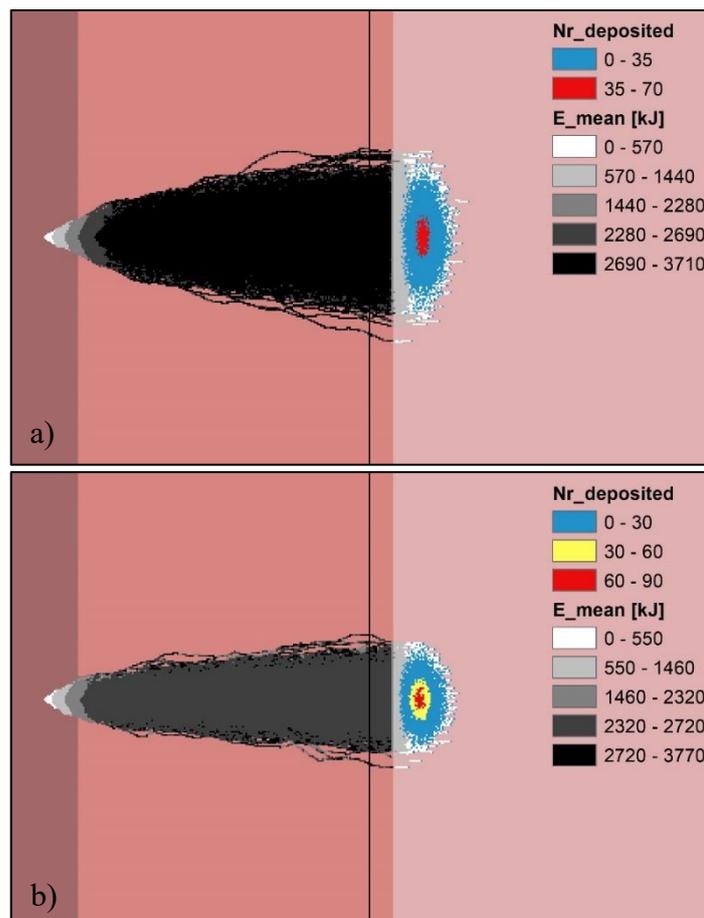


Figura 2.36: distribuzione del numero di blocchi sferici depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA DISCOIDALE

La Tab. 2.29 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc* e i valori dell'angolo di dispersione laterale α (definito come la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione), suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma discoidale. I valori minimi passano da 54° a 55° in relazione all'aumento della densità di vegetazione mentre quelli massimi si attestano sul valore costante di 59° .

In termini di energia cinetica, i massimi valori presentano un picco di circa 3800 kJ nella zona di transito nello scenario 2.37 a) nello scenario 2.37 b). In seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, le energie diminuiscono e si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.29: valori di energy line angles φ_p e di dispersione laterale α per il versante virtuale 3 e per un blocco di forma discoidale.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] | α [°] |
|----------|------------------|------------------|--------------|
| 0% | 54 | 59 | 15 |
| 25% | 54 | 59 | 14 |
| 50% | 54 | 59 | 14 |
| 75% | 55 | 59 | 12 |
| 100% | 55 | 59 | 12 |

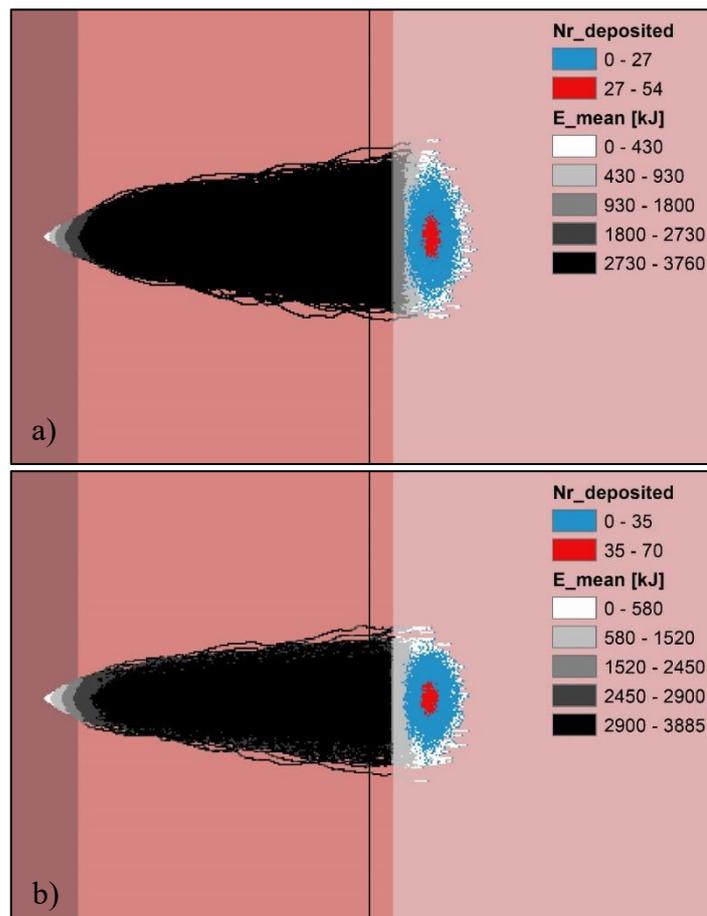


Figura 2.37: distribuzione del numero di blocchi discoidali depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

2.5 Il versante virtuale 4 ($\beta = 85^\circ$)

Il versante virtuale 4 è rappresentato in Fig. 2.38. Le dimensioni geometriche del versante e l'inclinazione della zona di distacco, di transito e di deposito sono indicate in Fig. 2.39.

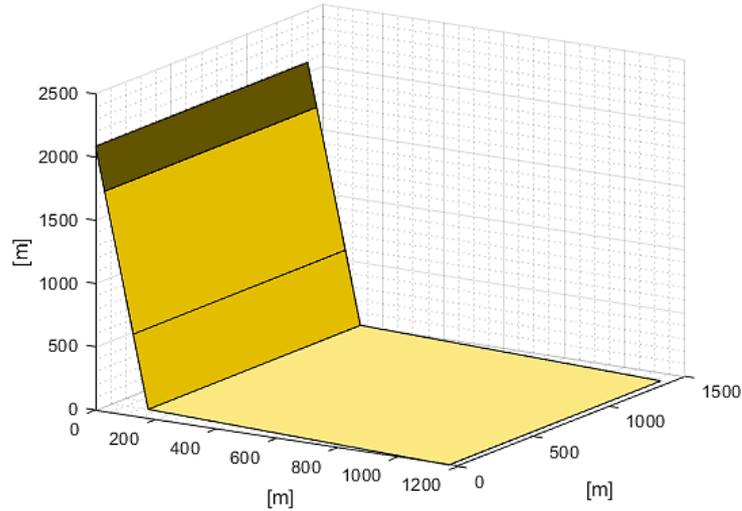
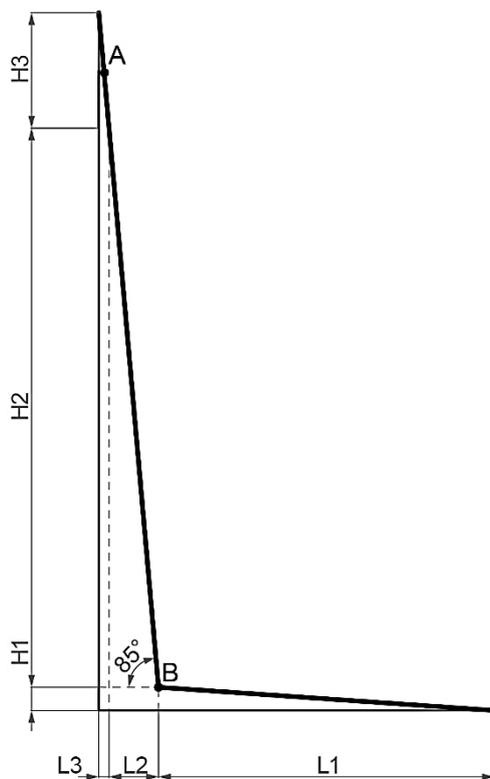


Figura 2.38: schematizzazione del versante virtuale 3 con $\beta = 60^\circ$ ed indicazione della posizione della rete paramassi fittizia.



| H_1 [m] | L_1 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
|-----------|-----------|---------------------------|
| 69,60 | 995,00 | 4 |
| H_2 [m] | L_2 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
| 1670,40 | 145,00 | 85 |
| H_3 [m] | L_3 [m] | Inclinazione [$^\circ$] |
| 345,00 | 30,00 | 85 |

Figura 2.39: sezione del versante con indicazione delle dimensioni e calcolo dell'inclinazione di ogni tratto.

2.5.1 Valori di energy line angle φ_p ed effetto della forma del blocco

○ BLOCCO DI FORMA CUBICA

La Tab. 2.30 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc*, suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma cubica.

Il massimo valore di φ_p è di 85° e indica che, sebbene in numero esiguo, alcuni blocchi si fermano nella zona di transito, caratterizzata da un'inclinazione costante di 85° . La maggioranza dei valori è concentrata nella zona di deposito, indipendentemente dalla classe di vegetazione considerata e presenta una distribuzione pressoché simile (Fig. 2.40).

Tabella 2.30: valori di energy line angles φ_p per il versante virtuale 4 e per un blocco di forma cubica.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] |
|----------|------------------|------------------|
| 0% | 74 | 85 |
| 25% | 73 | 85 |
| 50% | 73 | 85 |
| 75% | 74 | 84 |
| 100% | 74 | 85 |



Figura 2.40: distribuzione degli angoli di energy line φ_p per un blocco di forma cubica.

La variabilità dei risultati in relazione ad una differente distribuzione della densità di vegetazione è illustrata in Fig. 2.41. Gli scenari riferiti al versante virtuale 4 non mettono in evidenza significativi cambiamenti nell'estensione longitudinale e di espansione laterale dell'area di invasione del crollo né sembra che la presenza e la densità di vegetazione influenzi la traiettoria di caduta in questo caso. La maggior parte dei blocchi raggiunge la zona di deposito, percorrendo una distanza massima (misurata in pianta) di circa 550 m.

I valori registrati in corrispondenza del collettore fittizio evidenziano che nello scenario privo di vegetazione, solo 3 dei 20000 blocchi si arrestano a monte del collettore paramassi, per i quali quindi si individua il valore massimo dell'angolo φ_p di 85° (Tab. 2.31). Per lo scenario relativo ad una densità di vegetazione del 100% 1 blocco su 20000 non raggiunge il collettore, fermandosi a monte di esso (Tab. 2.32).

Il massimo valore di energia cinetica si riscontra nella zona di transito ed è nell'ordine di grandezza di 6000 kJ; in seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, i valori diminuiscono fino a 0 kJ nella zona di deposito.

Tabella 2.31: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con classe di densità di vegetazione pari a 0%, assenza di alberi).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 19997 | 8202,60 | 69,40 | 173,70 | 118,90 | -55,90 |

Tabella 2.32: valori individuati in corrispondenza del collettore fittizio e riferiti al 95% della funzione densità di probabilità delle variabili (scenario con densità di vegetazione del 100%, 1 albero per ogni cella del DTM).

| scr_nr | n | E_95 [kJ] | V_95 [m/s] | Ph_95 [m] | Vrot_95 [rad/s] | Imp_a95 [°] |
|--------|-------|-----------|------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1 | 19999 | 7949,30 | 69,40 | 194,10 | 117,40 | -55,90 |

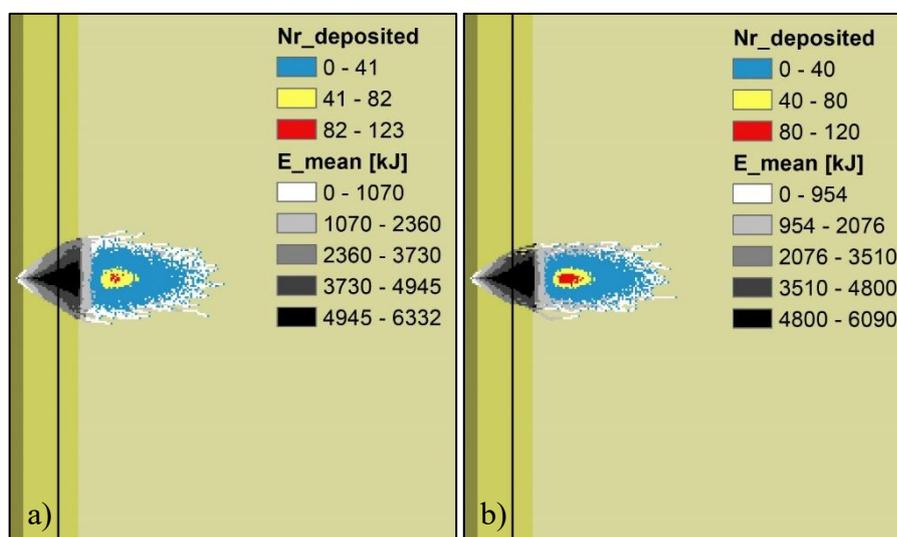


Figura 2.41: distribuzione del numero di blocchi cubici depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA ELLISSOIDALE

La Tab. 2.33 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc*, suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma ellissoidale.

Il massimo valore di energia cinetica si riscontra nella zona di transito ed è nell'ordine di grandezza di 7800 kJ nel caso di assenza di vegetazione ad alto fusto (Fig. 2.42 a) e di 7500 kJ per una classe di densità di vegetazione del 100% (Fig. 2.42 b); in seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, i valori diminuiscono si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.33: valori di energy line angles φ_p per il versante virtuale 4 e per un blocco di forma ellissoidale.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] |
|----------|------------------|------------------|
| 0% | 71 | 85 |
| 25% | 71 | 85 |
| 50% | 72 | 85 |
| 75% | 71 | 85 |
| 100% | 72 | 85 |

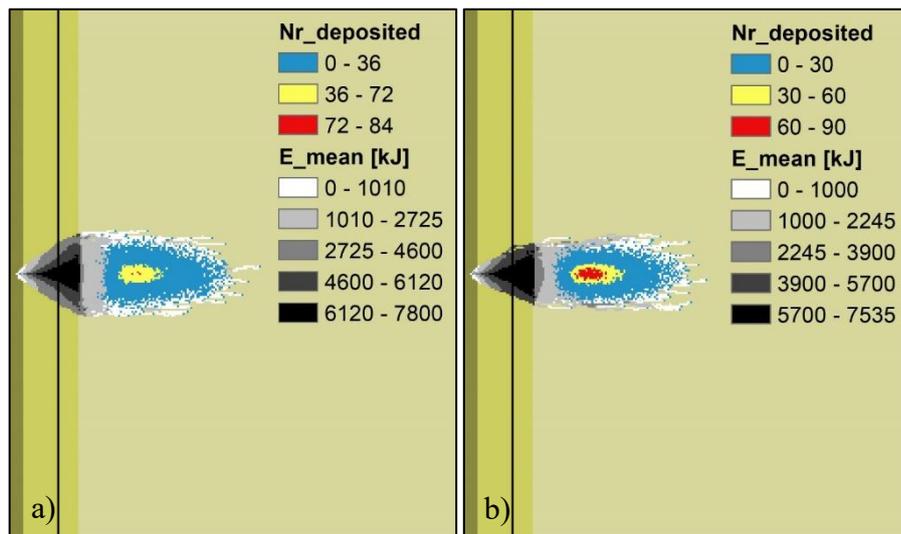


Figura 2.42: distribuzione del numero di blocchi ellissoidali depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA SFERICA

La Tab. 2.34 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc*, suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma sferica.

Il massimo valore di energia cinetica si riscontra nella zona di transito ed è nell'ordine di grandezza di 5000 kJ nel caso di assenza di vegetazione ad alto fusto (Fig. 2.43 a) e nel caso di una densità di vegetazione del 100% (Fig. 2.43 b); in seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, i valori diminuiscono e si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.34: valori di energy line angles φ_p per il versante virtuale 4 e per un blocco di forma sferica.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] |
|----------|------------------|------------------|
| 0% | 76 | 85 |
| 25% | 76 | 85 |
| 50% | 76 | 85 |
| 75% | 75 | 85 |
| 100% | 75 | 84 |

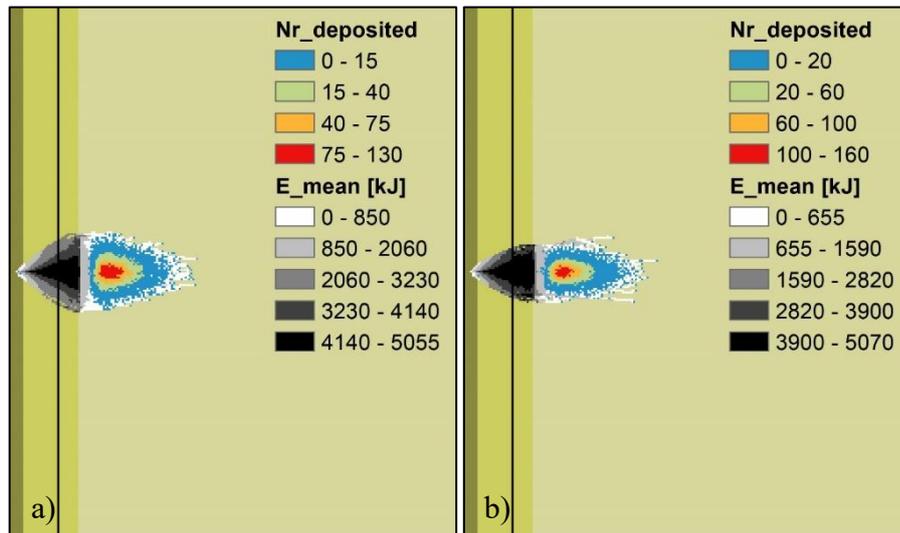


Figura 2.43: distribuzione del numero di blocchi sferici depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

○ BLOCCO DI FORMA DISCOIDALE

La Tab. 2.35 riassume i valori di energy line angle φ_p minimo e massimo ricavati dal raster *EL_angles.asc*, suddivisi in base alla distribuzione di densità di vegetazione ad alto fusto per un blocco di forma discoidale.

Il massimo valore di energia cinetica si riscontra nella zona di transito ed è nell'ordine di grandezza di 5700 kJ nel caso di assenza di vegetazione ad alto fusto (Fig. 2.44 a) e nell'ordine di 5900 kJ per una densità di vegetazione del 100% (Fig. 2.44 b); in seguito al cambiamento di pendenza localizzato al piede del pendio, i valori diminuiscono e si annullano nella zona di deposito.

Tabella 2.35: valori di energy line angles φ_p per il versante virtuale 4 e per un blocco di forma discoidale.

| DENS_VEG | EL_angle_min [°] | EL_angle_max [°] |
|----------|------------------|------------------|
| 0% | 74 | 85 |
| 25% | 76 | 84 |
| 50% | 75 | 84 |
| 75% | 75 | 85 |
| 100% | 74 | 85 |

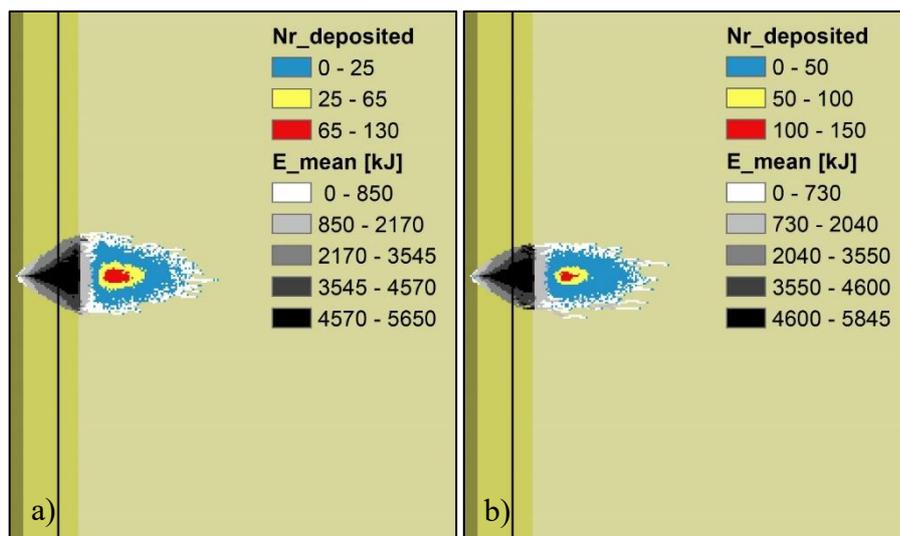


Figura 2.44: distribuzione del numero di blocchi depositati e della media dei massimi valori di energia cinetica: a) scenario senza vegetazione ad alto fusto, b) scenario con densità di vegetazione del 100% nella zona di transito.

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

3.1 Introduzione

I risultati ottenuti dalle simulazioni parametriche analizzate nel Cap. 2 hanno lo scopo di evidenziare eventuali correlazioni fra i parametri necessari al software QPROTO (ϕ_p e α) e alcuni fattori quali: l'angolo di inclinazione del pendio β , la forma del blocco e la densità di vegetazione ad alto fusto.

La prima considerazione riguarda il versante virtuale 4 ($\beta=85^\circ$) che si potrebbe definire un caso limite nelle analisi effettuate. Lo studio condotto nel Cap. 2 ha messo in luce che per nessuna tipologia di blocco utilizzata si verifica una variazione significativa nella morfologia dell'area di invasione del crollo in roccia. L'angolo ϕ_p assume valori minimi variabili fra 71° (blocco ellissoidale) e 76° (blocco di forma sferica e discoidale).

Per queste ragioni si ritiene opportuno fornire, a favore di sicurezza (e qualora non si abbiano a disposizione informazioni sufficienti per effettuare una back analysis di dettaglio degli evento di crollo per versanti di questo tipo) un valore di energy line angle ϕ_p pari a 71° che non tiene conto della variazione della densità di vegetazione e rappresenta il valore minimo registrato negli scenari simulati nel Cap. 2.

L'angolo α assume valori variabili compresi fra 34° (blocco cubico) e 28° (blocco discoidale) ma per nessuna tipologia di blocco si verifica una variazione significativa nella morfologia dell'area di invasione.

Lo stesso ragionamento segue quindi la definizione di un valore unico e a favore di sicurezza dell'angolo di dispersione laterale α pari a 34° , il massimo registrato negli scenari simulati.

Lo scenario $\beta=85^\circ$ non verrà quindi preso in considerazione nei paragrafi che seguono, dove i risultati delle analisi parametriche condotte sugli scenari $\beta=30^\circ$, $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$ vengono messi a confronto.

3.2 Confronto fra gli scenari analizzati

Per riassumere i risultati analizzati nel Cap. 2, sono stati creati quattro abachi che permettono di individuare i valori degli angoli di energy line φ_p e di dispersione laterale α al variare della densità di vegetazione.

Gli abachi riportati in Fig. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 seguono le seguenti assunzioni:

- ogni abaco è relativo ad una particolare forma del blocco;
- gli abachi fanno riferimento a un volume di distacco di 1 m^3 ;
- sull'asse delle ascisse compare il valore della densità di vegetazione indicata come trees/ha (numero di alberi/ettaro) e descritta in Tab. 2.2 ;
- sull'asse delle ordinate compare il valore degli angoli φ_p e α fornito in gradi;
- i valori degli angoli di energy line φ_p per i versanti virtuali con un angolo di inclinazione del pendio $\beta=30^\circ$ e 45° rappresentano il 98esimo percentile (Cap. 2), considerato conservativo;
- i valori degli angoli di energy line φ_p per il versante virtuale con un angolo di inclinazione del pendio $\beta=60^\circ$ sono rappresentati dal valore minimo individuato nel raster *EL_angles.asc* (Cap. 2);
- i valori degli angoli di dispersione laterale α sono stati ricavati misurando sul piano orizzontale la metà dell'ampiezza del cono che meglio approssima qualitativamente l'area di invasione per ogni scenario.

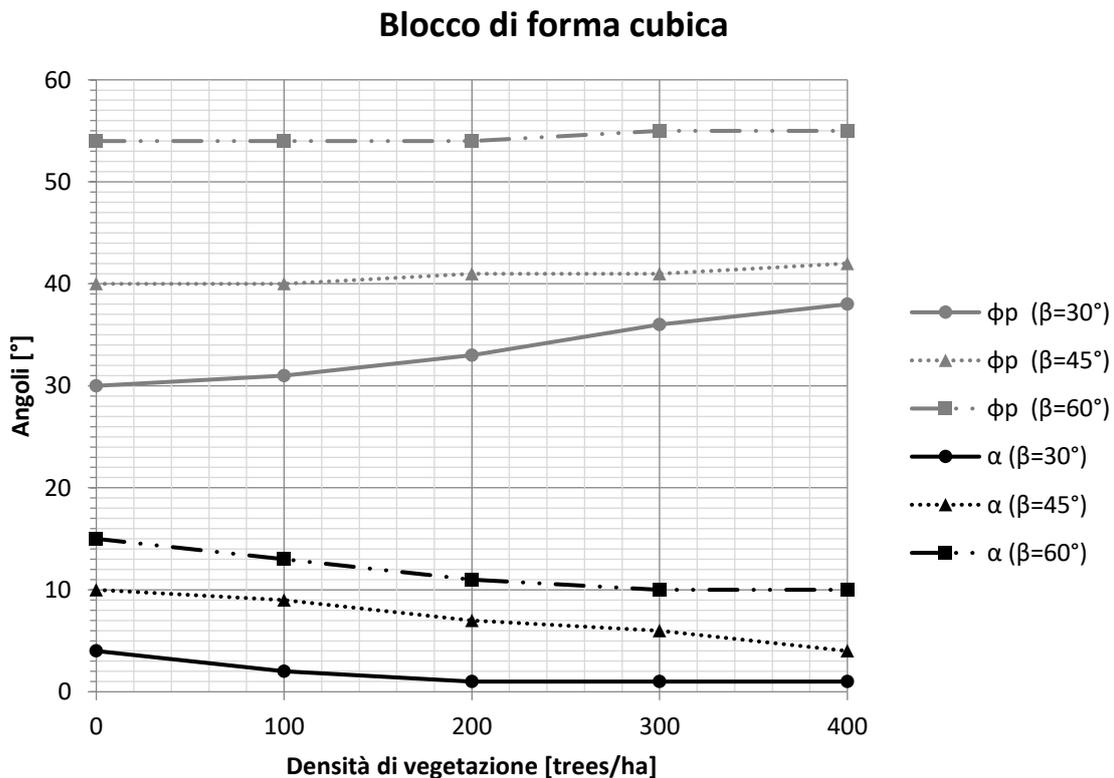


Figura 3.1: valori di energy line angle φ_p e di angolo di dispersione laterale α per un blocco di forma cubica.

Blocco di forma ellissoidale

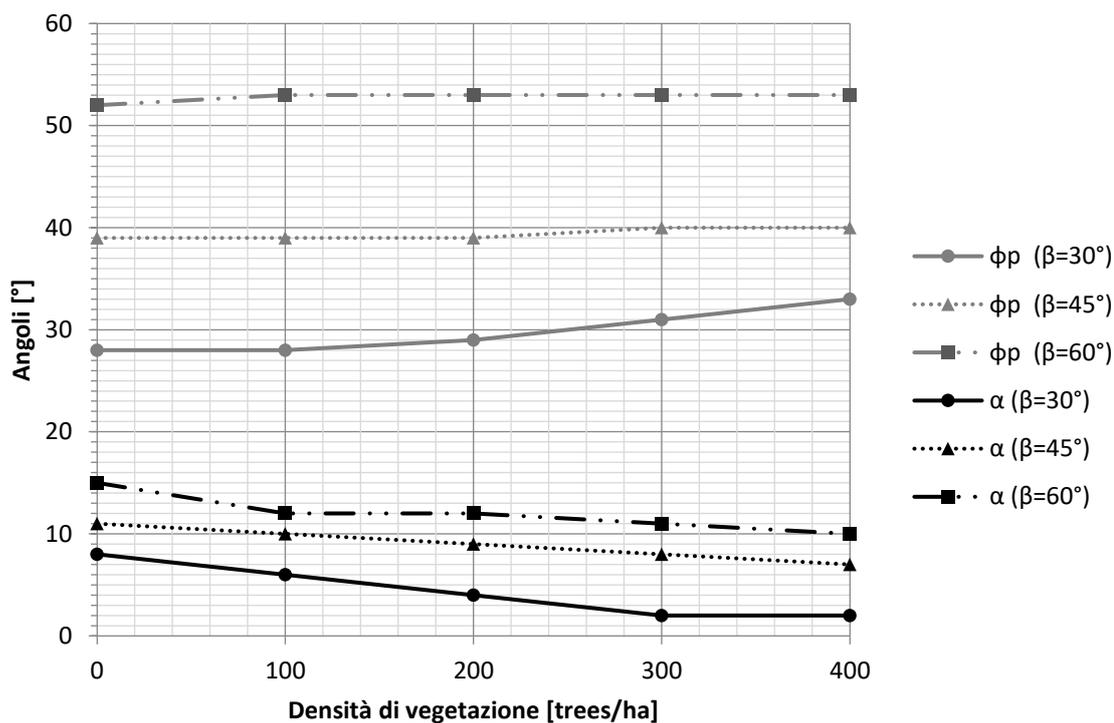


Figura 3.2: valori di energy line angle ϕ_p e di angolo di dispersione laterale α per un blocco di forma ellissoidale.

Blocco di forma sferica

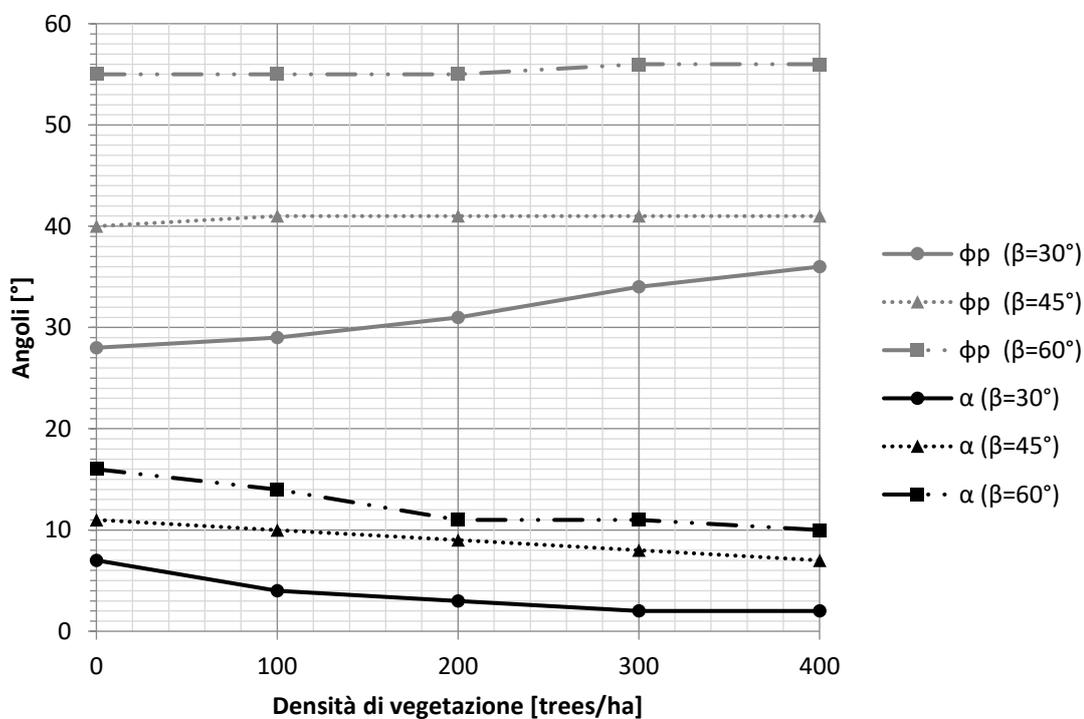


Figura 3.3: valori di energy line angle ϕ_p e di angolo di dispersione laterale α per un blocco di forma sferica.

Blocco di forma discoidale

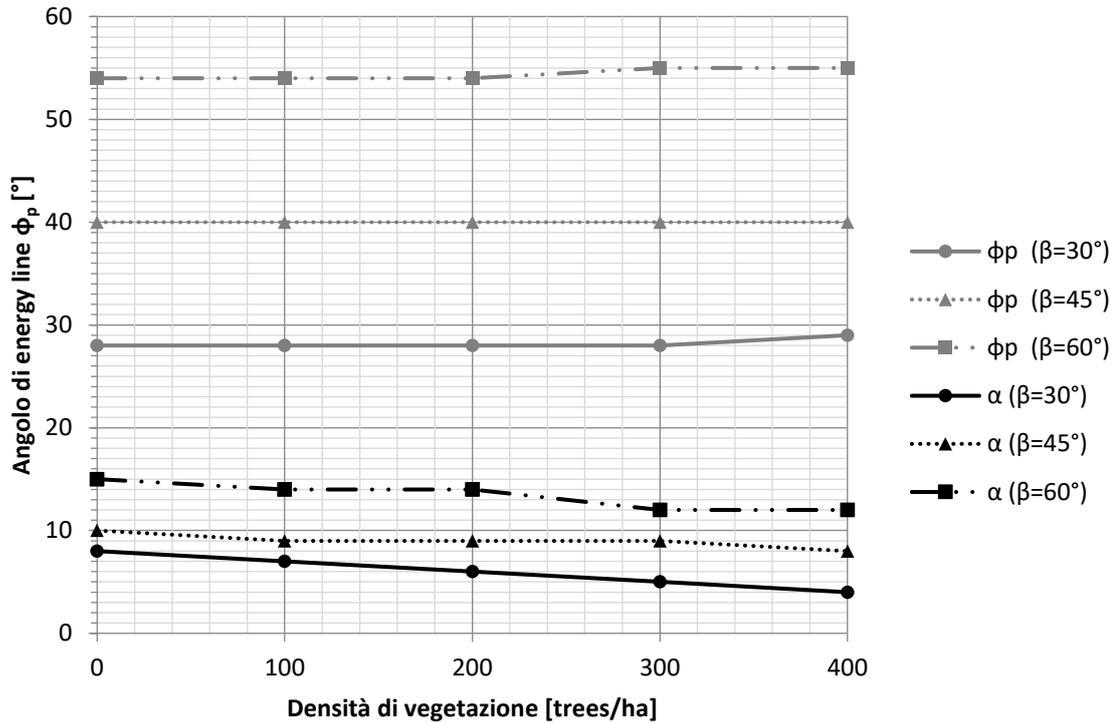


Figura 3.4: valori di energy line angle ϕ_p e di angolo di dispersione laterale α per un blocco di forma discoidale.

Lo studio condotto in questa tesi sui valori di angolo di energy line ϕ_p e sui valori di angolo di dispersione laterale α è preliminare; molti aspetti infatti dovranno essere analizzati e approfonditi in futuro ma può fornire una prima indicazione agli utilizzatori di QPROTO per la definizione del cono di invasione di un fenomeno di caduta massi (Cap. 4).

In termini generali si può concludere che:

- ϕ_p assume valori molto variabili in corrispondenza di un differente angolo di inclinazione del pendio β (da circa 28° per $\beta=30^\circ$ a circa 55° per $\beta=60^\circ$);
- per un blocco discoidale l'aumento della densità di vegetazione sembra non avere un'influenza significativa per tutti gli scenari analizzati;
- per un angolo di inclinazione del pendio minore ($\beta=30^\circ$) e per blocchi di forma cubica e sferica, l'influenza della densità di vegetazione è maggiore;
- l'angolo α ha una variabilità molto più limitata (da circa 4° a 16° in caso di assenza di vegetazione) al variare dell'angolo di inclinazione del pendio β ;
- all'aumentare della densità di vegetazione l'angolo diminuisce leggermente in tutti gli scenari analizzati, con una tendenza molto simile per tutte le forme del blocco e per tutti gli angoli β considerati;
- i valori minimi si riconducono ai versanti con minore β ed essi aumentano all'aumentare di β .

3.3 Influenza del volume

Le analisi del fenomeno di caduta massi svolte nel Cap. 2 fanno riferimento a un blocco di volume 1 m^3 , grazie alle quali è stato possibile identificare numerose correlazioni fra la forma del blocco, la densità di vegetazione ad alto fusto e l'angolo di inclinazione del pendio β .

Un fenomeno di caduta massi tuttavia può interessare volumi ben più gravosi di 1 m^3 , come specificato nella classificazione di Rochet (1987) descritta nel Par. 1.1; in virtù di questa considerazione e per fornire una trattazione completa, sono state condotte nuove simulazioni per i versanti virtuali 1 ($\beta=30^\circ$) e 2 ($\beta=45^\circ$) variando il volume del blocco in caduta. Il blocco è di forma cubica e sono stati tralasciati, in questa fase, i possibili effetti dovuti ad una diversa forma del blocco che verranno analizzati in futuro.

3.3.1 Versante virtuale 1 ($\beta = 30^\circ$)

In Fig. 3.5 sono riportati i risultati relativi ad una variazione di volume del blocco cubico per un versante virtuale con un angolo di inclinazione del pendio di 30° . I volumi considerati sono: 5 m^3 , 10 m^3 , 50 m^3 e 100 m^3 .

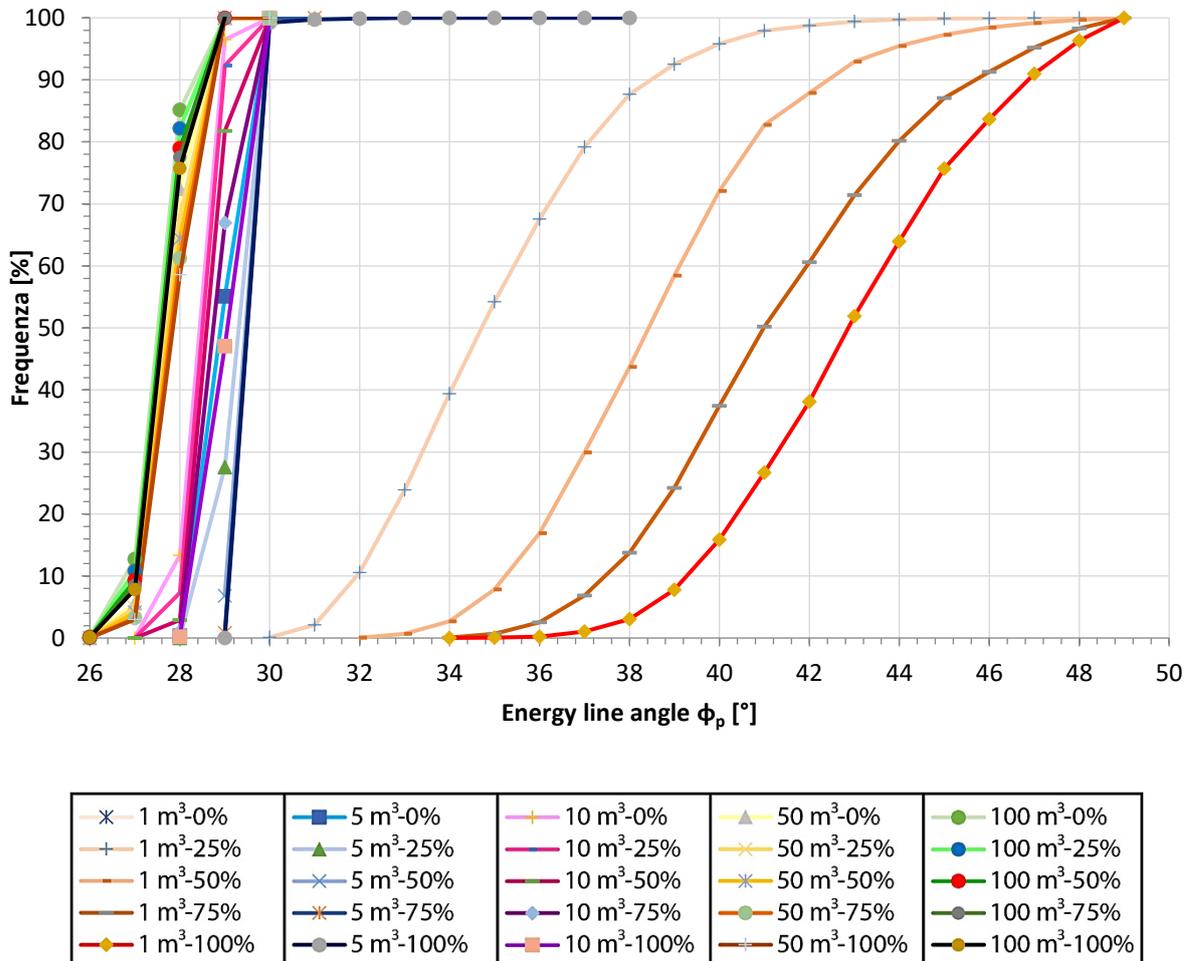


Figura 3.5: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p al variare del volume (blocco di forma cubica).

Lo studio sulla variazione del volume dei blocchi che si distaccano da un versante fratturato ha messo in evidenza prima di tutto che all'aumentare del volume diminuisce il valore di φ_p ; i blocchi in caduta sul versante acquistano un'energia cinetica tale da percorrere distanze maggiori. Inoltre all'aumentare del volume tali distanze sono sempre meno influenzate e non risentono della presenza della vegetazione ad alto fusto, permettendo di concludere che a partire da un volume di 5 m^3 , la densità di vegetazione è un parametro trascurabile nei confronti dell'evoluzione di fenomeno di caduta massi.

Per un volume di 1 m^3 l'angolo di energy line φ_p subisce un incremento da 30° in caso di assenza di vegetazione fino a 38° in caso di densità di vegetazione del 100%; l'aumento dell'angolo φ_p indica che all'aumentare del numero di alberi presenti sulla zona di transito, aumenta la capacità degli stessi di decelerare o fermare i blocchi sul versante.

Per un blocco con un volume di 5 m^3 all'aumentare della densità di vegetazione si riscontra un valore di φ_p che passa da 28° negli scenari con una classe di vegetazione di 0% e 25%, a 29° per gli scenari con classe di vegetazione di 50%, 75% e 100%. L'angolo φ_p assume un valore costante pari a 27° per un volume di 10 m^3 e pari a 26° per un volume di 50 e 100 m^3 .

L'angolo di dispersione laterale α presenta valori molto ridotti, compresi fra un minimo di 3° e un massimo di 8° ; in generale la sua variabilità è limitata sia in relazione ad un cambiamento del volume sia in relazione ad un aumento della densità di vegetazione.

In Tab. 3.1 sono riassunti i valori di φ_p (in Fig. 3.5 i valori sono individuati in corrispondenza di una frequenza del 2%; essi rappresentano i valori minimi e più conservativi della distribuzione) e di α .

Tabella 3.1: individuazione degli angoli φ_p e α .

| VOLUME [m^3] | CLASSE_VEG. | φ_p [$^\circ$] | α [$^\circ$] | VOLUME [m^3] | CLASSE_VEG. | φ_p [$^\circ$] | α [$^\circ$] |
|-------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 0% | 30 | 4 | 5 | 0% | 28 | 6 |
| | 25% | 31 | 2 | | 25% | 28 | 5 |
| | 50% | 33 | 1 | | 50% | 29 | 4 |
| | 75% | 36 | 1 | | 75% | 29 | 4 |
| | 100% | 38 | 1 | | 100% | 29 | 3 |
| | 0% | | | 10 | 0% | 27 | 6 |
| | 25% | | | | 25% | 27 | 5 |
| | 50% | | | | 50% | 27 | 5 |
| | 75% | | | | 75% | 27 | 4 |
| | 100% | | | | 100% | 27 | 4 |
| | 0% | | | 50 | 0% | 26 | 8 |
| | 25% | | | | 25% | 26 | 6 |
| | 50% | | | | 50% | 26 | 5 |
| | 75% | | | | 75% | 26 | 5 |
| | 100% | | | | 100% | 26 | 4 |
| | 0% | | | 100 | 0% | 26 | 7 |
| | 25% | | | | 25% | 26 | 6 |
| | 50% | | | | 50% | 26 | 5 |
| | 75% | | | | 75% | 26 | 5 |
| | 100% | | | | 100% | 26 | 4 |

3.3.2 Versante virtuale 2 ($\beta = 45^\circ$)

In Fig. 3.6 sono riportati i risultati relativi ad una variazione di volume del blocco cubico per un versante virtuale con un angolo di inclinazione del pendio di 45° . I volumi considerati sono: 5 m^3 , 10 m^3 , 50 m^3 e 100 m^3 .

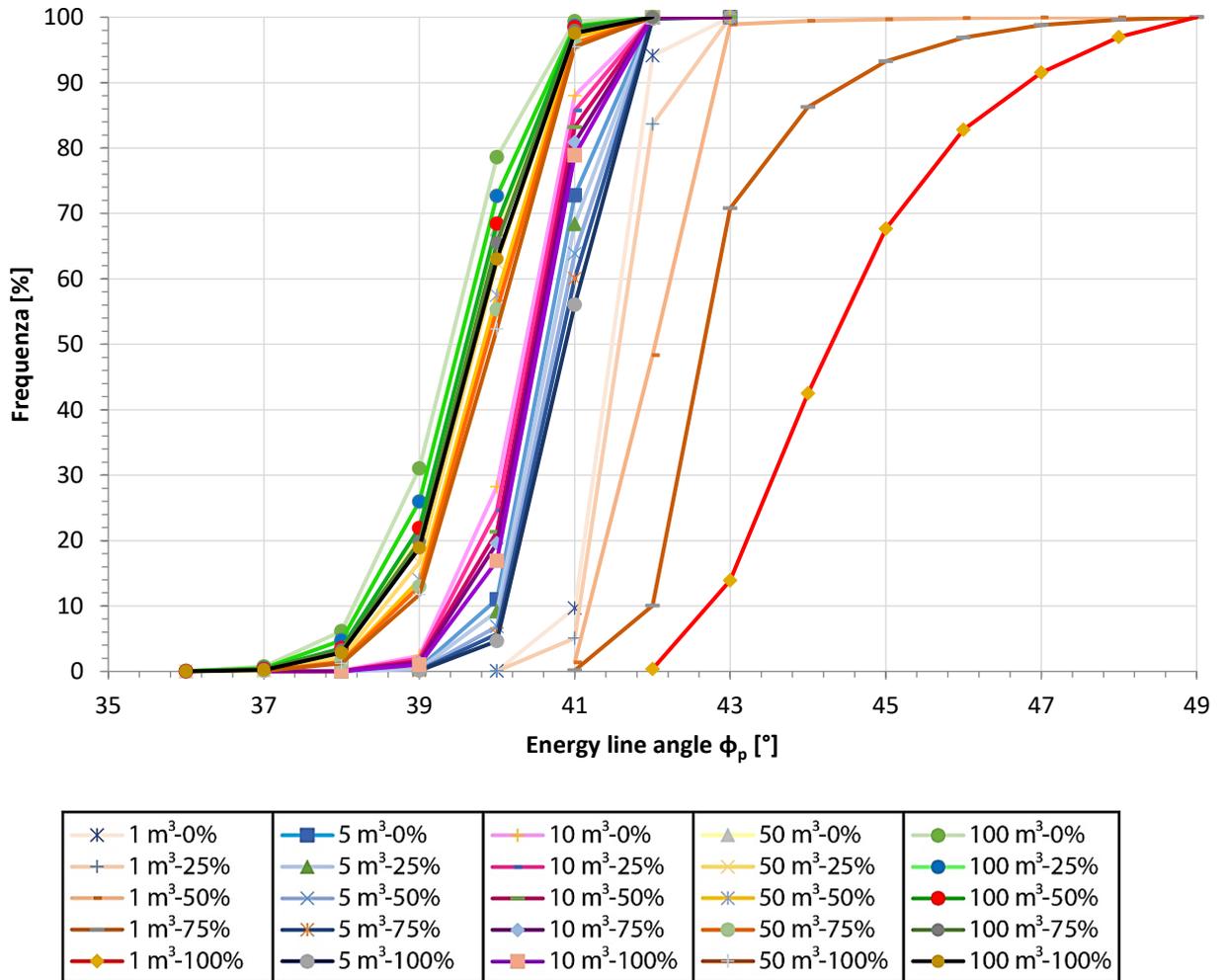


Figura 3.6: distribuzione degli angoli di energy line ϕ_p al variare del volume (blocco di forma cubica).

Lo studio sulla variazione del volume dei blocchi ha messo in evidenza un comportamento analogo a quello del versante virtuale 1, permettendo di concludere che a partire da un volume di 5 m³ la densità di vegetazione è un parametro trascurabile nei riguardi dell'evoluzione di fenomeno di caduta massi.

Per un blocco con un volume di 1 m³ l'angolo di energy line φ_p subisce un incremento da 40° in caso di assenza di vegetazione a 42° in caso di densità di vegetazione del 100%; l'aumento dell'angolo φ_p indica che all'aumentare del numero di alberi presenti sulla zona di transito, aumenta la capacità degli stessi di decelerare o fermare i blocchi sul versante.

Per un blocco con un volume di 5 e 10 m³ all'aumentare della densità di vegetazione si riscontra un valore di φ_p che si attesta a 39°; l'angolo φ_p assume un valore costante pari a 38° per un volume di 50 m³ e pari a 37° per un volume di 100 m³.

L'angolo di dispersione laterale α presenta valori molto ridotti, compresi fra un minimo di 4° e un massimo di 12°; in generale la sua variabilità è limitata sia in relazione ad un cambiamento del volume sia in relazione ad un aumento della densità di vegetazione.

In Tab. 3.2 sono riassunti i valori di φ_p (in Fig. 3.6 i valori sono individuati in corrispondenza di una frequenza del 2%; essi rappresentano i valori minimi e più conservativi della distribuzione) e di α .

Tabella 3.2: individuazione degli angoli φ_p e α .

| VOLUME [m ³] | CLASSE_VEG. | φ_p [°] | α [°] |
|--------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| 1 | 0% | 40 | 10 |
| | 25% | 40 | 9 |
| | 50% | 41 | 7 |
| | 75% | 41 | 6 |
| | 100% | 42 | 4 |
| 5 | 0% | 39 | 11 |
| | 25% | 39 | 9 |
| | 50% | 39 | 8 |
| | 75% | 39 | 7 |
| | 100% | 39 | 7 |
| 10 | 0% | 39 | 11 |
| | 25% | 39 | 9 |
| | 50% | 39 | 8 |
| | 75% | 39 | 7 |
| | 100% | 39 | 6 |
| 50 | 0% | 38 | 12 |
| | 25% | 38 | 8 |
| | 50% | 38 | 7 |
| | 75% | 38 | 6 |
| | 100% | 38 | 6 |
| 100 | 0% | 37 | 11 |
| | 25% | 37 | 8 |
| | 50% | 37 | 7 |
| | 75% | 39 | 6 |
| | 100% | 39 | 6 |

ESEMPIO DI APPLICAZIONE

4.1 Il sito di studio

Le simulazioni parametriche condotte nei capitoli precedenti hanno condotto alla definizione di un set di angoli φ_p e α al variare di una serie di fattori che influenzano le traiettorie e le energie dei massi in caduta. Lo scopo di questo capitolo è quello di testare tali angoli su un caso studio reale, attraverso il software QPROTO (Castelli et al, 2019).

Il sito di prova si trova nella frazione di Morliere, comune di Exilles (Val Susa, Torino) ed è storicamente interessato da fenomeni di caduta massi. Nel 1984, a seguito di un'ordinanza di sgombero del Sindaco, è stata realizzata una barriera paramassi per proteggere il centro abitato da eventuali crolli in roccia futuri (Fontan, 2004). È stata inoltre ipotizzata una relazione fra i crolli in roccia verificatisi in questa zona con i fenomeni gravitativi associati al versante in frana di Clot Brun (Arpa Piemonte, 2017).

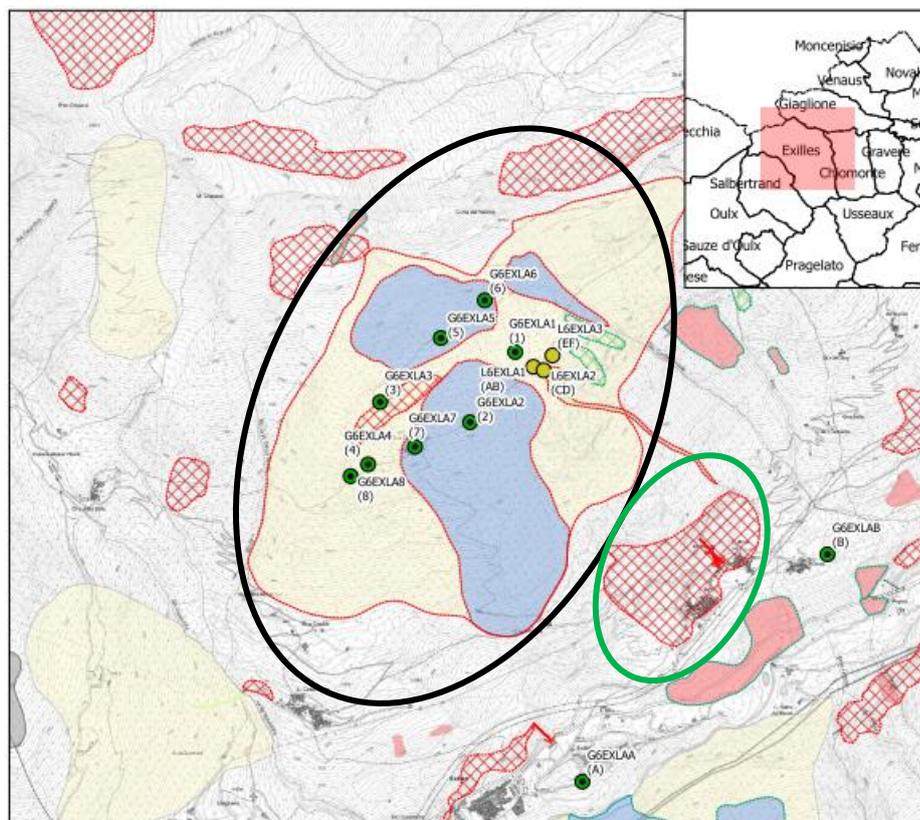


Figura 4.1: scheda informativa relativa ai dissesti del versante. In nero la frana di Clot Brun (Cima del Vallone), in verde la frana della frazione di Morliere (Arpa Piemonte, 2017).

4.2 L'evento di caduta massi del 9 Novembre 2011

In data 9 Novembre 2011 un evento di crollo ha colpito la frazione di Morlière, distruggendo una barriera paramassi posizionata sul versante e colpendo tre edifici. L'area interessata dal crollo presenta una quota della parte sommitale di 1250 m e una quota del piede del versante di 950 m (Fig. 4.2).

Un sopralluogo effettuato dal Consorzio Forestale Alta Val di Susa, ha messo in luce che l'evento è stato generato dal crollo di un singolo pilastro in micascisti; il pilastro, non vincolato dalle funi di acciaio predisposte negli anni '70 per altri blocchi pericolanti sul versante, si è ribaltato a seguito delle abbondanti precipitazioni avvenute nei giorni precedenti il 9 Novembre 2011. Successivamente, il pilastro si è frantumato in porzioni minori in parte arrestate sul posto e in parte movimentate verso valle attraverso il canale di trasferimento illustrato in Fig. 4.3.

I frammenti che si sono aperti la strada verso valle hanno probabilmente movimentato altri blocchi presenti sul versante che hanno raggiunto tre abitazioni, due disabitate (Fig. 4.4 e 4.5) e una abitata (Fig. 4.6) e hanno distrutto la barriera paramassi (Fig. 4.7). Tale ipotesi è supportata dalla patina scura superficiale che riveste i blocchi rinvenuti nelle vicinanze degli edifici colpiti.

Attraverso l'analisi dei danni registrati durante l'impatto blocco-edificio, è possibile stimare l'energia al momento della collisione sulla base delle curve di fragilità ricavate empiricamente nel sito di Fiumelatte (Lecco) da Agliardi et al, 2009 (Fig. 4.8). Considerando che una valutazione più dettagliata della vulnerabilità e del danno richiederebbe delle indagini approfondite, in prima approssimazione si assume che il contesto geomorfologico sia simile.

I tre edifici colpiti durante l'evento di crollo nella frazione di Morlière hanno subito danni non strutturali; è possibile quindi assumere per ciascuno un grado di perdita pari a 0,5 al fine di ricavare un'energia di impatto di circa 200 kJ (Fig. 4.8)

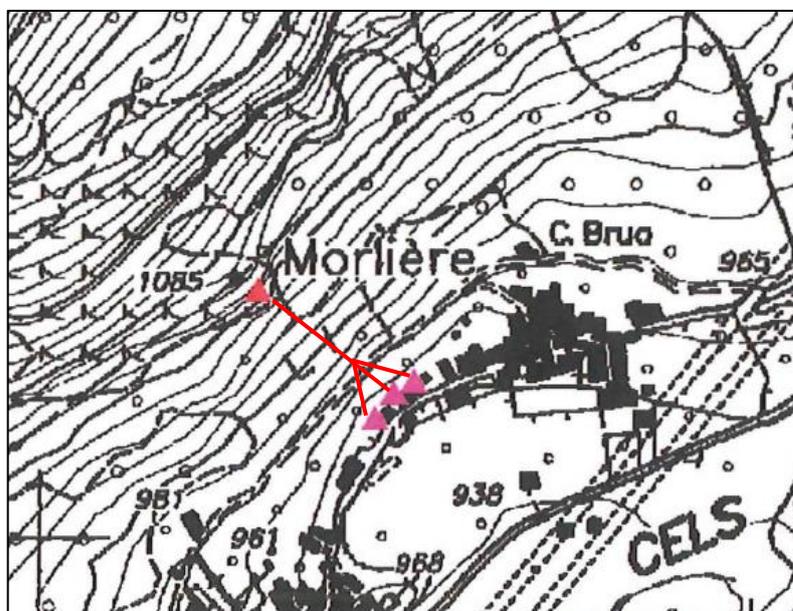


Figura 4.2: localizzazione della zona di distacco e degli edifici colpiti, con indicazione delle direzioni di movimento (Vangelista, 2011 – verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).

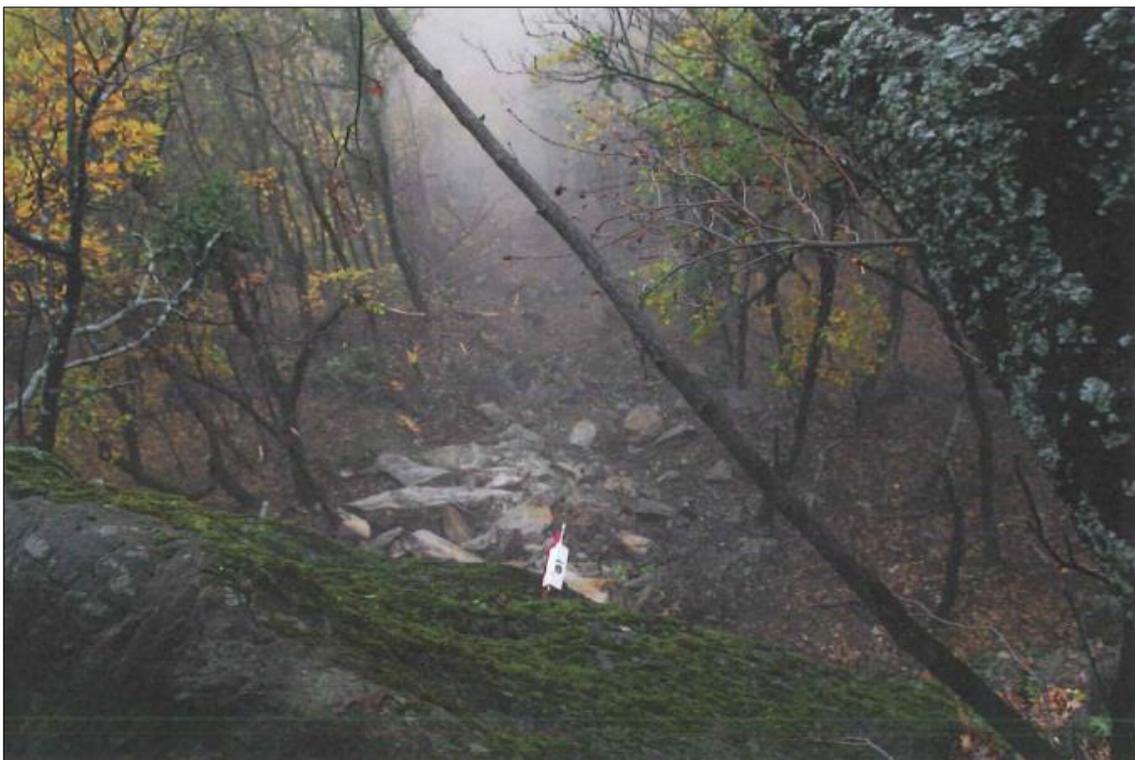


Figura 4.3: canale di trasferimento della frana di Morliere (Vangelista, 2011 - verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).



Figura 4.4: edificio 1 disabitato lesionato (Vangelista, 2011 - verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).



Figura 4.5: edificio 2 disabitato lesionato (Vangelista, 2011 - verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).



Figura 4.6: edificio 3 abitato lesionato. Il blocco, non visibile nell'immagine, ha colpito una porzione esterna dell'edificio (Vangelista, 2011 - verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).



Figura 4.7: barriera paramassi distrutta (Vangelista, 2011 - verbale del sopralluogo dell'evento franoso del 9 Novembre 2011).

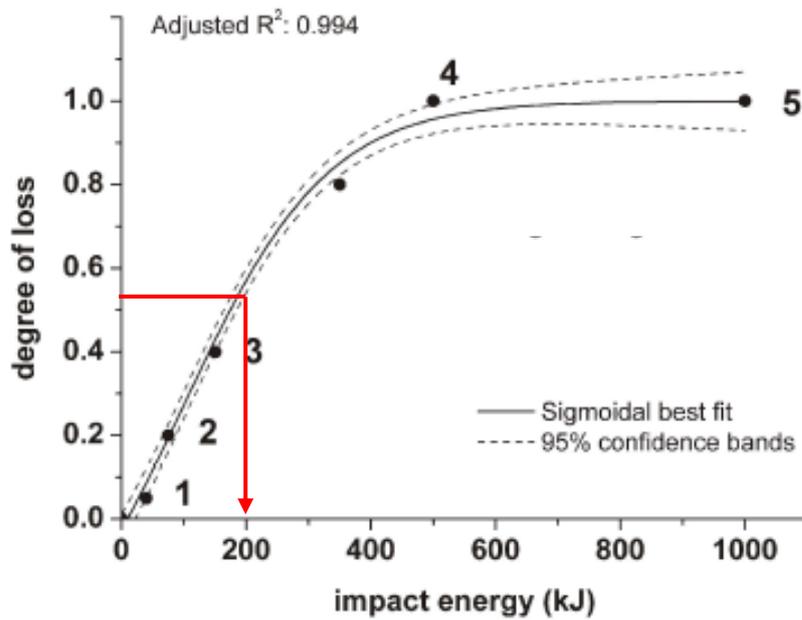


Figura 4.8: funzione empirica di vulnerabilità sito-specifica ricavata per il sito di Fiumelatte (Lecco); relazione fra il grado di perdita e l'energia di impatto (Agliardi et al, 2009).

4.3 Back Analysis dell'evento tramite Rockyfor3D

Per poter confrontare i risultati ottenuti tramite il software QPROTO, è stata condotta una back analysis dell'evento del 9 Novembre 2011 tramite il software di dettaglio Rockyfor3D.

La creazione dei raster necessari per l'avvio della simulazione, descritti nel Cap. 1, trova avvio nell'analisi dell'ortofoto ricavata dal database del Geoportale della Regione Piemonte e nell'analisi del DTM, con una risoluzione di 5 m x 5 m.

Le osservazioni sulla nicchia di distacco attraverso l'ortofoto e la documentazione tecnica relativa all'evento, hanno permesso di individuare 7 punti di distacco (Fig. 4.9, Tab. 4.1). Il volume dei blocchi è stato ipotizzato utilizzando un metodo statistico che mette in relazione il volume di progetto di un blocco atteso in una determinata area soggetta ad un fenomeno di caduta massi con il corrispondente periodo di ritorno espresso in anni (De Biagi et al, 2017). Sulla base di un rilievo dei blocchi al piede e un censimento degli eventi passati in termine di volume/data, per il sito di Cels la correlazione volume-tempo di ritorno è stata definita da Vallero (comunicazione personale) e riportata in Fig. 4.10. Considerando un evento medio atteso con cadenza ventennale, il volume di riferimento che si ricava è di circa 5 m³.

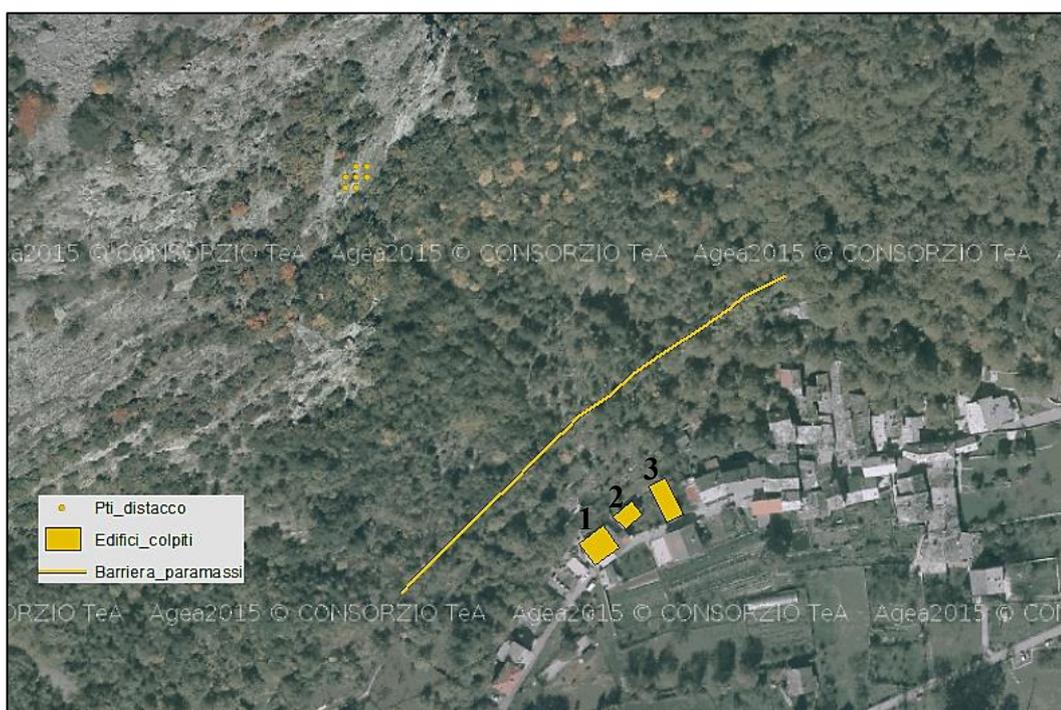


Figura 4.9: posizione dei punti di distacco, della barriera paramassi realizzata negli anni '70 e dei tre edifici colpiti durante l'evento del 9 Novembre 2011.

Tabella 4.1: parametri di caratterizzazione del blocco.

| ID | SHAPE | RCK_DENSITY [kg/m ³] | VOLUME [m ³] |
|----|-------|----------------------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 2800 | 5 |
| 2 | 1 | 2800 | 5 |
| 3 | 1 | 2800 | 5 |
| 4 | 1 | 2800 | 5 |
| 5 | 1 | 2800 | 5 |
| 6 | 1 | 2800 | 5 |
| 7 | 1 | 2800 | 5 |

I parametri riguardanti la caratterizzazione del suolo sono indicati in Fig. 4.11; è stato scelto di mappare il terreno attraverso tre grandi aree omogenee, i cui valori sono stati attribuiti in base all'analisi dell'ortofoto e calibrati attraverso i dati raccolti durante un sopralluogo in sito. Le aree risultano così definite:

- soiltype 6 nella zona di distacco: substrato roccioso con valori di *rg.10* pari a 0,33, *rg.20* pari a 0,34 e *rg.70* pari a 0,19;
- soiltype 5 nella zona di transito: substrato roccioso con substrato di degradazione meteorica con valori di *rg.10*, *rg.20* e *rg.70* simili al caso di soiltype 6;
- soiltype 3 nelle vicinanze degli edifici colpiti: detrito di falda o suolo compatto medio con piccoli massi con valori *rg.10* pari a 0,15, *rg.20* pari a 0,32 e *rg.70* pari a 0,15.

L'influenza della vegetazione ad alto fusto è stata valutata in un primo momento attraverso il software FINT (Dorren, 2017) che permette di risalire alla posizione degli alberi inserendo come input un Digital Surface Model (DSM, modello che descrive la superficie terrestre e gli oggetti che si collocano sopra di essa) e un Digital Elevation Model (DEM) con la medesima estensione e risoluzione. Successivamente è necessario settare i valori di altezza minima dell'albero [m] e la funzione in base alla quale viene calcolato il DBH di ciascun albero identificato.

Nella fattispecie, i file raster di input DSM e DTM hanno generato una distribuzione di vegetazione decisamente sotto stimata rispetto a quanto evidenziato dall'ortofoto (Fig. 4.12). Probabilmente l'errore è da imputare principalmente all'elevata risoluzione dei raster di input (5 m x 5 m); nella guida del software FINT viene fornito un range ottimale per la risoluzione dei raster compreso fra 0,5 m e 2 m, specificando che a una maggiore risoluzione corrisponde una minore precisione nell'individuazione degli alberi.

Per tali motivi si è scelto di sfruttare le informazioni contenute nell'ortofoto, conteggiando le chiome riconoscibili in un'area pressoché omogenea nell'intorno della zona di distacco ed estendendo il risultato all'intera zona retrostante la frazione di Morlière. È stata quindi identificata una densità di vegetazione massima di 800 trees/ha, con un diametro medio calcolato all'altezza del petto (DBH) di 40 cm. Come specificato nel Par. 2.1, è stato dimostrato che per un DTM con una risoluzione di 5 m x 5 m i risultati delle simulazioni parametriche non sembrano variare all'aumentare del numero massimo di alberi presenti oltre il valore di 1 albero per cella (Netti et al, 2016); per questo motivo una densità di vegetazione di 800 trees/ha, che meglio approssima la totale copertura della vegetazione nella zona di Morlière, è confrontabile con una distribuzione di 400 trees/ha individuata come classe di densità massima (100%) nelle simulazioni riguardanti i versanti virtuali (Cap. 2).

La barriera paramassi (Fig. 4.7) realizzata alla fine degli anni '70 è stata dimensionata in modo da assorbire una quantità di energia pari a 800 kJ e con un'altezza di 4,5 m, seguendo le indicazioni fornite dalla ditta installatrice. Nonostante la sua efficienza non sia garantita a più di 40 anni dall'installazione, è comunque evidente che abbia ricoperto un ruolo nel fenomeno di caduta massi avvenuto nel 2011, rallentando i blocchi e riducendo la loro energia.

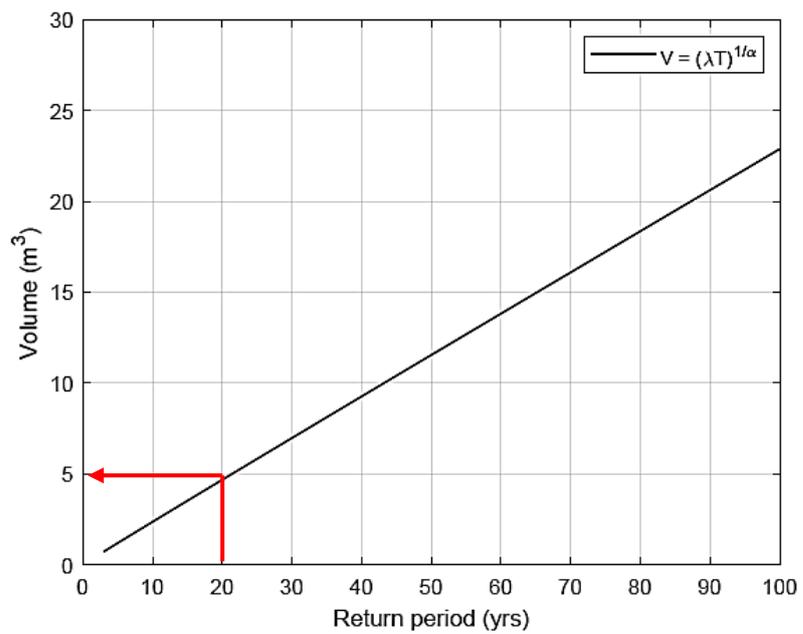


Figura 4.10: relazione fra periodo di ritorno e volume dei blocchi (Vallero, comunicazione personale).

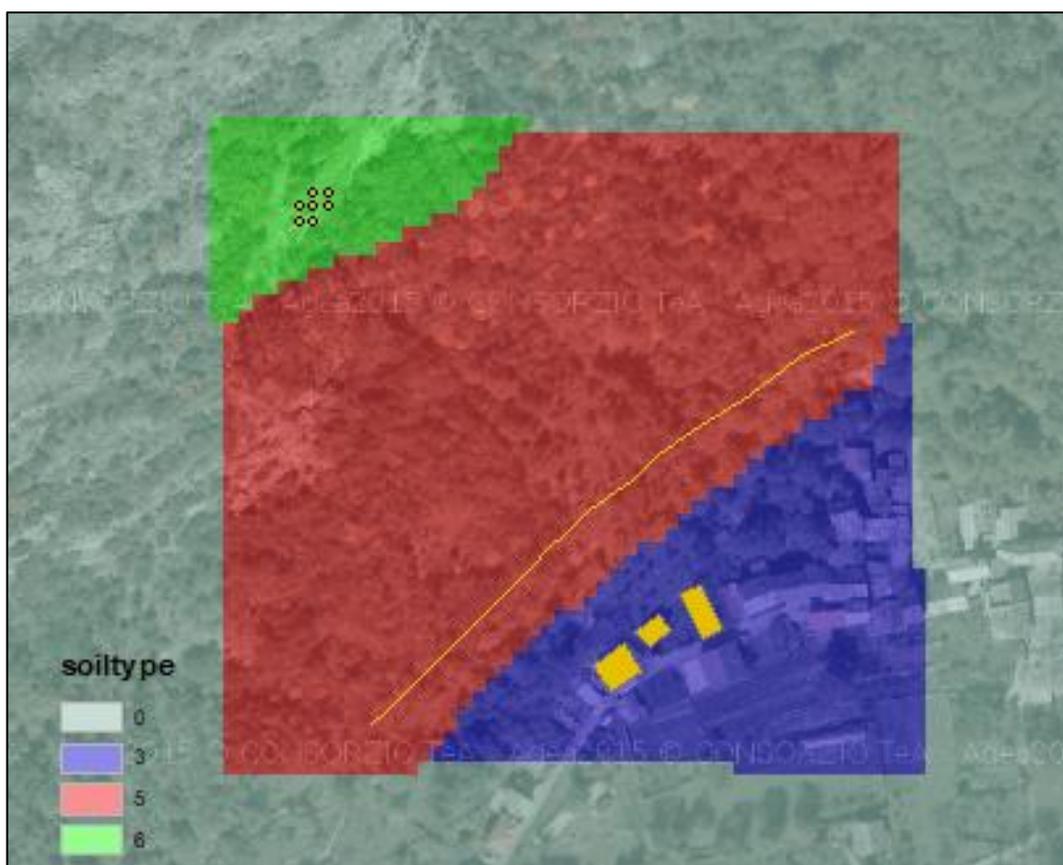


Figura 4.11: mappa della tipologia di suolo soiltype.asc.



Figura 4.12: risultati della posizione degli alberi restituita dal software FINT (Dorren, 2017).

I risultati delle analisi condotte sul sito utilizzando il software Rockyfor3D hanno permesso la riproduzione dell'area di invasione del crollo, che appare coerente con quanto accaduto durante l'evento del 2011.

La prima considerazione da mettere in evidenza riguarda la barriera paramassi; dal verbale del sopralluogo effettuato dal Consorzio Forestale Alta Val di Susa si evince che la barriera paramassi è stata distrutta linearmente per circa 50 m, valore leggermente maggiore per la back analysis effettuata attraverso il software Rockyfor3D e pari a circa 80 m.

Nel caso di simulazione con una barriera paramassi, Rockyfor3D permette di valutare i risultati delle analisi cinematiche in corrispondenza della barriera stessa attraverso l'analisi del file di output *Rockyfor3D_v50_CalC_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt*; in questo caso il software ha individuato 8990 blocchi impattanti contro la barriera, con un valore di energia cinetica al 98esimo percentile pari a 3592,60 kJ. Tale valore, nettamente maggiore rispetto agli 800 kJ con i quali era stata progettata la barriera negli anni '70, giustifica la rottura della barriera paramassi durante l'evento del 2011. Considerando che la durabilità di una barriera paramassi è inversamente proporzionale al tempo di esercizio, è doveroso tenere in conto che al momento del crollo la barriera presentava un tempo di esercizio di circa 40 anni, valore temporale per il quale l'efficienza dissipativa di una barriera non è più garantita.

In Fig. 4.13 sono riportati i risultati in termini di energia cinetica (98esimo percentile) [kJ]. Nel primo tratto della zona di transito i valori registrati sono nell'ordine di 5300 kJ e diminuiscono verso valle fino a un valore massimo di circa 700 kJ in corrispondenza dell'edificio 1, di circa 2000 kJ in corrispondenza dell'edificio 2 e di circa 3000 kJ in corrispondenza dell'edificio 3.

I valori ottenuti sono maggiori della stima sull'energia di impatto nel danneggiamento (200 kJ); i siti di Fiumelatte e di Morlière presentano caratteristiche differenti e solo per una prima indicazione di massima sono stati considerati simili; inoltre, la vulnerabilità di ogni edificio colpito durante l'evento di Morlière non è nota. In relazione a queste approssimazioni i risultati appaiono comunque confrontabili e accettabili, considerando che lo scopo principale delle analisi era quello di definire e studiare l'area di invasione del crollo.

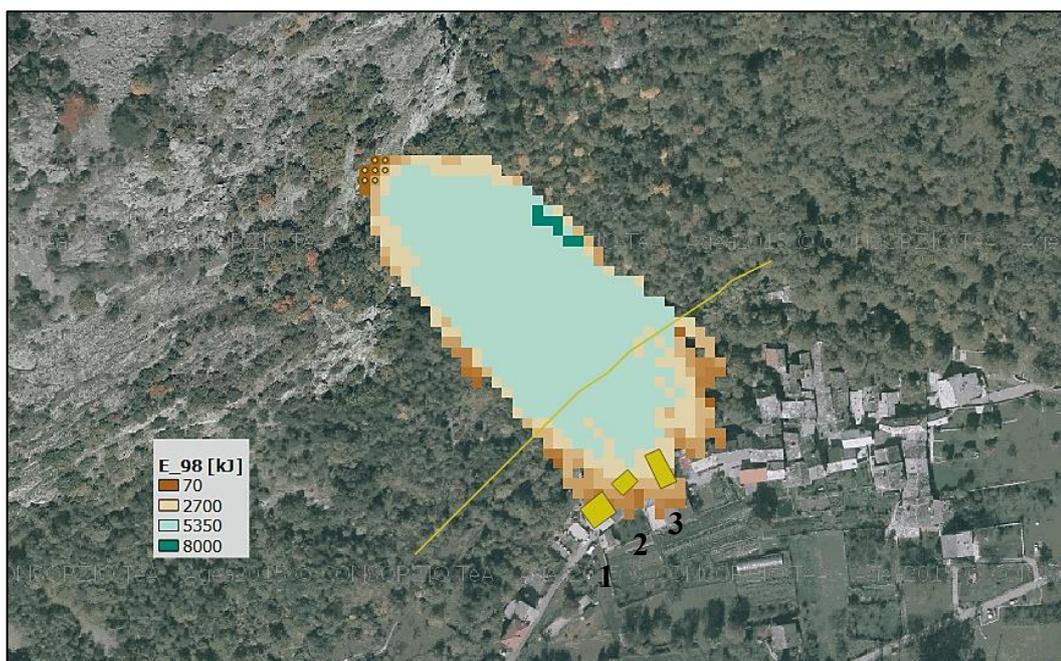


Figura 4.13: risultati dell'analisi di dettaglio condotta tramite Rockyfor3D. Valori in termini di energia cinetica riferiti al 98esimo percentile [kJ].

L'andamento della velocità massima è descritto in Fig. 4.14. I valori maggiori sono localizzati nella zona centrale dell'area di invasione e raggiungono un picco di 28,2 m/s. A monte della barriera paramassi i valori massimi si aggirano nell'ordine di 20 m/s; il file di output *Rockyfor3D_v50_Calc_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt* indica un valore di velocità pari a 17,10 m/s, corrispondente al 95esimo percentile.

A valle della barriera le velocità diminuiscono: i blocchi impattano contro l'edificio 1 con una velocità di 7 m/s, contro l'edificio 2 con una velocità di 14 m/s e contro l'edificio 3 con una velocità di 17 m/s.

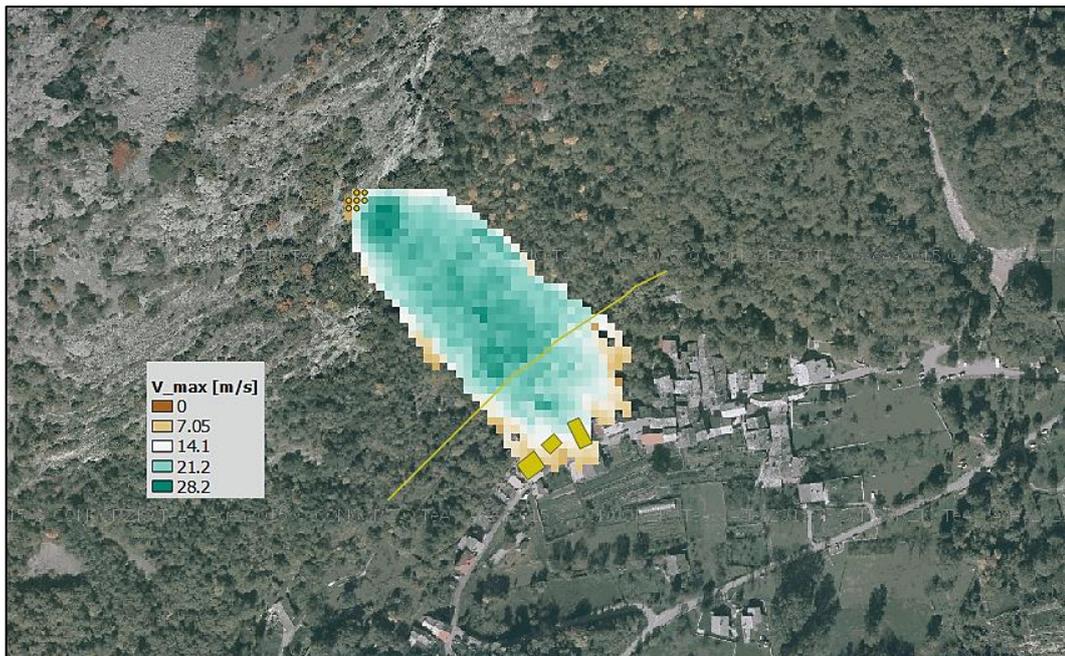


Figura 4.14: risultati dell'analisi di dettaglio condotta tramite Rockyfor3D. Valori in termini di velocità massima [m/s].

4.4 Back Analysis dell'evento tramite QPROTO

La back analysis effettuata tramite il Plugin QPROTO ha preso avvio dalla caratterizzazione del pendio. L'individuazione della linea di massima pendenza a partire dalla zona sorgente (Fig. 4.15) ha permesso l'estrapolazione del profilo altimetrico del pendio e la determinazione dell'angolo di inclinazione del pendio β , identificato in circa 30° (Fig. 4.16).



Figura 4.15: individuazione del profilo di massima pendenza.

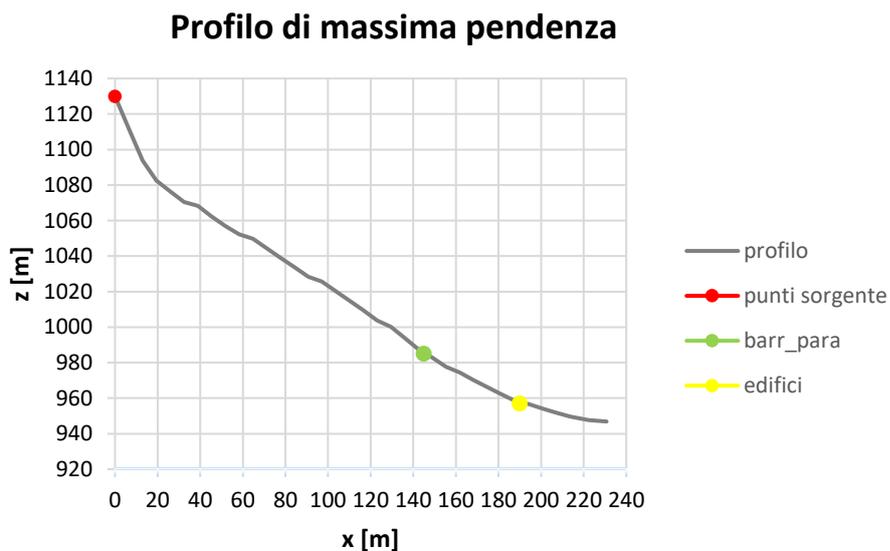


Figura 4.16: profilo altimetrico del pendio in corrispondenza della linea di massima pendenza e indicazione della posizione dei punti sorgente, della barriera paramassi e degli edifici colpiti.

L'analisi è stata condotta a partire dai punti di distacco individuati in precedenza, utilizzando i valori di angolo di energy line φ_p e di angolo di dispersione laterale α individuati nel Cap. 3 (Par. 3.3.1, Tab. 3.1): rispettivamente 29° e 3° per un blocco di 5 m^3 di volume. Come specificato nel Par. 3.3, dedicato all'effetto della variazione di volume, l'angolo φ_p risulta insensibile alle variazioni di densità di vegetazione. Il valore di 29° , individuato in corrispondenza di una distribuzione di 400 trees/ha, può essere considerato adeguato per il sito in esame che presenta una densità di vegetazione massima di 800 trees/ha, considerando il fatto che per una densità maggiore di 1 albero a cella di DTM l'influenza della densità di vegetazione sembra essere trascurabile (Netti et al, 2016).

Il primo risultato è stato ottenuto utilizzando un valore di angolo di *aspect* ω di 140° , corrispondente all'angolo compreso fra la direzione del Nord geografico e la linea di massima pendenza indicata in Fig. 4.15. Non è stata imposta alcuna restrizione sulla distanza di visibilità, lasciando invariato il valore di default presente sul software, pari a 800 m.

In termini di dispersione laterale del cono, i risultati in prima approssimazione appaiono accettabili: come nel caso della back analysis effettuata tramite Rockyfor3D, la barriera paramassi risulta distrutta per circa 70 m. In termini di estensione longitudinale invece, il cono si estende per circa 100 m oltre le abitazioni colpite, configurando uno scenario più conservativo rispetto al caso reale (Fig. 4.17).

In termini di energia cinetica massima, è possibile notare che i valori massimi di circa 9500 kJ si riscontrano in corrispondenza delle abitazioni colpite (Fig. 4.17); tale valore è probabilmente dovuto alla scelta degli angoli φ_p e α che non tengono conto dell'effetto della barriera paramassi né della presenza delle abitazioni.

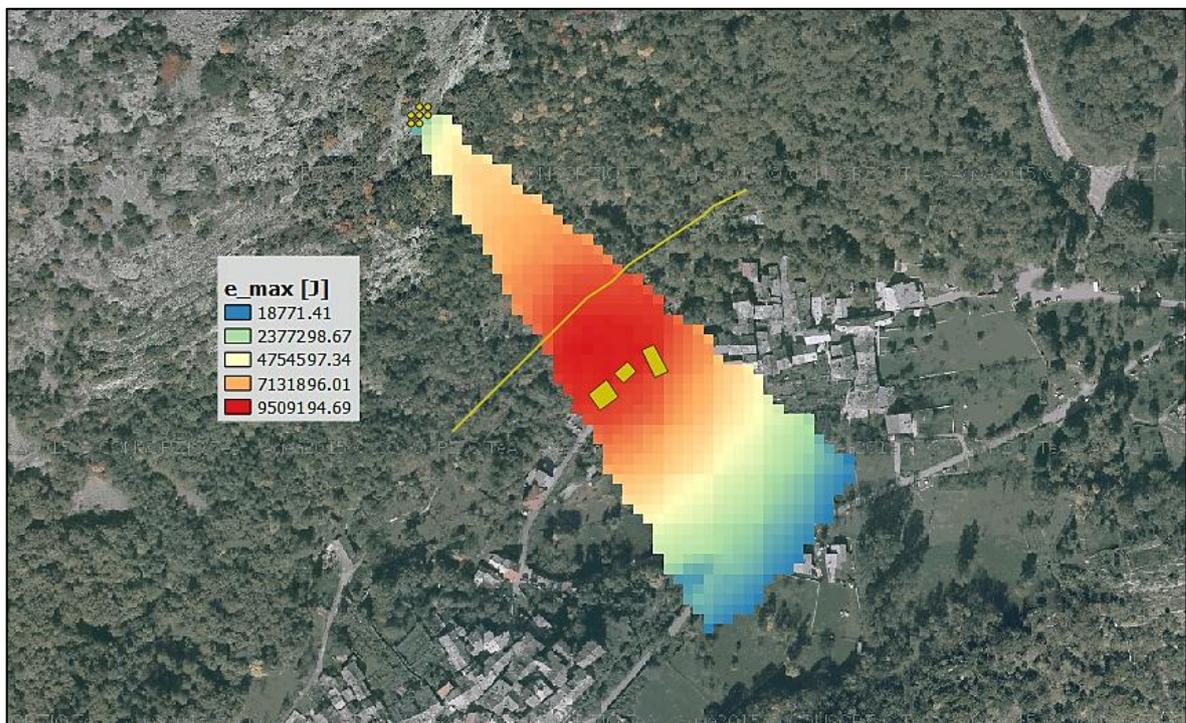


Figura 4.17: risultati della prima back analysis effettuata con QPROTO. Valori di energia cinetica massima espressa in J.

In termini di velocità massima (Fig. 4.18) si registra un picco in corrispondenza delle abitazioni colpite, pari a 35 m/s, valore nettamente superiore a quello riscontrato nella simulazione di dettaglio di Rockyfor3D.

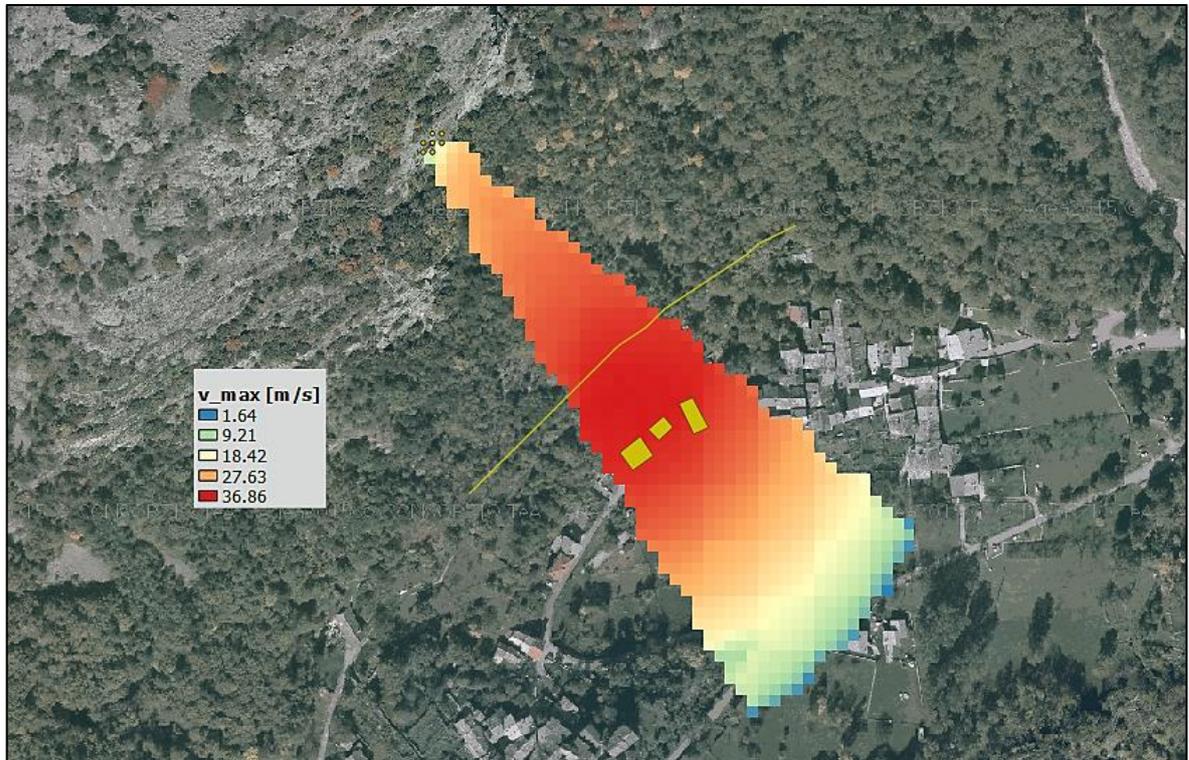


Figura 4.18: risultati della prima back analysis effettuata con QPROTO. Valori di velocità massima espressi in m/s.

4.4.1 Prima implementazione: affinamento della direzione di immersione

La prima implementazione dei risultati ha comportato la definizione di un valore di *aspect* ω (direzione di immersione nel punto sorgente) differente per ogni cella sorgente, ricavato dalla mappa raster di aspect (Fig. 4.19).



Figura 4.19: indicazione del valore di ω per ogni cella sorgente.

Gli angoli φ_p e α non sono stati modificati e, per poter valutare l'influenza del parametro *visibility distance*, non è stata imposta alcuna restrizione rispetto al valore di default di 800 m. Né l'area di invasione né i valori di energia cinetica massima riportano cambiamenti significativi infatti in corrispondenza delle abitazioni si registra un valore di circa 9000 kJ, ancora eccessivamente conservativo (Fig. 4.20).

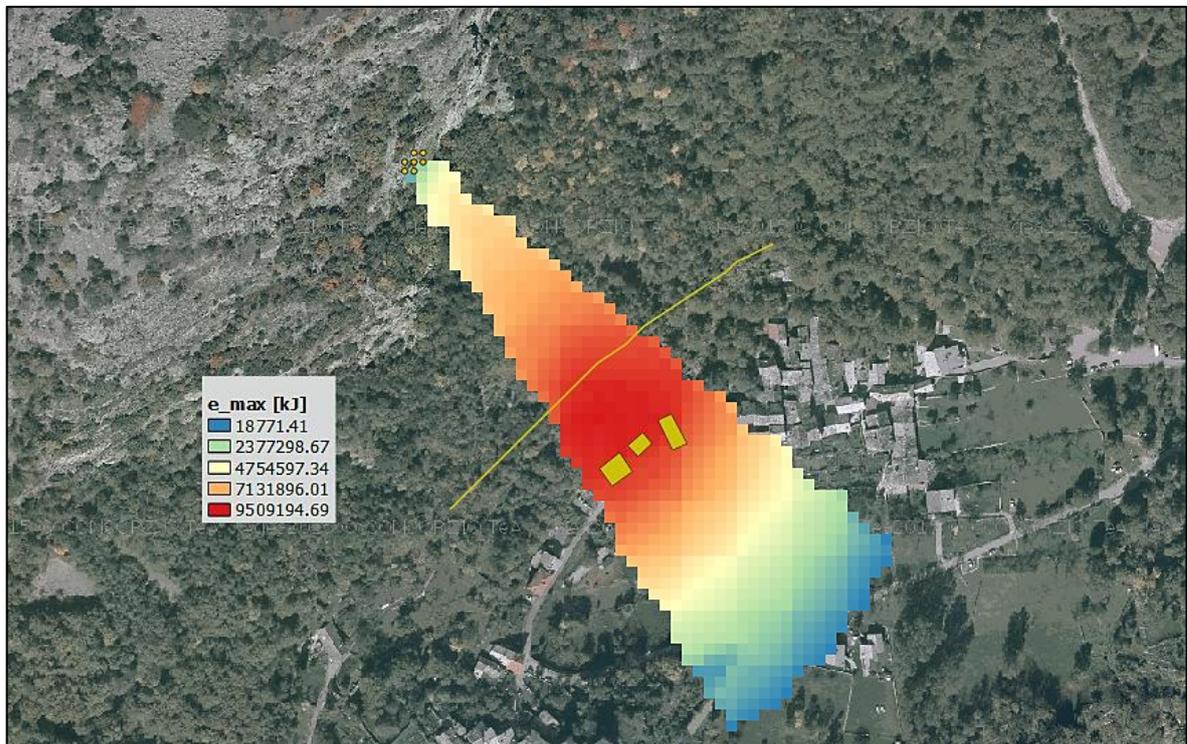


Figura 4.20: valori di energia cinetica massima espressi in J.

La velocità massima si registra in corrispondenza delle abitazioni e raggiunge un valore di circa 35 m/s (Fig. 4.21).

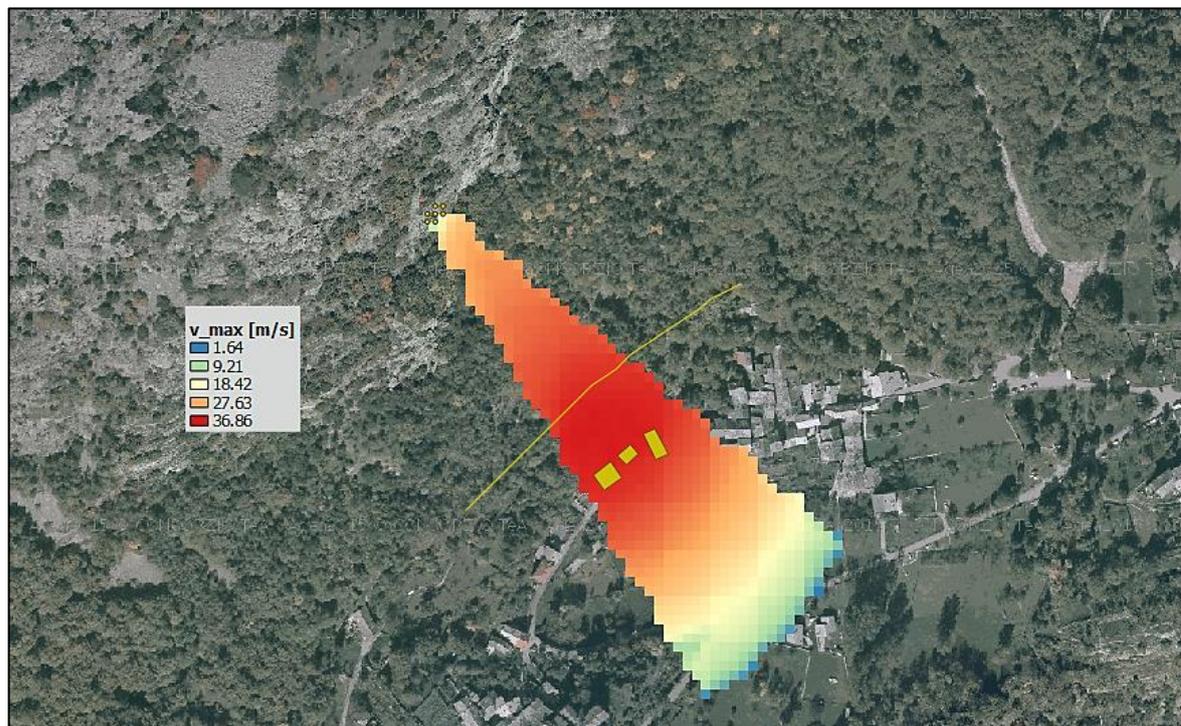


Figura 4.21: valori di velocità massima espressi in m/s.

4.4.2 Seconda implementazione: valutazione dell'influenza delle reti

L'implementazione finale dell'analisi si è svolta utilizzando un differente set di angoli φ_p e α . Considerando che i valori ottenuti nel Cap. 3 non tengono conto della presenza di una barriera paramassi che, per quanto vetusta, ha sicuramente indotto una dissipazione dell'energia dei blocchi in caduta, per una migliore calibrazione degli angoli si suppone qui in prima approssimazione la seguente relazione:

$$\varphi_p^f = \varphi_p + \varepsilon_{\varphi p} \quad (1)$$

Dove:

- φ_p^f : valore finale dell'angolo di energy line φ_p ;
- φ_p : valore che non tiene conto della presenza della barriera paramassi (Par. 3.3);
- $\varepsilon_{\varphi p}$: costante di calibrazione (effetto dissipativo della barriera).

Analogamente per la determinazione del valore finale dell'angolo di dispersione laterale α si assume:

$$\alpha^f = \alpha + \varepsilon_{\alpha} \quad (2)$$

Con:

- α^f : valore finale dell'angolo di dispersione laterale α ;
- α : valore che non tiene conto della presenza della barriera paramassi (Par. 3.3);
- ε_{α} : costante di calibrazione (effetto dissipativo della barriera).

Le costanti di calibrazione utilizzate in questa simulazione sono pari a 10° sia per l'angolo φ_p sia per l'angolo α e sono state ottenute per tentativi, non avendo a disposizione una correlazione ben definita per la loro determinazione; si rimanda ad una più ampia campagna di simulazioni numeriche future per correlare le caratteristiche delle barriere e gli angoli φ_p e α . In questo modo l'area di invasione ben approssima l'evento reale e la simulazione di Rockyfor3D.

In termini di energia cinetica massima i risultati si possono ritenere accettabili: a monte della barriera paramassi i blocchi raggiungono un'energia cinetica media di circa 3200 kJ, valore che diminuisce fino a 2300 kJ in corrispondenza dell'edificio 1 e 2500 kJ in corrispondenza degli edifici 2 e 3 (Fig. 4.22).

In termini di velocità massima, il valore raggiunto a monte della barriera è compreso nell'intervallo 18 - 25 m/s mentre in corrispondenza delle abitazioni si misura una velocità massima nell'ordine di 18 m/s per l'edificio 1 e 19 m/s per gli edifici 2 e 3 (Fig. 4.23).

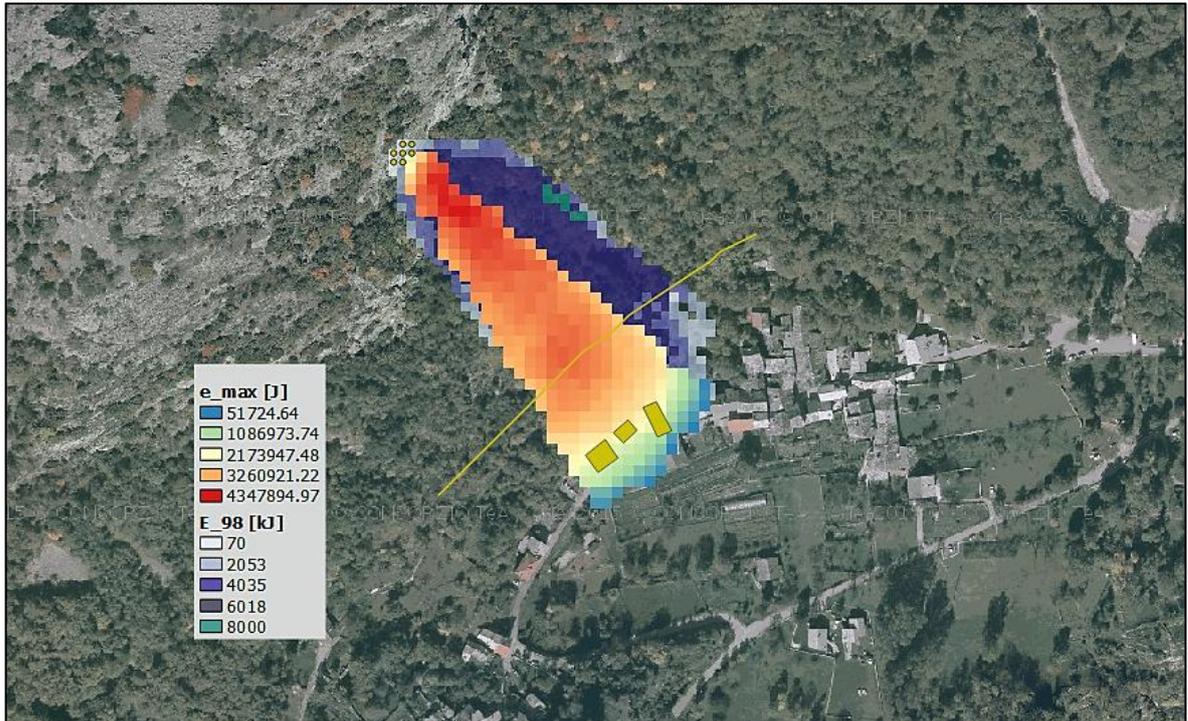


Figura 4.22: valori di energia cinetica a confronto: in rosso quelli ottenuti tramite QPROTO (J), in blu quelli relativi alla simulazione di dettaglio di Rockyfor3D (98esimo percentile, in kJ).

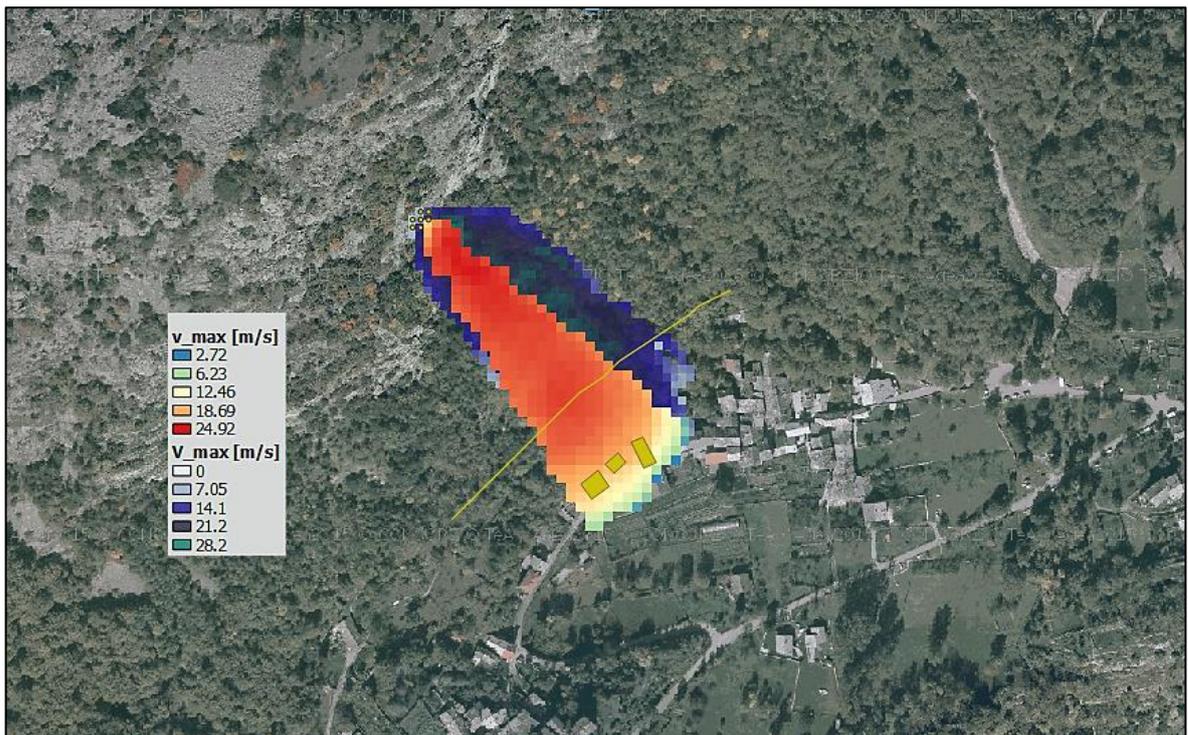


Figura 4.23: valori di velocità massima a confronto: in rosso quelli ottenuti tramite QPROTO (m/s), in blu quelli relativi alla simulazione di dettaglio di Rockyfor3D (m/s).

4.5 Discussione dei risultati

La simulazione dell'evento di crollo avvenuto nel 2011 nel comune di Exilles ha permesso di validare e implementare i parametri necessari per il Plugin QPROTO.

In primo luogo è stata valutata l'influenza del parametro *dip direction* ω : nella prima simulazione il valore di 140° è stato calcolato in riferimento all'angolo compreso fra il Nord geografico e la linea di massima pendenza media del versante mentre, nelle successive implementazioni, è stato assegnato il valore reale (ottenuto dalla mappa di aspect) a ogni punto sorgente. I risultati tuttavia non hanno dimostrato cambiamenti significativi in termini di area di invasione, di energia cinetica e di velocità.

In secondo luogo è stata valutata l'influenza della presenza di una barriera paramassi sugli angoli di energy line φ_p e di dispersione laterale α : nella prima simulazione sono stati utilizzati i valori di 29° e di 3° ottenuti trascurando la presenza della barriera nel Cap. 3, successivamente attraverso una "costante di calibrazione" si è invece cercato di prendere in considerazione gli effetti dissipativi della barriera paramassi.

I risultati hanno messo in evidenza che la sensibilità dell'analisi è strettamente correlata alla scelta di tali angoli e ad un'adeguata calibrazione degli stessi. Tale affermazione trova riscontro nel cambiamento subito dal cono di visibilità in seguito all'implementazione degli angoli φ_p e α , la cui estensione finale rispecchia in maniera significativa quella di dettaglio.

Tuttavia è evidente una sovrastima dei risultati, pur essendo nello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti nelle simulazioni di dettaglio; tale sovrastima è accettabile e indispensabile per poter ottenere dei valori cautelativi in relazione a un'analisi di tipo speditivo, caratterizzata da dati di input di facile e veloce reperibilità e da un'elevata incertezza sui risultati.

CONCLUSIONI

La tesi è dedicata allo studio dei fattori che influenzano l'evoluzione di un crollo in roccia e la sua modellazione a piccola scala. Tale esigenza nasce dalle considerazioni legate al recente sviluppo del plugin QPROTO (Castelli et al, 2019) per il software geografico libero QGIS 3.4 che permette di valutare l'area di invasione, la pericolosità e la suscettibilità relativa (spaziale) del fenomeno attraverso analisi speditive e preliminari da condursi su aree estese (ad esempio tratti di viabilità alpina).

QPROTO utilizza il principio del metodo dei coni (Jaboyedoff e Labiouse, 2011) e richiede la conoscenza degli angoli di energy line φ_p e degli angoli di dispersione laterale α per la creazione del cono di invasione del fenomeno.

In letteratura i valori di φ_p sono legati a numerose correlazioni empiriche, basate unicamente sulla geometria e sulla topografia del versante; appare evidente quindi che tali angoli non tengano conto di molti dei parametri che invece influenzano in modo preponderante il fenomeno.

In virtù di queste considerazioni, l'obiettivo perseguito nel lavoro di tesi è stato di identificare alcune correlazioni fra le caratteristiche del pendio e i valori di φ_p e α , che gli utilizzatori di QPROTO possano avere a disposizione in modo rapido e che contengano al loro interno tutte le informazioni necessarie per una corretta analisi del fenomeno di caduta massi.

Lo studio ha preso avvio dalla creazione di versanti virtuali semplificati, costituiti dall'unione di tre piani inclinati e dotati di un "collettore" paramassi fittizio, privo di capacità energetiche dissipative e utilizzato con il solo scopo di verificare il numero di blocchi che lo attraversano; successivamente è stato valutato come la geometria del pendio, la forma e il volume del blocco possano modificare l'evoluzione del fenomeno in relazione alla densità di vegetazione ad alto fusto presente sul versante, attraverso delle simulazioni parametriche di dettaglio effettuate con il software traiettografico Rockyfor3D.

I risultati hanno messo in evidenza che esiste un'ampia variabilità, al variare della vegetazione, dell'angolo φ_p in relazione all'inclinazione β del pendio (da circa 28° per $\beta=30^\circ$ a circa 55° per $\beta=60^\circ$).

Per angoli di inclinazione β maggiori di 60° la morfologia dell'area di invasione è pressoché simile ed i valori di φ_p non subiscono cambiamenti significativi.

Per angoli di inclinazione β di 30° e per blocchi di forma cubica e sferica, l'influenza della densità di vegetazione e la variabilità di φ_p sono massime; i blocchi in movimento subiscono una decelerazione o si fermano, confermando il duplice ruolo protettivo della vegetazione ad alto fusto. Essa infatti ha sia un ruolo di protezione nei confronti del sito stesso (*site-protection function*) dai fenomeni di eccessiva erosione del suolo e dai possibili flussi di detriti e sia un ruolo di protezione diretta (*direct protective function*) per le persone, infrastrutture ed abitazioni in caso di valanghe e crolli in roccia (Dorren et al, 2004).

All'aumentare della densità di vegetazione la variabilità di φ_p si riduce tranne che per il caso di un blocco discoidale, per il quale la vegetazione sembra non avere un'influenza per tutti gli scenari analizzati.

L'angolo α invece ha una variabilità molto più limitata in relazione all'angolo di inclinazione β (da circa 4° a circa 15° nel caso di assenza di vegetazione). All'aumentare della densità di vegetazione l'angolo diminuisce leggermente in tutti i casi, con una tendenza molto simile per tutte le forme del blocco e per le inclinazioni β del versante analizzate.

Successivamente, l'implementazione delle analisi ha portato alla valutazione dell'influenza della variazione del volume del blocco e ha messo in luce che, a partire da un volume di 5 m^3 , l'influenza della vegetazione ad alto fusto sembra trascurabile.

L'insieme di queste analisi parametriche ha consentito la creazione di abachi che, anche se in questa prima fase della ricerca, possono essere utilizzati dagli utenti di QPROTO.

Al fine di validare i risultati e di fornire un esempio su come possano essere utilizzati, è stata infine condotta l'analisi di un caso studio reale tramite il software QPROTO. Nel Novembre 2011 un fenomeno di caduta massi ha interessato il comune di Exilles (Torino); sono stati colpiti tre edifici e una barriera paramassi presente sul versante è stata distrutta per circa 50 m lineari. La back analysis condotta con QPROTO utilizzando i valori di ϕ_p e α ricavati dalle simulazioni parametriche, ha messo in evidenza la necessità di una calibrazione migliore degli angoli in relazione agli effetti dovuti alla presenza di una rete sul versante; in prima approssimazione è stata quindi definita una costante di calibrazione " ε_{ϕ_p} " e " ε_{α} ", che tenga conto dell'effetto dissipativo della barriera paramassi, da sommare ai valori di ϕ_p e α definiti sulla base degli studi parametrici condotti (nei quali non si teneva conto dell'effetto dissipativo della rete).

I risultati, pur essendo molto preliminari, si possono considerare soddisfacenti e costituiscono un terreno fertile e stimolante per nuovi studi e indagini.

In particolare sarà necessario analizzare in futuro alcuni parametri che in questo studio sono stati trascurati ma che potrebbero risultare fondamentali; sarà necessario studiare come la scabrezza della superficie e le diverse tipologie di suolo possano influenzare l'evoluzione dei crolli in roccia, in relazione ad esempio alla maggiore dissipazione di energia associata a valori maggiori di scabrezza o ad un comportamento meno elastico del terreno.

Successivamente occorrerà valutare l'influenza delle barriere paramassi attraverso uno studio comparativo di casi reali di caduta massi; sarà necessario valutare l'evoluzione del fenomeno considerando alcuni aspetti fondamentali legati ad una barriera paramassi come la capacità energetica dissipativa, l'altezza, i danni subiti e gli anni di esercizio al fine di definire una correlazione che possa calibrare al meglio gli angoli ϕ_p e α .

QPROTO è stato sviluppato per QGIS, un software libero e gratuito a disposizione della comunità scientifica; anche i risultati di questa ricerca saranno conformi a tale ideale e il feedback degli utilizzatori sarà fondamentale per l'ulteriore affinamento dei risultati, nell'ottica della condivisione della conoscenza.

BIBLIOGRAFIA

- Agliardi F., Crosta G. B., Frattini P., 2009. *Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques*. Natural Hazards and Earth System Science, Vol. 9, pp. 1059-1073.
- Azzoni A., Barbera G. L. et Zaninetti A., 1995. *Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 32, pp. 709–724.
- Barla M., 2010. *Elementi di Meccanica e Ingegneria delle Rocce*. Celid, Torino.
- Castelli M., Grisolia M., Barbero M. et al, 2019 (in pubblicazione). *A QGIS procedure to estimate rockfall hazard at a regional scale: the QPROTO tool*.
- Coggan J. S., Stead et Eyre, 1998. *Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment*. Transactions of the institution of mining and metallurgy, section b: applied earth science, Vol. 1, pp. 299-304.
- Cremona L. P., 2018. *Studio dei parametri necessari per una valutazione preliminare della pericolosità da caduta massi*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- De Biagi V., Napoli M. L., Barbero M., Peila D., 2017. *Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size*. Natural Hazards and Earth System Science, Vol. 17, pp. 103-113.
- De Blasio F. V., 2010. *Breve introduzione alla dinamica delle frane*. Liguori Editore, Napoli.
- Dorren L. K. A., Berger F., Imeson A., Maier B., Rey F., 2004. *Integrity, stability and management of protection forest in the European Alps*. Forest ecology and management, Vol. 195, pp. 165-176.
- Dorren L. K. A. et Simoni, S., 2014. *Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi*. ecorisQ.
- Dorren L. K. A., 2003. *A review of rockfall mechanics and modelling approaches*. Progress in Physical Geography 27, 1, pp.69-87.
- Dorren L. K. A., 2016. *Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model*. EcorisQ.
- Dorren L. K. A., 2017. *FINT – Find individual trees. User manual*. EcorisQ.
- Evans G. S. et Hungr O., 1993. *The assessment of rockfall hazard at the base of the talus slope*. Canadian Geotechnical Journal, 30, pp. 620-636.

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

Fontan D., 2004. *Studio geologico-tecnico sulle pareti rocciose sovrastanti le frazioni Cels (Rif e Morliere)*. Comune di Exilles.

Giani G. P., 1997. *Caduta di massi. Analisi del moto ed opere di protezione*. Hevelius Edizioni, Napoli.

Heim A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, Vol. 77, pp. 1-127.

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

Hsü K. J., 1975. *Catastrophic debris streams (Stürztroms) generated by rockfall*. Geological Society of America Bulletin, Vol. 86, pp. 129-140.

Jaboyedoff M., 2003. *CONEFALL 1.0. User's guide*. Quanterra.

Jaboyedoff M. et Labiouse V., 2011. *Technical note: preliminary estimation of rockfall runout zones*. Natural Hazards and Earth System Science, Vol. 11, pp. 819-828.

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

Meißl G., 1998. *Modellierung der reichweite von Felsstürzen: fallbeispiele zur GISgestützte gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum*. PhD tesis, Innsbrucker Geographische Studien, Band 28, Universität Innsbruck, Innsbruck, Austria.

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.

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

Ritchie A. M., 1963. *Evaluation of rockfall and its control*. Highway Research Record, Vol. 17, pp. 13-28, Highway Research Board, Washington.

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

Shanmugam, G., 2015. *The landslide problem*. Journal of Palaeogeography, Vol. 4, pp. 109-166.

Stokes A., Salin F., Kokutse A. D., Berthier S., Jeannin H., Mochan S., Dorren L., Kokutse N., Abd.Ghani M., Fourcaud T., (2005). *Mechanical Resistance of Different Tree Species to Rockfall in the French Alps*. Plant and Soil., Vol. 278, pp. 107-117.

Turner A. K., Schuster R. L., 2012. *Rockfall. Characterization and control*. Transportation Research Board, National Academies of science, Washington D. C.

Vangelista Z., 2011. *Verbale di sopralluogo n° 29/2011, Consorzio Forestale Alta Valle Susa*. Oulx.

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

SITOGRAFIA

<http://www.ecorisq.org>

<http://www.geoportale.piemonte.it>

<http://www.arpa.piemonte.it/>

http://webgis.arpa.piemonte.it/Web22/sifrap/ii_livelli/001-01071-00.pdf

http://webgis.arpa.piemonte.it/Web22/sifrap/ii_livelli/001-00964-01.pdf

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare la Professoressa Castelli per la fiducia riposta nei miei confronti e per avermi seguita con cura, attenzione e dedizione.

Ringrazio il Professor Vallero per essersi appassionato al mio lavoro di tesi, offrendomi preziosi consigli e spunti di riflessione durante questo percorso.

Ringrazio la mia famiglia, i miei amici e tutti coloro che mi hanno aiutato ad affrontare questi anni di Politecnico in modo positivo e propositivo.

Come direbbe Plauto: “*Factum est illud; fieri infectum non potest*”.