

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria

ANALISI MODELLISTICA DEL RUOLO DELLA FORESTA NELLA  
MITIGAZIONE DEL PERICOLO DI CADUTA MASSI IN LOCALITA'  
COL DI ROCCA (ROCCA PIETORE BL)

*Modeling analysis of the forest function for hazard mitigation against rockfall  
in Col di Rocca village (Rocca Pietore BL)*

Relatore:

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatore:

Dott. Francesco Bettella

Laureanda:

*Anna Davare*

Matricola

1132779

ANNO ACCADEMICO 2016 - 2017



## RIASSUNTO

Il presente lavoro di tesi si propone di analizzare il ruolo della foresta nella mitigazione del disturbo gravitativo da caduta massi nel versante ubicato a monte dell'abitato di Col di Rocca nel comune di Rocca Pietore in provincia di Belluno.

Questo studio nasce dalla necessità di conoscere le dinamiche di interazione massa-foresta e il livello di protezione fornito nei confronti degli elementi sensibili presenti nel fondovalle, quali la strada provinciale e le abitazioni.

Le fasi che hanno contraddistinto questo studio sono due: la prima relativa al rilievo preliminare in campo a partire dalla distinzione del pendio in zone omogenee; la seconda relativa alla realizzazione di una serie di scenari di evento con il software Rockyfor3D.

I parametri ottenuti dall'analisi descrittiva della foresta di protezione in esame hanno permesso di classificare il suo livello di protezione come medio (Stand Density Index, SDI pari a 607).

Nel versante oggetto di questo studio sono state realizzate delle aree di saggio a partire dalle quali sono stati definiti i parametri di input del software per la modellazione della caduta massi ed ipotizzati i diversi scenari di simulazione del disturbo in funzione delle diverse condizioni del soprassuolo forestale.

La realizzazione di una serie di confronti tra i vari scenari ha permesso di comprendere gli effetti di mitigazione direttamente imputabili alla foresta, sia nelle condizioni attuali in cui si presenta, che nelle condizioni ideali definite in letteratura.

Le simulazioni hanno evidenziato che il popolamento forestale in esame è una misura di protezione utile contro il fenomeno di caduta massi, in quanto permette di ridurre in maniera considerevole la distanza di arresto, l'energia cinetica e l'altezza dei rimbalzi dei massi simulati.

Nonostante la foresta limiti notevolmente la propagazione del fenomeno di caduta massi, questo non può comunque interessare alcuni elementi sensibili nel fondovalle. Perciò è stata anche ipotizzata la posa di ulteriori manufatti paramassi il cui effetto di mitigazione va a sommarsi a quella della foresta e delle reti paramassi attualmente presenti sul versante.

La soluzione progettuale individuata permette di mettere in sicurezza l'abitato di Col di Rocca e la Strada Provinciale.

Possiamo concludere quindi che un buon livello di protezione nel sito analizzato può essere fornito dalla combinazione di elementi naturali (foresta) ed antropici (reti paramassi), evidenziando l'importanza della loro complementarietà.

A partire dai risultati ottenuti dall'analisi modellistica, è stato possibile applicare il metodo RHV (Crosta et al., 2003) ai fini della mappatura della suscettibilità nel sito caso di studio. Confrontando

la zonazione in tre livelli di gravità dal presente studio con la mappatura del pericolo (P.A.I) esistente, è stato proposto un miglioramento della mappatura attuale del pericolo idrogeologico.

## ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the role played by forest in the mitigation of the phenomenon of rockfall along the mountain slope above the small village of Col di Rocca in the municipality of Rocca Pietore, in Belluno district.

This study is born to answer to a need of acquiring a deeper knowledge about the interaction dynamics between rock and forest and about the protection degree of the sensitive elements that we can find at the bottom of the valley, like streets and buildings.

This study can be divided into two main phases: the first one is related to a preliminary field analysis, which starts from the distinction of the slope in different homogeneous areas, the second one is related to the simulation of some possible sceneries with the software Rockyfor3D.

The parameters obtained by the descriptive analysis of the protection forest allowed us to classify the degree of protection as medium (Stand Density Index, SDI 607).

On the slope, object of this study, some sample areas were identified to define the input parameters of the landslide modeling software and to decide some simulation sceneries of the rockfall thanks to the different conditions of the forested topsoil.

Through the analysis of some comparisons among the different simulation sceneries, it was possible to know the mitigation effects directly imputable to the forest, both in actual and in ideal conditions, which are described in literature.

The simulations stressed the fact that the analyzed forest is a useful protection element against the rockfall hazard, because it allowed us to reduce considerably the runout, the kinetic energy and the rebounding height of the simulated rock.

Despite the forest reducing considerably the rockfall activity, some sensitive elements at the bottom of the valley can still be damaged by the effects of this phenomenon. Therefore, the hypothesis of realizing some more protection elements against rockfall, of which the mitigation effect is added to the first one exercised by the forest and the nets that are already in use on the slope.

The project solution, considered in this study, allows us to secure the little village of Col di Rocca and the Provincial Road.

We can affirm that a good protection degree of the analyzed site of study can be provided thanks to a combination of natural (forest) and anthropic (nets) elements, underlining the importance of their complementarity.

Starting from the modeling analysis results, it was possible to calculate the RHV index (Crosta et al., 2003) in order to map the susceptibility of the site, object of this study. Comparing three different degrees of gravity through a zonation process and the existing risk mapping (P.A.I.), it was proposed to improve the actual mapping of the hydrogeological hazard.

## INDICE GENERALE

RIASSUNTO .....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUZIONE.....	15
1.1 DEFINIZIONE DI DISTURBO NATURALE .....	15
1.2 CONCETTI DI PERICOLO E RISCHIO NATURALE .....	15
1.3 LA CADUTA MASSI .....	17
1.4 ASPETTI GEOMORFLOGICI DELLE AREE DI INNESCO .....	22
2. FORESTE DI PROTEZIONE .....	23
2.1 DEFINIZIONE.....	23
2.2 RUOLO DEL BOSCO NELLA DISSIPAZIONE ENERGETICA .....	
PER LA CADUTA MASSI .....	25
2.3 INDICAZIONI PER LA GESTIONE.....	26
2.4 STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE ED INDIVIDUAZIONE DELLE FORESTE DI PROTEZIONE IN REGIONE VENETO .....	31
3. OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO .....	33
4. AREA CASO DI STUDIO .....	35
4.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	35
4.2 INQUADRAMENTO STORICO .....	36
4.2.1 EVOLUZIONE DELL'USO DEL SUOLO: ANALISI DI FOTO AEREE STORICHE .....	37
4.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	42
4.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO .....	43
4.4.1 PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO.....	45
4.5 INQUADRAMENTO TRAMITE GLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE .....	46
4.6 INQUADRAMENTO CLIMATICO .....	49
4.7 ANALISI DEL POPOLAMENTO FORESTALE.....	50
5. MATERIALI E METODI.....	57
5.1 RILIEVI DI CAMPO.....	57
5.1.1 SUDDIVISIONE AREA IN ZONE OMOGENEE .....	57
5.1.2 TRANSETTO PER RILIEVO CICATRICI .....	59
5.1.3 AREE DI SAGGIO .....	61
5.2 APPLICAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO ROCKYFOR3D .....	64
5.2.1 ROCKY-FOR 3D.....	64

5.2.1.1 ALGORITMI DI CALCOLO .....	65
5.2.1.2 TRAIETTORIE DI CADUTA.....	65
5.2.1.3 DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA .....	68
5.2.1.4 CALCOLO DELLA VELOCITA' DI CADUTA .....	69
5.2.1.5 DATI DI INPUT .....	72
5.2.1.6 FILES DI OUTPUT .....	73
5.2.1.7 SIMULAZIONI CON FORESTA .....	75
5.2.1.7 SIMULAZIONI CON RETI PARAMASSI .....	79
5.2.1.8 LIMITI DEL MODELLO .....	80
6. RISULTATI.....	81
6.1 ANALISI DESCRITTIVA .....	81
6.2 MODELLAZIONE NUMERICA.....	94
6.2.1 AREE DI SAGGIO PER LA STIMA DEI PARAMETRI DI INPUT .....	94
6.2.2 SELEZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT .....	97
6.2.3 SCENARI IPOTIZZATI.....	102
7. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE.....	107
7.1 CONFRONTO TRA I DIVERSI SCENARI .....	120
8. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' DA CADUTA MASSI NELL'AREA OGGETTO DI STUDIO.....	129
8.1 IL METODO RHV .....	129
8.2 GESTIONE FORESTALE MIRATA ALLA PROTEZIONE .....	134
8.3 IPOTESI DI INTERVENTI FUTURI .....	137
9. DISCUSSIONE GENERALE E CONCLUSIONI .....	141
10. RINGRAZIAMENTI .....	146
11. BIBLIOGRAFIA.....	147

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Rappresentazione schematica delle classi di pericolo Hazard (H).....	16
Figura 2 Rappresentazione della suddivisione in classi di Rischio Specifico (Rs).....	16
Figura 3 Elementi interni al versante e fattori predisponenti il fenomeno di caduta massi.....	18
Figura 4 Rappresentazione delle tre zone tipiche del fenomeno di caduta massi.....	21
Figura 5 Fasi di sviluppo di una foresta.....	31
Figura 6 Mappatura delle foreste di protezione diretta della regione Valle d'Aosta.....	32
Figura 7 Localizzazione del sito caso di studio e del Ru de Sas Negher nell'ambito della superficie della Regione Veneto.....	35
Figura 8 Immagini aeree dell'area caso di studio relative agli anni 1970 (a sinistra) e 1980 (a destra).....	38
Figura 9 Immagini aeree dell'area caso di studio relative agli anni 1991 a sinistra) e 2001 (a destra).....	38
Figura 10 Classificazione immagini aeree relative agli anni 1970 (a sinistra) e 1980 (a destra).....	39
Figura 11 Classificazione immagini aeree relative agli anni 1991 (a sinistra) e 2001 (a destra).....	39
Figura 12 Grafico esemplificativo dell'evoluzione dell'uso del suolo nel tempo all'interno dell'area caso di studio.....	40
Figura 13 Carta di uso del suolo del versante del Ru de Sass Negher caso di studio.....	41
Figura 14 Rappresentazione del sito di studio con la suddivisione per colori in base alle caratteristiche litologiche. Fonte: Database delle diverse litologie che compongono il territorio della Regione Veneto, Direzione Geologia della Regione Veneto.....	43
Figura 15 Foto aerea nella quale viene evidenziato (tratteggio blu) il percorso del Ru de Sass Negher....	44
Figura 16 Estratto del P.A.I. relativo alla zona caso di studio con in evidenza il livello di pericolo associato.....	45
Figura 17 Estratto del PTRC per l'ambito 02 – Dolomiti Agordine (Valori naturalistico-ambientali e storico-culturali).....	47
Figura 18 Estratto del PTCP Provincia di Belluno- Tavola C.5 Sistema del paesaggio.....	48
Figura 19 Estratto della Carta delle Fragilità del P.A.T.I. di prossima adozione per il Comune di Rocca Pietore (BL).....	48
Figura 20 Carta dei principali tipi forestali presenti su versante caso di studio.....	49
Figura 21 Esempio di intervento di alleggerimento del versante nella zona di transito dei massi.	52
Figura 22 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia alta del versante alla destra orografica del rio.....	53
Figura 23 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia alta del versante alla sinistra orografica del rio.....	53
Figura 24 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante alla sinistra orografica del rio.....	54
Figura 25 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante alla destra orografica del rio.....	54
Figura 26 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante alla destra orografica lontano dal canale.....	55
Figura 27 Suddivisione del versante caso di studio in zone omogenee indicate con una lettera.....	59
Figura 28 Esempi di cicatrici da impatto esaminate nella fase di raccolta dati.....	60
Figura 29 Esempio di scheda di campionamento prevista dal manuale del modello Rockyfor3D.....	61
Figura 30 Distribuzione delle aree di saggio all'interno del versante caso di studio.....	62
Figura 31 Rappresentazione del meccanismo di definizione della traiettoria da parte del modello Rockyfor3d.....	66
Figura 32 Schema rappresentativo del range di variazione della direzione del masso a	

seguito del rimbalzo.....	67
Figura 33 Schema rappresentativo del moto gravitativo di un masso in caduta lungo un versante.....	69
Figura 34 Esempio di determinazione del parametro MOH nelle tre tipologie previste dal modello Rockyfor3D.....	70
Figura 35 Rappresentazione del dem impiegato ai fini della modellazione.....	72
Figura 36 Schema descrittivo delle fasi di simulazione del modello Rockyfor3D con la presenza di foresta.....	77
Figura 37 Distribuzione in classi delle altezze delle piante presenti all'interno del transetto.....	81
Figura 38 Distribuzione valori di diametro ad 1,30 metri misurati all'interno del transetto.....	82
Figura 39 Distribuzione dei valori di diametro misurato alla base della pianta.....	82
Figura 40 Distribuzione di frequenza della variazione di diametro tra i due valori misurati per ogni pianta.....	83
Figura 41 Distribuzione di frequenza dei valori di area basimetrica calcolati ad un'altezza di 1,30 m.....	83
Figura 42 Distribuzione di frequenza dei valori di area basimetrica calcolata alla base della pianta.....	84
Figura 43 Distribuzione delle distanze misurate da monte tra una pianta e l'altra distinte tra misure a destra e sinistra.....	85
Figura 44 Grafico volto ad evidenziare la notevole presenza di danni (cicatrici) dovuti al verificarsi del fenomeno di caduta massi all'interno del popolamento forestale.....	86
Figura 45 Numero di cicatrici contate per pianta all'interno del transetto.....	86
Figura 46 Descrizione dello stato fitosanitario delle piante presenti all'interno del transetto.....	87
Figura 47 Descrizione della tipologia di danno legato alle cicatrici presenti sul tronco delle piante all'interno del transetto.....	87
Figura 48 Distribuzione di frequenza relativa della posizione delle ferite sul tronco degli individui presenti all'interno del transetto.....	88
Figura 49 Distribuzione di frequenza delle altezze delle cicatrici da terra.....	88
Figura 50 Distribuzione percentuale della forma delle cicatrici sulle piante all'interno del transetto.....	89
Figura 51 Distribuzione dei valori di base delle cicatrici presenti sulle piante all'interno del transetto.....	89
Figura 52 Distribuzione dei valori di altezza delle cicatrici presenti sulle piante all'interno del transetto.....	90
Figura 53 Distribuzione di frequenza dell'area interessata dalle cicatrici sulle piante del transetto.....	90
Figura 54 Curva di frequenza cumulata dei valori di superficie interessata dalle cicatrici.....	91
Figura 55 Descrizione della presenza o meno di massi alla base della pianta analizzata all'interno del transetto.....	91
Figura 56 Distribuzione di frequenza relativa dei valori di diametro intermedio rilevati nei massi alla base delle piante.....	92
Figura 57 Distribuzione di frequenza cumulata del diametro intermedio dei massi alla base delle piante.....	92
Figura 58 Distribuzione di frequenza relativa dei valori di diametro minore dei massi alla base delle piante.....	93
Figura 59 Distribuzione di frequenza del diametro maggiore dei massi alla base delle piante.....	93
Figura 60 Distribuzione dei valori di volume calcolati dei massi alla base delle piante.....	94
Figura 61 Forma dei massi più rappresentativi dell'area di saggio in funzione della distanza dalla parete sorgente.....	95
Figura 62 Altezza media della necromassa presente a terra in funzione della distanza dalla zona sorgente.....	96
Figura 63 Area media coperta dalla necromassa per ogni area di saggio in funzione della distanza dalle aree sorgente.....	96
Figura 64 Localizzazione delle aree sorgente del disturbo.....	98
Figura 65 Tratto del canale del Ru de Sass Negher con presenza di elementi di scabrezza di varia natura. A monte si possono vedere le aree sorgente.....	103
Figura 66 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO1.....	109
Figura 67 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 1.....	109
Figura 68 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 2.....	111

Figura 69 Numero di passaggi dei massi per ogni cella durante nello SCENARIO 2.....	111
Figura 70 Distribuzione degli impatti all'interno del popolamento forestale per lo SCENARIO 2.....	113
Figura 71 Distribuzione dei valori di altezza di impatto sulle popolamento forestale per lo SCENARIO 2.....	113
Figura 72 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 3. ....	114
Figura 73 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 3.....	114
Figura 74 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 4.....	117
Figura 75 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 4.....	117
Figura 76 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 5.....	119
Figura 77 Numero medio dei passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 5.....	119
Figura 78 Probabilità di passaggio dei blocchi in moto gravitativo in caso di assenza di copertura forestale, SCENARIO 1.....	121
Figura 79 Probabilità di passaggio dei blocchi in moto gravitativo con presenza di soprassuolo forestato, SCENARIO 2.....	121
Figura 80 Numero di massi depositati lungo il versante in caso di simulazione senza foresta, SCENARIO 1.....	122
Figura 81 Distribuzione dei valori del numero di massi depositati lungo il versante in caso di simulazione con foresta, SCENARIO 2.....	122
Figura 82 Distribuzione del numero medio di impatti dei blocchi sulle piante lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 2.....	124
Figura 83 Distribuzione del numero medio di impatti dei blocchi sulle piante lungo il versante in condizioni ideali, SCENARIO 3.....	124
Figura 84 Distribuzione dei valori di energia massima dei massi in movimento lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.....	126
Figura 85 Distribuzione dei valori di energia massima dei in movimento lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 5.....	126
Figura 86 Distribuzione del numero massimo di massi depositati in ogni cella lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.....	127
Figura 87 Distribuzione del numero massimo di massi depositati in ogni cella lungo il versante secondo le ipotesi di sistemazione, SCENARIO 5.....	127
Figura 88 Distribuzione dei valori di volume dei massi depositati in ogni cella lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.....	127
Figura 89 Distribuzione dei valori di volume dei massi in ogni cella lungo il versante secondo le ipotesi di sistemazione, SCENARIO 5.....	127
Figura 90 Matrice tridimensionale impiegata per la stima del pericolo di caduta massi secondo il metodo RHV, dove a indica il posizionamento dell'indice RHI, b indica questo valore riportato nella matrice cubica, c indica il valore finale di RHV.....	130
Figura 91 Mappatura del versante in esame con il metodo RHV secondo il quale si possono distinguere le tre classi di pericolo (colori rosso, arancio e giallo).....	132
Figura 92 Confronto tra la mappatura attuale della zona prevista dal PAI e i risultati della mappatura secondo il metodo RHV.....	133
Figura 93 Localizzazione delle opere di difesa nel sito caso di studio.....	138



## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Suddivisione delle foreste di protezione in tre livelli.....	24
Tabella 2 Parametri che devono essere soddisfatti per garantire le esigenze di stabilità di un popolamento forestale contro la caduta massi (Regione Autonoma Valle d’Aosta – Regione Piemonte, 2006).....	29
Tabella 3 Eventi franosi registrati nella banca dati dell’I.F.F.I.....	36
Tabella 4 Valori percentuali della classificazione temporale delle foto aeree storiche.....	40
Tabella 5 Tipologie di suolo presenti nel manuale del modello Rockyfor3D con coefficiente di restituzione $R_n$ .....	63
Tabella 6 Valori percentuali di probabilità dell’angolo di deviazione del blocco a seguito del rimbalzo secondo il modello Rockyfor3D.....	67
Tabella 7 Valori percentuali di probabilità di deviazione della direzione di caduta a seguito di un impatto contro un albero.....	68
Tabella 8 Tre diametri del masso più rappresentativo dell’area di saggio.....	99
Tabella 9 Descrizione delle caratteristiche delle opere simulate.....	106
Tabella 10 Tabella 10 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 1.....	107
Tabella 11 Principali parametri di output ottenuti.....	109
Tabella 12 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 2..	109
Tabella 13 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 3..	113
Tabella 14 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 3.....	115
Tabella 15 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 4..	116
Tabella 16 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 4.....	116
Tabella 17 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 5..	118
Tabella 18 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 5.....	120
Tabella 19 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 1 a SCENARIO 2.....	120
Tabella 20 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 2 a SCENARIO 3.....	123
Tabella 21 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 4 a SCENARIO 5.....	125
Tabella 22 Tabella di riferimento per la riclassificazione dei parametri del metodo RHV.....	131
Tabella 23 Descrizione dei parametri per la stima dell’indice SDI, sia in condizioni attuali in cui si presenta il popolamento, sia nelle condizioni ideali definite dalla letteratura.....	135
Tabella 24 Diversi livelli di protezione associati a valori di SDI calcolati (Reineke, 1933).....	135
Tabella 25 Caratteristiche tecniche delle reti ipotizzate per la sistemazione del versante.....	139

## INDICE DELLE FORMULE

(1) Formula per il calcolo del coefficiente di restituzione tangenziale $R_t$ .....	70
(2) Formula di Pfeiffer e Bowen per il calcolo della componente tangenziale del moto del masso a seguito di un impatto.....	71
(3) Formula di Pfeiffer e Bowen per il calcolo della componente normale del moto del masso a seguito di un impatto.....	71
(4) Formula di Pfeiffer e Bowen per il calcolo della velocità di rotazione del blocco a seguito dell'urto.....	72
(5) Formula per il calcolo della deviazione standard impiegata dal software Rockyfor.....	74
(6) Formula per il calcolo della dispersione di energia totale in caso di impatto con foresta impiegata dal software Rockyfor.....	77
(7) Formula per il calcolo della massima energia dissipabile impiegata dal software Rockyfor.....	78
(8) Formula per il calcolo della componente orizzontale della massima energia dissipabile impiegata dal software Rockyfor.....	78
(9) Formula per il calcolo del valore ideale di altezza di impatto per ottenere la massima dissipazione.....	78
(10) Formula per il calcolo della componente verticale della massima energia dissipabile impiegata dal software Rockyfor.....	78
(11) Formula di Jonsson per il calcolo della massima energia dissipata in funzione dell'angolo di impatto del masso.....	79
(12) Formula di Reineke per il calcolo dello Stand Density Index (SDI) per valutare il livello di protezione fornito da una foresta.....	131
(13) Formula per la mappatura del pericolo nell'approccio RHV.....	135



## 1.INTRODUZIONE

### 1.1 DEFINIZIONE DI DISTURBO NATURALE

Un disturbo naturale è un qualunque evento discreto nel tempo che altera la struttura di un ecosistema, comunità o popolazione e modifica la disponibilità delle risorse e l'ambiente fisico (Pickett e White, 1985). Questo turbamento della funzionalità di un ecosistema può essere di natura biotica o abiotica a seconda degli elementi che la possono originare. In particolare, i disturbi di natura biotica sono generalmente caratterizzati da pullulazioni di insetti, attacco di patogeni e da diverse tipologie di danni imputabili alla presenza di specie erbivore; mentre i disturbi di natura abiotica si verificano sotto forma di frane, valanghe, alluvioni e schianti, con genesi esterna all'ecosistema in esame. Ci sono diversi fattori che inducono il propagarsi di un disturbo, detti predisponenti, ed altri che causano in maniera diretta il danno, i quali sono detti scatenanti; i fattori di contributo sono invece elementi che svolgono un ruolo secondario nello sviluppo del disturbo stesso.

### 1.2 CONCETTI DI PERICOLO E RISCHIO NATURALE

Un pericolo naturale è un processo naturale potenziale o in evoluzione che può produrre effetti negativi per l'uomo o per l'ambiente (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006). La pericolosità è definita come la probabilità del verificarsi di un fenomeno potenzialmente dannoso all'interno di una data area e in un dato periodo di tempo (Varnes, 1984).

Le variabili fisiche che influenzano l'entità del disturbo naturale sono l'area di incidenza, l'intensità del fenomeno e la sua probabilità di accadimento, quest'ultima si traduce nel Tempo di Ritorno dello stesso. Dall'intersezione tra queste componenti vengono definite le classi di pericolo Hazard (H) di un disturbo naturale. In funzione dei parametri di intensità e frequenza, anche il pericolo di caduta massi viene generalmente classificato in diverse classi di pericolo che viene definito come alto, moderato o basso (Raetzo et al., 2002). Come si può vedere in Figura 1, queste classi presentano dei valori soglia corrispondenti rispettivamente ai tre livelli sopra citati. Un aspetto di particolare importanza che non deve essere trascurato, è la frequente presenza di pericolo residuo relativo alle situazioni con tempo di ritorno molto elevato la cui intensità non è nota.

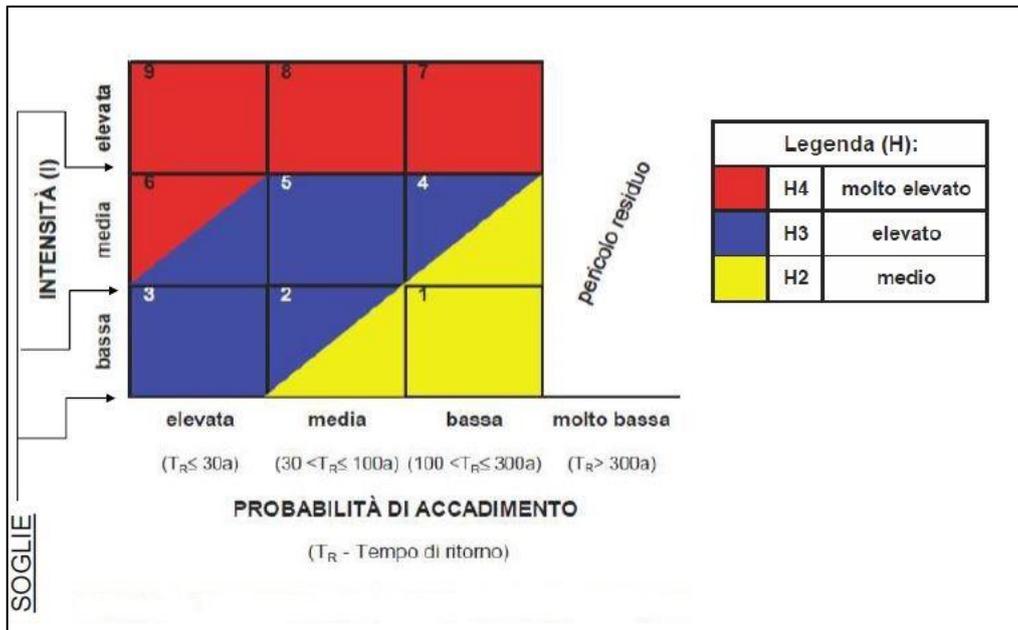


Figura 1 Rappresentazione schematica delle classi di pericolo Hazard (H).

Queste considerazioni nei confronti dei disturbi naturali non sono tuttavia complete se non si considera l'impatto che essi hanno sulle attività antropiche. Nota la presenza di elementi suscettibili sul territorio, esposti al pericolo e caratterizzati da un particolare valore economico, detta vulnerabilità, è possibile rilevare la presenza di un rischio specifico suddiviso anch'esso in classi come evidenziato in Figura 2.

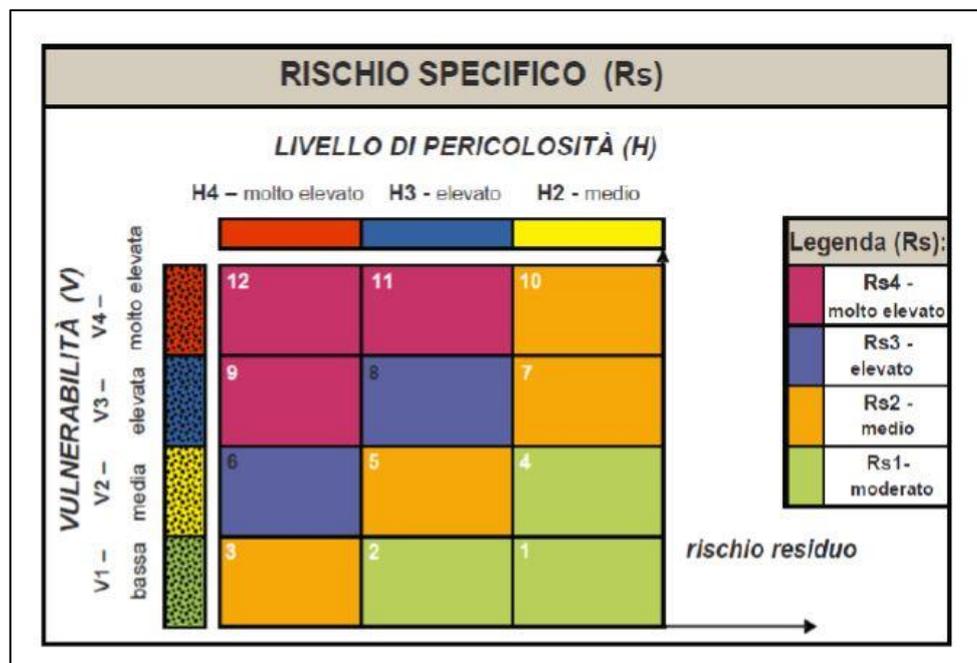


Figura 2 Rappresentazione della suddivisione in classi di Rischio Specifico (Rs).

### 1.3 LA CADUTA MASSI

Il processo gravitativo della caduta massi (*Rockfall*) è un disturbo naturale abiotico molto diffuso nelle zone montuose dove la presenza di frequenti affioramenti rocciosi o di vere e proprie pareti instabili provoca spesso il movimento verso valle dei frammenti litoidi. Gli eventi di crollo di massi o di roccia sono accumulabili ad una sorta di fenomeno di frana o valanga di materiale roccioso, aventi origine dal distacco di materiale litoide presso la superficie di pareti rocciose verticali o sub-verticali con l'improvviso rilascio di volumi rocciosi che discendono lungo il pendio (Selby, 1982). Durante la caduta del masso e mentre il blocco si trova in aria, esso si muove secondo una traiettoria parabolica controllata unicamente dalla gravità (Asteriou et al, 2016).

La classificazione di Crosta (2000) dei fenomeni di crollo in funzione dei volumi coinvolti prevede la seguente suddivisione:

- *Boulder fall*: se il litoide presenta un volume inferiore a  $10 \text{ m}^3$ ;
- *Block fall*: se il litoide supera i  $100 \text{ m}^3$ ;
- *Cliff fall*: se il masso presenta un volume compreso tra  $10^4 \text{ m}^3$  e  $10^6 \text{ m}^3$ ;
- *Bergsturz* o *rock avalanche*: in caso di volumi superiori a  $10^6 \text{ m}^3$ .

La definizione che viene mantenuta valida in questo studio, considera “caduta massi” come il movimento verso valle di blocchi rocciosi perlopiù isolati e volumetricamente limitati a valori compresi tra  $0.02$  e  $5 \text{ m}^3$  a partire dalla superficie di una rupe (Berger et al., 2002). Questo fenomeno, si distingue da altre tipologie di frana in quanto il distacco e la caduta interessano una porzione di roccia singola, il cui comportamento dinamico è indipendente l'una dall'altra.

Questo fenomeno viene causato da una serie di fattori predisponenti che agiscono in combinazione tra loro, si tratta in generale di meccanismi che causano la progressiva diminuzione delle forze coesive che caratterizzano le rocce, agendo a livello dei punti di debolezza dei frammenti litoidi e provocandone la disgregazione fisica. Alcuni di questi sono:

- la geologia delle rocce, legata alla tipologia ed al grado di variabilità dei massi;
- la scistosità, legata al grado di fratturazione e alle caratteristiche dei vari piani lungo i quali avviene questo fenomeno, tra cui l'orientazione degli stessi;
- le proprietà geomeccaniche delle rocce e del suolo quali coesione, attrito, resistenza al taglio ed angolo di deposito.
- la quota, l'esposizione e la pendenza del versante ( $>30^\circ$ );
- il clima legato alla presenza di vento e di infiltrazioni d'acqua che causano fenomeni di fusione e rigelo;
- disgelo del permafrost;

- il livello di attività (anche storica) del versante in esame;

La figura sottostante descrive in maniera schematica i diversi fattori predisponenti e le caratteristiche del versante che interessa il moto gravitativo dei massi verso valle. Lo schema considera anche come il distacco di massi da monte possa trovare innesco anche in seguito a movimenti sismici ed attività tettonica (Broili, 1974).

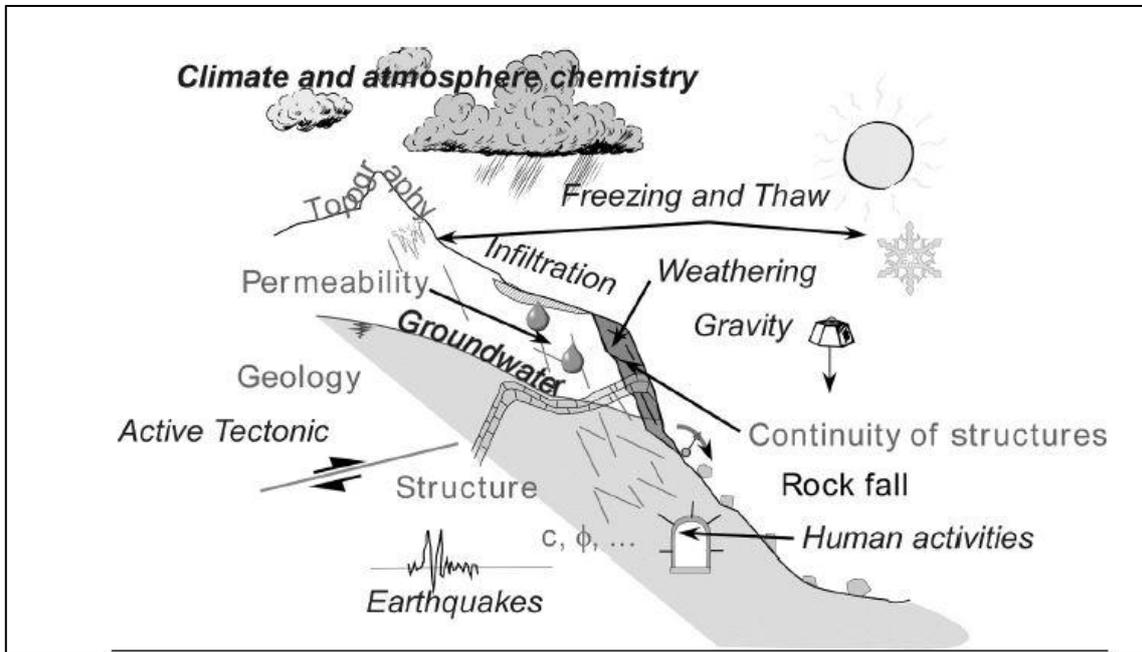


Figura 3 Elementi interni al versante e fattori predisponenti il fenomeno di caduta massi.

Una volta avvenuto il distacco a monte, il movimento dei massi viene controllato principalmente dalla forza di gravità che si porta verso valle secondo gradiente cinetico, da valori di potenziale maggiore a minore.

In generale, è necessario specificare che il termine *rockfall* comprende uno spettro di processi che includono il rotolamento indipendente, il rimbalzo di singoli frammenti, il flusso di masse granulari con o senza l'intervento del substrato e fenomeni di transizione che contengono entrambi gli elementi (Bourrier et al., 2013).

Ci sono, infatti, diverse tipologie di movimento che possono essere assunte dai blocchi in corsa tra cui le principali sono:

- **CADUTA LIBERA:** nel caso in cui il masso si sposti secondo un moto parabolico ad elevata velocità, generata dal tramutarsi dell'energia potenziale in energia cinetica. Si verifica generalmente nel caso in cui le pendenze siano maggiori di  $76^\circ$  (Ritchie, 1963). Il movimento viene definito traslazione orientata dei massi al loro baricentro con una successiva rotazione attorno ad esso (Azzoni et al., 1995);
- **RIMBALZO E ROTOLAMENTO:** nel caso in cui il movimento sia influenzato dall'impatto del litoide con alcuni ostacoli quali irregolarità del suolo come cambi di pendenza o accumuli

di detrito minerale, oppure depositi di tronchi o materiale legnoso situato lungo il percorso. In questo caso il litoide in corsa subisce alcune modifiche sia in termini di massa che di energia cinetica, in quanto generalmente il masso si frantuma e perde circa il 75% della sua energia iniziale, raggiungendo in alcuni casi anche una perdita pari al 86% (Broili, 1974).

Nel caso di versanti particolarmente scoscesi il masso continua la discesa esplicando contatti minimi con la parete rocciosa, ossia compiendo una o più successioni di salti in aria, mentre al di sotto dei 45° il movimento assume una maggior aderenza alla superficie, tramutandosi in rotazione.

Insieme al rimbalzo, il rotolamento è il tipo di movimento maggiormente riscontrato negli eventi di *rockfall* (Broili, 1974), in caso di pendenze inferiori ai 30° e versanti con scabrezza tale da non limitare in alcun modo il movimento di discesa verso valle. Il rotolamento è tipico dei pendii dove il suolo è di tipo roccioso con detrito di versante i cui valori di diametro oscillano tra 0.05 e 0.30 metri. Questo tipo di moto è quello che permette il più possibile al masso di preservare nello spazio l'energia cinetica e di conseguenza di raggiungere i massimi valori di runout, soprattutto se il litoide è di forma sferica.

Si tratta del processo più difficile da simulare con i modelli che studiano le traiettorie, in quanto è complessa la descrizione dell'impatto del blocco in caduta sulla superficie del versante. Spesso le informazioni disponibili relative alle proprietà meccaniche e geometriche del suolo non sono sufficienti alla previsione del rimbalzo dei litoidi (Bourrier et al., 2009).

- **SCIVOLAMENTO E SLITTAMENTO:** movimento limitato nello spazio che si verifica nel caso in cui il pendio sia a pendenza ridotta ed il valore di energia cinetica posseduta dal masso sia basso. Si verifica generalmente al principio del movimento di discesa o in ultima fase al momento dell'arresto, quando la forza di attrito è tale da non poter essere vinta dal masso (Bozzolo e Palmi, 1986).
- **ARRESTO:** ultima fase del movimento di un masso verso valle, è funzione della morfologia del versante e della scabrezza incontrata lungo il percorso, della velocità del masso in corsa e della sua forma. Si verifica in caso di massima dissipazione dell'energia cinetica iniziale e causa il deposito dei sedimenti. I frammenti litoidi di minori dimensioni tendono a disperdere per primi l'energia cinetica acquisita a monte e di conseguenza a depositarsi a livello di pendenze maggiori subendo di più l'attrito dovuto al contatto del litoide con il versante, mentre i blocchi di maggiori dimensioni subiscono questo effetto in termini minori tendendo a depositarsi a quote e pendenze inferiori rispetto al caso precedente.

In quanto fenomeno gravitativo, la caduta massi può essere distinta nelle tre zone in cui generalmente si manifesta il fenomeno, caratterizzate da elementi diversi che ne compongono la superficie. A

differenza di altri fenomeni di questo tipo, questa distinzione non è così precisa e facilmente realizzabile in quanto i confini tra le zone di innesco, transito ed arresto spesso non sono chiari e risultano talvolta sovrapposti. Questo aspetto è imputabile al fatto che, durante il crollo, le forze in gioco sono in continua evoluzione e possono indurre alla formazione di nuove aree sorgenti, accumulo di litoide anche in tratti ad elevata pendenza, oppure ripresa del movimento di massi in aree di arresto temporaneo in seguito ad urti. A partire da queste considerazioni è possibile comunque, in linea generale, definire le caratteristiche delle 3 zone:

Per quanto riguarda la zona di distacco, nella quale il fenomeno ha origine, la pendenza generalmente risulta superiore a  $30^\circ$ , dove le aree sorgente possono essere sia puntiformi che su area estesa. Generalmente si tratta di pareti rocciose molto ripide, con costoni a strapiombo e piani di stratificazione sfavorevoli. La presenza del popolamento forestale è considerata un elemento positivo per la capacità di trattenuta e di stabilizzazione del terreno da parte delle radici, ma anche un elemento negativo in quanto accelera i processi disgregativi delle rocce soprattutto in caso di sollecitazioni esterne, come ad esempio in presenza di neve o di vento.

Per quanto riguarda la zona di transito (o trasporto), la pendenza presenta valori compresi tra  $30^\circ$  e  $35^\circ$ , in questa fascia la velocità di caduta dei massi e le altezze raggiunte da terra presentano i valori massimi, tendono a perdere energia solamente in caso di impatto contro ostacoli quali ad esempio le piante o la micro-topografia.

A questo livello del versante la presenza del bosco svolge un ruolo molto importante di dissipazione, il quale è funzione di specie, densità, diametro, struttura e tessitura del popolamento forestale. La capacità delle piante di ostacolare il transito dei massi è fortemente influenzata dalla loro dimensione: all'aumentare del volume dei massi diminuisce la capacità degli alberi di piccolo diametro di formare una barriera efficace (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006).

Per quanto riguarda la zona di deposito, la pendenza del terreno si riduce a valori inferiori a  $25^\circ$  ed i massi in questa condizione tendono a fermarsi anche in concomitanza con la presenza di elementi che aumentano la scabrezza a livello del soprassuolo. Questa fascia risulta essere facilmente riconoscibile per la presenza di grandi quantità di materiale depositato al suolo in seguito al crollo. In questa condizione anche alberi di piccoli diametri possono fermare massi di grosse dimensioni, cosa che non accade nella zona di transito (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006).

In figura 4 viene riportato uno schema del fenomeno dove sono evidenziate le tre zone e gli elementi che le caratterizzano. Il principio generale che spiega il verificarsi della caduta massi è che se un masso si ferma in modo indipendente, difficilmente ripartirà nel suo movimento, se invece esso è fermo perché bloccato da un ostacolo allora potrebbe rimettersi in movimento qualora le caratteristiche dell'ostacolo dovessero venir meno.

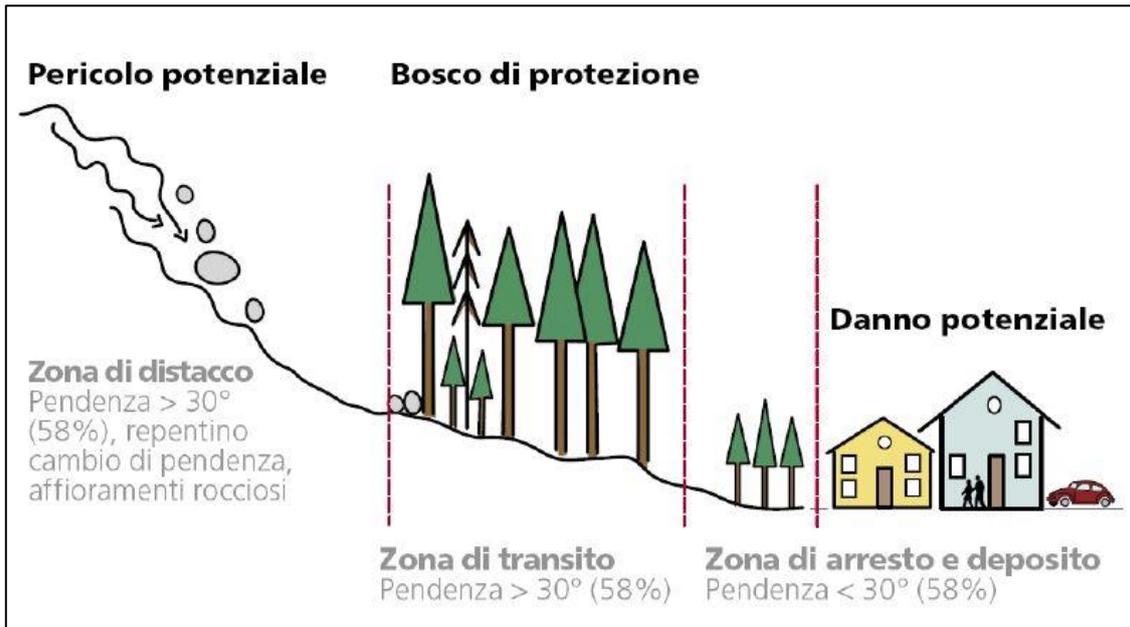


Figura 4 Rappresentazione delle tre zone tipiche del fenomeno di caduta massi (tratto da slide del corso "Incendi e disturbi di natura abiotica").

L'individuazione di un bosco soggetto al fenomeno di caduta massi avviene attraverso l'osservazione delle numerose tracce di eventi passati, le quali possono essere facilmente riscontrate e sono:

- Alberi schiantati o danneggiati nella porzione di fusto a monte con cicatrici frontali, laterali o di striscio, oppure lacerazioni dei tessuti con traumi a livello dei canali resiniferi;
- Tracce di impatto al suolo di massi che spesso formano buche le quali possono portare anche a fenomeni erosivi (effetto *dunping*);
- Massi al piede di piante, ceppaie o tronchi posizionati lungo la linea preferenziale di massima pendenza;
- Testimonianze storiche di eventi passati le cui informazioni sono contenute nelle carte tecniche locali;
- Opere a difesa di elementi sensibili a valle.

La caduta di massi o blocchi è un evento improvviso, sovente senza segnali premonitori (Frehner M., 2005). Lo studio di questo fenomeno è molto complesso in quanto si dimostra di difficile previsione, sia in termini spaziali che temporali. Alcuni parametri che influenzano il moto gravitativo sono difficili da determinare in modo diretto in campo, come ad esempio i coefficienti di restituzione e l'angolo di attrito dinamico, mentre altri valori possono cambiare nel tempo, come ad esempio le condizioni di stabilità dei blocchi e la scabrezza del pendio. Negli ultimi anni, nell'area dolomitica, è stato accertato un incremento di questi fenomeni alle quote medio elevate (> 1700 metri s.l.m.), con una tendenza che si è concentrata prevalentemente nella stagione estiva o tardo-estiva.

Nonostante il fatto che questo processo coinvolga volumi piuttosto limitati, il fenomeno di caduta massi può tuttavia tradursi in perdite economiche legate all'interruzione di servizi, danneggiamento di strutture, così come causare la morte degli operatori o di coloro che utilizzano i servizi stessi (Corona et al., 2017).

#### 1.4 ASPETTI GEOMORFLOGICI DELLE AREE DI INNESCO

Il disturbo gravitativo sopra descritto è fortemente influenzato dalla morfologia del territorio nel quale si verifica. Concentrando l'attenzione sulle caratteristiche delle zone di innesco del fenomeno, si distinguono alcuni elementi importanti quali:

- **PUNTO DI INNESCO;** L'origine di questo fenomeno avviene generalmente in corrispondenza di affioramenti rocciosi lungo un versante in pendenza o di pareti spioventi particolarmente instabili. Future attività di caduta massi possono essere individuate confrontando la struttura geologica della massa rocciosa e la topografia del versante. In questo contesto sono di fondamentale importanza la dimensione, la densità, l'orientamento e la presenza di discontinuità rocciose. (Dorren, 2007). Le aree sorgente possono essere localizzate in maniera puntuale, oppure essere estese ad un'intera parete.
- **GEOLOGIA;** Un ruolo importante viene svolto dalle caratteristiche della matrice rocciosa presente nella zona di innesco. Le rocce più predisposte al fenomeno sono quelle con orientamento della stratificazione sfavorevole, scistosità e fratturazione della massa rocciosa a causa del fenomeno di gelo-disgelo oppure all'infiltrazione nella roccia delle radici di alcune piante.
- **PRESENZA DI VEGETAZIONE;** Le piante presenti nell'area di distacco svolgono una duplice funzione, da un lato di ancoraggio della matrice rocciosa al suolo, con un incremento della compattezza dello stesso, dall'altro lato favoriscono il rilascio di sostanze dall'apparato radicale che accelerano la degradazione della matrice rocciosa e, dunque, il distacco verso valle. Anche in caso di vento, la presenza di piante molto alte può favorire il distacco di porzioni di matrice rocciosa.

## 2. FORESTE DI PROTEZIONE

### 2.1 DEFINIZIONE

Il bosco è un bene sociale multifunzionale che esplica i suoi benefici sull'intero ambiente a vantaggio della collettività (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006). Tra questi benefici, le popolazioni alpine hanno sempre portato con sé la consapevolezza della capacità delle foreste di montagna nello svolgere un ruolo eteroprotettivo nei confronti di elementi sensibili. A causa della crescente pressione turistica e del fabbisogno infrastrutturale, la funzione di protezione delle foreste di montagna ha acquisito sempre maggiore importanza (Kräuchi et al, 2000). La foresta, infatti, ha la facoltà di contenere molti fra i fenomeni gravitativi tipici degli ambienti montani e non solo, quali caduta massi, distacco di valanghe, scivolamenti superficiali ed erosione.

Nelle zone montuose europee, in particolare, si trovano molti elementi che necessitano di essere protetti dalla caduta massi, come viene chiaramente evidenziato dall'ingente numero di blocchi che viene arrestato in corrispondenza della foresta che si trova nel versante sovrastante molti insediamenti ed infrastrutture. La presenza di questi massi, inoltre, evidenzia come la foresta offra un'alternativa alle misure tecniche di protezione contro il fenomeno di *rockfall* di tipo ecologico ed efficiente dal punto di vista economico (Berger et al., 2007). Nei confronti degli eventi episodici, le foreste di protezione rappresentano, infatti, un'interessante misura di mitigazione per la loro capacità di riduzione dei pericoli ed i costi di gestione relativamente bassi (Schönenberger e Brang, 2001).

Il ruolo di protezione svolto dalle foreste può essere distinto in tre livelli in funzione delle caratteristiche dell'ecosistema e delle esigenze dell'uomo (Meloni, 2006).

La prima tipologia di foreste di protezione è detta *generica o indiretta* e corrisponde al I° livello nel quale la funzione protettiva viene svolta nei confronti della conservazione del suolo dall'erosione diffusa o incanalata, situazione, questa, tipica di quelle foreste che non svolgono una funzione propriamente produttiva, oppure di popolamenti forestali ubicati a quote elevate o poco accessibili.

La seconda tipologia, invece, riguarda le foreste che svolgono una funzione di protezione *diretta*, detta di II° livello, dove la foresta si trova in un versante con pendenza superiore a 30° ed il ruolo di protezione viene svolto nei confronti dei pericoli naturali, impedendoli oppure limitandoli nei loro effetti.

La terza tipologia, che corrisponde al III° livello delle foreste di protezione diretta (FPD) riguarda i popolamenti che si trovano sempre su versanti ad una pendenza superiore ai 30°, ma in presenza di elementi sensibili da proteggere a valle (AA.VV., 2006; Brang, 2001; Dorren et al, 2004; Motta e Haudemand, 1999). E' questo il caso ad esempio delle foreste poste a protezione di abitati ed

infrastrutture che spesso si osservano nelle valli alpine. In Tabella 1 viene riassunta la distinzione descritta.

FUNZIONE DI PROTEZIONE		
PROTEZIONE GENERICA (I° livello)	tutte le foreste	Regimazione delle acque, rischio idrogeologico
FORESTE DI PROTEZIONE (II° livello)	foreste su pendii > 30°	Protezione caduta massi, valanghe, movimenti superficiali...
FORESTE DI PROTEZIONE DIRETTA FPD ( III° livello)	foreste su pendii > 30° al di sopra di elementi da proteggere	Protezione caduta massi, valanghe, movimenti superficiali nei confronti di uno specifico manufatto antropico

*Tabella 1 Suddivisione delle foreste di protezione in tre livelli.*

L'ecosistema foresta, in assenza di disturbi esterni, viene considerato stabile. Per stabilità selvicolturale di una foresta di protezione si intende la capacità di un ecosistema di mantenere la sua struttura e la sua vitalità rispetto alle influenze esterne ed interne e la sua capacità di svolgere in modo continuo e sostenuto le funzioni che gli sono richieste (Langenegger, 1979). A sua volta la stabilità viene suddivisa in due componenti principali: resilienza e resistenza.

Per quanto concerne la prima, essa risulta essere la capacità di un ecosistema di riacquistare le caratteristiche originarie a seguito di un disturbo, nel caso della resistenza si parla della capacità di un ecosistema di contrastare un disturbo naturale.

Storicamente le foreste di protezione vengono definite “bandite” riferendosi a quei popolamenti forestali dove vengono poste delle limitazioni alle utilizzazioni allo scopo di proteggere l'ecosistema da uno sfruttamento indiscriminato, ai fini di garantirne la perpetuità e la capacità protettiva nel tempo. Nelle Alpi, infatti, l'effetto protettivo della foresta viene riconosciuto da secoli, come è evidente dai divieti di taglio che sono stati emessi approssimativamente a partire dall'anno 1350 (Dorren et al., 2012).

L'obiettivo dell'imposizione di queste limitazioni è proprio quello di ottenere e preservare un popolamento forestale il più possibile in condizioni di stabilità.

Nota l'importanza del mantenimento nel tempo dei popolamenti forestali con finalità protettive, sono stati sviluppati diversi studi al fine di incrementare le conoscenze riguardo questa tematica.

Le ricerche che riguardano l'interazione tra caduta massi e foresta possono essere divise in 3 gruppi principali sulla base della scala spaziale (Dorren et al., 2012):

1. Ricerche sulla scala della singola pianta o del singolo rimbalzo;
2. Ricerche a livello del singolo versante, inteso dal punto di rilascio alla zona di deposito;

### 3. Ricerche su scala locale o regionale.

## 2.2 RUOLO DEL BOSCO NELLA DISSIPAZIONE ENERGETICA PER LA CADUTA MASSI

Le foreste presenti nelle regioni montuose forniscono un'importante funzione di protezione per la società e in particolare la protezione contro la caduta massi ha richiamato recentemente una considerevole attenzione. Le ragioni di questo sono legate al fatto che la caduta massi è uno dei più comuni rischi naturali negli ambienti montani, e l'effetto protettivo delle principali foreste montane europee potrebbe in futuro conoscere un decremento a causa della loro avanzata fase vetusta con una mancanza di rinnovazione (Ramner et al., 2010).

Le azioni svolte dalla foresta nella dissipazione dell'energia sono diversificate in funzione della localizzazione del popolamento lungo il versante.

In corrispondenza della zona di innesco, dove ha origine il fenomeno di *rockfall*, la presenza di una copertura arborea ha effetto positivo limitato alla capacità di mantenere aggregata la superficie, attraverso l'azione meccanica degli apparati radicali (Jahn, 1988; Gerber, 1998).

Un aspetto particolarmente importante che va valutato nella zona di distacco del litoide è la distanza del popolamento nei confronti della zona sorgente. Numerosi studi hanno infatti evidenziato che, in seguito al distacco, il masso acquisisce la massima velocità di corsa entro i primi 40 metri di discesa lungo il pendio non vegetato, oltre a questa distanza è molto difficile intervenire nell'arresto del blocco (Gsteiger, 1993). Per questo motivo sarebbe opportuno trovare una copertura vegetazionale entro i 40 metri dalla zona di origine del *rockfall*; ottimale sarebbe non scendere sotto i 20 metri di distanza, al fine di non consentire al masso di caricarsi completamente di energia cinetica e di iniziare immediatamente la fase dissipativa attivata dalla foresta (Wesser e Frehner, 1996).

Altre considerazioni devono essere compiute nelle zone di transito e di deposito dove la presenza di ostacoli può solo limitare il fenomeno di caduta massi attraverso gli impatti e le collisioni che portano ad una riduzione della velocità del litoide in corsa che può causare, in alcuni casi, anche l'arresto.

I processi di collisione con la superficie del versante così come il piano forestale, influenzano la perdita di energia e perciò anche la distanza di arresto dei massi in caduta (Sellmeier et al., 2017).

Tale fenomeno di dispersione dipende ovviamente dalle caratteristiche del litoide in corsa, dall'energia cinetica che possiede in relazione alla lunghezza del pendio attraversato, nonché dalle caratteristiche del bosco come densità, distribuzione delle piante e specie (Berger e Dorren, 2006).

Per quanto riguarda le specie, deve essere condotta una distinzione sostanziale tra conifere (definite *softwood*) e latifoglie (denominate invece *hardwood*) in quanto, prove in campo hanno dimostrato come le diverse specie presentano valori di resistenza meccanica inferiori nel primo caso rispetto al secondo. Si stima che una foresta di conifere di età matura sia in grado di assorbire e dissipare fino a 200-500 kJ di energia (Dorren et al., 2007), un popolamento di latifoglie può superare questo valore di gran lunga.

Anche lo stato fitosanitario del popolamento forestale può far variare i parametri di resistenza stimati poiché un popolamento deperente può risultare ulteriormente suscettibile all'attacco di patogeni e più facilmente danneggiabile dai massi in transito verso valle rispetto ad un popolamento sano, dunque, in questo caso, la capacità di dissipazione energetica viene ridotta e talvolta viene meno.

Un altro parametro importante è l'età del popolamento, la quale, rapportata alle peculiarità di ogni singola specie, rende la risposta degli individui in caso di sollecitazione più o meno elastica e, di conseguenza, più o meno efficace.

La foresta però non svolge solo un ruolo positivo nei confronti della caduta massi, ma può dare origine anche ad effetti negativi nelle zone sorgente del fenomeno. Le radici delle piante più grosse possono infatti favorire l'attività di caduta massi, poiché esse generalmente penetrano negli spazi esistenti nella superficie della lettiera e nella roccia agendo come cunei (Dorren, 2007). Il movimento dei fusti delle piante, a causa delle forze esercitate dalla neve o dal vento, può provocare il fenomeno di caduta massi attraverso un ulteriore effetto di sollecitazione delle radici (Gerber, 1998). Inoltre, la presenza delle radici nello strato roccioso del sottosuolo può portare ad un'accelerazione dell'alterazione chimica ad opera degli agenti atmosferici (Jahn, 1998). La foresta non risulta, dunque, un elemento sempre favorevole ai fini della protezione di un versante da caduta massi, ma devono essere compiute delle distinzioni in funzione del tipo di popolamento e delle sue condizioni, del tipo di lettiera e strato roccioso presente, della morfologia del versante analizzato. Per questi motivi, le considerazioni relative al ruolo dissipativo della foresta devono essere valutate caso per caso.

## 2.3 INDICAZIONI PER LA GESTIONE

A partire dalle considerazioni sul ruolo del bosco nella dissipazione energetica presenti nel capitolo 2.2, è possibile definire alcune indicazioni e linee guida per la gestione del popolamento forestale ai fini di ottimizzare questa funzione di protezione.

La definizione delle strategie selvicolturali presuppone, in primo luogo, la conoscenza di adeguate informazioni su condizioni ambientali locali, storia dell'uso del suolo e dei popolamenti forestali,

disturbi naturali ed antropici ed esigenze ecologiche delle singole specie (AA.VV. Regione Piemonte, 2006). Ogni popolamento, infatti, è unico nel tempo e nello spazio e non si deve assecondare la tendenza pragmatica a sviluppare una strategia che ha dato buoni risultati in una zona ed applicarla in modo estensivo su vaste superfici (Kohm e Franklin, 1997). La strategia selvicolturale, infatti, deve essere adeguata al sito dal punto di vista stazionale, altitudinale e del popolamento in esame.

Gli interventi devono infatti essere:

- Adeguati dal punto di vista dell'obiettivo di protezione da pericolo naturale;
- Nel luogo appropriato;
- Al momento giusto nel quale sia possibile ottenere un effetto ottimale con un investimento minimo;
- In sintonia con l'ambiente naturale, sfruttando le forze dell'evoluzione naturale del bosco;
- Considerando le variabilità stazionali su piccola scala in modo coerente con l'ambiente circostante;
- Efficaci, portando al raggiungimento dell'obiettivo con un'elevata probabilità;
- Con obiettivi proporzionali agli sforzi realizzati, equilibrio tra costi e benefici.

Ci sono una serie di parametri tipici del popolamento forestale che devono essere rispettati perché il soprassuolo possa adempiere alle sue funzioni di dissipazione dell'energia cinetica dell'evento tramite urti e collisioni con le piante, di decelerazione del moto del blocco in caduta e di riduzione delle altezze di rimbalzo.

Un parametro che riveste particolare importanza in questo ambito è il **DIAMETRO MINIMO EFFICACE**, valore soglia di diametro dei tronchi ai fini dello svolgimento della funzione di protezione che una foresta può assolvere nei confronti del pericolo naturale di caduta massi. I valori di diametro presentano dati che possono soddisfare esigenze variabili da minime a ideali e sono influenzate da alcuni fattori tra cui:

- **PENDENZA DEL VERSANTE**: nel caso in cui essa sia maggiore di 35° (70%) il valore di diametro aumenta;
- **FORMA DEI MASSI**: se è sub-sferica i valori di diametro dovrebbero aumentare per garantire la protezione;
- **TIPOLOGIA DI SUOLO**: se il suolo limita l'ammortizzamento in quanto si presenta superficiale, compatto o roccioso, il valore di diametro aumenta;
- **SCABREZZA DEL TERRENO**: se il terreno è liscio il valore di diametro minimo efficace è più alto;
- **SPECIE**: se la consistenza del legno è scarsa, come ad esempio nel caso di Abete rosso ed Abete bianco, il valore di diametro va posto più alto;

- STATO FITOSANITARIO: il valore del diametro va aumentato se le piante sono sensibili a marciumi radicali e carie del fusto (tipico di alcune specie come Abete rosso e Faggio).

Un' altro parametro importante è la DENSITA' di piante ad ettaro, utile a soddisfare le esigenze di stabilità del popolamento, la quale, strettamente legata alla percentuale di copertura, descrive le caratteristiche ideali di una foresta di protezione.

La COMPOSIZIONE del popolamento forestale, compatibilmente con le condizioni stazionali, dovrebbe privilegiare specie dal legno meccanicamente resistente a scapito delle piante dal legno più fragile e sensibile agli attacchi parassitari.

Un altro elemento importante da considerare è la STRUTTURA della foresta, la quale deve essere la più omogenea possibile e le aperture ("*gaps*") lungo la linea di massima pendenza devono essere limitate nelle dimensioni e nella quantità.

Un popolamento stabile prevede anche una valutazione dell'ANCORAGGIO limitato dalla presenza di alberi instabili, oppure di grandi dimensioni.

Sono state realizzate alcune tabelle, relative alle esperienze gestionali delle regioni italiane di Piemonte e Valle d'Aosta, all'interno delle quali sono stati riportati tutti i parametri sopra elencati con i relativi valori di riferimento sia per quanto riguarda le esigenze minime che le esigenze ideali di stabilità.

In figura 6 viene presentata una tabella riassuntiva dei parametri che devono essere soddisfatti all'interno di una foresta di protezione per ottenere la stabilità.

Zone	Parametri		Dimensione massi	Esigenze minime	Esigenze ideali	
Zona di transito, di arresto e di deposito	<b>Composizione</b>		Specie con legno meccanicamente resistente (robinia, querce, faggio) e specie con legno resistente a marciumi e carie del fusto (larice, latifoglie), compatibilmente con il tipo di stazione.			
Zona di transito	Densità	<b>N° piante /ha</b>	Blocchi $\leq 0,05 \text{ m}^3$ (diametro $< 40 \text{ cm}$ )	almeno 400 piante/ha con $\varnothing > 12,5 \text{ cm}$	almeno 600 piante/ha con $\varnothing > 12,5 \text{ cm}$	
				eventualmente anche rilascio di ceppaie tagliate alte		
				Blocchi da $0,05$ a $0,20 \text{ m}^3$ (diametro da $40$ a $60 \text{ cm}$ )	almeno 300 piante/ha con $\varnothing > 24 \text{ cm}$	almeno 400 piante/ha con $\varnothing > 24 \text{ cm}$
				eventualmente anche rilascio di ceppaie tagliate alte		
Zona di arresto e di deposito			Blocchi da $0,20$ a $5,00 \text{ m}^3$ (diametro da $60$ a $180 \text{ cm}$ )	almeno 150 piante/ha con $\varnothing > 36 \text{ cm}$	almeno 200 piante/ha con $\varnothing > 36 \text{ cm}$	
Zona di transito, di arresto e di deposito			Per massi eterogenei, di tutte le dimensioni;	<ul style="list-style-type: none"> <li>- l'eventuale presenza di polloni contribuisce alla protezione</li> <li>- tronchi a terra e ceppaie alte efficaci come complemento agli alberi in piedi.</li> </ul>		
Zona di transito, di arresto e di deposito		<b>% di copertura</b>	Per massi di tutte le dimensioni	indifferente, purché sia rispettato il numero piante/ha		
Zona di transito, di arresto e di deposito	Struttura	<b>Aperture (lungo la linea di pendenza)</b>	Per massi di tutte le dimensioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aperture lungo la linea di massima pendenza distanza tra i tronchi <math>&lt; 20 \text{ m}</math></li> <li>- l'eventuale presenza di polloni contribuisce alla protezione</li> <li>- tronchi a terra e ceppaie alte efficaci come complemento agli alberi in piedi</li> </ul>		
Zona di distacco	Elementi di stabilità	<b>Ancoraggio</b>	assenza di alberi instabili e/o di grandi dimensioni			
Zona di transito, di arresto e di deposito			assenza di alberi instabili			

Tabella 2 Parametri che devono essere soddisfatti per garantire le esigenze di stabilità di un popolamento forestale contro la caduta massi (Regione Autonoma Valle d'Aosta – Regione Piemonte, 2006).

Un altro parametro da tenere in considerazione nella gestione di una foresta di protezione è l'area basimetrica, calcolata a partire dalla circonferenza delle piante misurate a petto d'uomo (1,30 m) espressa in  $\text{m}^2/\text{ha}$ . Questo valore, dovrebbe essere di almeno  $10 \text{ m}^2/\text{ha}$  per esigenze minime e  $25 \text{ m}^2/\text{ha}$  per un livello di protezione ottimale, tale da non impedire lo sviluppo dell'evento, ma garantire alla foresta stabilità e rinnovazione nel lungo periodo con sostituzione delle eventuali piante danneggiate (Brang, 2001). Gli effetti negativi dei disturbi possono essere mitigati da foreste di età irregolari, dove la presenza e la distribuzione degli alberi assicurino una protezione contro i pericoli naturali e la possibilità di sostituzione degli alberi danneggiati con la rinnovazione esistente che assicura l'elasticità del soprassuolo (O'Hara, 2006).

Per ottenere la perpetuità di questa condizione è necessario che nel popolamento forestale convivano piante nelle diverse fasi di sviluppo all'interno di una struttura multiplana che permetta sia di bloccare

o limitare il moto gravitativo dei piccoli massi con l'azione delle piante più giovani, dense ed elastiche, sia di ostacolare il movimento dei blocchi più grandi attraverso gli individui maturi, meno densi, ma con diametri superiori in grado di dissipare l'energia cinetica. L'azione combinata di queste due componenti del popolamento, permette di ottenere il miglior risultato dal punto di vista della mitigazione. Quanto detto è dimostrabile dal fatto che il numero totale di impatti in foresta riveste maggiore importanza rispetto all'efficacia dell'urto singolo, espressa nella quantità di energia dissipata (Dorren et al., 2005).

I benefici che la presenza della foresta secondo queste caratteristiche porta ad un versante (pendenza 33°- 40°) in termini di protezione, è pari all'assorbimento di una forza d'urto di 10.000 kg (Rickli et al., 2004) con la riduzione della velocità di caduta dei massi fino a 15-25 m/s e diminuzione dell'altezza di rimbalzo del blocco fino a 1-2 metri da terra. Un altro beneficio importante indotto dalla foresta è sicuramente la deviazione della traiettoria del litoide in corsa dovuta all'impatto con i fusti presenti, con successiva modifica della runout rispetto al suo asse normale (Dorren et al., 2005; Jahn, 1998).

La gestione di questa tipologia di popolamenti forestali risulta essere, come si evince, molto delicata e complessa, per questo motivo è necessario fare alcune considerazioni.

La prima osservazione riguarda lo studio della foresta di protezione come un ecosistema forestale in continua ed inesorabile evoluzione naturale, dove il livello di protezione garantito non è costante nel tempo.

L'evoluzione di un ecosistema forestale è rappresentata da una serie di fasi che si ripetono in modo ciclico, ivi rappresentate in ordine cronologico (Dorren et al., 2004, Motta e Haudemand, 1999).

1. Fase di rigenerazione e rinnovazione del popolamento forestale, il suolo viene colonizzato dalle specie pioniere;
2. Fase di transizione, alle specie pioniere subentrano specie più esigenti che iniziano a creare la struttura definitiva della foresta;
3. Fase ottimale, massima biomassa e stabilità;
4. Seconda fase di transizione, le piante invecchiano e iniziano a schiantarsi: la foresta crolla e ritorna alla fase iniziale di rigenerazione.

Il livello di protezione corrispondente alle varie fasi è molto diverso, in quanto nella fase di rigenerazione esso è minimo, mentre nella fase ottimale il popolamento si trova in condizioni di massima stabilità ed efficienza di dissipazione energetica. In Figura 5 sono rappresentate le diverse fasi evolutive.

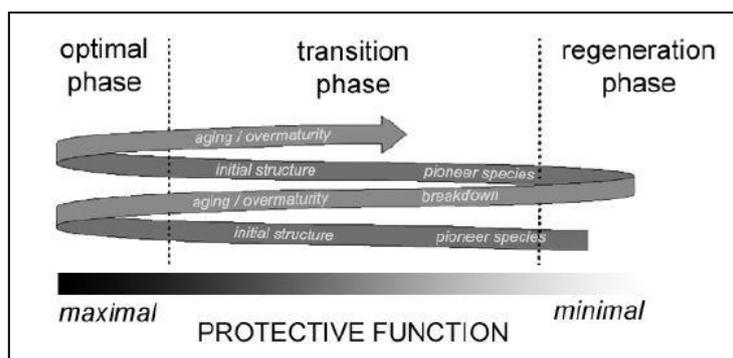


Figura 5 Fasi di sviluppo di una foresta.

La velocità di transizione tra le diverse fasi dipende molto dalla velocità di invecchiamento delle piante, che varia con le condizioni stazionali e con la tipologia forestale, ma anche con la magnitudo e la frequenza dei disturbi naturali e dagli effetti che la loro manifestazione comporta sul popolamento forestale (Dorren et al., 2004).

Attraverso una gestione ottimale è possibile agire a livello di queste fasi, privilegiando le condizioni più favorevoli a garantire la perpetuità del popolamento e la costanza del servizio reso nel tempo concretizzate nelle foreste giovani, resistenti ed elastiche con un'elevata presenza di rinnovazione naturale.

Una considerazione deve essere compiuta per il legno morto a terra, il quale può avere origine sia dalle utilizzazioni volte a garantire la perpetuità del popolamento, sia per cause naturali.

Il legno morto a terra, nel breve e medio periodo, esercita un effetto positivo, purché non sia indotto a scivolamento; tale fenomeno è favorito dalla pendenza del versante e dall'azione dei movimenti del manto nevoso. Nel lungo periodo, la decomposizione del materiale legnoso al suolo, che può avvenire più o meno velocemente in funzione delle caratteristiche climatiche del sito, può determinare nuovamente la movimentazione dei massi accumulatisi nel tempo (AA.VV. Regione Piemonte, 2006).

## 2.4 STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE ED INDIVIDUAZIONE DELLE FORESTE DI PROTEZIONE IN REGIONE VENETO

La gestione del pericolo di dissesto idrogeologico viene attualmente disciplinata dal decreto legislativo n° 152 del 2006 denominato "Norme in Materia Ambientale" che si occupa di difesa del suolo, consolidamento dei versanti e tutela delle acque.

In Regione del Veneto, invece, la pianificazione del territorio, che comprende anche la difesa del suolo, è disciplinata dalla "Legge Urbanistica Regionale del Veneto" n°11 del 23 aprile del 2004. Secondo questa norma vengono previsti i diversi livelli di pianificazione del territorio a livello

regionale, provinciale e comunale con l'obiettivo di conoscere lo stato di fatto del territorio ai diversi livelli e regolamentare la loro evoluzione futura.

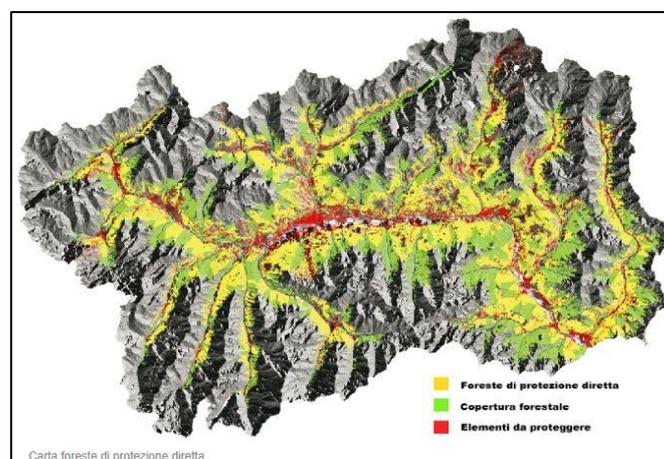
Secondo la norma regionale del 2004, infatti, il soggetto pianificatore a cui spettano le maggiori competenze nell'ambito della difesa del suolo risulta essere la Provincia mediante la stesura del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) e la conseguente imposizione del vincolo idrogeologico ai siti idonei.

A livello comunale, invece, è prevista la realizzazione del Piano di Assetto del Territorio (PAT) come strumento di pianificazione urbanistica che delinea le scelte strategiche per il governo del territorio ai fini di tutelare l'integrità fisica ed ambientale e l'identità culturale e paesaggistica.

Per quanto riguarda il sito caso di studio, gli elaborati a disposizione sono riportati nel paragrafo 4.5. In termini di difesa del territorio nei confronti del fenomeno di caduta massi, uno strumento importante è la conoscenza delle foreste che svolgono la funzione di protezione, in quanto, in assenza di soprassuolo è necessario intervenire con la realizzazione di opere.

La regione del Veneto non è provvista di una mappatura delle foreste di protezione nei confronti dei diversi fenomeni gravitativi quali caduta massi, colata detritica e distacco di valanghe.

Un esempio di mappatura è presente in altre Regioni italiane tra cui la Valle d'Aosta nella quale è stata realizzata una cartografia completa delle foreste di protezione di III° livello, cioè diretta nei confronti di insediamenti umani o vie di comunicazione (sito [regione.vda.it](http://regione.vda.it)). Come si può vedere nell'immagine sottostante, la maggior parte delle foreste della regione (colore verde) possono essere definite di protezione (colore giallo).



*Figura 6 Mappatura delle foreste di protezione diretta della regione Valle d'Aosta.*

### 3. OBIETTIVI DEL PRESENTE LAVORO

Il presente lavoro di tesi si prefigge di analizzare il ruolo di protezione del popolamento forestale ubicato nel versante a valle dell'affioramento roccioso Sass Negher (Rocca Pietore, Belluno) nei confronti del disturbo gravitativo della caduta massi o *rockfall*.

L'analisi consta di varie fasi:

In primo luogo la realizzazione di un rilievo preliminare lungo tutto il versante che consenta di acquisire maggiori informazioni sul popolamento forestale e sui fenomeni in atto. Nell'ambito di questa prima fase, gli obiettivi prevedono la suddivisione del sito caso di studio in zone omogenee sia dal punto di vista delle caratteristiche del soprassuolo arboreo che della tipologia di fenomeno.

A seguito della suddivisione, si prevede di effettuare una prima analisi di tipo descrittivo mediante la realizzazione di un transetto all'interno della zona molto disturbata, ponendo l'attenzione in particolare sulle interazioni massa-foresta.

In secondo luogo il presente studio di tesi si prefigge di simulare le condizioni del versante in caso di evento di caduta massi con l'impiego del software Rockyfor3D. L'applicazione di questo modello prevede in primis la taratura dei parametri di input a seguito della realizzazione di aree di saggio in campo secondo le procedure previste dal software stesso.

Attraverso la realizzazione di una serie di scenari di evento, i quali prevedono diverse condizioni di soprassuolo, questo studio si propone di valutare il ruolo di mitigazione della foresta nei confronti del fenomeno di caduta massi.

Infine, considerando la presenza di elementi sensibili quali il centro abitato di Col di Rocca e la strada provinciale 641, i quali richiedono un maggior livello di sicurezza, il presente lavoro si prefigge di valutare la realizzazione di eventuali opere antropiche qualora la foresta non fornisca un adeguato livello di protezione.

Una volta definiti questi aspetti, il presente studio prevede l'applicazione del metodo RHV ai fini della mappatura della suscettibilità nei confronti del fenomeno di *rockfall* dell'intero sito caso di studio. L'indice RHV, è da considerarsi un valido supporto alla pianificazione del pericolo idrogeologico nell'area.



## 4. AREA CASO DI STUDIO

Il sito oggetto di questo studio, è un versante boscato a monte dell'abitato di Col di Rocca, nel comune di Rocca Pietore, in provincia di Belluno. E' stata individuata questa zona per realizzare un'analisi di interazione caduta massi-foresta inerente alla tipologia di ricerca contrassegnata dal numero 2, "ricerche a livello del singolo versante, inteso dal punto di rilascio alla zona di deposito" come previsto in letteratura (Dorren et al., 2012).

Si tratta di un pendio boscato interessato dal fenomeno di caduta massi localizzato in particolare nei pressi del rio denominato "Ru de Sass Negher" originato dall'omonimo affioramento roccioso.

### 4.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area caso di studio si trova nel settore nord-ovest della Provincia di Belluno, come evidenziato nell'immagine sottostante (Figura 7) con il punto di colore rosso.



*Figura 7 Localizzazione del sito caso di studio e del Ru de Sas Negher, nell'ambito della superficie della Regione Veneto.*

Il sito si trova in Val Pettorina, percorsa in direzione ovest-est dall'omonimo torrente che costituisce un affluente destro del torrente Cordevole, il quale a sua volta, è il principale affluente del fiume Piave.

In questa tipica valle dolomitica, le maggiori cime sono la Marmolada (3343 m s.l.m.) e il monte Migogn (2384 m s.l.m.), la cui vetta costituisce anche il punto più alto dello spartiacque del bacino

del Ru de Sass Negher. Il versante è caratterizzato da una pendenza media di 34° con esposizione sud- sud est.

## 4.2 INQUADRAMENTO STORICO

Il sito caso di studio, localizzato sul versante sottostante al Sass Negher, affioramento roccioso così denominato per la matrice vulcanica che si presenta con un tipico colore scuro, è noto agli abitanti del luogo come “*bosch bandi*”. Questo termine ladino della parlata locale sta ad indicare un popolamento forestale da sempre caratterizzato da alcune limitazioni nelle utilizzazioni a causa del ruolo protettivo svolto dalla foresta soprattutto nei confronti delle abitazioni sottostanti.

Il versante, infatti, si trova in condizioni di forte instabilità a causa della notevole pendenza e della presenza di roccia a monte poco compatta, con frequenti distacchi di massi.

La frequenza empirica di accadimento del “fenomeno di caduta massi” può essere posta indicativamente intorno ad 1/5 anni, in quanto spesso si verificano distacchi molto ravvicinati nel tempo.

Si denota una scarsità di informazioni riguardo questo sito, infatti presso la banca dati dell’Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (I.F.F.I.) sono stati registrati solo 4 eventi all’interno del bacino idrografico del Ru de Sass Negher. In Tabella 3 sono riassunte le informazioni raccolte in questa banca dati.

ID frana	Coordinate WGS 84 (fuso 32)		Comune	Movimento	Metodo	Danno
	X	Y				
250046600	726921,134	5146820,174	Rocca Pietore	Scivolamento rotazionale/traslattivo	Dato storico/archivio	n.d.
250217200	726920,356	514,6820,174	Rocca Pietore	Colamento rapido	Dato storico/archivio	Nuclei/centri abitati
250218500	726920,341	5146820,156	Rocca Pietore	Colamento rapido	Dato storico/archivio	n.d.
250045800	726959,063	5146453,216	Rocca Pietore	Scivolamento rotazionale/traslattivo	Dato storico/archivio	n.d.

Tabella 3 Eventi franosi registrati nella banca dati dell’I.F.F.I.

Si nota come i fenomeni gravitativi testimoniati storicamente siano sia di “colamento rapido” dunque inerente alla colata detritica, ma anche “scivolamento rotazionale/traslattivo” legato al fenomeno della caduta massi. Uno di questi eventi registrati ha raggiunto anche l’abitato di Col di Rocca, provocando danni alle abitazioni.

Testimonianze raccolte dagli abitanti del luogo mettono in evidenza come frequenti distacchi di massi si verificano nel periodo primaverile a causa del fenomeno di gelo-disgelo tipico di questo periodo dell'anno, in molti di questi episodi i massi hanno raggiunto la sottostante strada provinciale con notevole rischio per il transito di veicoli.

#### 4.2.1 EVOLUZIONE DELL'USO DEL SUOLO: ANALISI DI FOTO AEREE STORICHE

Un metodo per ottenere qualche informazione in più sull'evoluzione storica ed i cambiamenti di uso del suolo del versante analizzato risulta essere un'analisi delle fotografie aeree in possesso del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

Queste immagini appartengono a numerose campagne, portate avanti ai fini di monitorare l'evoluzione del territorio italiano nel tempo e di poterne comprendere meglio i fenomeni che si verificano.

Le immagini sono state selezionate tramite i loro codici identificativi e reperite presso la sede del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Padova. Per analizzare al meglio l'evoluzione nel tempo sono state individuate immagini relative ai seguenti anni (compatibilmente con la disponibilità dell'ente):

- 1970;
- 1980;
- 1991;
- 2001.

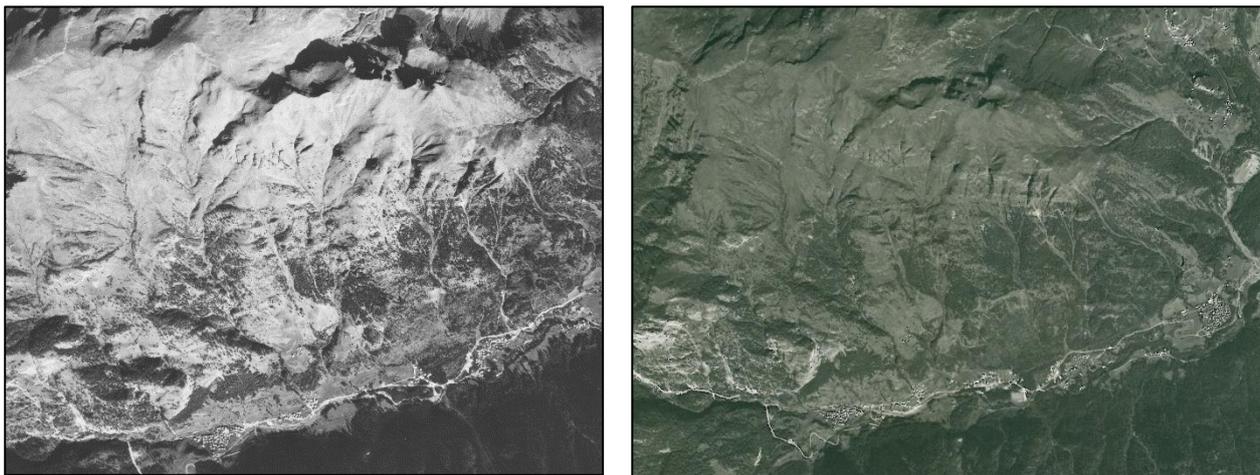
L'obiettivo di questa analisi, è principalmente quello di valutare gli eventuali cambiamenti avvenuti nel tempo a livello di soprassuolo, in particolare tra due categorie di uso del suolo quali pascolo (dunque senza adeguata copertura forestale a protezione dell'abitato di Col di Rocca) e foresta propriamente detta.

Una volta georeferenziate le immagini aeree, con alcune difficoltà legate alla problematicità di trovare punti di riferimento nelle foto e alla qualità, si è proceduto con la classificazione (algoritmo Maximum Likelihood di ESRI ArcGIS) secondo tre categorie principali quali:

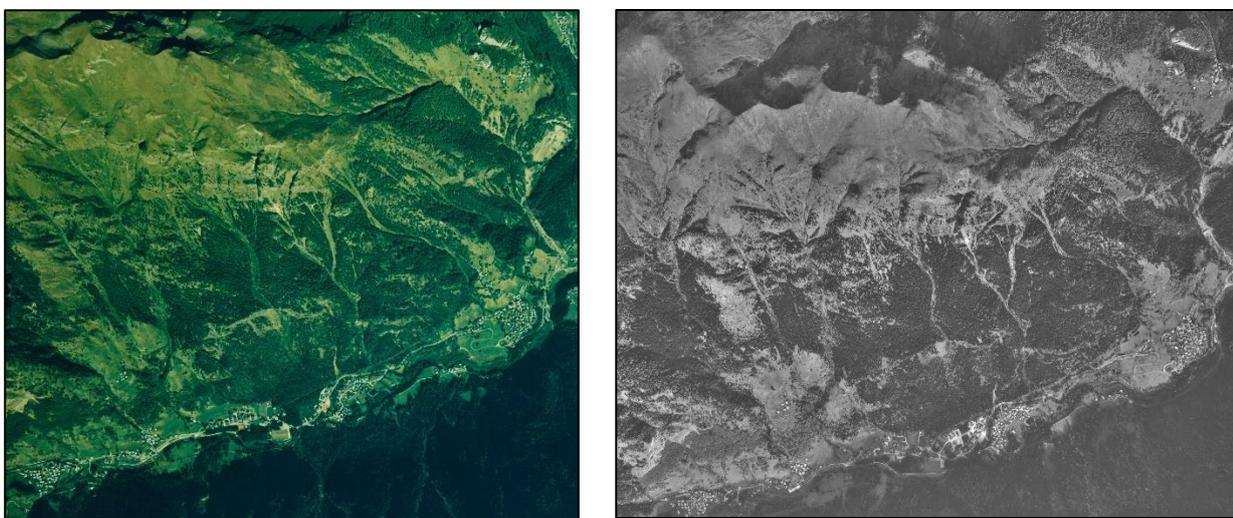
- Foresta (indicata con colore verde in figura 16 e 17);
- Pascolo (indicata con il colore giallo in figura 16 e 17);
- Urbanizzato e rocce nude (indicata con il colore viola in figura 16 e 17).

Soltanto una volta realizzata la classificazione temporale è stato possibile effettuare un confronto considerando il numero di pixel presenti, nell'area di interesse, per ogni categoria.

Di seguito vengono riportate le immagini aeree (Figure 8 e 9) e le successive classificazioni corrispondenti (Figure 10 e 11).



*Figura 8 Immagini aeree dell'area caso di studio relative agli anni 1970 (a sinistra) e 1980 (a destra).*



*Figura 9 Immagini aeree dell'area caso di studio relative agli anni 1991 a sinistra) e 2001 (a destra).*

Di seguito vengono riportati i risultati delle classificazioni ottenute a partire dalle immagini aeree.

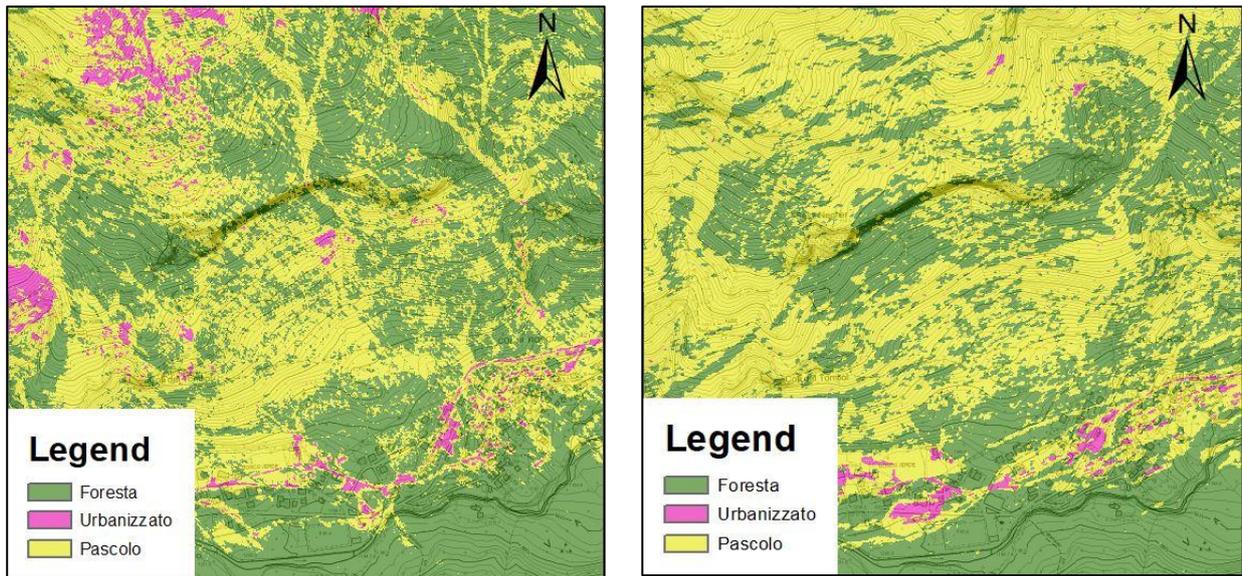


Figura 10 Classificazione immagini aeree relative agli anni 1970 (a sinistra) e 1980 (a destra).

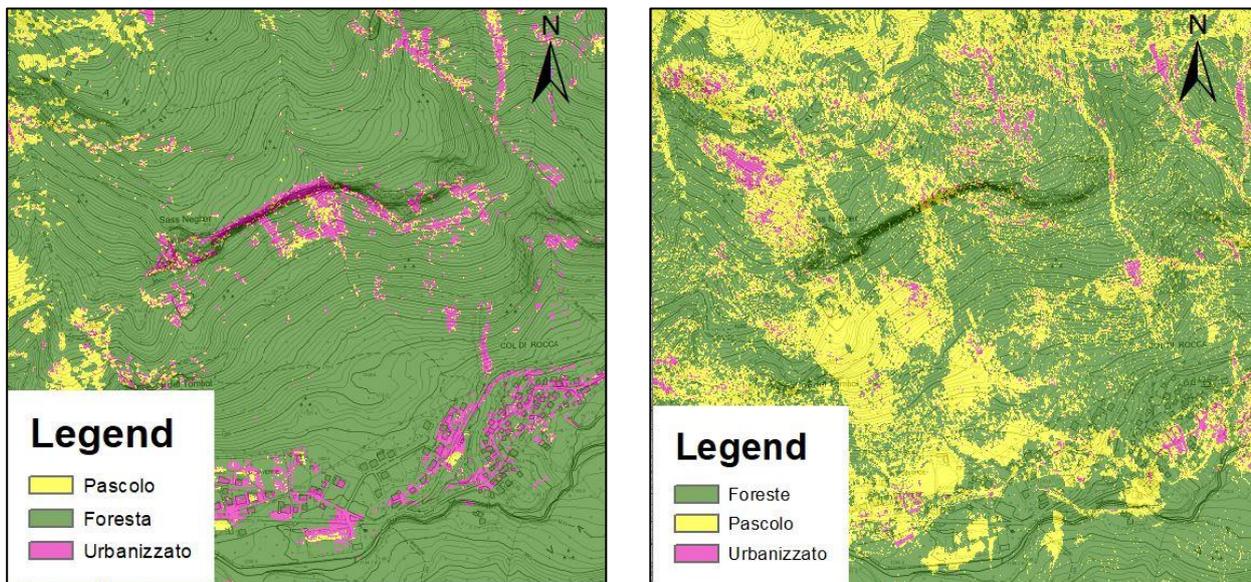


Figura 11 Classificazione immagini aeree relative agli anni 1991 (a sinistra) e 2001 (a destra).

Osservando le immagini ottenute dalla classificazione si può subito notare come i pixel dalla colorazione verde, corrispondente al parametro “foresta”, presentino un trend in aumento nelle ultime due immagini rispetto alle prime.

Per quanto riguarda l’analisi delle condizioni attuali del versante caso di studio, è stato valutato il supporto cartografico messo a disposizione dalla Regione Veneto relativo all’uso del suolo, realizzato nell’anno 2009.

I risultati percentuali di queste analisi, che prevedono il confronto temporale tra le categorie di uso del suolo vengono descritti nella seguente tabella.

%	1970	1980	1991	2001	2009
FORESTA	51	45	87	59	81
PASCOLO	45	54	5	37	8
URBANIZZATO	4	1	7	4	11

Tabella 4 Valori percentuali della classificazione temporale delle foto aeree storiche.

Di seguito viene riportato un grafico (Figura 12) che descrive l'evoluzione temporale del sito.

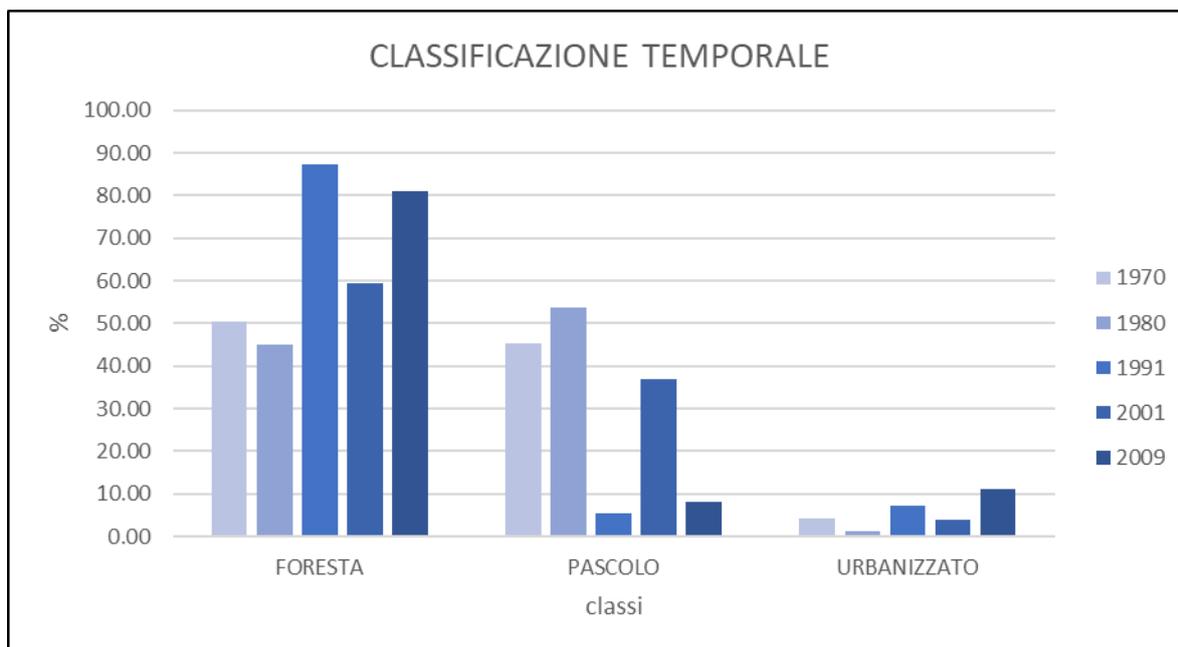


Figura 12 Grafico esemplificativo dell'evoluzione dell'uso del suolo nel tempo all'interno dell'area caso di studio.

Nonostante la procedura di classificazione sia stata complicata dalla diversa qualità, risoluzione ed angolazione di foto aeree scattate a distanza di decenni, si osserva come, a partire dagli anni '90 ci sia stato un aumento del valore percentuale della superficie forestale, che è arrivato a superare il 50% dei pixel totali. Il trend per quanto riguarda la superficie dedicata all'attività di pascolo risulta, al contrario, in decrescita. I valori percentuali del numero di pixel appartenenti alla categoria urbanizzato si dimostrano tutto sommato abbastanza costanti nel tempo in quanto quest'area, dopo il 1970, non ha mai subito grandi processi di espansione abitativa.

Si osserva come la classificazione dell'anno 2001 risulti anomala rispetto alle immagini degli altri anni, questo è dovuto alla classificazione di una serie di pixel come appartenenti alla categoria pascolo anche se in realtà si tratta di porzioni di foresta presenti sul versante. La scarsa qualità dell'immagine a disposizione in questo caso ha indotto il verificarsi della presente anomalia.

Il motivo per il quale si possono osservare questi valori rispecchia un po' ciò che è accaduto in molte aree montane delle Alpi, dove l'uomo si è dedicato sempre più ad attività quali turismo e servizi e

meno alla cura del territorio causando un progressivo abbandono della cura del bosco e del pascolo. Con il passare del tempo, questa tendenza ha portato ad un aumento del peso sui versanti e ad una maggiore instabilità dei popolamenti forestali, sempre più frequentemente soggetti a fenomeni gravitativi quali caduta massi, schianti da vento e da neve come avviene oggi.

Per quanto riguarda l'uso del suolo attuale nel versante caso di studio, una descrizione dettagliata viene data dalla carta di copertura del suolo (realizzata nel 2009 sulla base dell'analisi di Ortofoto dell'anno 2007), che viene fornita dagli elaborati cartografici della Regione Veneto. Le principali tipologie di suolo presenti nel versante caso di studio sono: due tipologie di pecceta quali secondaria montana e dei substrati silicatici dei suoli mesici altimontana; un lariceto tipico; tracce di piceo-faggio dei suoli xerici. Oltre alla copertura forestale, le altre categorie presenti riguardano rocce nude; superfici a copertura erbacea; tessuto urbano discontinuo medio principalmente residenziale.

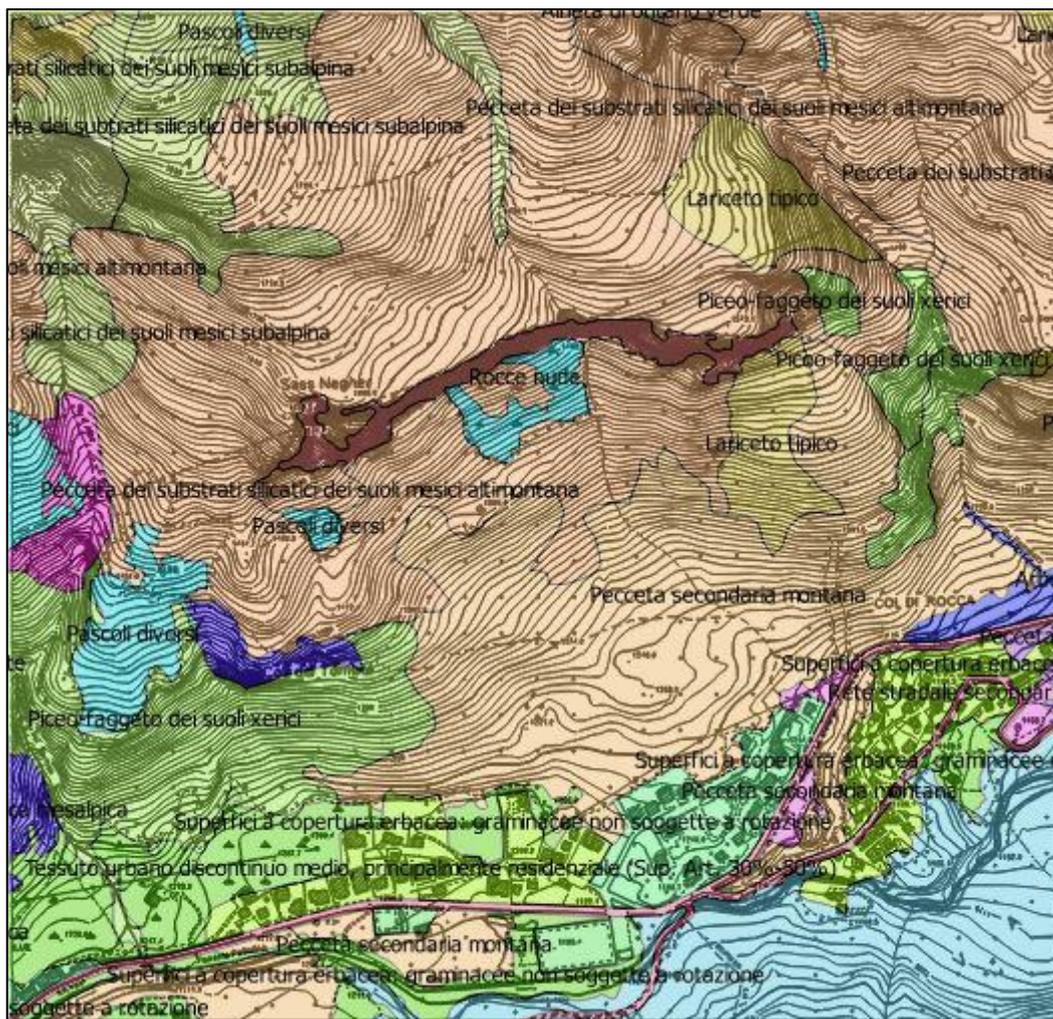


Figura 13 Carta di uso del suolo del versante del Ru de Sass Negher caso di studio.

### 4.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il bacino in esame è collocato all'interno della Val Pettorina, la quale è caratterizzata, nella parte ovest da vallecole che presentano la tipica forma ad "U", in quanto generate dal ritiro dei ghiacciai würmiani. In quest'area della valle sono presenti tenaci calcari ladinici (Calccare della Marmolada) che consentono la conservazione di pareti rocciose verticali. Nella parte est della valle, invece, si nota la prevalenza di rocce piroclastiche sempre risalenti al Ladinico (AA.VV., 2017).

Il sito caso di studio si trova all'interno della fascia più dissestata della Val Pettorina, localizzata tra Col di Rocca e Saviner di Laste, dove il torrente scorre all'interno di terreni morenici, erodibili e franosi, con detriti facilmente trasportabili a valle.

I tipi litologici presenti nel versante caso di studio e nelle zone limitrofe vengono descritti dall'immagine sottostante. Nella parte alta del versante si trovano arenarie vulcaniche, breccie caotiche poligeniche, siltiti con associati calcari (colore rosa), verso valle, invece, le caratteristiche geologiche possono essere distinte in due componenti: la destra e la sinistra orografica del Ru de Sas Negher.

Nella porzione destra, si distingue nella fascia alta la stessa tipologia geologica della fascia a monte, mentre, a quote più basse il suolo è ricoperto da depositi alluvionali e fluvioglaciali misti (colore verde) fino a livello del fondovalle.

Nella porzione sinistra, invece, le caratteristiche geologiche sono più varie in quanto nella porzione alta si trovano calcari e calcari dolomitici (poligono a quota maggiore), nel poligono intermedio si trovano sempre calcari, arenarie, conglomerati e marne, infine, nel poligono più a valle si trovano calcari, arenarie, marne e gessi.

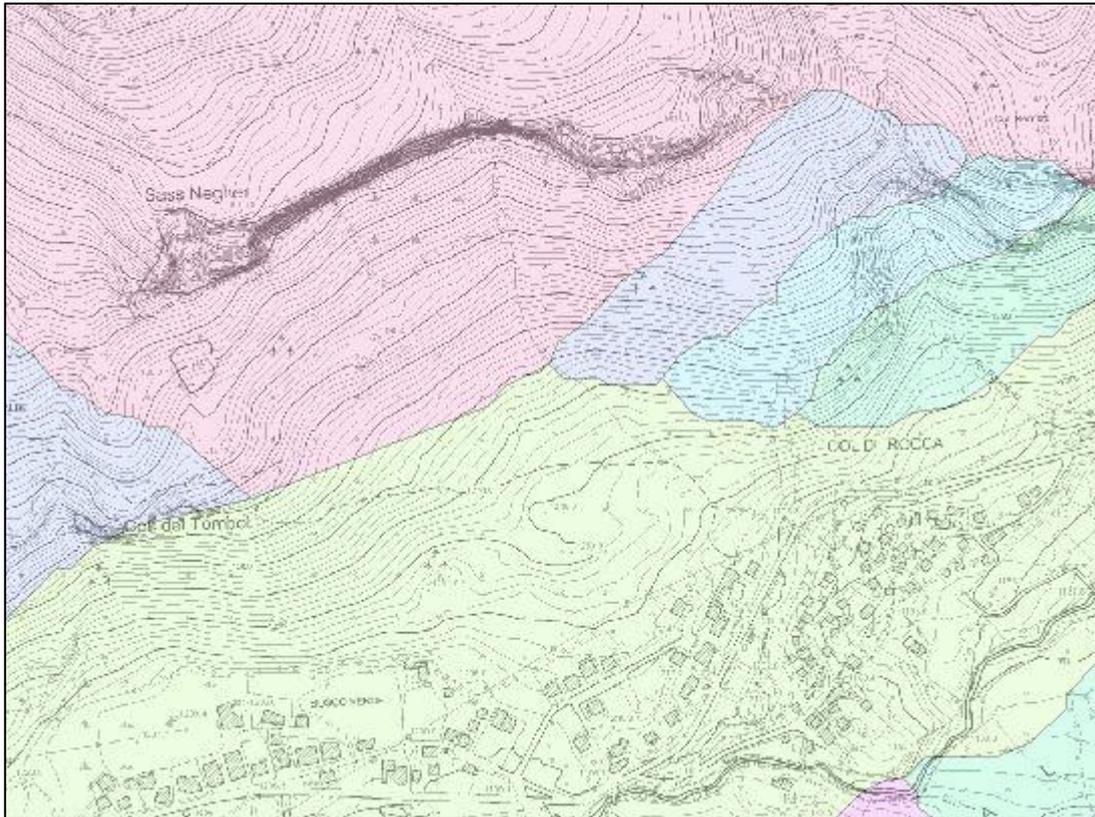


Figura 14 Rappresentazione del sito di studio con la suddivisione per colori in base alle caratteristiche litologiche. Fonte: Database delle diverse litologie che compongono il territorio della Regione Veneto, Direzione Geologia della Regione Veneto.

#### 4.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Dal punto di vista idrogeologico, il Ru de Sass Negher dà origine ad un piccolo bacino idrografico con un'estensione inferiore ad 1 km<sup>2</sup> e può essere considerato un rio effimero in quanto esso tende ad attivarsi e, dunque, ad avere un deflusso verso valle, soltanto in caso di eventi piovosi di una certa entità. Questo accade principalmente in caso di forzanti pluviometriche particolarmente importanti, quando può dare luogo ad ondate di piena ad evoluzione molto rapida e impulsiva e che si accompagnano a portate solide con trasporto torrentizio di sedimenti (AA.VV., 2017).

A seconda dell'intensità delle precipitazioni e delle condizioni manutentive in cui si trova l'alveo prima dell'evento, e in particolare nel tratto che separa l'alto salto in roccia (cascata) a monte del paese dalla SS 641 (lungo 630 m), il trasporto solido può assumere modalità molto dannose sia in ragione della sua morfologia (precedenti depositi) sia della forte pendenza, manifestandosi anche sotto forma di colata detritica (*debris flow*) o comunque di flusso solido ad alta concentrazione (*debris flood*), come è avvenuto recentemente in occasione dell'evento alluvionale del 5 novembre 2014.

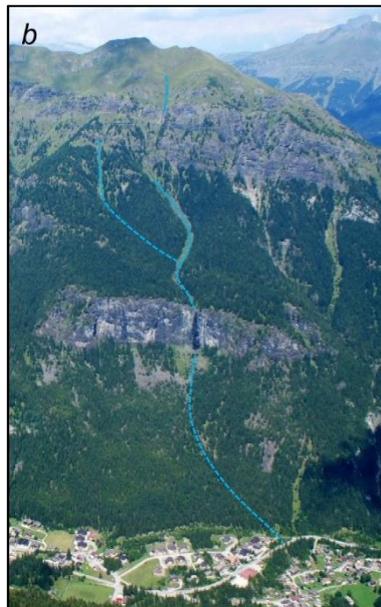
La sorgente del rio viene localizzata alle pendici del monte Migogn (2384 m s.l.m.) e della Pala di Mezzo (2340 m s.l.m.), il corso d'acqua presenta un tratto colluviale per circa 200 metri fino a quota

2090 m s.l.m., che poi diventa molto pendente (pendenza media 34°) lungo un tratto in roccia. A valle di questo tratto in roccia, il Ru de Sass Negher incontra un canalone lungo l'impluvio principale. In corrispondenza di quest'ultimo, in concomitanza con inverni particolarmente nevosi, non è rara la formazione di valanghe che favoriscono il trasporto di detriti minerali e legnosi i quali comportano, a causa degli schianti delle piante, anche possibili ostruzioni del tratto d'alveo compreso tra quota 1250 e 1400 m s.l.m.

Al termine del canalone, il corso d'acqua incontra un salto di roccia di circa 100 metri corrispondente al Sass Negher (a quota 1600 m s.l.m.), formando una cascata. Ai piedi di quest'ultima è possibile osservare il notevole apporto detritico accumulato dal rio nel tempo, il quale si deposita in gran parte in questo punto a causa della notevole dissipazione energetica a seguito del salto di roccia. In questo punto, infatti, non si osserva un vero e proprio canale, bensì un accumulo caotico di detriti che limita la formazione di suolo e dunque anche di soprassuolo vegetale.

Anche verso valle non si osserva un canale ben definito, ma si possono notare erosioni localizzate a seguito di colate detritiche avvenute in passato, che hanno causato lo spostamento del rio con una certa facilità su questo tratto di versante.

L'intero percorso del Ru de Sass Negher viene evidenziato con il colore azzurro in Figura 21 sotto riportata, dove è possibile osservare anche l'estensione del versante caso di studio.



*Figura 15 Foto aerea nella quale viene evidenziato (tratteggio blu) il percorso del Ru de Sass Negher.*

Una volta a valle, il corso d'acqua attraversa la strada forestale che porta in località Sofedera, la Strada Statale 641 e più a valle anche il centro abitato di Col di Rocca fino a giungere alla confluenza con il Torrente Pettorina.

#### 4.4.1. PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO

Il documento utile alla pianificazione idrogeologica nell'area oggetto di studio è il Piano di Assetto Idrogeologico denominato in questo caso "Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico dei bacini dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave e Brenta-Bacchiglione" (PAI, anno 2004), aggiornato nel giugno 2007 e adottato in via definitiva nel novembre 2012 con delibera n.3 del Comitato Istituzionale. L'Ente competente nel redigere questo piano è l'Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione.

Lo scopo principale del PAI è quello di caratterizzare il territorio in esame dal punto di vista della pericolosità come supporto alla pianificazione del territorio.

Il versante caso di studio, dal Sass Negher fino alla confluenza con il torrente Pettorina, viene inserito in una zona classificata come Pericolosità Geologica Moderata (sigla P1). A questo codice corrispondono le zone soggette a pericolosità geologica legata a fenomeni di scivolamento rotazionale/traslativo e a fenomeni di trasporto solido intenso e colate detritiche.

La figura sottostante riporta la scheda contenuta nel PAI relativa alla zona di analisi dove viene evidenziata la pericolosità ad il relativo codice identificativo.

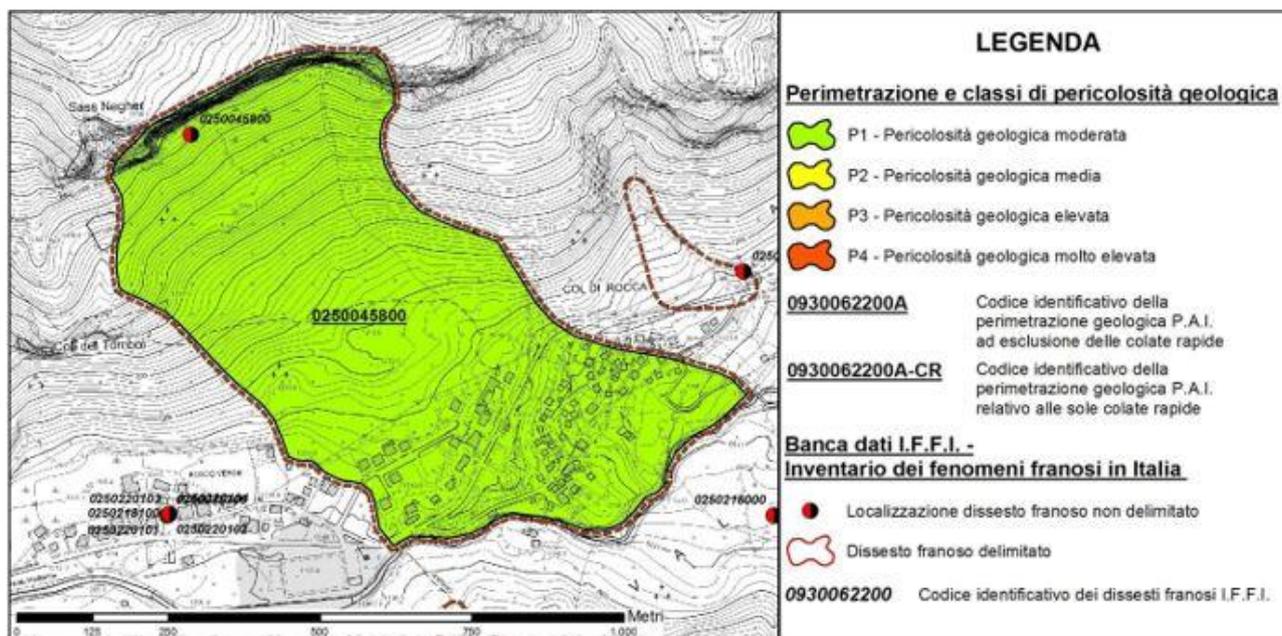


Figura 16 Estratto del P.A.I. relativo alla zona caso di studio con in evidenza il livello di pericolo associato.

Per quanto riguarda gli interventi previsti dal Piano per la classe di Pericolosità geologica P1, secondo le Norme di Attuazione del PAI (Allegato alla delibera n.3 del Comitato Istituzionale del 9 novembre 2012), ci sono alcune limitazioni all'intervento. E' posto divieto, infatti:

- eseguire scavi o abbassamenti del piano di campagna in grado di compromettere la stabilità delle fondazioni degli argini, ovvero dei versanti soggetti a fenomeni franosi;

- realizzare tombinature dei corsi d'acqua;
- realizzare interventi che favoriscono l'infiltrazione delle acque nelle aree franose;
- costruire, indurre a formare vie preferenziali di veicolazione di portate solide o liquide;
- realizzare in presenza di fenomeni di colamento rapido (CR) interventi che incrementino la vulnerabilità della struttura, quali aperture sul lato esposto al flusso;
- realizzare locali interrati o seminterrati nelle aree a pericolosità idraulica o da colamento rapido.

Inoltre, per non incrementare le condizioni a rischio nelle aree pericolose, tutti i nuovi interventi, opere, attività consentiti dal Piano o autorizzati, dopo la sua approvazione devono essere tali da:

- mantenere le condizioni esistenti di funzionalità idraulica o migliorarle, agevolare e comunque non impedire il normale deflusso delle acque;
- non aumentare le condizioni di pericolo dell'area interessata nonché a valle o a monte della stessa;
- non ridurre complessivamente i volumi invasabili delle aree interessate tenendo conto dei principi dell'invarianza idraulica e favorire, se possibile, la creazione di nuove aree di libera esondazione;
- minimizzare le interferenze, anche temporanee, con le strutture di difesa idraulica, geologica o valanghiva.

Infine, tutte le opere di mitigazione della pericolosità e del rischio devono prevedere il piano di manutenzione e tutti gli interventi consentiti non devono pregiudicare la definitiva sistemazione né la realizzazione degli altri interventi previsti dalla pianificazione del bacino vigente.

#### 4.5 INQUADRAMENTO TRAMITE GLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE

Il sito oggetto di studio è presente nei vari strumenti di pianificazione a diversi livelli, tra cui:

- Il Piano Territoriale Regionale di Coordinamento del Veneto (PTRC), che permette di individuare la zona caso di studio ed i principali elementi sensibili quali zone con particolari vincoli di tutela, siti storici e geositi. Il versante caso di studio si trova all'interno dell'area contrassegnata dal cerchio di colore rosso.

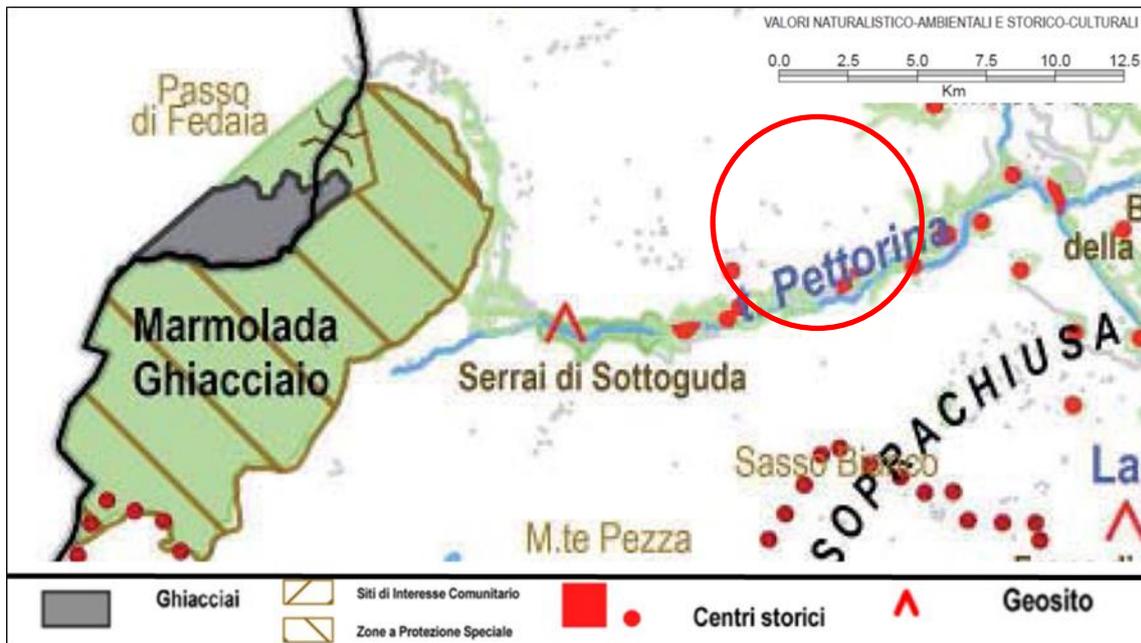


Figura 17 Estratto del PTRC per l'ambito 02 – Dolomiti Agordine (Valori naturalistico-ambientali e storico-culturali).

Per quanto riguarda la mappatura del pericolo in regione Veneto, il documento di riferimento è il Piano di Assetto Idrogeologico, per i particolari relativi alla descrizione del versante caso di studio si rimanda al capitolo 4.4.1.

- Il Piano di Coordinamento Territoriale Provinciale della Provincia di Belluno (PTCP) che evidenzia gli ambiti paesaggistici che devono essere valorizzati all'interno del versante oggetto di studio come evidenziato dal cerchio di colore rosso. In particolare, persegue la tutela e la valorizzazione dei paesaggi e si concretizza sul territorio nei diversi ambiti del PTRC attraverso l'articolazione in sub-ambiti paesaggistici, nei quali si prevede di applicare le strategie d'intervento dirette alla realizzazione di obiettivi di qualità e modulate su vari livelli, utilizzando il contributo di numerose discipline tecniche riferite a settori specifici (AA. VV., 2017). La tutela è quindi rivolta ad ambiti di pregio paesaggistico e paesaggi d'alta quota, paesaggi storici dei versanti vallivi e boschi storici, ecosistemi con funzioni fondamentali di equilibrio ecologico. Di seguito si riporta un estratto di questo documento relativo al versante caso di studio.

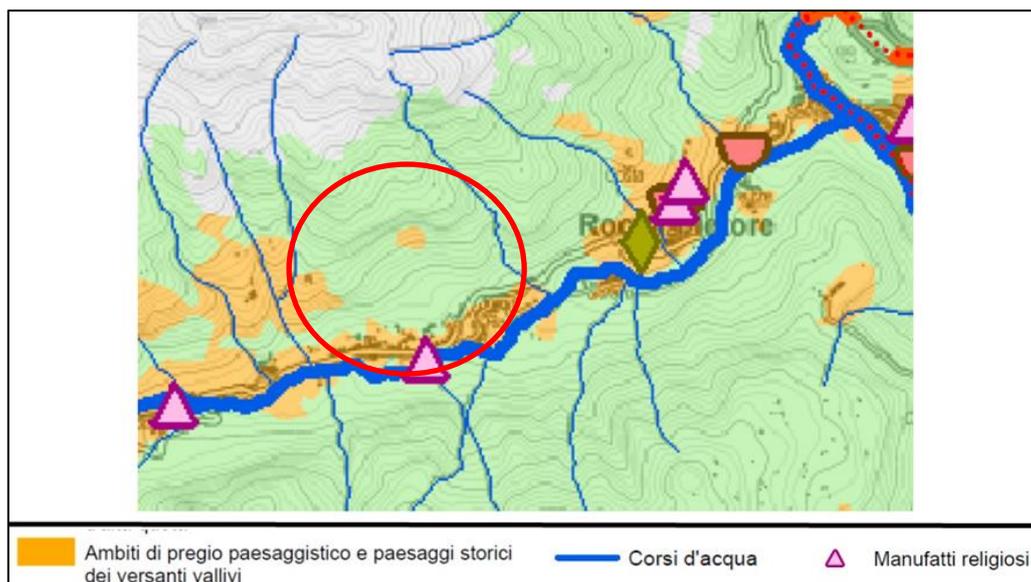


Figura 18 Estratto del PTCP Provincia di Belluno- Tavola C.5 Sistema del paesaggio.

- Piano Urbanistico Intercomunale (PATI) di prossima adozione dal Comune di Rocca Pietore (BL), documento che accorpa diversi comuni confinanti con la finalità di avere uno sviluppo territoriale comune. Nell’ambito di questo piano, in particolare, è prevista la “Carta delle Fragilità” la quale si occupa principalmente della suddivisione del territorio in aree idonee e non all’edificazione. Nella categoria delle aree non idonee si trovano tutte le zone soggette a dissesto idrogeologico, in particolare soggette ad erosione, frana, valanga e alluvione e di conseguenza sottoposte a penalità ai fini edificatori (AA.VV., 2017).

L’immagine sottostante riporta un estratto del PATI per l’area caso di studio all’interno della quale si vede evidenziata in rosa la fascia corrispondente al canale del Ru de Sass Negher considerata non idonea, di colore più chiaro le zone idonee, mentre il centro abitato di Col di Rocca è cerchiato in rosso.

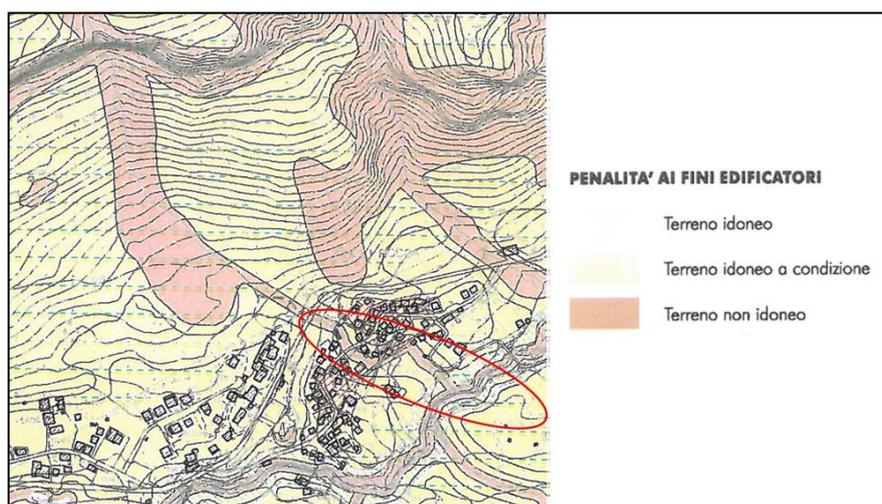


Figura 19 Estratto della Carta delle Fragilità del P.A.T.I. di prossima adozione per il Comune di Rocca Pietore (BL)

Nell'ambito della pianificazione territoriale, soprattutto in ambienti montani, la conoscenza approfondita dei popolamenti forestali presenti sul territorio e delle loro funzioni è fondamentale. Nel caso della Regione Veneto, non esiste una vera e propria mappatura delle foreste di protezione nei confronti dei fenomeni gravitativi quali caduta massi, valanghe, frane.

E' possibile reperire informazioni relative alle tipologie forestali e alle foreste sulle quali è stato apposto un vincolo alla gestione. L'immagine sottostante (Figura 20) raffigura le tipologie forestali presenti nel versante caso di studio, si tratta principalmente di peccete distinte dal colore blu su gran parte dell'estensione del versante, con sporadiche presenze di piceo-faggete alle due estremità del pendio e di lariceti e larici-cembreti sul lato alla sinistra idrografica del Ru de Sass Negher.

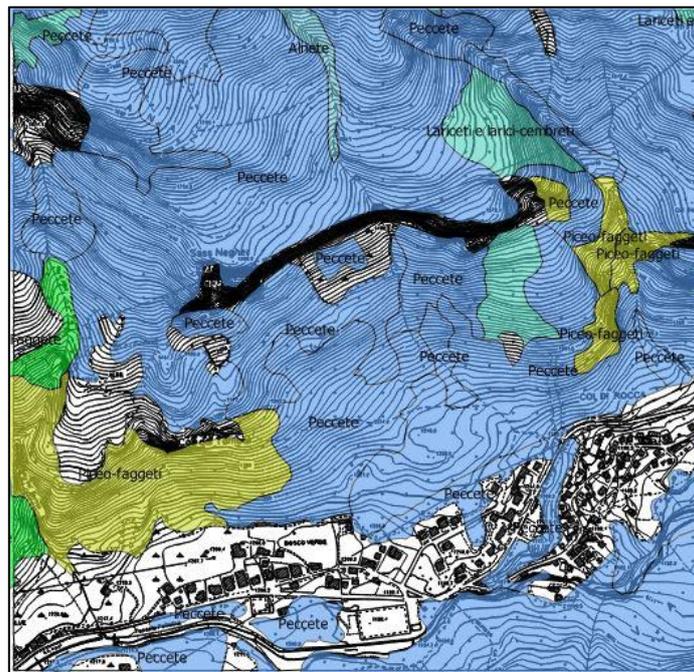


Figura 20 Carta dei principali tipi forestali presenti su versante caso di studio.

#### 4.6 INQUADRAMENTO CLIMATICO

Il clima del sito caso di studio può essere definito mesoclima alpino, tipico delle aree centro-settentrionali della provincia di Belluno e delle aree più interne del Veneto. Questo clima si caratterizza per precipitazioni relativamente elevate e distribuite uniformemente nel corso dell'anno, con massimi stagionali spesso riferibili alla tarda primavera, all'inizio dell'estate e dell'autunno (AA.VV., 2017). In questo tipo di clima, le precipitazioni vedono una variazione da Sud verso Nord, con valori annui di 1500 millimetri nelle valli meridionali, mentre solo 800 millimetri nelle zone più interne settentrionali. In questo contesto, l'inverno risulta essere la stagione meno piovosa, mentre, in estate, questo ambiente è frequentemente interessato da rovesci sparsi pomeridiani causati dalla convezione diurna favorita dalla morfologia del territorio con la presenza di barriere naturali.

Per quanto riguarda le temperature, questa zona presenta valori medi annui di circa 7-8°C, con valori medi per quanto riguarda i mesi invernali che scendono sotto lo zero. Talvolta, nella stagione invernale, si arriva anche a valori di -20°C nei fondivalle a quote intorno ai 1000 m s.l.m.

Secondo la classificazione climatica di Köppen elaborata per i climi italiani da Pinna in funzione della temperatura (Pinna, 1978), il mesoclima alpino appartiene in prevalenza al clima temperato fresco alle quote più basse e al clima temperato freddo o freddo alle quote più alte (AA.VV., 2017).

#### 4.7 ANALISI DEL POPOLAMENTO FORESTALE

Il soprassuolo presente nel versante caso di studio può essere definito una pecceta coetaneiforme in quanto l'abete rosso (*Picea abies*) risulta essere la specie dominante, anche se accompagnata, soprattutto nello strato arbustivo, da nocciolo (*Corylus avellana*) e faggio (*Fagus sylvatica*). Questo popolamento rientra nel caso particolare delle formazioni di falda o rupe generalmente presenti nelle regioni mesalpica ed endalpica, dove talora sono presenti delle peccete su detriti di falda o, più raramente, su rupi (Del Favero, 2004).

Una prima distinzione all'interno del popolamento forestale deve essere compiuta tra il lato destro e quello alla sinistra idrografica del Ru de Sass Negher. Nel primo caso, le piante hanno colonizzato questo tratto di versante soltanto a seguito del fenomeno di caduta massi, ancorandosi alle porzioni di suolo più favorevoli presenti nell'area. Nel secondo caso, invece, le piante si trovano in un tratto dove l'attività di caduta massi è attuale o comunque recente; il popolamento infatti si è sviluppato prima che il fenomeno si originasse.

Per quanto riguarda lo stato fitosanitario del popolamento forestale in esame, a partire da queste considerazioni e dalle osservazioni di campo è possibile affermare che nel primo caso esso è buono poiché le piante non vengono danneggiate da alcun disturbo e non si riscontrano evidenti attacchi parassitari in corso; nel secondo caso, invece, le piante si presentano danneggiate con evidenti cicatrici dovute all'impatto con i massi, le quali favoriscono l'ingresso di parassiti che portano ad un'ulteriore degradazione del popolamento.

Nella descrizione generale, però, devono essere compiute alcune distinzioni del versante in aree omogenee, le quali poi saranno utili anche ai fini della modellazione:

- Fascia alta del versante alla destra orografica del canale condizionata dalla presenza del Sass Negher come salto di roccia che origina la cascata.

Qui la vegetazione è molto rada a causa del notevole apporto detritico presente, le poche specie presenti sono principalmente Nocciolo e Abete rosso, per quanto riguarda la rinnovazione, si osserva

solamente la presenza di polloni di Nocciolo con notevoli difficoltà di attecchimento a causa della scarsa disponibilità di suolo (Figura 24).

- Fascia alta del versante alla sinistra orografica del canale condizionata dalla prossimità alle fessurazioni instabili del Sass Negher che causano frequenti e recenti distacchi.

In questa zona la vegetazione si differenzia perché la densità del popolamento risulta maggiore e la distanza tra l'affioramento roccioso e il popolamento forestale si riduce notevolmente rispetto alla fascia precedente. In questo caso il popolamento forestale può essere definito un ceduo di Faggio con la presenza di alcuni individui sporadici di Abete Rosso. Si osserva la presenza di molte buche generalmente di forma ellittica che favoriscono lo sviluppo della rinnovazione e la diffusione di nuovi polloni (Figura 25).

- Fascia a quota intermedia alla sinistra orografica del canale nella quale si trova la zona di transito del fenomeno di caduta massi. In questa zona quasi totalmente interessata da conifere, a parte qualche ingresso sporadico del Faggio, si osserva la presenza di buche che favoriscono la rinnovazione anche se la presenza di massi caduti recentemente ne limita lo sviluppo (Figura 26).

- Fascia a quota intermedia lungo le sponde del Ru de Sass Negher alla destra orografica, dove il popolamento forestale è fortemente influenzato dal transito della colata detritica che, nel suo movimento gravitativo, danneggia le piante adiacenti al canale. Il popolamento in questa fascia si compone di Abete rosso con una piccola percentuale di Nocciolo. La rinnovazione presente risulta essere principalmente di Abete Rosso, favorita dalla necromassa presente a terra sotto forma di ramaglie e ceppaie le quali danno origine, insieme ai massi al suolo, a micrositii favorevoli per l'attecchimento delle piantine (Figura 27).

- Fascia a quota intermedia distante dal canale alla sua destra orografica, nella quale la foresta si presenta stabile, ad elevata densità, ma in stato fitosanitario buono. Le specie presenti sono principalmente Abete Rosso accompagnato da Faggio e Nocciolo. Anche in questo caso si rileva la presenza di necromassa a terra distribuita però a chiazze, mentre la rinnovazione, anche se scarsa, è caratterizzata principalmente da Faggio cresciuto al riparo da grossi massi depositati in passato (Figura 28).

Per quanto riguarda la gestione del popolamento forestale in esame, si osservano dei depositi non recenti di legname risalenti ad un intervento a cura dei Servizi Forestali Regionali con l'obiettivo di alleggerire il versante e limitare il trasporto di detrito legnoso a valle in occasione di eventi piovosi eccezionali. Un esempio di intervento ancora visibile attualmente viene descritto in figura 21.



*Figura 21 Esempio di intervento di alleggerimento del versante nella zona di transito dei massi.*

Attualmente utilizzazioni limitate nella fascia boschiva di fondovalle vengono effettuate da parte degli abitanti di Col di Rocca.

Di seguito viene riportata la documentazione fotografica delle diverse aree sopradescritte.



*Figura 22 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia alta del versante: destra orografica del Ru de Sass Negher.*



*Figura 23 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia alta del versante: sinistra orografica del Ru de Sass Negher.*



*Figura 24 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante: sinistra orografica del Ru de Sass Negher.*



*Figura 25 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante: destra orografica del Ru de Sass Negher.*



*Figura 26 Immagine relativa alla copertura forestale della fascia intermedia del versante: destra orografica lontano dal canale.*



## 5. MATERIALI E METODI

### 5.1 RILIEVI DI CAMPO

#### 5.1.1 SUDDIVISIONE AREA IN ZONE OMOGENEE

Prima di procedere alla vera e propria fase di rilievi in campo, è stato effettuato un rilievo preliminare che ha permesso di percorrere l'intero versante alla medesima quota (1450 m s.l.m.) prendendo come riferimento le isoipse.

Da questa prima analisi speditiva è stato possibile comprendere meglio i fenomeni che interessano il versante e la loro scansione temporale. E' stato infatti possibile osservare come l'area possa essere distinta in due zone in base alle diverse interazioni tra massi in caduta e foresta:

- Alla destra orografica del Ru de Sas Negher è stata riscontrata la presenza di notevoli accumuli detritici dove la vegetazione, sia arborea che arbustiva, ha colonizzato l'area in tempi successivi alla caduta dei massi. Non è stata osservata alcuna traccia di fenomeni recenti.
- Alla sinistra orografica del canale, invece, la situazione risulta essere molto diversa in quanto il fenomeno di caduta massi è in attività, soprattutto nel periodo estivo/primaverile. La foresta presente risulta essere più rada della precedente con evidenti tracce del passaggio dei massi sia con cicatrici lungo i fusti, che con accumulo di massi alla base delle piante.

La presenza di vegetazione risulta essere molto disomogenea all'interno del pendio in quanto l'area sottostante alla parete rocciosa si presenta priva di suolo e di specie arboree in modo continuo, mentre la fascia sottostante ad una quota più bassa e con meno incidenza dei fenomeni gravitativi, presenta una buona copertura.

Questo rilievo preliminare ha permesso inoltre di individuare 5 principali aree sorgente le quali possono essere definite attive grazie alla presenza di rocce affioranti e pareti fessurate a strapiombo. Osservata la variabilità dei parametri misurati in campo è stato deciso di suddividere la superficie in zone omogenee in modo da distribuire i valori misurati puntualmente su tutta l'area oggetto di studio e creare le mappe di input necessarie alla modellazione numerica.

Non essendoci evidenti correlazioni tra parametri topografici quali altitudine, scabrezza del terreno ed i principali parametri del popolamento forestale, si è deciso di effettuare questa suddivisione a partire dalle osservazioni realizzate nel rilievo preliminare e dai dati raccolti nella fase di esecuzione delle aree di saggio.

In Figura 29 è evidenziata la suddivisione che è stata realizzata secondo 5 aree con caratteristiche omogenee. Queste sono state contrassegnate da una lettera dell'alfabeto.

Le aree individuate sono le seguenti:

- ZONA A

Fascia ubicata alla destra orografica del rio, si trova a valle dell'affioramento roccioso. La foresta in questa fascia è molto rada o talvolta assente. All'interno di questa zona non sono state realizzate aree di saggio, ma solo una stima del masso più rappresentativo ai fini della modellazione.

- ZONA B

Area ubicata alla sinistra orografica del rio, a valle del Sass Negher. Qui la foresta è presente con una densità sufficiente a svolgere un ruolo protettivo. All'interno di questa zona è stata realizzata un'area di saggio rappresentativa di tutta la fascia.

- ZONA C

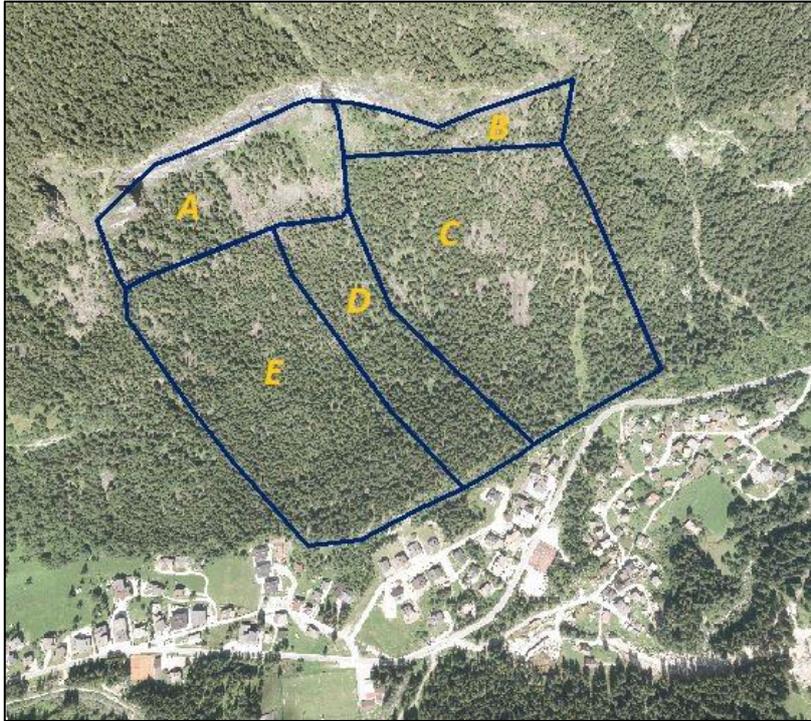
Area posta a quote inferiori della precedente, dove il popolamento è omogeneo fino a livello del fondovalle. Anche in questo caso è stata realizzata un'area di saggio rappresentativa dell'intera fascia.

- ZONA D

Area localizzata alla destra orografica del canale, molto vicina allo stesso e da cui è condizionata. Al suo interno sono state realizzate 3 aree di saggio a varie quote per conoscere meglio il versante ai fini della modellazione.

- ZONA E

Area ubicata alla destra orografica del canale, ma distante dallo stesso. Questa zona è risultata essere poco disturbata, con popolamento forestale omogeneo e denso. In questo caso sono state realizzate 3 aree di saggio a diverse quote.



*Figura 27 Suddivisione del versante caso di studio in zone omogenee indicate con una lettera.*

### 5.1.2 TRANSETTO PER RILIEVO CICATRICI

Una prima analisi ha interessato la sinistra orografica del Ru de Sas Negher e ha riguardato una prima raccolta dati riguardante le tracce dovute al passaggio dei massi evidenti a livello delle specie arboree presenti.

E' stato realizzato un transetto lungo la linea di massima pendenza con una lunghezza di 30 m per una superficie totale di 750 m<sup>2</sup>. Osservando l'area da monte verso valle sono state individuate le 4 piante corrispondenti agli angoli dei transetti, sono state poi individuate le coordinate, segnalate con delle fascette e registrate sull'app per smartphone Locus Map Free. All'interno di questa superficie sono state tracciate 6 fasce orizzontali lungo le quali sono state rilevate alcune caratteristiche degli individui presenti utili a fini descrittivi dell'area che viene considerata molto disturbata.

Il totale delle piante campionate lungo le fasce è 54, tra le quali è stata misurata l'altezza di 3 piante per ogni fascia, la prima, l'ultima e la pianta centrale. Le misure sono state realizzate compatibilmente con la copertura forestale. Le informazioni raccolte riguardo il popolamento forestale sono le seguenti:

- n° della fascia di appartenenza;
- specie;
- n° della pianta;
- n° di cicatrici per pianta;

- distanza tra le piante sia a destra che a sinistra osservando da monte (L1 e L2);
- diametro a petto d'uomo (DPU);
- diametro alla base;
- altezza di tre piante per fascia.

Per quanto riguarda l'analisi delle cicatrici è stato rilevato:

- superficie interessata dalla ferita;
- altezza da terra;
- forma (rotonda, ellittica o rettangolare);
- tipologia di ferita, se frontale, laterale o di striscio;
- tipo di danno, se recente o cicatrizzato;
- presenza di masso alla base;
- diametri maggiore, minore o intermedio del masso;
- stato fitosanitario della pianta in esame.

Di seguito vengono riportate alcune immagini raffiguranti alcuni esempi di cicatrici rilevate in campo.



*Figura 28 Esempi di cicatrici da impatto esaminate nella fase di raccolta dati.*

Le informazioni raccolte sono state poi riassunte in una tabella di campionamento in campo e poi elaborate con excel.

### 5.1.3 AREE DI SAGGIO

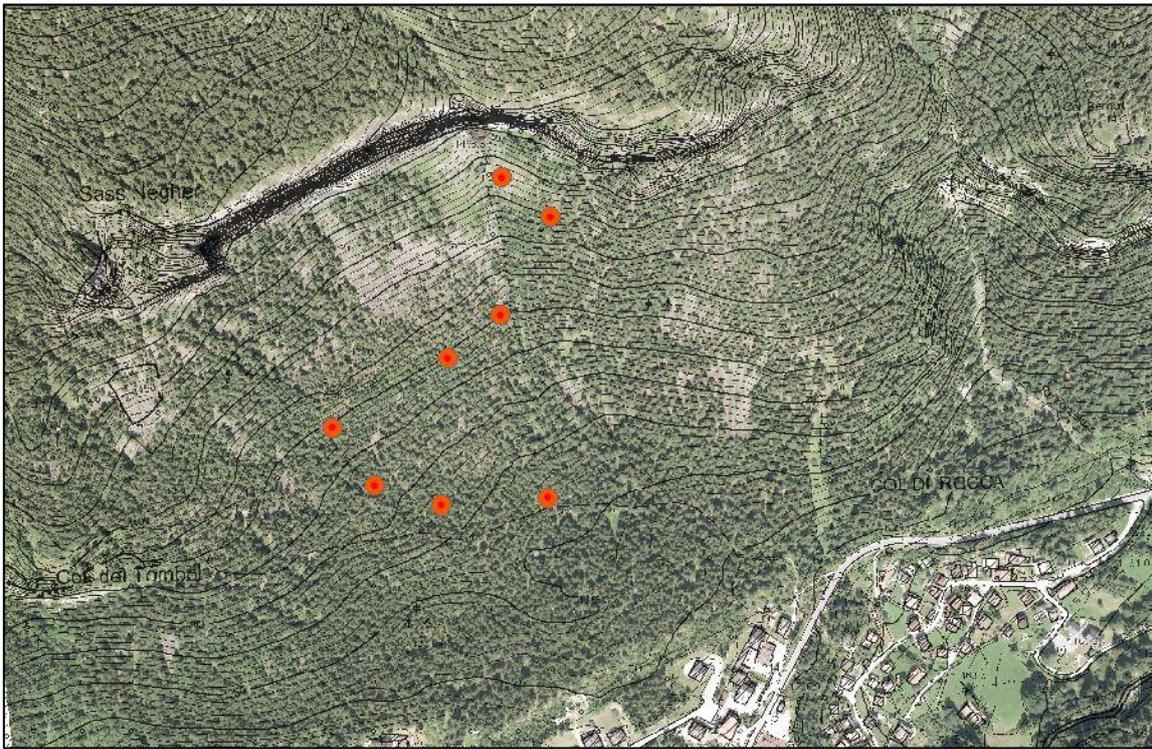
La seconda fase dei rilievi di campo ha riguardato l'intero versante caso di studio, con la raccolta dati in funzione della vicinanza al canale del Ru de Sas Negher, dell'accessibilità da parte degli operatori e della rappresentanza del fenomeno ai fini dell'applicazione del modello Rockyfor 3D. E' stato scelto di utilizzare la scheda di campionamento descritta nel manuale del modello e di raccogliere i dati all'interno di 8 aree di saggio dal raggio 10 metri distribuite sul versante. In figura 29 è riportato un esempio di questa scheda.

Informazioni generali			
Data*		Nr. Poligono*	
Sito*		Inclinazione*	( ° / % )
Nome*		Zona di:*	<input type="checkbox"/> stacco <input type="checkbox"/> transito <input type="checkbox"/> deposito
* ogni poligono rappresenta un'unità omogenea; dimensione dipende dalla scala di mappatura			
Caratteristiche del poligono			
<b>1. Caratteristiche del blocco (depositato nel poligono o potenzialmente caduta dalla zona di stacco)</b>			
Forma del Blocco	<input type="checkbox"/> 1. blocco parallelepipedo <input type="checkbox"/> 2. blocco ellissoidale <input type="checkbox"/> 3. blocco sferico <input type="checkbox"/> 4. blocco discoidale		
Dimensioni del blocco (d1, d2, d3):	..... (m) x ..... (m) x ..... (m)		
Densità (kg.m <sup>-3</sup> ):			
<b>2. Tipo di suolo</b>			
Suolo	<input type="checkbox"/> Fiume; palude; materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	<input type="checkbox"/> Materiale fine (spessore > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> Materiale fine (spessore < ~100 cm) / sabbia/ghiaia a mista
		<input type="checkbox"/> Detrito di falda (Ø < ~10 cm); suolo compatto medio con piccoli massi; strade forestali	<input type="checkbox"/> Detrito di versante (Ø > ~10 cm); o suolo compatto con grandi massi
		<input type="checkbox"/> Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica	<input type="checkbox"/> Substrato roccioso <input type="checkbox"/> Strade asfaltate
(soiltype) Valori per Rockyfor3D	0	1	2
			3
			4
			5
			6
			7
<b>3. Scabrezza della superficie inclinata</b>			
MOH: altezza di un ostacolo (MOH) rappresentativa per il 70%, 20% e 10% della superficie senza una zona omogenea sul pendio. Il parametro deve essere misurato guardando il pendio verso valle, nella direzione di discesa del masso.			
	MOH 70% della superficie (rg70)		<input type="checkbox"/> 0-100 (m)
	MOH 20% della superficie (rg20)		<input type="checkbox"/> 0-100 (m)
	MOH 10% della superficie (rg10)		<input type="checkbox"/> 0-100 (m)
Lying tree stems*	Altezza media=	m	Area covered = %
<b>4. Foresta*</b>			
Superficie di interpretazione: ..... m x ..... m			
DPU* (cm)	* DPU: Diametro medio a petto d'uomo		
Registrare tutti i DPU > 5 cm misurato nella superficie di interpretazione; p.e., 8, 31, 17, 13, ...			
Densità alberi / ha			
DPU medio (cm)			
Deviaz. std. DPU (cm)	Conifere (%)		
Specie*			
<b>5. Indicatori di attività di caduta massi*</b>			
nr. d'impatti sugli alberi*		altezza d'impatti sugli alberi (m)*	
profondità d'impatto (m)*		recenti blocchi depositate in poligono*	si / no
<b>6. Commenti / schizzo*</b>			

Figura 29 Esempio di scheda di campionamento prevista dal manuale del modello Rockyfor3D.

Le aree di saggio sono state dapprima individuate in modo approssimativo e numerate mediante l'impiego del software ArcGis utilizzando le ortofoto e il DTM a 5 metri dell'area in esame. Il punto centrale dell'area di saggio è stato successivamente verificato in campo e talvolta modificato in funzione delle esigenze di omogeneità e di accessibilità attraverso l'impiego dell'app per smartphone

Locus Map Free. Di seguito viene riportato lo schema della distribuzione spaziale delle aree di saggio a seguito della correzione in campo.



*Figura 30 Distribuzione delle aree di saggio all'interno del versante caso di studio.*

Una volta individuato il centro e segnato con un picchetto a terra, è stata definita anche la superficie dell'area di saggio attraverso l'utilizzo di un distanziometro laser (True Pulse 360° B, Laser Technology) ed in alcuni casi della cordella metrica. In seguito si è proceduto raccogliendo tutti i dati relativi alla scheda di campionamento utile alle varie simulazioni del modello, sia per quanto riguarda le caratteristiche geomorfologiche del sito, che per quanto riguarda le condizioni con cui si presenta la foresta. In particolare le informazioni raccolte sono:

- numero progressivo corrispondente all'area di saggio analizzata;
- pendenza del terreno ottenuta da misure dirette in campo effettuate con distanziometro laser;
- tipologia di zona legata al fenomeno che interessa l'area esaminata, se si tratta di zona di distacco, scorrimento, accumulo;
- forma del blocco più rappresentativo depositato nell'area. Questa stima è stata realizzata individuando il litoide che meglio rappresenta le condizioni medie degli accumuli minerali presenti nell'area di saggio;
- valori dei tre diametri (minimo, medio e massimo) del masso più rappresentativo dell'area;
- densità del litoide, misurata in laboratorio a partire dalla raccolta di alcuni frammenti di blocchi rappresentativi del fenomeno prelevati in campo;

- tipologia di suolo, secondo 7 classi predefinite dal modello e descritte dalla tabella 5 presente nel manuale Rockyfor3D;

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R <sub>n</sub> valori medi	R <sub>n</sub> 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 (Ø < ~10 cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali	0,33	0,30 - 0,36
4	Detrito di versante (Ø > ~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

Tabella 5 Tipologie di suolo presenti nel manuale del modello Rockyfor3D con coefficiente di restituzione R<sub>n</sub>.

- indice MOH (*Mean Obstacle Height*) secondo le percentuali di 70%, 20% e 10%. Tale valore viene espresso in particolare da 3 classi di probabilità, chiamate rg70, rg20, rg10 corrispondenti rispettivamente al 70%, 20% e 10% di altezza media degli ostacoli al suolo. Queste classi descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza lungo il suo percorso (Dorren e Simoni, 2014). Come ostacoli vengono considerati tutti gli elementi minerali che modificano la caduta del blocco. Il valore ottenuto varia da 0 in caso di superficie liscia, a 100 in caso di ostacolo insormontabile in corrispondenza del quale i massi si arrestano, come ad esempio un fiume;
- altezza media dei *lying tree stems*, misura dell'altezza di eventuali piante morte a terra;
- superficie coperta dai *lying tree stems*, misura dell'area interessata dalla necromassa;
- DPU medio delle conifere presenti, attraverso il cavallettamento totale all'interno dell'area di saggio;
- larghezza della ceppaia, misura delle dimensioni della ceppaia a terra;
- densità piante/ha;
- percentuale di conifere sul totale, calcolo ottenuto a partire dalle piante cavallettate;
- altezza media delle piante grandi, misura con il distanziometro laser ove possibile per problemi di copertura forestale;
- specie arboree presenti nell'area di saggio;
- numero medio di impatti per pianta;
- altezza degli impatti da terra, misurazione effettuata con cordella metrica dal colletto alla cicatrice;
- profondità di impatto, misura speditiva effettuata con cordella metrica;
- recenti blocchi depositati alla base, osservati in fase di misurazione;

- allegati fotografici ed ulteriori note.

Una volta raccolti, questi dati sono stati riassunti un foglio di calcolo di Excel ed accorpati se comuni ad una stessa area omogenea con le quali è stato suddiviso il versante analizzato. In questo modo è stato possibile ottenere valori medi il più possibile adeguati alle diverse aree che possano essere poi utilizzati al meglio nella fase di modellazione.

## 5.2. APPLICAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO ROCKYFOR3D

### 5.2.1. ROCKY-FOR 3D

L'accurata predizione della caduta massi è uno dei bisogni principali nelle aree montane, sia per la gestione del rischio che per delineare le contromisure (Agliardi et al., 2003).

Per calcolare la traiettoria di caduta dei blocchi nelle tre dimensioni in questo studio viene impiegato il modello di simulazione RockyFor3D. Questo modello, fisicamente basato, combina algoritmi deterministici con approcci stocastici, in quanto, date le incertezze connesse alla determinazione dei parametri, questi sono stabiliti in maniera randomizzata, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili (Dorren e Simoni, 2014).

Il modello Rockyfor3D permette di predire accuratamente diversi modelli di caduta massi, sia in caso di versanti forestati che non, in ambiente montano (Dorren et al., 2006).

Questo può inoltre essere impiegato nella simulazione del fenomeno di caduta massi su diverse scale: di versante (nell'ambito di un'analisi di compatibilità), locale (nell'ambito di un PZP cioè Piano delle Zone di Pericolo) e regionale (all'interno di un PAI cioè Piano di Assetto Idrogeologico).

Il software Rockyfor3D (1998) nasce dall'evoluzione dei precedenti modelli Rocky3 e RockyFor e permette di simulare in modo tridimensionale il fenomeno della caduta massi considerando la dissipazione dell'energia sia su versanti privi di vegetazione che su versanti dove il masso può incontrare un popolamento forestale.

Gli elementi peculiari del Rockyfor3D sono:

- Il calcolo del rimbalzo viene considerato in funzione della dimensione del masso, il quale include anche la profondità di penetrazione nelle diverse tipologie di suolo.
- Una stima il più possibile oggettiva in campo dei parametri richiesti per calcolare il coefficiente di restituzione tangenziale.
- La soluzione combinata tra elementi fisici e stocastici per stimare la direzione di caduta dei massi. Questo permette di calcolare un vettore 3D di movimento del masso in caduta.
- La possibilità di esplicitare gli effetti integrati dei singoli tronchi, specificando la posizione delle piante ed il loro diametro in ogni traiettoria considerata (Dorren et al, 2012).

Questo modello nasce in Svizzera nel *Federal Office for the Environment* (FOEN), ideato dal Dottor Luuk K.A. Dorren sulla base di combinazioni di processi fisici ed algoritmi deterministici, è poi stato perfezionato con simulazioni in campo sulle Alpi Francesi ed Austriache da Frédéric Berger (ricercatore del Cemagref di Grenoble in Francia).

Il modello simula la traiettoria di caduta massi con un vettore che memorizza i valori tridimensionali di posizione e velocità, attraverso il calcolo di una sequenza di cadute libere del grave, descritte dalla classica legge parabolica di caduta libera in aria e di rimbalzi sulla superficie del pendio, nonché, se richiesto, di urti contro gli alberi (Dorren e Simoni, 2014).

Il funzionamento di questo software è basato sull'impiego di modelli di elevazione digitale del terreno (DEM) e di una serie di raster volti a descrivere nel modo più dettagliato possibile la micro-topografia del versante in esame.

I dati di ingresso richiesti dal modello consistono in una serie di raster ASCII (formato ESRI) i quali possono definire la topografia e le caratteristiche della superficie in pendenza, così come un insieme di parametri che definiscono le condizioni di rilascio del masso a monte (Dorren e Berger, 2012).

#### 5.2.1.1. ALGORITMI DI CALCOLO

A partire dai file di input sopraccitati, il software analizza le diverse traiettorie che potrebbero intraprendere i massi nel loro moto gravitativo verso valle. Nell'analisi delle traiettorie vengono tenute in considerazione tutte le possibili deviazioni al percorso originale che si potrebbero verificare a seguito di impatti sia al suolo che nei confronti di ostacoli, la cui più diretta conseguenza è la riduzione della velocità a causa della dissipazione di un componente di energia iniziale.

Gli elementi analizzati dal modello Rockyfor3D sono dunque:

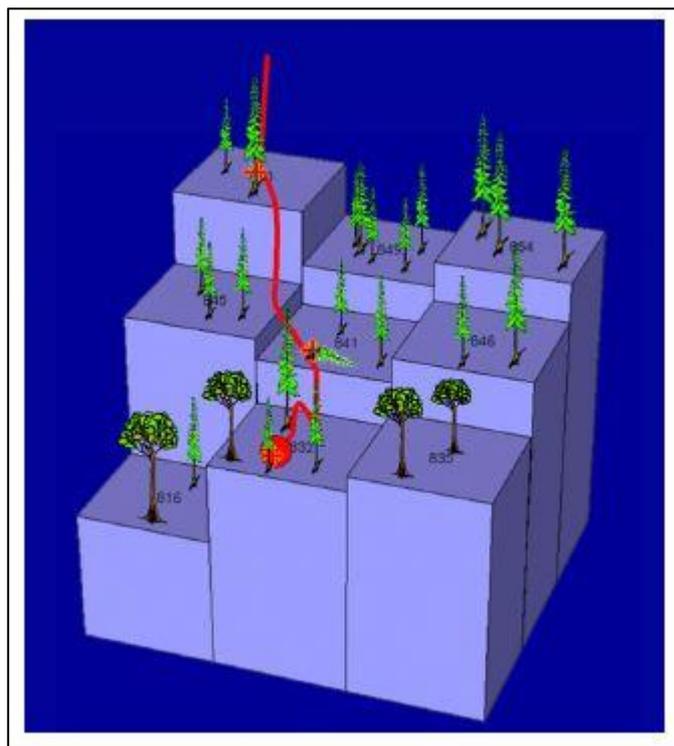
- Le traiettorie di caduta;
- La dissipazione dell'energia;
- La velocità di caduta.

Per questo motivo sono realizzate più simulazioni per comprendere tutti gli scenari possibili che si potrebbero verificare lungo un versante. In questo caso sono state utilizzate 5000 simulazioni per ogni scenario.

#### 5.2.1.2. TRAIETTORIE DI CADUTA

A partire dal DEM del versante, il modello procede simulando le traiettorie di rockfall analizzando la distribuzione delle quote per ogni singola cella, considerando in questo modo la topografia dell'area e la possibile distribuzione dell'energia cinetica acquisita.

L'immagine sottostante (Figura 31) rappresenta un esempio di come il software sfrutti il DEM dell'area caso di studio nella definizione della traiettoria del masso in caduta.



*Figura 31 Rappresentazione del meccanismo di definizione della traiettoria da parte del modello Rockyfor3d.*

Come è possibile osservare dall'immagine, per traiettoria si intende un insieme di rimbalzi e parabole in aria; per quanto riguarda le rotazioni del blocco roccioso sulla superficie, la simulazione considera tale movimento come una successione di rimbalzi a breve/brevissima distanza (pari al raggio R del masso e non inferiori a 0,2 metri). Suddetta approssimazione risulta totalmente errata nel caso dello scorrimento, per questo motivo tralasciato dal modello (Dorren, 2012).

Fase fondamentale per una corretta definizione delle traiettorie è l'individuazione delle aree sorgente del masso, le quali costituiscono il punto di innesco del fenomeno. Conoscere la loro posizione, l'altezza dal piano del suolo e la distanza da ostacoli che potrebbero limitare il movimento permette di stimare l'energia cinetica acquisita dal litoide. Da questi elementi ha origine l'inizio del movimento del masso ed essendo parametri naturali variabili in funzione di altrettanti elementi naturali, non viene effettuata soltanto una simulazione (o lancio), ma un elevato numero delle stesse sulla base dell'esperienza maturata dall'operatore.

Il movimento simulato dal software considera dunque principalmente valori di quota, pendenza, esposizione della cella sorgente e la presenza di ostacoli; l'arresto del movimento, invece, è legato all'esaurimento dell'energia cinetica del blocco dovuta ad una diminuzione della pendenza o per dissipazione dell'energia a seguito di impatti.

I cambiamenti di traiettoria avvengono in funzione di alcuni fattori tra cui:

- la velocità e la direzione possedute dal litoide in fase di ingresso nel pixel;
- le condizioni micro-topografiche del versante;
- la probabilità che si verifichi la deviazione (funzione della velocità).

Il range di variazione dell'angolo di direzione del masso oscilla tra  $0^\circ$  e  $60^\circ$ .

Per quanto riguarda la deviazione della traiettoria viene considerato l'angolo maggiormente rappresentativo delle condizioni di acclività delle celle confinanti rispetto ad una centrale di riferimento, in relazione alla velocità del litoide; generalmente ciò si manifesta con il compimento di una traiettoria che privilegia la linea di massima pendenza (Zevenbergen e Thorne, 1987).

Quella definita *slope aspect* è la direzione, guardando verso valle, corrispondente alla massima variazione del gradiente valutato tra ogni cella e le quattro celle raster più vicine (sopra, sotto, a destra e a sinistra) (Dorren e Simoni, 2014).

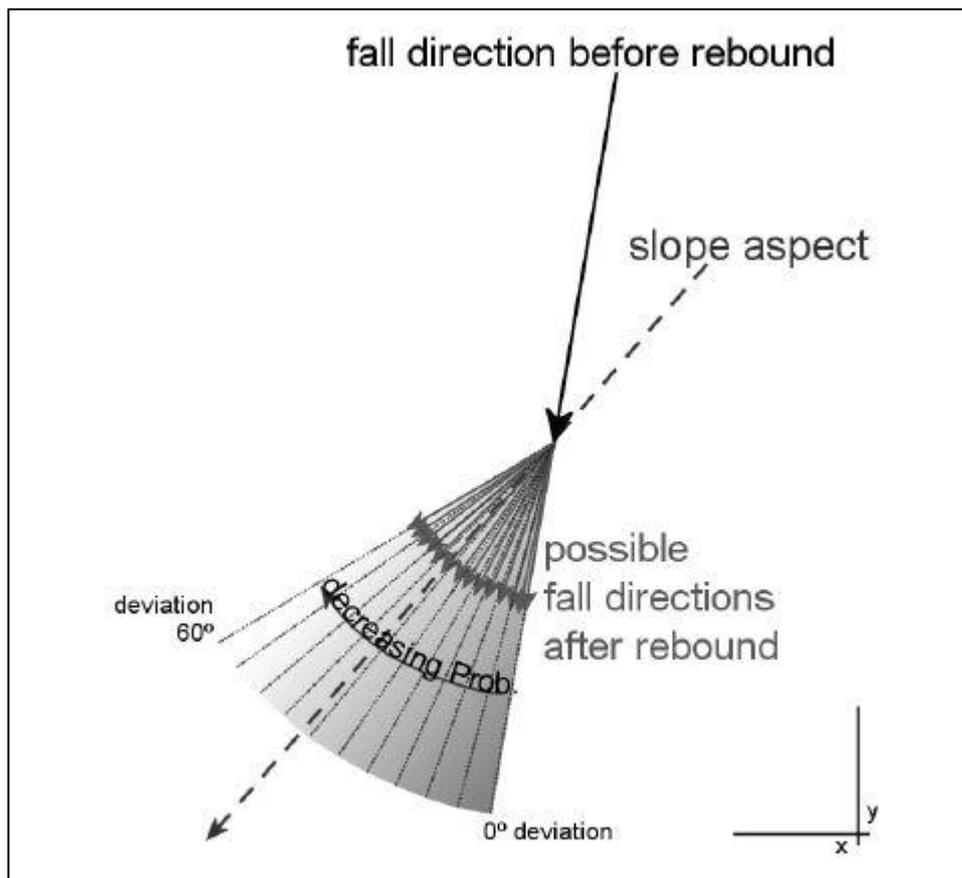


Figura 32 Schema rappresentativo del range di variazione della direzione del masso a seguito del rimbalzo.

Questo valore di esposizione, viene calcolato con l'algoritmo di Zevenbergen e Thorne e viene utilizzato come base per stimare la deviazione del blocco rispetto alla sua direzione di caduta che si verifica ad ogni rimbalzo, partendo da una distribuzione casuale dei numeri e dalla velocità posseduta dal litoide.

Per quanto riguarda la definizione del numero causale, questa si riferisce alla deviazione subita dal blocco rispetto alla direzione originale, con diverse classi di riferimento. L'immagine sottostante

riporta la probabilità degli intervalli dell'angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, per le tre classi di velocità usate da Rockyfor3D (Dorren e Simoni, 2014).

Angolo di deviazione (°)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10 \text{ m.s}^{-1}$	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15 \text{ m.s}^{-1}$	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15 \text{ m.s}^{-1}$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Tabella 6 Valori percentuali di probabilità dell'angolo di deviazione del blocco a seguito del rimbalzo secondo il modello Rockyfor3D.

In caso di cambiamento di direzione dovuto ad impatto con gli alberi, sono stati eseguiti degli esperimenti da Dorren (2005), il quale afferma che la traiettoria del litoide può essere deviata lateralmente fino a  $76^\circ$  rispetto alla direzione iniziale di caduta. Questa stima considera sia la direzione entrante che quella uscente da un cerchio di riferimento di raggio 5 metri posizionato attorno all'albero colpito, con uno scostamento di traiettoria a livello locale che può essere anche di  $180^\circ$ . La deviazione del blocco dopo l'impatto contro un albero dipende dalla posizione del baricentro del blocco rispetto al tronco dell'albero al momento dell'impatto. Su queste basi sono stati definiti tre principali tipi di impatto: frontale, laterale o di striscio (Dorren e Simoni, 2014). La tabella 7 sotto riportata evidenzia i valori di probabilità di deviazione in caso di impatto contro un albero.

Tipo di impatto	Probabilità (%)		
	Deviazione di $0 - 22.5^\circ$	Deviazione di $22.5^\circ - 67.5^\circ$	Deviazione di $67.5^\circ - 76^\circ$
Frontale	44	50	6
Laterale	11	84	5
Di striscio	72	24	4

Tabella 7 Valori percentuali di probabilità di deviazione della direzione di caduta a seguito di un impatto contro un albero.

### 5.2.1.3. DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA

Il modello Rockyfor3D riesce a quantificare la perdita di energia che interessa il masso dalla zona sorgente fino al punto di arresto del moto gravitativo a valle. Questo è possibile grazie alla stima degli impatti realizzati sia a terra, che contro alcuni ostacoli e la definizione di un coefficiente di restituzione del suolo o degli elementi nel soprassuolo. Questa stima avviene secondo alcune fasi:

- Calcolo della dispersione di energia del blocco a partire dalla semplificazione della cinetica del masso che viene equiparato ad un'oggetto sferico del quale si conoscono posizione e condizione in ogni istante del movimento.

- Stima del movimento del masso a partire dalla micro-topografia del versante, sfruttando il DEM. Questo viene equiparato ad un moto parabolico uniformemente accelerato che porta ad una serie di impatti con il suolo. A questo punto devono essere prese in considerazione sia le caratteristiche del terreno che il livello di interazione del blocco con il suolo. Questi si traducono rispettivamente nel coefficiente di restituzione e nel grado di penetrazione ( $D_p$ ) i quali stimano la perdita di energia del blocco e ne condizionano i movimenti successivi.

Nell'immagine sottostante viene descritta schematicamente la dinamica di caduta di un masso lungo un pendio, dove, a partire da una traiettoria parabolica, il movimento subisce alcune alterazioni. Gli step previsti sono i seguenti:

- Rotazione in aria (1);
- Impatto al suolo (2);
- Grado di penetrazione ( $D_p$ ) nel terreno a seguito dell'impatto (3);
- Ripresa del moto gravitativo con energia ridotta (4).

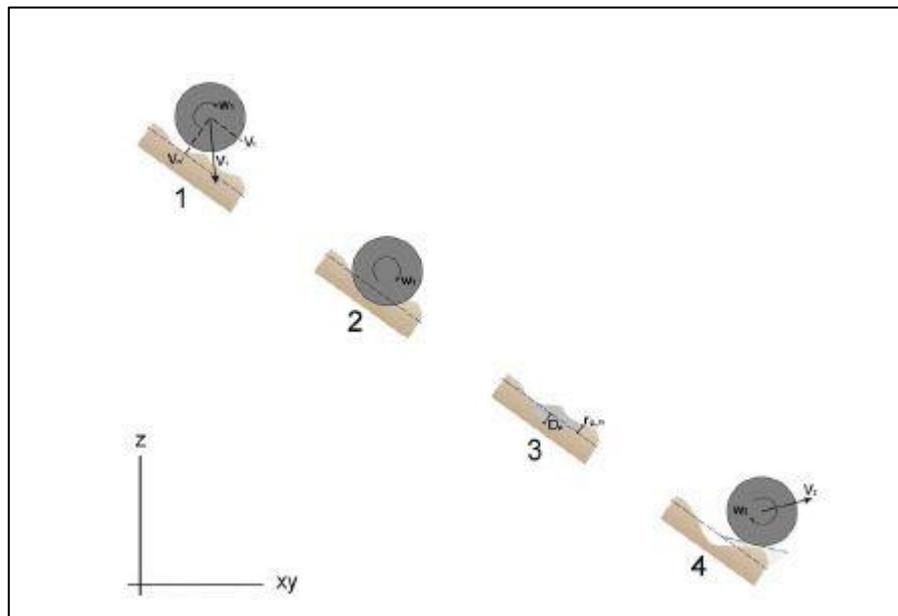


Figura 33 Schema rappresentativo del moto gravitativo di un masso in caduta lungo un versante.

#### 5.2.1.4. CALCOLO DELLA VELOCITA' DI CADUTA

Nella fase di analisi del percorso di un masso in movimento lungo un pendio, i parametri fondamentali sono l'energia cinetica posseduta da quest'ultimo in ogni cella del raster e di conseguenza la velocità massima con cui il litoide può arrivare a valle. Per quanto riguarda la velocità posseduta dal masso, questa viene progressivamente ridotta a seguito dei numerosi rimbalzi e deviazioni descritte dal coefficiente di restituzione tangenziale. Questi dipendono sia dalle caratteristiche morfologiche del

blocco in esame, il quale può essere di forma paragonabile ad un parallelepipedo, di forma ellissoidale, sferica o discoidale; ma anche dalle condizioni di micro-topografia della superficie incontrata lungo il percorso verso valle, cioè il suo grado di rugosità causato dalle discontinuità presenti di origine rocciosa (non vengono considerati lettiera e componente organica del suolo).

Il modello Rockyfor3D a tal proposito prevede la stima di un apposito indice definito Mean Obstacle Height (sigla MOH) il quale descrive in termini probabilistici la scabrezza del pendio.

La scelta del valore da attribuire al parametro MOH richiede molta attenzione, perché Rockyfor3D è sensibile a questo parametro, la scabrezza della superficie viene infatti impiegata per calcolare il coefficiente tangenziale di restituzione (Dorren e Simoni, 2014).

La figura seguente riporta un esempio che esplica in modo schematico la definizione di questo parametro secondo il manuale del modello, i valori devono essere attribuiti osservando il pendio da monte verso valle nella direzione di discesa del masso.

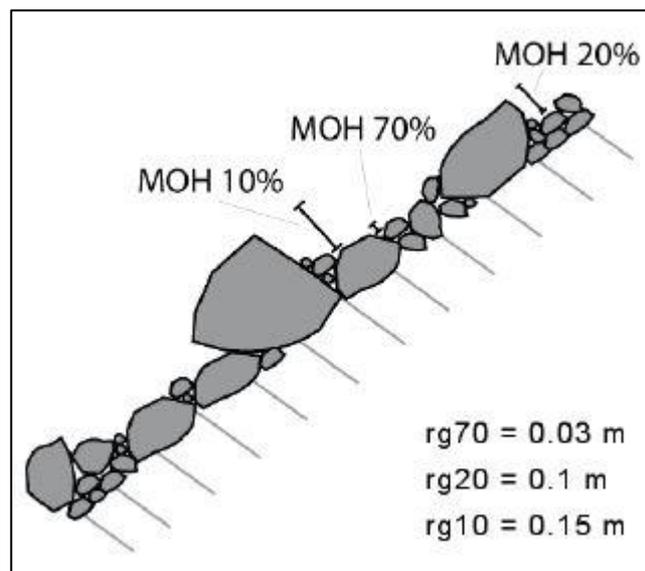


Figura 34 Esempio di determinazione del parametro MOH nelle tre tipologie previste dal modello Rockyfor3D.

Questo parametro permette di approfondire in maniera più dettagliata la morfologia del pendio in esame, in modo da rendere più adeguata la simulazione delle traiettorie ed attribuire un peso alle dissipazioni energetiche dovute agli impatti.

A partire dal valore dell'indice MOH, è possibile stimare una serie di parametri quali ad esempio il coefficiente di restituzione tangenziale  $R_t$ , ossia il valore rappresentativo del decremento di velocità subito dal masso in seguito ad un rimbalzo e conseguente impatto al suolo (Pfeiffer and Bowen, 1989; Spang and Krauter, 2001; Dorren e Simoni, 2014). La formula del coefficiente  $R_t$  è la seguente:

$$R_t = \frac{1}{1 + [(MOH + D_p) / R]}$$

(1)

Per la determinazione del coefficiente  $R_t$ , il valore della scabrezza del versante viene scelto all'interno delle tre classi prestabilite e soppesato alla massima profondità di penetrazione ( $D_p$ ) creata dal masso nell'impiantare al suolo secondo la dimensione del suo raggio ( $R$ ) (Pichler et al., 2005).

Una volta calcolato questo valore, di consuetudine viene considerato un range di variazione del valore per un intervallo pari a  $\pm 10\%$  scelto casualmente dal modello.

Il valore del coefficiente di restituzione tangenziale dovuto al contatto del masso al suolo induce ad una modifica della dinamica del masso a seguito dell'impatto secondo la formula:

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot V_{rot1}^2 + RockMass \cdot V_{t1}^2) \cdot R_t}{I + RockMass \cdot R^2}}$$

(2)

Le variabili di questa formula, secondo gli autori Pfeiffer e Bowen sono:

- $R$  indica il raggio del masso;
- $I$  indica il momento di inerzia;
- $V_{t1}$  la velocità tangenziale e  $V_{rot1}$  la velocità di rotazione precedente al rimbalzo;
- $RockMass$  indica il peso del litoide in kg.

Oltre alla componente tangenziale della velocità è possibile stimare la componente normale della dinamica del masso. Gli autori della formula sono sempre Pfeiffer e Bowen ed il coefficiente è noto come  $V_{n2}$ . La formula per la sua stima è la seguente:

$$V_{n2} = V_{n1} \cdot \frac{R_n}{1 + \left[ \frac{abs \cdot V_{n1}}{9} \right]^2}$$

(3)

I parametri presenti nella formula sono:

- $V_{n1}$  indica la velocità normale del litoide prima del rimbalzo;
- $R_n$  è il coefficiente di restituzione normale (definito in base alla tipologia di suolo);
- $Abs$  corrisponde al fattore di variazione di  $R_n$  correlato all'elasticità del rimbalzo a seconda della velocità di collisione (elastico a basse velocità, anelastico ad alte velocità). (Habib, 1977).

Infine, un ultimo parametro può essere stimato a partire dai valori di velocità, si tratta della velocità di rotazione che, per pendenze di versante pari o superiori a  $4^\circ$ , modifica il movimento di caduta

libera verso valle. La formula di Pfeiffer e Bowen relativa alla velocità di rotazione del blocco a seguito di un urto contro un ostacolo è data dalla seguente formula:

$$V_{rot2} = \min \left[ \frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) \cdot 2}{5 \cdot R} \right]$$

(4)

### 5.2.1.5. DATI DI INPUT

I dati di input constano in particolare di 10 mappe raster, tutte della stessa dimensione e della stessa risoluzione (Dorren e Simoni, 2014). Le mappe raster riportano i 10 parametri di input del modello suddivisi per aree omogenee i quali sono:

- *Dem.asc*: mappa raster del modello digitale del terreno, a partire dalla quale il modello calcola la mappa delle pendenze e l'esposizione. Il Modello Digitale del Terreno (DTM) impiegato in questo caso è caratterizzato da celle con lato 5 metri, il quale viene fornito dalla Regione Veneto, essendo ottenuto a partire dalla Carta Tecnica Regionale (CTR). La figura 15 rappresenta il file ottenuto relativo all'ombreggiatura (hillshade);

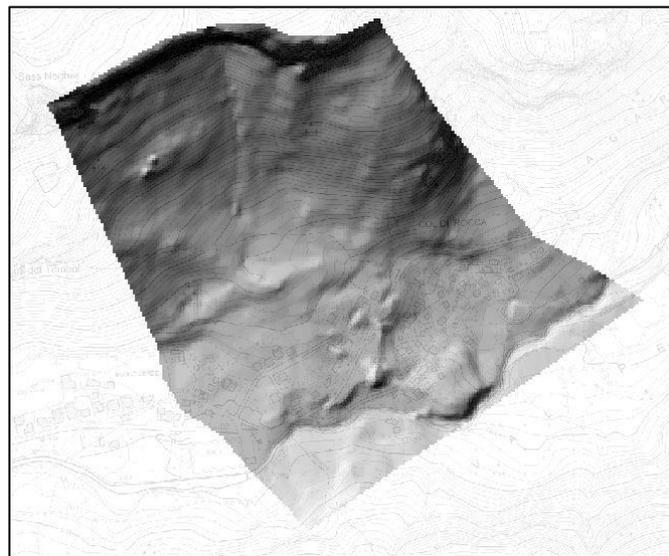


Figura 35 Rappresentazione del dem impiegato ai fini della modellazione.

- *Rockdensity.asc*: mappa raster che descrive la densità ( $\text{kg/m}^3$ ) dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco. In questa mappa, i punti di distacco presentano valori  $> 0$  attribuendo un valore di densità ai blocchi che saranno simulati staccarsi da ogni cella sorgente. Per questo motivo le celle raster con un valore pari a 0 non saranno considerate come celle sorgente.
- *dl.asc*: mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce le dimensioni (esprese in m) del blocco quali altezza, larghezza e lunghezza in ogni cella sorgente.

- *d2.asc*: mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco.
- *d3.asc*: mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco.
- *blshape.asc*: mappa raster che definisce, per ogni cella sorgente, la forma del blocco in caduta. Esso può essere descritto dai seguenti valori:
  - 0 blocco senza forma/assenza di celle sorgenti definite
  - 1 blocco parallelepipedo (le tre dimensioni possono essere differenti tra loro)
  - 2 blocco ellissoidale (i tre diametri possono essere differenti tra loro)
  - 3 blocco sferico (i tre diametri sono identici)
  - 4 blocco discoidale (il diametro più piccolo del blocco è massimo 1/3 degli altri due, che sono comparabili in termini di grandezza)
- *rg70.asc*: mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce la scabrezza della superficie inclinata. Questa scabrezza non definisce la microtopografia, ma i massi situati lungo il pendio che vanno ad ostacolare la caduta del blocco. Tale scabrezza viene definita in termini probabilistici e corrisponde all'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo che un masso che cade incontra nel 70% dei casi, durante un rimbalzo nel poligono definito.
- *rg20.asc*: mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 20% da un blocco in caduta.
- *rg10.asc*: mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 10% da un blocco in caduta.
- *soiltype.asc*: mappa raster che definisce la tipologia del suolo. Questa mappa rappresenta l'elasticità del terreno e deve essere mappata in campo utilizzando poligoni che rappresentano aree omogenee. Sono previsti 8 tipi di suolo collegati al valore di  $R_n$ , coefficiente di restituzione normale.

#### 5.2.1.6. FILES DI OUTPUT

A partire dai files di input sopra descritti il modello Rockyfor permette di simulare, nel modo più adeguato alle caratteristiche topografiche e morfologiche del versante il fenomeno di caduta massi. Il modello agisce in termini cautelativi considerando, dunque, tutti i valori massimi stimati per ogni singola cella. Ad ogni istante temporale il masso simulato supera o rimbalza in una data cella raster e i massimi delle diverse variabili simulate in quella cella vengono memorizzati nella relativa cella in differenti raster (Dorren e Simoni, 2014).

L'obiettivo è quello di ottenere una mappa delle traiettorie tridimensionali di caduta massi che si potrebbe potenzialmente verificare in caso di reale disturbo di questo genere.

Tutti gli output di Rockyfor3D presentano la stessa dimensione, risoluzione e formato dei raster di input.

Le mappe raster di output sono in formato ESRI ASCII Grid e possono essere aperte e visualizzate direttamente in molti software GIS (Dorren e Berger, 2012). I file di output sono:

- *E\_mean.asc*: media dei massimi valori di energia cinetica (di rotazione e di traslazione) di tutti i blocchi simulati in quella cella (espressi in kJ);
- *E\_50.asc*, *E\_90.asc*, *E\_95.asc*, *E\_98.asc*, *E\_99.asc*: il 50, il 90 e il 98 percentile di energia cinetica registrati in ogni cella. L'output è in formato intero e corrisponde ai seguenti valori di classe energetica: ≤3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 270, 285, 300, 500, 1000, 1500, 3000, 5000, 10000, >10000 (espressi in kJ).
- *E\_95CI.asc*: intervallo di confidenza pari al 95% (CI) di tutti i massimi di energia cinetica registrati in ogni cella, dove:

95% CI =  $E\_mean + 2 \times$  deviazione standard del massimo valore in una cella, assumendo una distribuzione normale. La formula della deviazione standard impiegata da Rockyfor3D è la seguente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left( n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)}$$

(5)

la stima del valore del 95% viene considerato come il massimo valore di energia registrato da una data cella (valori espressi in kJ).

- *Ph\_mean.asc*: 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*: il 50, 90, 95 e 98 sono i percentili di altezza di passaggio registrata in ogni cella. L'output è in formato intero e corrisponde ai seguenti limiti di classe di altezza: ≤ 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, >20 (valori espressi in metri).
- *Ph\_95CI.asc*: tutti i valori massimi di altezza di passaggio registrati in ogni cella, misurati in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie. Il principio di calcolo del valore è uguale al precedente. Può perciò essere considerato come la massima altezza di passaggio in ogni cella;
- *Nr\_passages.asc*: numero di blocchi passati in ogni cella;

- *Nr\_sourcecells.asc*: numero di celle sorgenti che alimentano una data cella. In altre parole, questa mappa mostra per ogni cella, da quante celle sorgenti arrivano i blocchi in quella data cella;
- *Reach\_probability.asc*: mappa che mostra se è probabile (valori più elevati nella mappa) o improbabile (valori più bassi nella mappa ma sempre superiori a zero) che un masso raggiunga una determinata cella. In ogni cella viene rappresentato un valore in percentuale dato da:  $(Nr\_passages \times 100) / (Nr\_simulation\_per\_source\_cell \times Nr\_sourcecells)$ ;
- *Nr\_deposited.asc*: 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*: massimo volume del blocco arrestato in ogni cella (espresso in m<sup>3</sup>);
- *EL\_angels.asc*: raster dove vengono riportati gli angoli minimi sottesi alla linea dell'energia calcolata per cella (in gradi). L'angolo della linea dell'energia (come precedentemente descritto da Heim (1932), Scheidegger (1973), Toppe (1987), Gerber (1998), Jaboyedoff e Labiouse (2003)) è l'angolo di inclinazione di una linea diretta virtuale tra la posizione di arresto e la posizione di origine del blocco caduto.
- *Traj\_time.asc*: tempo minimo necessario per raggiungere una cella raster dalle aree sorgenti definite (espresso in secondi);
- *V\_max.asc*: velocità massima simulata in valore assoluto per cella raster (m/s). Questi dati devono essere usati con cautela in quanto non ci sono ulteriori informazioni sulla distribuzione statistica delle velocità del blocco (questo output viene aggiunto a richiesta).

#### 5.2.1.7. SIMULAZIONI CON FORESTA

Le simulazioni con il modello Rokyfor3D possono essere effettuate sia lungo un pendio dove gli ostacoli sono solamente costituiti da massi precedentemente depositati e dalla morfologia del versante, oppure in caso di presenza di un popolamento forestale, il modello prevede un'integrazione nei dati di input.

Il modello permette, infatti, di analizzare gli effetti della caduta di un litoide all'interno di un popolamento forestale, prendendo in considerazione la parziale perdita di energia cinetica a seguito dell'impatto tra masso ed albero. La foresta ha la capacità di assorbire una parte dell'energia e di ammortizzare l'impatto del masso a terra. In questa area, il modello Rockyfor3D utilizza un coefficiente di restituzione normale ed uno tangenziale ai fini di calcolare il rimbalzo del blocco di

roccia sulla superficie del versante (Volkwein et al., 2011). Il coefficiente di restituzione normale permette di definire come avviene il cambiamento della velocità normale durante l'impatto, il coefficiente tangenziale, al contrario, definisce la riduzione della velocità tangenziale (Corona et al., 2017). Entrambi i coefficienti dipendono dalla forma del blocco e dal raggio, dalla profondità del cratere di impatto durante il rimbalzo (condizionato in altre parole dal tipo di suolo) e dalla scabrezza della superficie del versante (Dorren et al., 2005).

In caso di simulazione con foresta, Rockyfor3D permette di scegliere tra due opzioni per integrare i dati iniziali riferiti al solo versante e al masso in caduta con informazioni relative all'interazione roccia-vegetazione.

La prima opzione prevede la realizzazione di un file contenente le coordinate di ogni singolo albero presente nel sito caso di studio e il diametro del fusto misurato all'altezza del petto (DPU). Questo file può essere ottenuto sia tramite rilievi di campo manuali, che attraverso la realizzazione di un modello di superficie normalizzata (DSM) ottenuto tramite dati laserscanning. Il file viene poi nominato *treefile.txt* e salvato nella directory in cui si sta lavorando privo di intestazione. A quest'ultimo vanno poi aggiunte una serie di informazioni come la percentuale media di conifere presenti all'interno di ogni cella contenuta all'interno del file *conif\_percent.asc* dove i valori sono compresi tra 0 e 100. Questo raster deve avere la stessa dimensione e risoluzione della mappa raster *dem.asc* riportante la topografia del terreno (modello digitale delle elevazioni).

La seconda opzione, che è stata utilizzata in questo caso di studio, prevede la rappresentazione della vegetazione mediante l'impiego di 4 mappe raster di seguito elencate:

- *nrtrees.asc*; dove i numeri delle varie celle rappresentano la densità di alberi ad ettaro (valori generalmente compresi tra 0 e 10000 ha<sup>-1</sup>);
- *dbhmean.asc*; file contenente i dati del DPU medio all'interno di ogni cella (valori compresi tra 0 e 250 cm);
- *dbhstd.asc*; i valori presenti nelle celle indicano la deviazione standard del DPU in ogni cella (gli estremi rimangono gli stessi del file precedente);
- *conif\_percent.asc*; i valori delle celle indicano la percentuale media di alberi di conifere presenti all'interno di ogni cella (range da 0 - 100%).

A partire dalle informazioni contenute all'interno di questi raster, il modello riesce ad assegnare densità e DPU al popolamento forestale per ogni pixel della superficie da analizzare. Si ottiene un file contenente le coordinate *x* e *y* di ogni albero individuata casualmente dal modello e contenente anche i valori di DPU. Il file verrà poi salvato con il nome *treefile.txt* nella directory in cui si sta lavorando ed impiegato nella simulazione. Anche in questo caso il file raster deve avere la stessa dimensione del *dem.asc* e la stessa risoluzione. I diversi passaggi per la creazione di questo file

vengono descritti in Figura 16 sotto riportata, dove dapprima vengono tracciati i vari poligoni con le tipologie forestali, si prosegue associandovi i dati corrispondenti e infine convertendo la mappa vettoriale in un raster impiegando i diversi attributi associati.

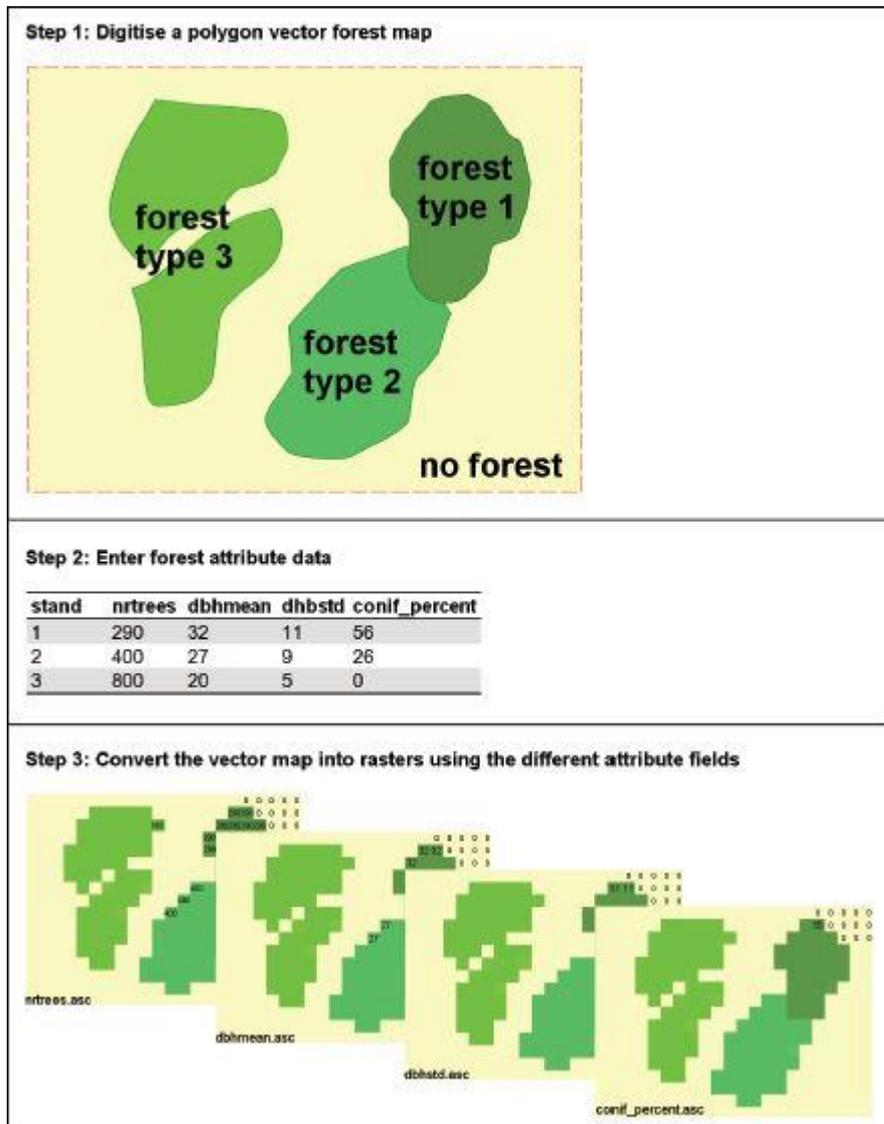


Figura 36 Schema descrittivo delle fasi di simulazione del modello Rockyfor3D con la presenza di foresta.

Il modello prevede la quantificazione della dispersione di energia totale  $E_{dtree}$  (kJ) mediante l'applicazione della seguente equazione:

$$E_{dtree} = \frac{E_{dissM} \cdot E_{dissV} \cdot E_{dissH} \cdot E_{diss\alpha\_imp}}{1000}$$

(6)

Dove i parametri presenti nella formula sono:

- MASSIMA ENERGIA DISSIPABILE ( $E_{dissM}$ )

Questo valore è strettamente correlato al diametro della pianta in esame misurato a 1,30 m da terra ed al coefficiente di resistenza alla rottura  $FE_{ratio}$ , definito in funzione della specie, solitamente i valori di riferimento sono 0,93 per le conifere e 1,59 per le latifoglie. La massima energia dissipabile è dunque data dalla formula:

$$E_{disM} = FE_{ratio} \cdot 38,7 \cdot DBH^{2,31}$$

(7)

- MASSIMA ENERGIA DISSIPABILE (COMPONENTE ORIZZONTALE) ( $E_{dissH}$ )

Questo parametro è stato ottenuto da una serie di studi morfo-dendrologici compiuti da Dorren e Berger (2006) sulla specie *Abies alba*. Il valore ottenuto attraverso la seguente formula rappresenta l'energia che potenzialmente può essere dissipata dalla pianta considerando la componente angolare dell'urto, cioè la posizione dell'impatto sull'intera circonferenza dell'albero rispetto al suo asse verticale centrale (sigla Pi-CTA). La formula ottenuta è la seguente:

$$\Delta E(\%) = E_{dissH} = -0,048 + \frac{0,98 + 0,046}{1 + 10^{[0,58 - ((Pi-CTA)/0,5DBH) - 8,007]}}$$

(8)

- MASSIMA ENERGIA DISSIPABILE (COMPONENTE VERTICALE) ( $E_{dissV}$ )

La dissipazione di una componente dell'energia cinetica grazie alla presenza delle piante avviene solo se l'impatto del masso si verifica ad una determinata altezza da terra. Se quest'ultima risulta eccessiva si potrebbe assistere a fenomeni di danneggiamento del tronco ed eventuale stroncamento. Il valore di altezza di impatto, in funzione del DBH, ideale per ottenere una buona dissipazione viene descritto dalla formula sottostante:

$$H_{tree} = 1,22 \cdot DBH^{0,8}$$

(9)

A partire da questo parametro, è possibile stimare il valore della massima energia dissipabile verticalmente (Dorren e Berger, 2006; Jonsson et al., 2007) applicando la seguente formula:

$$E_{dissV} = 1,62 \cdot \left( \frac{1}{1 + e^{18,04 \cdot (Z_i / H_{tree}) + 0,02 \cdot DBH - 2,35}} - \frac{1}{1 + e^{15,69 + 0,02 \cdot DBH}} \right)$$

(10)

dove le variabili sono:

- $Z_i$  altezza in metri di impatto del masso;

- H<sub>tree</sub> altezza della pianta;
- DBH diametro a petto d'uomo.

- ANGOLO DI IMPATTO DELLA DISSIPAZIONE ENERGETICA (E<sub>dissα\_imp</sub>)

Questo parametro permette di quantificare la dissipazione dell'energia conoscendo l'angolo di impatto e la sua variazione rispetto alla verticale.

La seguente formula (Jonsson, 2007) permette di quantificare il valore massimo di energia che può venir dissipata in funzione dell'angolo in cui avviene l'urto (α<sub>imp</sub> espresso in gradi).

$$E_{diss\alpha\_imp} = \min(1, (1,03 \cdot \sin(1,46 \cdot \frac{\min(\alpha\_imp, 70)}{180^\circ} \cdot \pi + 0,73)))$$

(11)

Per quanto riguarda gli output ottenuti dalla simulazione con vegetazione, essi vengono aggiunti ai raster della simulazione con versante privo di soprassuolo e sono:

- *Tree\_impact\_heights.asc*: massima altezza di impatto sull'albero per cella raster (valore misurato in metri);
- *Nr\_tree\_impacts.asc*: numero di impatti sull'albero per cella raster.

Il vantaggio di questo secondo metodo è che gli strati di vegetazione che sono coperti da alberi più grandi, ovvero il sottobosco, vengono rappresentati in modo migliore rispetto ai dati ottenuti tramite laserscanner (Dorren e Simoni, 2014). Si considera, infatti, come lo strato di sottobosco dominato, generalmente costituito da piante piuttosto piccole, possa svolgere una significativa funzione di protezione, che va a sommarsi a quella già importante fornita dagli alberi del piano dominante.

### 5.2.1.7. SIMULAZIONI CON RETI PARAMASSI

Il software Rockyfor3D prevede anche la possibilità di inserire nella simulazione la presenza di opere di difesa come le reti paramassi, le quali vanno ad integrare il ruolo svolto dal popolamento forestale in siti particolarmente sensibili o dove la foresta per vari motivi risulta carente nella sua struttura.

In questo caso, il modello prevede la creazione di ulteriori 3 raster nella directory di lavoro:

- *net\_number.asc*, numero di reti (dato adimensionale con valori compresi tra 0 e 999);
- *net\_energy.asc*, capacità di assorbimento dell'energia da parte della rete (con valori compresi tra 0 e 20000 kJ);
- *net\_height.asc*, altezza della rete misurata nella direzione perpendicolare alla direzione del pendio (con valori compresi tra 0 e 10 metri).

Anche in questo caso i raster devono avere la stessa dimensione e risoluzione del *dem.asc*.

#### 5.2.1.8. LIMITI DEL MODELLO

Il modello di simulazione Rockyfor3D permette di simulare realisticamente il fenomeno rockfall lungo un versante montano, a patto che vengano tenuti in considerazione i seguenti aspetti:

In primo luogo la RISOLUZIONE dei file raster di input consigliata da manuale deve essere compresa tra una cella 2x2 e una cella 10x10, dove un maggiore dettaglio però non necessariamente si traduce in un miglioramento della bontà della simulazione. Rockyfor3D non è stato infatti realizzato per limitare gli eventuali difetti dei raster di input.

In secondo luogo la conoscenza della MICRO-TOPOGRAFIA del versante in esame. Il DTM deve essere completo e dettagliato anche su piccola scala, altrimenti limita fortemente l'attendibilità delle simulazioni in quanto è proprio la morfologia del suolo con le sue irregolarità a influenzare le dinamiche di caduta del masso.

L'ALTEZZA DEI RIMBALZI varia al decrescere della risoluzione del DTM, si abbassa nelle superfici pianeggianti e, al contrario, aumenta nei versanti più acclivi (Agliardi e Crosta, 2003).

La DISTRIBUZIONE DEGLI IMPATTI è un altro parametro molto importante nella fase di simulazione, la localizzazione spaziale dei massi nelle simulazioni è prossima al dato reale, ma perde di accuratezza in presenza di raster a bassa risoluzione (Stoffel et al., 2006).

Infine un'altra limitazione del modello è legata all'ALTEZZA DEGLI IMPATTI, in quanto il valore medio delle cicatrici lungo il fusto ha scarsa corrispondenza nella realtà, in quanto alcuni individui sono fortemente danneggiati, mentre altri godono di ottima salute. Questo accade soprattutto se la simulazione viene prodotta a partire da DTM di scarsa qualità o risoluzione.

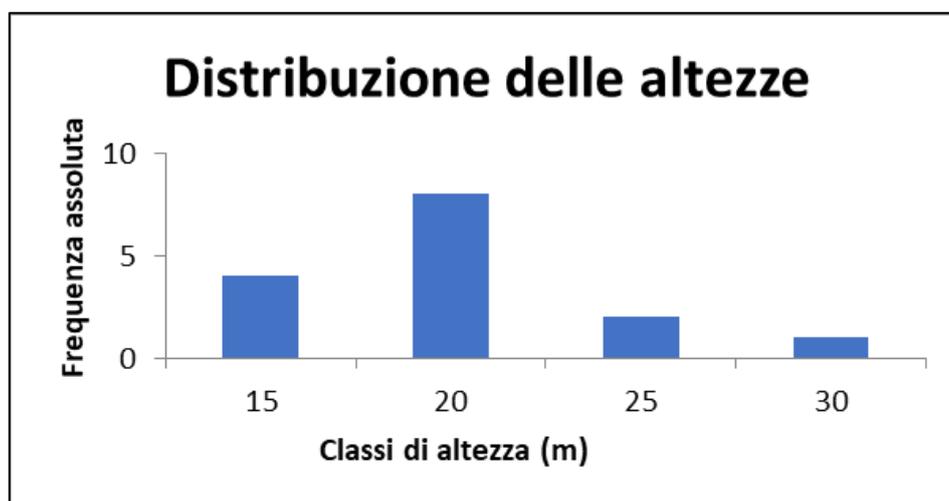
## 6. RISULTATI

I risultati dello studio del versante situato a monte dell'abitato di Col di Rocca ha portato ad una conoscenza approfondita del fenomeno gravitativo di caduta massi che interessa l'area del Ru de Sass Negher. I risultati vengono suddivisi in due componenti: una prima parte relativa all'analisi descrittiva della fascia di versante maggiormente disturbata attraverso la realizzazione di un transetto; una seconda parte inerente alla modellazione del fenomeno su tutta la superficie attraverso il software Rockyfor3D. Quest'ultima parte è comprensiva dei risultati ottenuti dalle indagini di campo volte alla stima dei parametri di input del modello (mediante la realizzazione di aree di saggio, vedi capitolo 5.1.3).

### 6.1 ANALISI DESCRITTIVA

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dalla prima analisi descrittiva del sito, è stato possibile analizzare come si presenta il soprassuolo ed osservare l'impatto del fenomeno di caduta massi sul popolamento forestale all'interno della fascia molto disturbata. All'interno dei transetti di rilievo (descrizione e localizzazione nel capitolo 5.1.2 dei materiali e metodi) sono state raccolte, in primo luogo, alcune informazioni dettagliate utili alla descrizione del popolamento forestale. Di seguito vengono presentate le elaborazioni dei dati raccolti all'interno del transetto.

Uno dei primi parametri misurati è stata l'altezza delle piante per conoscere la distribuzione verticale del popolamento forestale. Il totale delle piante misurate all'interno del transetto è di 18 con un valore minimo di 12 metri ed un valore massimo di 30.1 metri. La figura 37 evidenzia la suddivisione degli individui in classi di altezza.



*Figura 37 Distribuzione in classi delle altezze delle piante presenti all'interno del transetto.*

Il secondo parametro misurato all'interno del transetto è il diametro delle piante, dove per ognuna sono state realizzate due misure: il diametro a petto d'uomo (DPU) misurato a 1,30 dal suolo e il diametro alla base in corrispondenza del suolo. Questo ha permesso dapprima il calcolo dell'area basimetrica in entrambi i casi e successivamente la stima della differenza tra i due valori.

Di seguito viene riportata la distribuzione di frequenza assoluta dei valori di DPU misurato per ogni classe diametrica di ampiezza 5 cm. Come è possibile osservare in Figura 38, le due classi più rappresentate sono quelle del 25 e del 30.

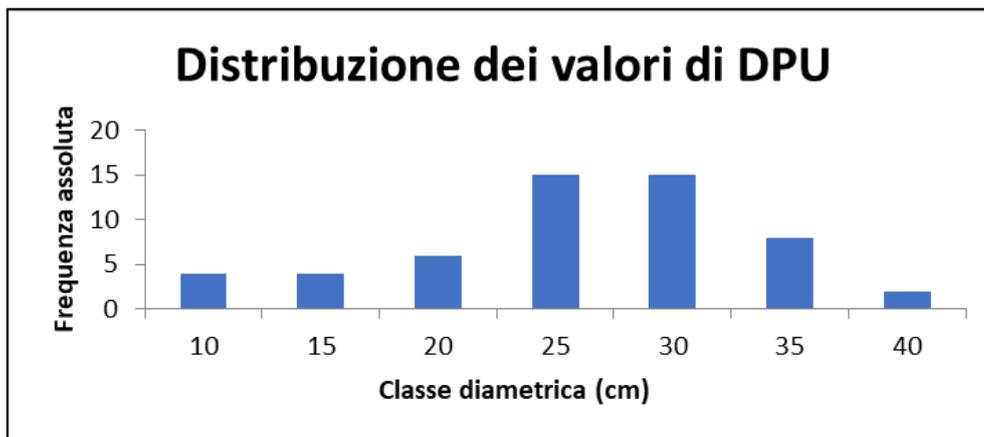


Figura 38 Distribuzione valori di diametro a 1,30 metri misurati all'interno del transetto.

Per quanto riguarda le misure relative ai diametri alla base, sono stati ottenute misure minime pari a 10 cm, massime 48 cm per un valore medio di 30.3 cm. La distribuzione di frequenza ottenuta in questo caso risulta essere rappresentata in Figura 39.

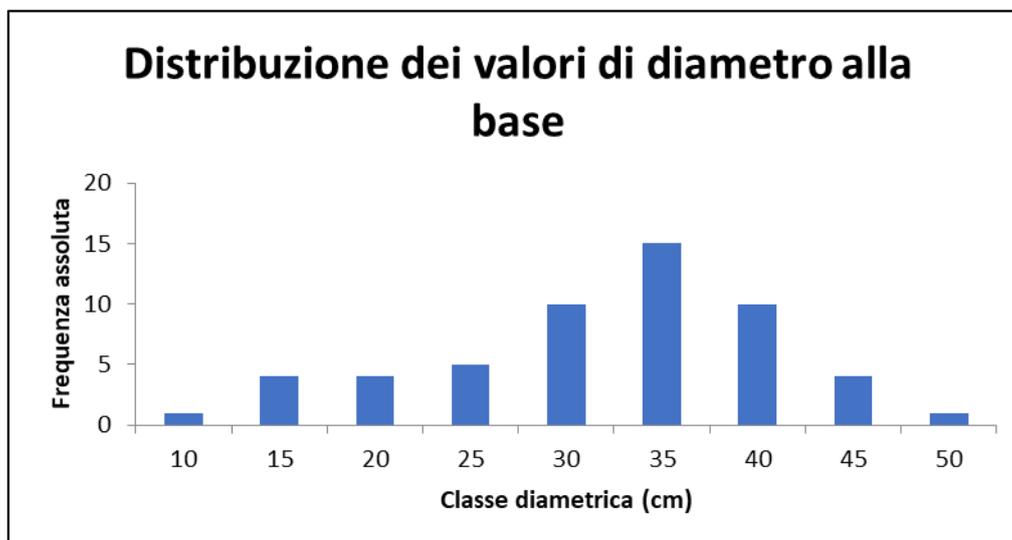


Figura 39 Distribuzione dei valori di diametro misurato alla base della pianta.

Le classi più rappresentative, in questo caso, risultano essere da 30 a 40 cm di diametro. E' stata poi calcolata la variazione di diametro ( $\Delta$ ) tra le due misure per ogni individuo.

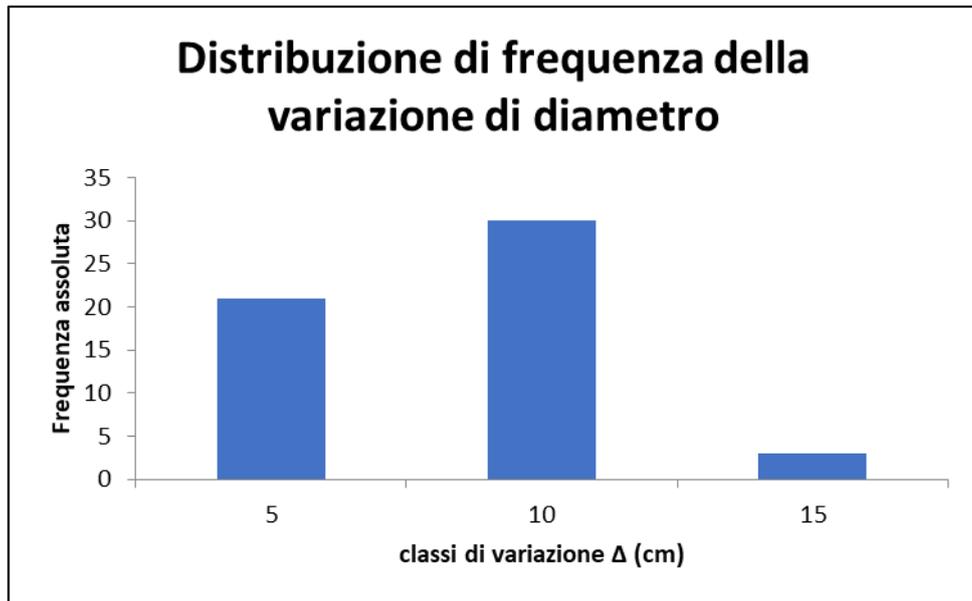


Figura 40 Distribuzione di frequenza della variazione di diametro tra i due valori misurati per ogni pianta.

E' possibile dunque affermare che la variazione più frequente registrata si attesta attorno a 10 cm tra una misura e l'altra.

A partire da questi dati è stato possibile calcolare l'area basimetrica in entrambe le situazioni sopra descritte ottenendo valori utili al confronto del popolamento in esame con altri casi studio.

Per quanto riguarda l'area basimetrica calcolata a petto d'uomo, i valori minimi misurati per una singola pianta sono di 38,48 cm<sup>2</sup>, massimi di 1075,21 cm<sup>2</sup> e medi di 502,33 cm<sup>2</sup>.

Di seguito viene riportato il grafico relativo alla distribuzione del valore di area basimetrica calcolato dove si può notare come la classe maggiormente rappresentata sia quella di 500 cm<sup>2</sup>.

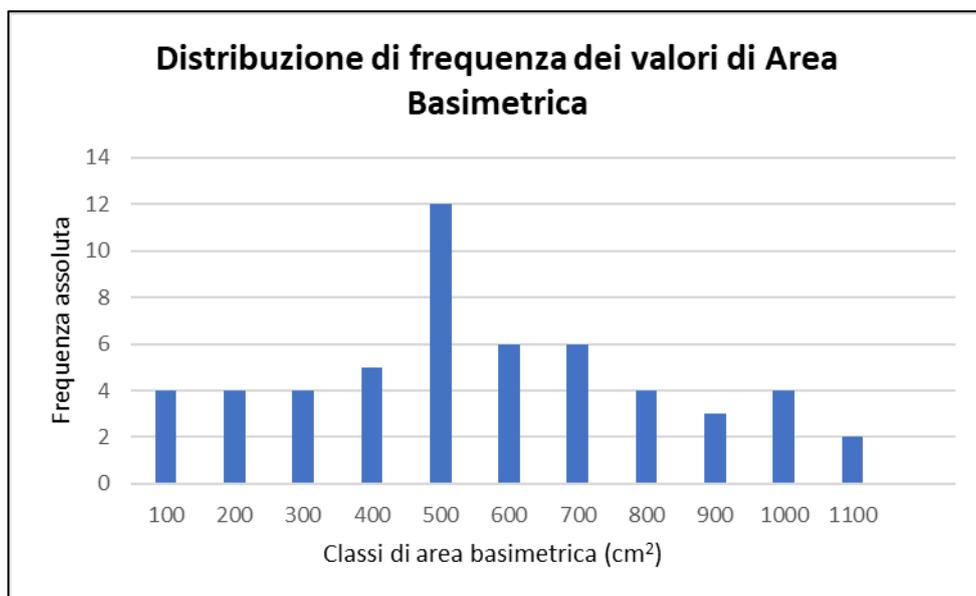


Figura 41 Distribuzione di frequenza dei valori di area basimetrica calcolati ad un'altezza di 1,30 m.

Per quanto riguarda il calcolo dell'area basimetrica alla base della pianta, i valori minimi ottenuti sono stati di 78,54 cm<sup>2</sup>, medi di 74,74 cm<sup>2</sup> e massimi di 1809,56 cm<sup>2</sup>.

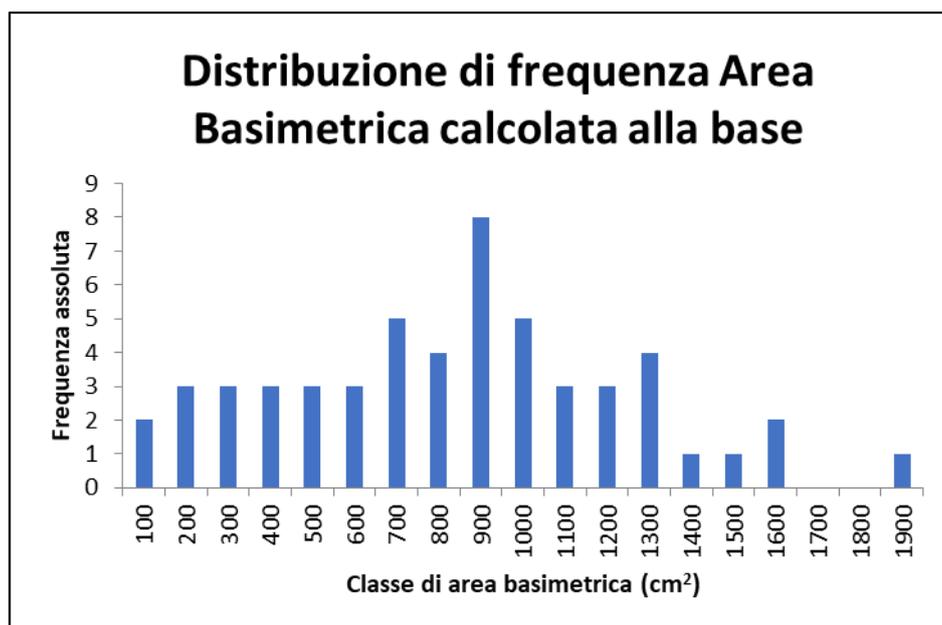


Figura 42 Distribuzione di frequenza dei valori di area basimetrica calcolata alla base della pianta.

Dalla Figura 42 si osserva come la classe più rappresentata sia quella data da valori di area basimetrica intorno a 900 cm<sup>2</sup>.

In seguito l'analisi descrittiva è stata concentrata maggiormente sulla valutazione del popolamento forestale in funzione della protezione dal fenomeno di caduta massi. In primo luogo è stata considerata, e in seguito misurata, la presenza di aperture (*gaps*) tra una pianta e l'altra che permettano il transito del litoide verso valle. E stata dunque misurata la distanza, ponendo l'operatore a monte rivolto verso valle, da una pianta ad un'altra, sia verso destra che verso sinistra. E' stato possibile in questo modo conoscere il valore di distanza media pari a 88.83 cm a destra e 79.49 cm a sinistra, con un valore medio generale tra una pianta e l'altra del popolamento pari a 81.66 cm. Il valore minimo misurato è di 2 cm ed il valore massimo di 400 cm. Di seguito viene riportato il grafico che rappresenta, per ogni pianta le due distanze, una a destra (L1) indicata con il colore azzurro ed una a sinistra indicata con il colore arancio (L2).

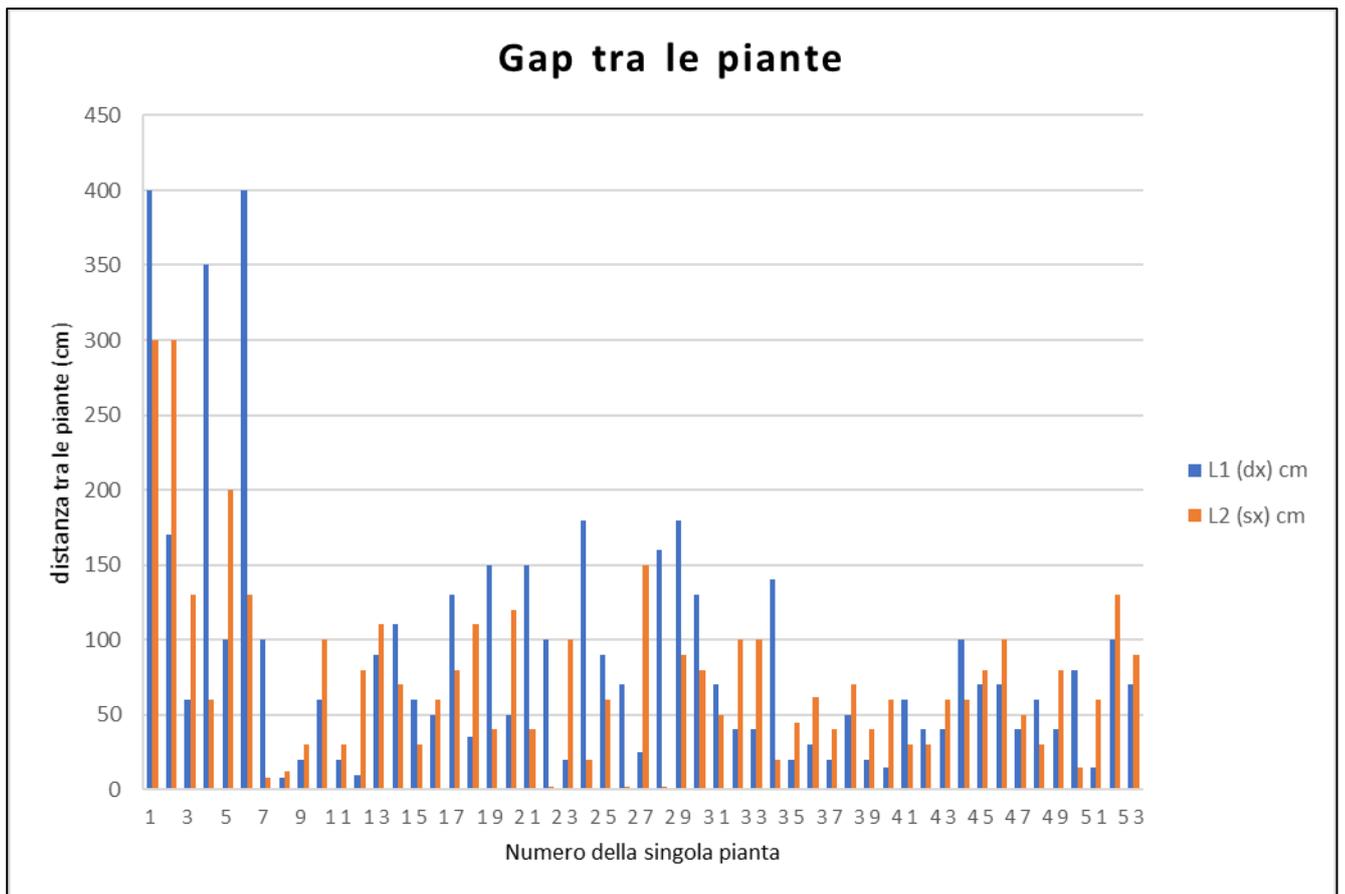


Figura 43 Distribuzione delle distanze misurate da monte tra una pianta e l'altra distinte tra misure a destra e sinistra.

Successivamente la raccolta dati ha riguardato l'analisi degli effetti visibili dovuti al transito di massi nei confronti del popolamento forestale, in primo luogo l'osservazione dell'eventuale presenza di cicatrici sul tronco delle piante dovute all'impatto con il litoide in corsa. Come si può notare dal seguente grafico, la maggior parte delle piante presenti all'interno del transetto presentano delle cicatrici, talvolta anche molto recenti, segnali di un fenomeno attivo. In particolare si osserva come nel 94% dei casi le piante appartenenti al transetto presentino una o più cicatrici.

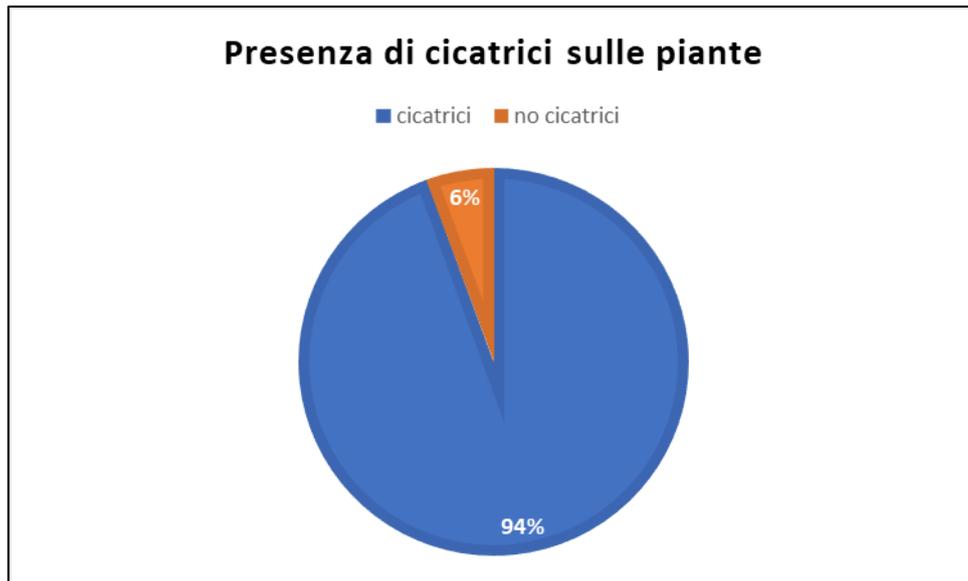


Figura 44 Grafico volto ad evidenziare la notevole presenza di danni (cicatrici) dovuti al verificarsi del fenomeno di caduta massi all'interno del popolamento forestale.

Una volta valutata la presenza di cicatrici, è stato considerato anche il numero di cicatrici che ogni pianta presenta a livello del tronco. Sono stati considerati in questa analisi solamente gli impatti ben visibili e non quelli totalmente cicatrizzati. Il seguente istogramma rappresenta i risultati ottenuti da questo conteggio dove si può notare come la situazione più frequente è quella di una cicatrice per pianta.

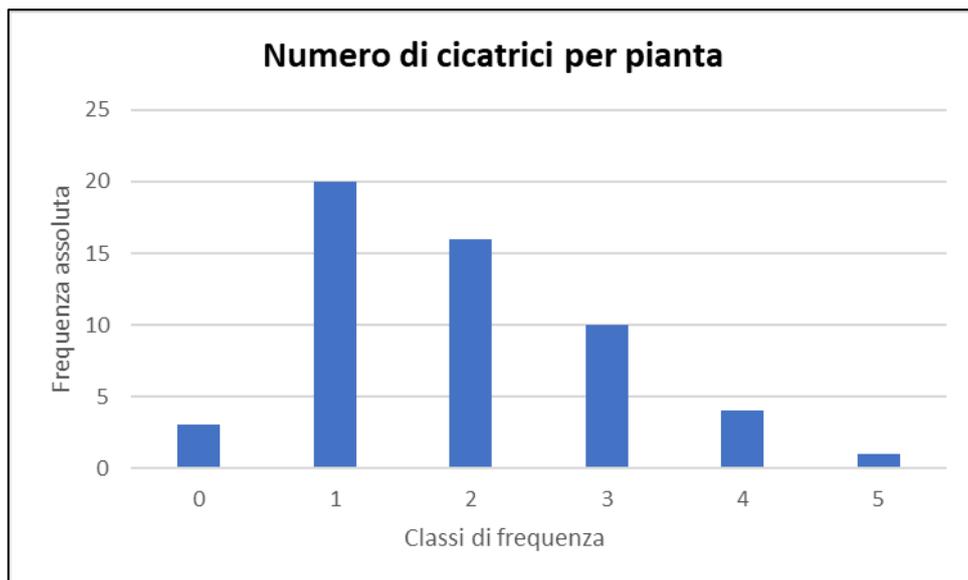


Figura 45 Numero di cicatrici contate per pianta all'interno del transetto.

Successivamente è stato valutato lo stato fitosanitario delle piante presenti all'interno del transetto, i risultati sono riassunti nel grafico sottostante, dove si può vedere come per il 90.7% gli individui si presentano in uno stato fitosanitario buono.

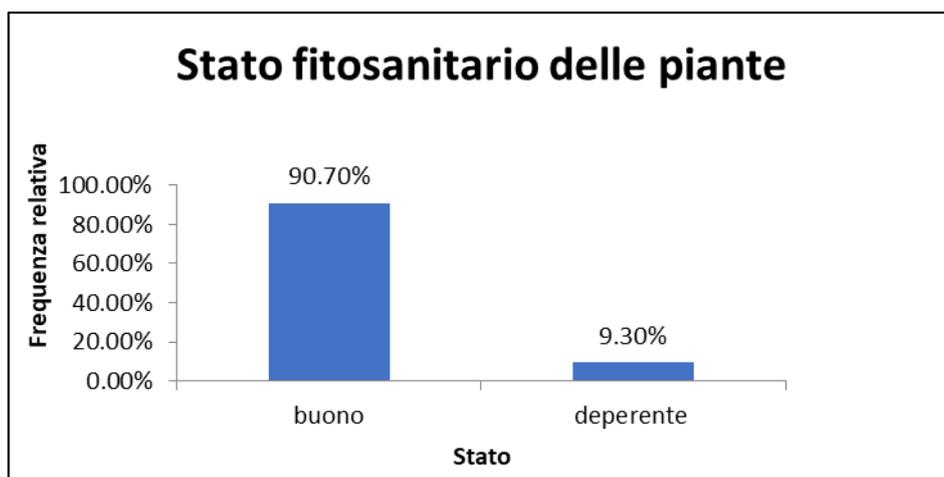


Figura 46 Descrizione dello stato fitosanitario delle piante presenti all'interno del transetto.

Questa condizione è legata al fatto che la maggior parte delle piante presenta una tipologia di danno cicatrizzato (91,26 %), una parte presenta danni parzialmente cicatrizzati (7,77 %), mentre i danni recenti riscontrati nell'area del transetto risultano essere minimi (0,97%).

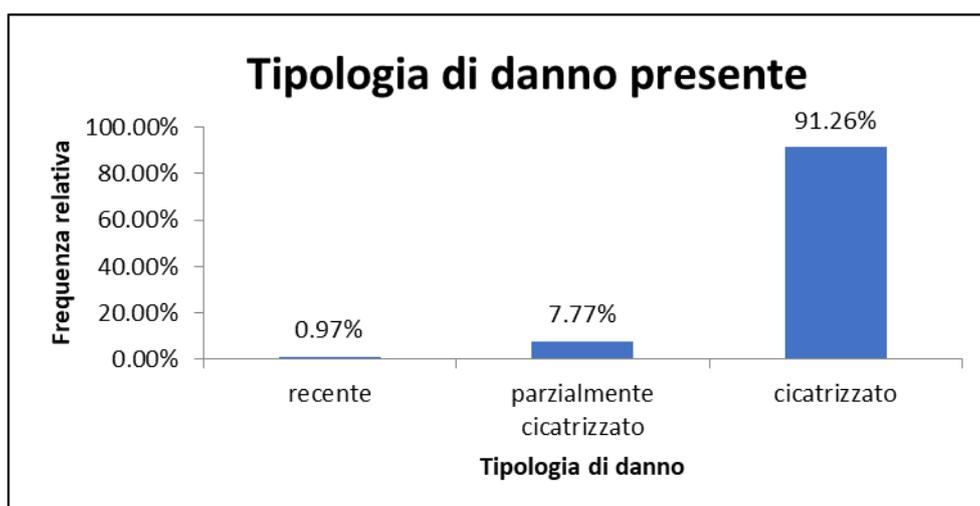


Figura 47 Descrizione della tipologia di danno legato alle cicatrici presenti sul tronco delle piante all'interno del transetto.

Per quanto riguarda la posizione delle cicatrici su tronco delle piante presenti all'interno del transetto, sono state distinte tre diverse categorie, posizione frontale, laterale e di striscio. E' stato osservato come il 57,28% degli impatti risulta essere frontale, il 35,92% laterale e solo il 6,80% di striscio.

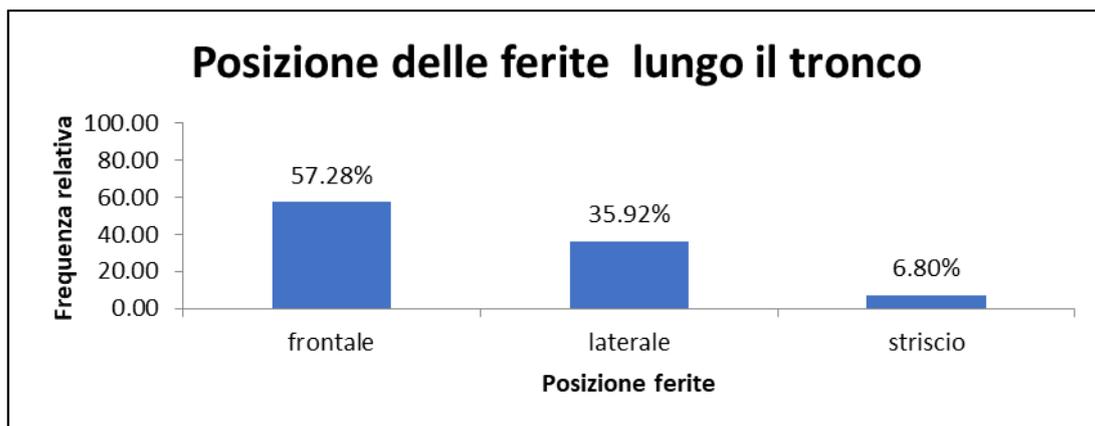


Figura 48 Distribuzione di frequenza relativa della posizione delle ferite sul tronco degli individui presenti all'interno del transetto.

E 'seguita poi la misura dell'altezza delle cicatrici sul tronco dalla base a livello del suolo, utile a determinare la dinamica del litoide nel suo movimento gravitativo. Si osserva come i valori di altezza risultino molto vari come si può notare dalla Figura 49.

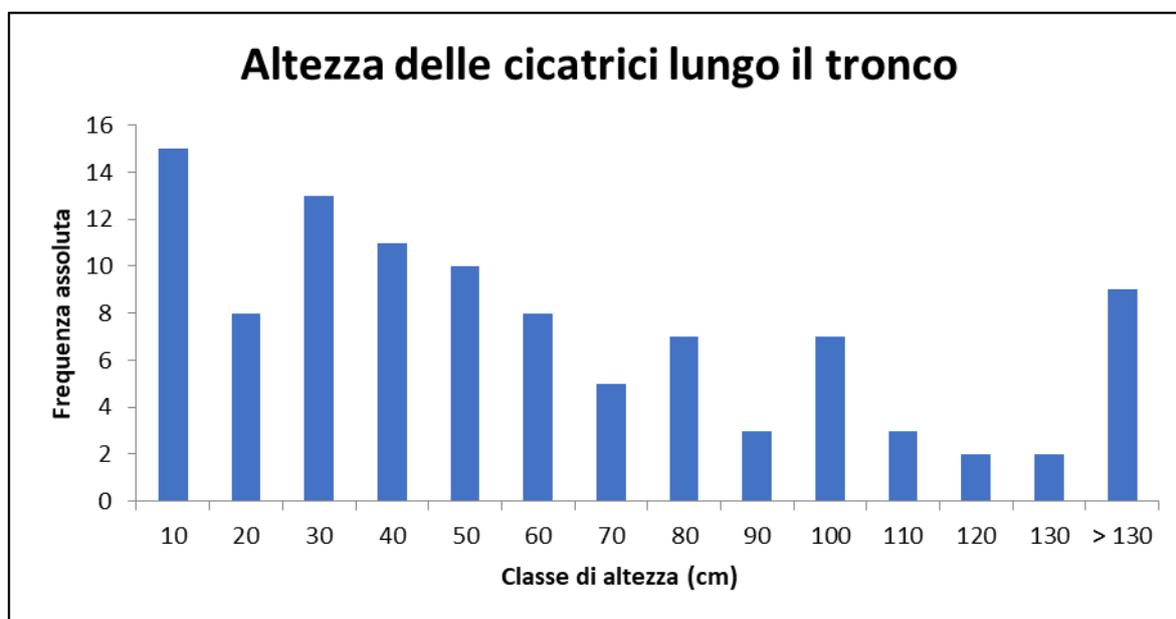


Figura 49 Distribuzione di frequenza delle altezze delle cicatrici da terra.

L'analisi successiva ha portato alla valutazione della forma delle cicatrici presenti sulle piante, dove il 45% risulta essere di forma ellittica, mentre il 29% invece è tonda.

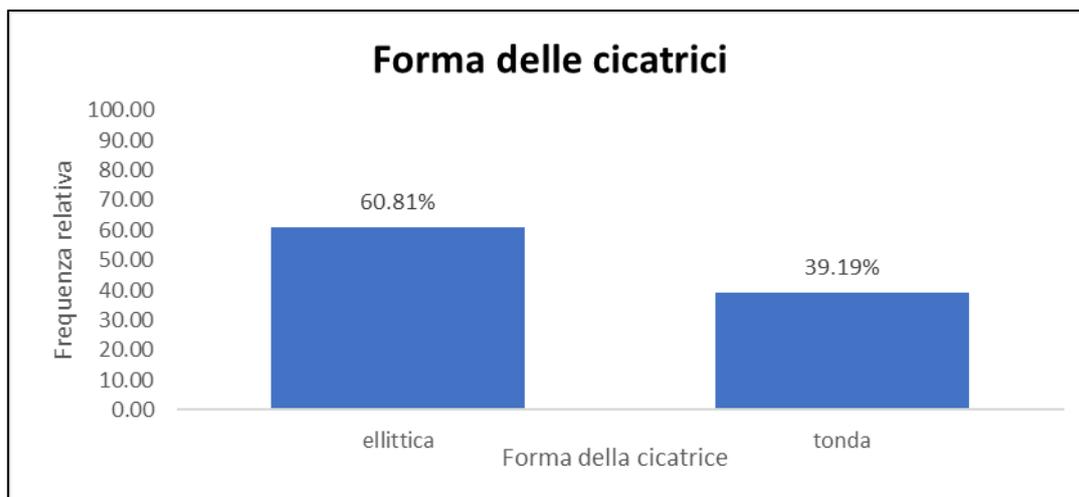


Figura 50 Distribuzione percentuale della forma delle cicatrici sulle piante all'interno del transetto.

In seguito si è proceduto misurando base, altezza ed area di questi impatti. Per quanto riguarda la base, il valore di larghezza più frequente risulta essere intorno a 10 cm, valori minimi 5 e massimi 35 cm. Anche per quanto riguarda l'altezza, i valori risultano essere dello stesso ordine di grandezza, con valori predominanti di 10 e 15 cm.

I grafici sottostanti riportano i risultati ottenuti.

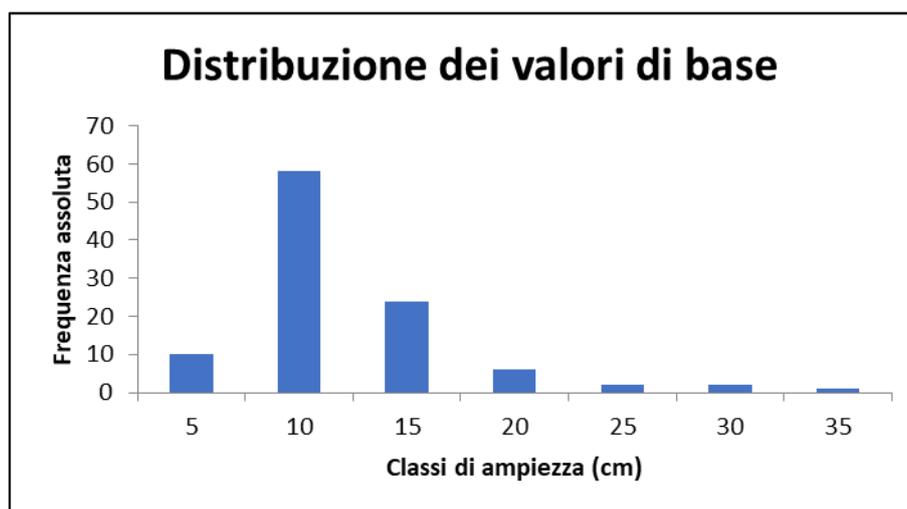


Figura 51 Distribuzione dei valori di base delle cicatrici presenti sulle piante all'interno del transetto.

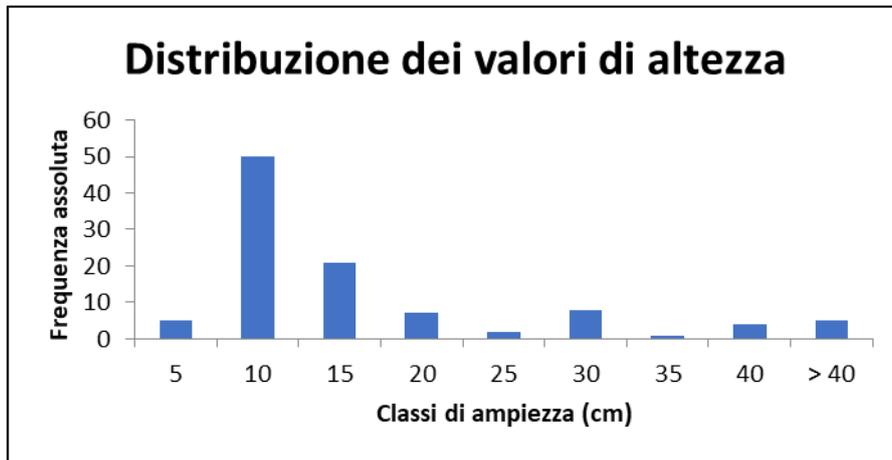


Figura 52 Distribuzione dei valori di altezza delle cicatrici presenti sulle piante all'interno del transetto.

A partire da queste misure è stato possibile calcolare anche la superficie interessata dalle cicatrici, i cui valori sia relativi che cumulati vengono evidenziati nelle seguenti figure.

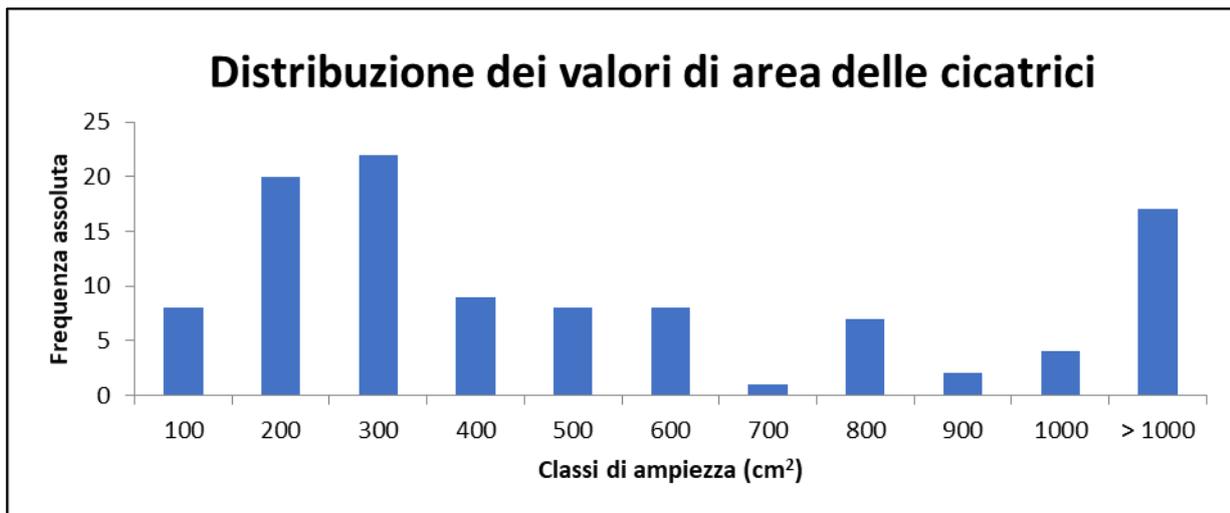


Figura 53 Distribuzione di frequenza dell'area interessata dalle cicatrici sulle piante del transetto.

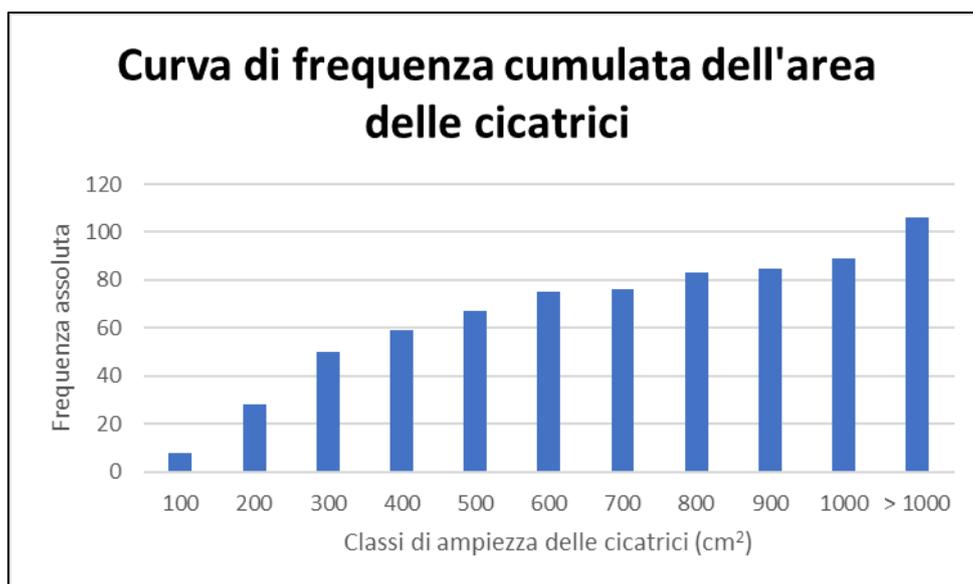


Figura 54 Curva di frequenza cumulata dei valori di superficie interessata dalle cicatrici.

Infine, l'ultimo parametro valutato da questa analisi descrittiva del transetto riguarda la presenza e le caratteristiche dei massi alla base delle piante. E' stato riscontrato come nel 63% dei casi si trovano uno o più massi di diverse dimensioni la cui presenza è direttamente collegata ai danni da impatto che si possono osservare sul tronco come è possibile notare nel grafico sotto riportato.

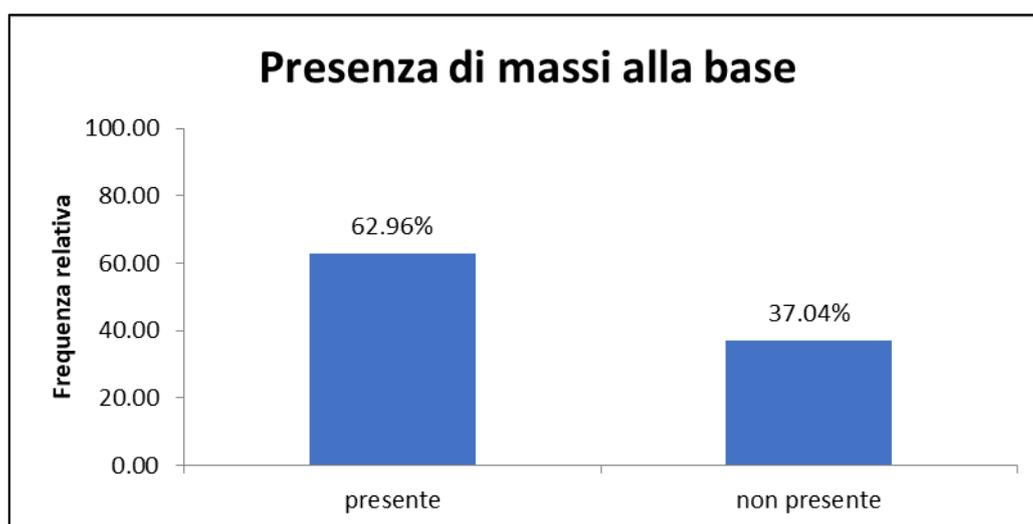


Figura 55 Descrizione della presenza o meno di massi alla base della pianta analizzata all'interno del transetto.

Una volta rilevata la presenza del masso, è stato possibile misurare i tre diametri principali: maggiore, intermedio e minore. Per quanto riguarda il diametro intermedio, è stata calcolata sia la distribuzione di frequenza relativa, sia cumulata come evidenziato nelle Figure seguenti (con valori espressi in cm).

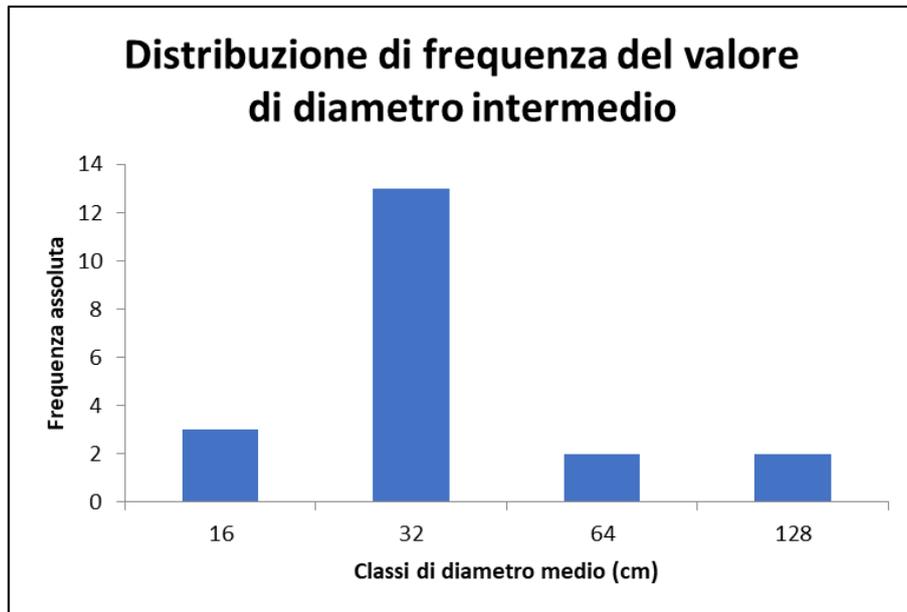


Figura 56 Distribuzione di frequenza relativa dei valori di diametro intermedio rilevati nei massi alla base delle piante.

Come si vede dal grafico, il valore di diametro intermedio più frequente appartiene alla classe dei 32 cm.

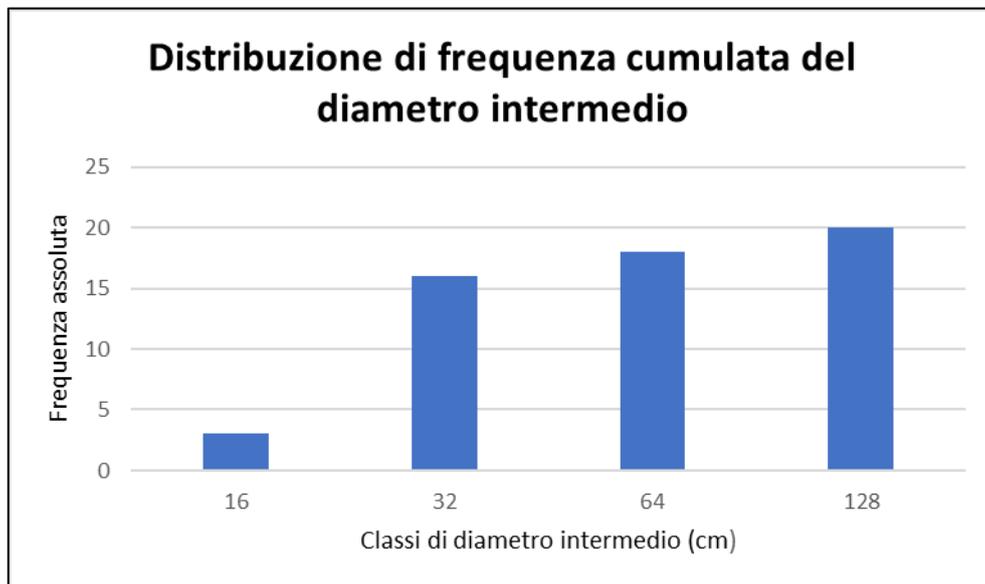


Figura 57 Distribuzione di frequenza cumulata del diametro intermedio dei massi alla base delle piante.

Per quanto riguarda gli altri due diametri maggiore e minore, sono stati realizzati i grafici relativi alla loro distribuzione di frequenza relativa.

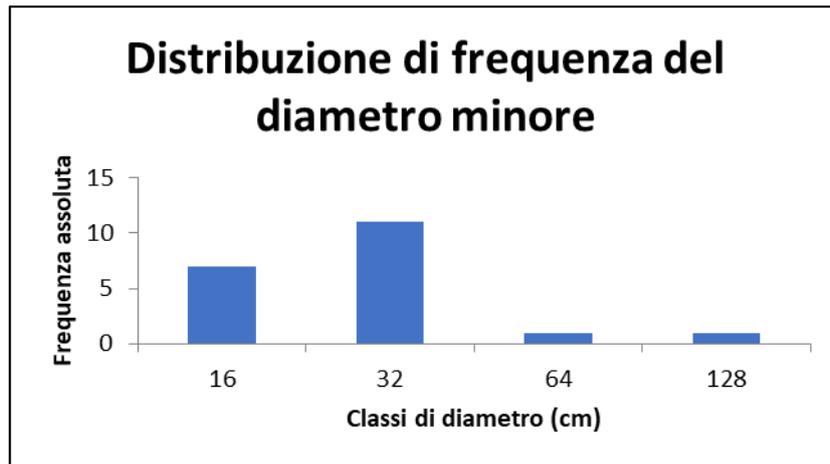


Figura 58 Distribuzione di frequenza relativa dei valori di diametro minore dei massi alla base delle piante.

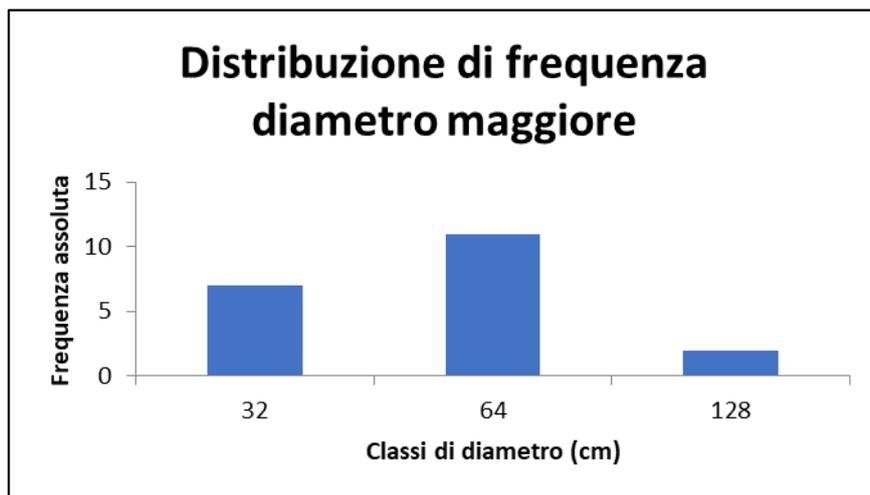
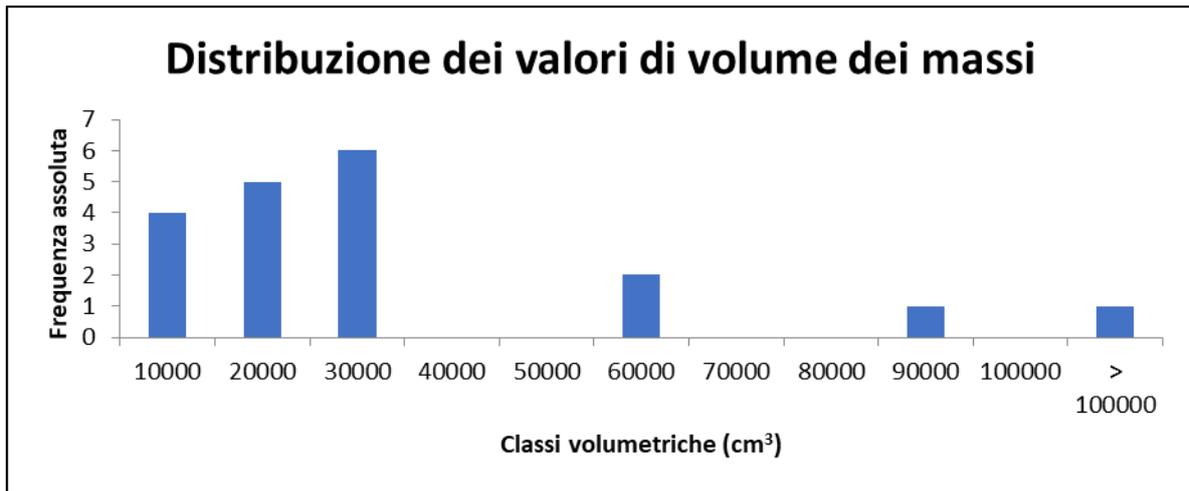


Figura 59 Distribuzione di frequenza del diametro maggiore dei massi alla base delle piante.

I valori minimi più frequenti appartengono alla classe del 32, mentre i valori massimi alla classe superiore del 64. Una volta raccolti questi dati è stato possibile calcolare il volume dei massi alla base delle piante presenti nel transetto ed esprimerne la sua distribuzione con il grafico sottostante.

Dall'osservazione di questo grafico emerge come il volume dei massi sia inferiore a  $30000 \text{ cm}^3$  per una buona parte dei casi, talvolta sono stati però osservati anche massi di volumi molto maggiori, anche di due o tre volte il primo caso.



*Figura 60 Distribuzione dei valori di volume calcolati dei massi alla base delle piante.*

## 6.2. MODELLAZIONE NUMERICA

### 6.2.1 AREE DI SAGGIO PER LA STIMA DEI PARAMETRI DI INPUT

La fase di raccolta dati per la modellazione del fenomeno di caduta massi ha previsto la compilazione dell'apposita scheda prevista per l'applicazione del software Rockyfor3D all'interno della quale sono state compilate anche le voci relative ad informazioni aggiuntive non richieste prettamente dal modello.

Sono state realizzate 8 aree di saggio di cui la metà di esse in zona di transito del fenomeno e la rimanente parte nella zona di deposito. Per quanto riguarda la forma prevalente del masso più rappresentativo dell'area, in generale sono state individuati massi dalla forma parallelepipedica, ellissoidale e discoidale. Il grafico sottostante mette in relazione la forma del masso con la distanza dalla zona sorgente.

La forma dei blocchi viene distinta in:

1. Parallelepipedo;
2. Ellissoidale;
3. Discoidale.

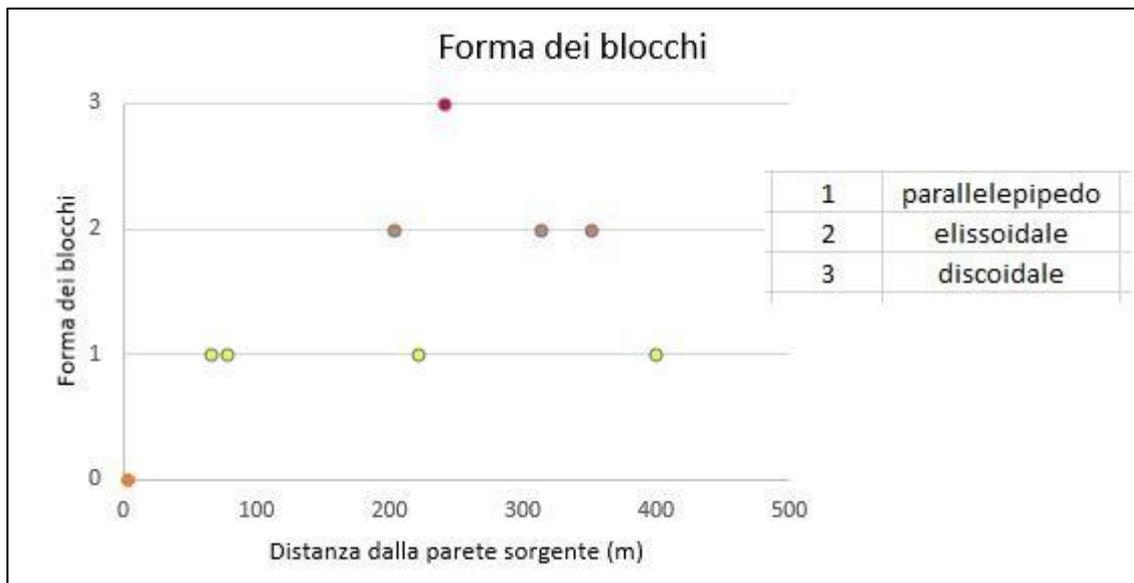


Figura 61 Forma dei massi più rappresentativi dell'area di saggio in funzione della distanza dalla parete sorgente.

In figura 61 si osserva come generalmente i blocchi ad una distanza inferiore dalla parete sorgente presentano una forma più spigolosa come può essere il parallelepipedo, mentre man mano che aumenta la distanza dal punto di innesco del fenomeno, il blocco più rappresentativo presenta una forma più arrotondata come per esempio ellissoidale o discoidale.

Per quanto riguarda la scabrezza del soprassuolo lungo il versante in esame, oltre alle piante in piedi che costituiscono il popolamento forestale, si nota anche la presenza di necromassa a terra descritta nella scheda del modello Rockyfor3D come *Lying Tree Stems* della quale sono state misurate l'altezza media e l'area media coperta.

L'altezza media risulta avere valori maggiori in caso di distanza inferiore a 250 metri dalla zona sorgente, viceversa i valori diminuiscono se la distanza è maggiore. Nel primo caso, cioè in prossimità del punto di innesco, la necromassa è costituita talvolta anche da tronchi, mentre, nel secondo caso, la necromassa si presenta principalmente sotto forma di ramaglie o piccoli tronchi ormai in fase di decomposizione.

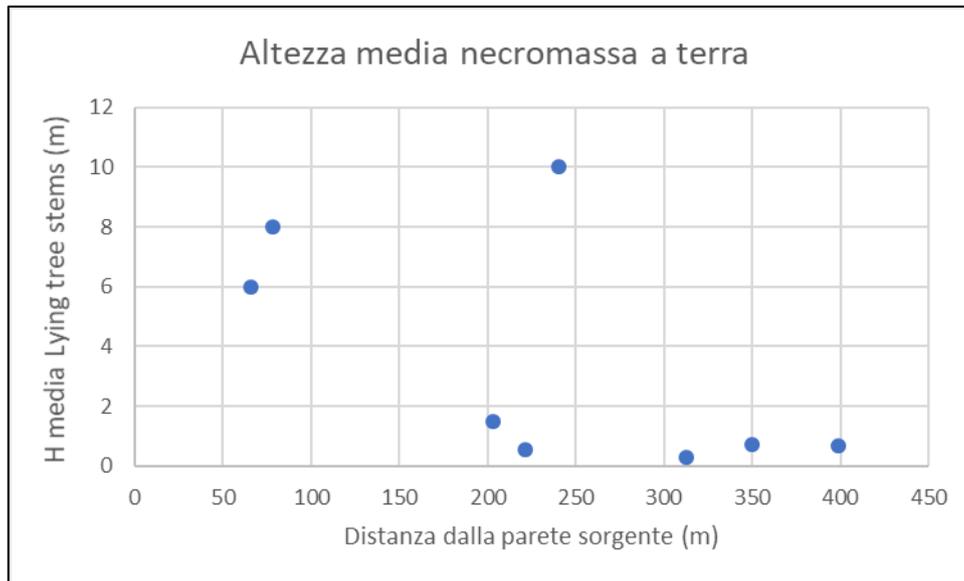


Figura 62 Altezza media della necromassa presente a terra in funzione della distanza dalla zona sorgente.

Allo stesso modo i valori medi di area coperta dalla necromassa nelle diverse aree di saggio sono stati calcolati e rappresentati nel grafico seguente rapportandoli alla distanza dalla zona sorgente.

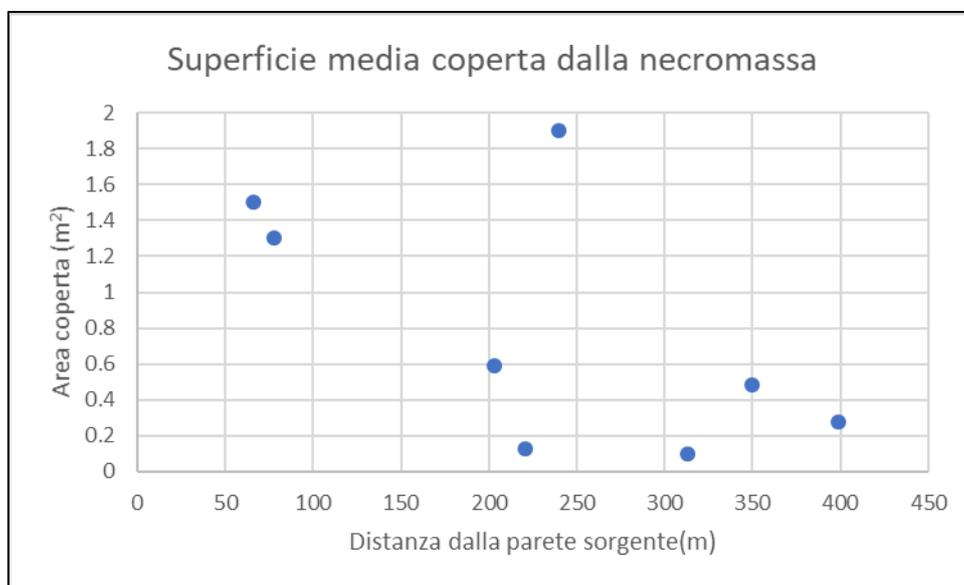


Figura 63 Area media coperta dalla necromassa per ogni area di saggio in funzione della distanza dalle aree sorgente.

Si osserva la presenza di una maggiore superficie coperta dalla necromassa ad una distanza inferiore ai 250 metri dalla zona sorgente, elemento importante ai fini dell'aumento della scabrezza del suolo. Per quanto riguarda il popolamento forestale in piedi, oltre ai parametri utili alla creazione dei file necessari alla modellazione, sono stati rilevati i valori di altezza media delle piante più grandi il cui valore minimo è di 13 metri ed il massimo di 24,1 m.

Per quanto riguarda le ferite presenti sui tronchi all'interno delle aree di saggio, generalmente le piante presentano una o due cicatrici ben visibili, a parte due casi: il primo riguarda l'area di saggio n.7 in quanto risulta essere la più distante dalle zone sorgente; il secondo caso riguarda, al contrario, gli

individui presenti nell'area di saggio n.2 che si trova a distanza limitata dalle zone sorgente, dove invece, gli individui presentano spesso impatti multipli.

L'altezza media degli impatti da terra in tutte le aree di saggio è di 0,83 m con valori medi massimi di 1,2 m nelle aree di saggio a quote più alte, mentre valori medi minimi di 0,35 m nelle aree di saggio a quote più basse, dunque più distanti dalle zone sorgente. Per quanto riguarda a profondità media delle cicatrici essa presenta valori di circa 1 cm in tutte le aree di saggio. Il diametro medio dei blocchi che recentemente si sono depositati nell'area di saggio a seguito del fenomeno di caduta massi è 0,25 m.

Un ulteriore approfondimento è stato condotto per quanto riguarda la rinnovazione, in quanto essa risulta presente in condizioni molto diverse tra le varie aree di saggio.

- Nella fascia più alta del popolamento forestale, dove è evidente la maggiore presenza di ceduo rispetto alla fustaia, si notano molti polloni anche di piccole dimensioni con una buona capacità di trattenuta di piccoli massi in corrispondenza della ceppaia. La rinnovazione di abete rosso in questa fascia risulta essere pressoché assente.

- Spostandosi verso valle, si osserva all'interno del popolamento la presenza di buche, dalla forma generalmente ellittica, all'interno delle quali si trova della rinnovazione di abete rosso soprattutto in corrispondenza di necromassa. Questi depositi sono stati costituiti sia naturalmente, a causa degli schianti, che artificialmente, in quanto si osservano dei tagli effettuati in passato con finalità di alleggerimento del versante.

- Nella fascia alla quota più bassa la situazione per quanto riguarda la rinnovazione risulta essere ancora diversa dalle precedenti, il suolo è completamente ricoperto di muschio e ramaglie, a questo livello gli eventi di caduta massi non si sono verificati di recente.

La rinnovazione è scarsa di faggio, ma soprattutto di abete rosso e si trova in posizioni riparate su grandi massi, o in corrispondenza di ramaglie.

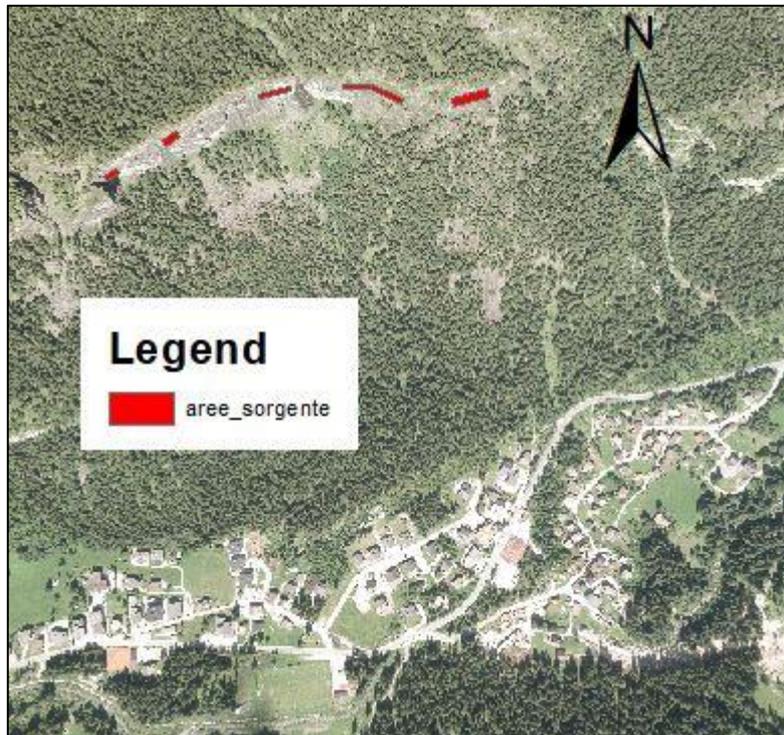
## 6.2.2 SELEZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT

Per ottenere file raster di input che siano adeguati alla realtà nella quale si verifica il fenomeno, è di fondamentale importanza la taratura dei parametri i quali vengono determinati a partire dai rilievi di campo. Al termine di questa fase saranno ottenute 10 mappe raster nel caso più semplice senza effetto rilevante della vegetazione, mentre il numero dei file aumenta in caso di simulazioni con foresta o reti paramassi che aumentano l'effetto dissipativo del fenomeno e ne modificano ulteriormente la dinamica. I parametri e le metodologie per determinarli vengono di seguito elencati:

## - AREE SORGENTE

Questa prima determinazione richiede un'analisi approfondita del territorio nel quale si va ad operare, sia dal punto di vista geologico che geomorfologico del versante. Inoltre deve essere valutata anche la presenza di elementi esterni che potrebbero determinare il distacco.

Ci sono diversi metodi per la determinazione delle aree sorgente tra cui il metodo di Barton (1978) che prevede la definizione delle aree sorgente in base a valori di pendenza posseduti dalla cella confrontata con degli appositi valori soglia in funzione della risoluzione del file e della geologia del sito. In questo caso, invece, la definizione delle zone sorgente è avvenuta nella fase del rilievo preliminare percorrendo diagonalmente tutto il versante ed osservando i punti maggiormente sensibili al fenomeno anche grazie a depositi più o meno recenti presenti in loco. I dati di letteratura confermano infatti che gli output del modello migliorano considerevolmente se le aree sorgente di caduta massi (come ad esempio le piccole sporgenze di roccia) e le sorgenti attive vengono identificate manualmente, rispetto a dati recuperati impiegando il gradiente medio di pendenza come valore soglia (Corona et al., 2013). Questa operazione è stata poi validata anche tramite il supporto delle ortofoto in fase di definizione con software gis.



*Figura 64 Localizzazione delle aree sorgente del disturbo.*

#### - PESO SPECIFICO DEL MASSO

Un altro parametro molto importante ai fini della simulazione è il peso specifico/densità del litoide in corsa. Questo è stato definito mediante la raccolta di alcuni campioni di roccia in loco e successive prove di laboratorio. I frammenti di roccia raccolti sono risultati particolarmente alterati e deteriorati ad opera degli agenti atmosferici. Per conoscere il valore medio del peso specifico dei massi che potrebbero originare un evento, sono stati individuati alcuni frammenti rappresentativi delle rocce presenti lungo il versante e sono stati pesati. Successivamente questi ultimi sono stati immersi all'interno di un cilindro graduato riempito d'acqua con volume noto. A seguito della misura del nuovo livello raggiunto dall'acqua all'interno del cilindro, è stato possibile eseguire la differenza e, in seguito, rapportando questo valore con il peso, trovare il peso specifico.

Sono state effettuate diverse prove, fino ad ottenere il valore medio di  $2.650 \text{ kg/m}^3$  (sistema internazionale kg massa) che risulta essere uno dei parametri di input del modello.

#### - DIMENSIONI DEI MASSI

Questo parametro è legato alle tre dimensioni del masso più rappresentativo presente all'interno dell'area di saggio di raggio 10 metri. E' stato individuato il litoide che presenta caratteristiche medie del quale sono state misurate le 3 dimensioni.

La tabella di seguito riporta i valori ottenuti per ogni area di saggio.

N° POLIGONO	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)
1	1.70	1.40	0.60
2	4.50	2.60	5.00
3	1.46	0.95	4.00
4	2.20	1.45	2.00
5	0.50	0.45	0.21
6	2.00	1.40	1.10
7	1.80	1.35	0.80
8	2.20	1.40	0.50

*Tabella 8 Tre diametri del masso più rappresentativo dell'area di saggio.*

Viene inserito anch'esso nella formazione dei raster di input.

#### - FORMA DEL BLOCCO IN ROCCIA

Nella fase di realizzazione delle aree di saggio in campo è stato possibile definire anche questo parametro relativo alla forma prevalente dei frammenti litoidi presenti nell'area, la quale va poi ad influire sulla tipologia di movimento gravitativo verso valle.

#### - TIPOLOGIA DI SUOLO

Nella fase di realizzazione delle aree di saggio è stato possibile anche definire la tipologia di suolo dal confronto con il manuale del modello Rockyfor3D secondo il quale sono previste 8 categorie. In questo sito di studio le tipologie rappresentate sono le seguenti:

-4: detrito di versante con diametro > 10 cm, oppure suolo compatto con grandi massi i cui valori di  $R_n$  medio è 0,38 all'interno di un più ampio intervallo di valori compresi tra 0,34 e 0,42.

-6: substrato roccioso con  $R_n$  medio pari a 0,53 nell'intervallo di valori 0,48 - 0,58.

-7: strade asfaltate con  $R_n$  medio pari a 0,35 nell'intervallo di valori 0,32 - 0,39.

Valori che poi verranno inseriti sotto forma di codice nel raster della tipologia di suolo.

- ALTEZZA IN METRI DI UN OSTACOLO RAPPRESENTATIVO- PARAMETRO MOH

Il valore di scabrezza del suolo è un parametro molto delicato da definire, ma determinante ai fini della modellazione. Si compone di 3 valori (viene prodotto un raster per ogni valore) di altezza dell'ostacolo che un masso incontra rispettivamente nel 10 %, 20% e 70% dei casi, durante un rimbalzo nel poligono definito. Nella fase di raccolta dati in campo sono stati definiti questi valori analizzando l'area di saggio da monte verso valle, misurando le altezze degli ostacoli e assegnandogli una percentuale di copertura.

In aggiunta a questi parametri di base sempre presenti in ogni simulazione, vengono poi aggiunti degli altri valori relativi alle caratteristiche del soprassuolo nel caso in cui la simulazione tenga conto dell'effetto dissipativo della foresta.

Tra le due opzioni per la stima del soprassuolo forestale, in questo caso è stato scelto di rappresentare la vegetazione secondo valori medi misurati in campo tramite la realizzazione di aree di saggio e poi riportati all'ettaro.

Si ottengono in questo modo i parametri utili a realizzare 4 mappe raster che permettono di descrivere le condizioni medie del popolamento forestale in esame:

- NUMERO DI PIANTE

Questo parametro è molto importante poiché descrive il numero di alberi ad ettaro all'interno di ogni cella. Il valore viene espresso in  $ha^{-1}$ . In questo caso sono state calcolate le piante presenti all'interno di ogni area di saggio e poi il valore ottenuto è stato rapportato all'ettaro.

- DBH MEDIO

Il valore medio del diametro a petto d'uomo (DBH) si riferisce ad ogni singola cella con valori espressi in cm. Il dato è stato determinato nella fase di raccolta dati in campo, dove è stato stimato il valore medio della singola area di saggio. I valori ottenuti in questo caso sono compresi tra 20 e 35 cm.

- DEVIAZIONE STANDARD DEL DBH

Dato calcolato a seguito dei rilievi di campo, che ha portato alla stima della deviazione standard di DBH all'interno di ogni cella con valori sempre espressi in cm. In questo caso i valori di deviazione standard sono inferiori a 20 cm.

#### - PERCENTUALE DI CONIFERE

Questo parametro si riferisce alla percentuale media di presenza di conifere contenute all'interno di una cella, viene definito in fase di campionamento considerando le conifere presenti nell'area di saggio. E' importante conoscere questo valore perché il modello attribuisce un peso maggiore alla capacità di dissipazione dell'energia delle conifere rispetto alle latifoglie. I valori ottenuti nel sito caso di studio si attestano, nella parte alta, a valori non superiori al 50%, mentre nella fascia a quota minore i valori superano l'80%.

Altri parametri di input selezionabili direttamente nell'interfaccia grafica (GUI) principale del programma permettono di tener conto della variabilità e della componente casuale del disturbo e sono:

#### -NUMERO DI SIMULAZIONI

L'affidabilità dei risultati di un'analisi probabilistica di caduta massi dipende principalmente, al di sopra di tutti gli altri fattori, dal numero delle simulazioni delle traiettorie dei massi lungo il versante (Netti et al., 2016). La scelta del numero di simulazioni da effettuare è dunque molto importante, in quanto influenza i risultati finali della modellazione poiché maggiori simulazioni vengono effettuate maggiori sono gli scenari di rischio possibili che vengono presi in considerazione. Si tratta in particolare del numero di traiettorie indipendenti dei singoli massi simulate per ogni cella sorgente (Dorren e Simoni, 2014).

Nel caso del Ru de Sass Negher il numero di simulazioni utilizzato per ogni scenario è di 5000 in quanto, da un'analisi di sensitività preliminare si è osservato che i risultati della simulazione non cambiavano per valori più alti. Inoltre, il valore identificato è in linea con valori trovati in letteratura e consentendo di simulare 355000 massi per scenario, considerando che il numero delle celle sorgente è di 71.

#### -VARIAZIONI DI VOLUME DEI BLOCCHI DI ROCCIA

Si tratta della percentuale con cui le tre dimensioni del blocco saranno variate in modo casuale durante la simulazione di ogni singola traiettoria (Dorren e Simoni, 2014).

La scelta di questo parametro, che può essere compreso tra +/- 0% e +/- 50%, tiene conto della variabilità dei parametri inseriti. Spesso, la scelta di questo valore è legata al diametro medio dei massi presenti in loco dovuti ad un evento ed al tempo intercorso dall'ultimo fenomeno di rockfall che si è verificato nella zona, come presente nello studio di Corona et al, 2013.

In questo caso, il valore della variazione del volume dei blocchi di roccia scelto è stato pari a +/- 20% in quanto i blocchi campionati risultano essere sufficientemente rappresentativi delle dimensioni dei massi che potrebbero interessare un possibile evento di rockfall. E' stato scelto un valore intermedio di variazione di volume per simulare il fenomeno in modo cautelativo.

#### -ALTEZZA DI CADUTA ADDIZIONALE INIZIALE

Altro parametro importante riguarda l'impostazione di un valore di altezza di caduta iniziale, che si riferisce all'altezza in metri sopra la superficie del DEM da cui verrà rilasciato il blocco nell'istante iniziale.

Questo parametro viene impostato di default dal modello pari a 0, in questo caso il valore viene mantenuto tale in quanto la quota delle zone di caduta iniziale viene fornita direttamente dal modello digitale del terreno input del modello.

#### -PRESENZA O ASSENZA DI BOSCO

Questo parametro deve essere indicato nell'interfaccia, in caso affermativo vanno inseriti nella simulazione i file raster prodotti precedentemente relativi alle caratteristiche del soprassuolo forestale.

#### -PRESENZA O ASSENZA DI RETI PARAMASSI O BARRIERE DI CALCOLO

Parametro che deve essere indicato nell'interfaccia accompagnato dagli appositi dati di input.

#### -PARAMETRI INIZIALI FISSATI DAL MODELLO ROCKYFOR3D

Questi due parametri sono riferiti a valori di velocità quali:

- velocità iniziale orizzontale pari a  $0,5 \text{ m/s}^2$

- velocità iniziale verticale pari a  $-0,5 \text{ m/s}^2$ , quest'ultima può essere aumentata con l'incremento dell'altezza iniziale di caduta.

### 6.2.3 SCENARI IPOTIZZATI

Le modellazioni sono state realizzate ipotizzando diversi scenari volti a descrivere alcuni aspetti riguardanti il movimento gravitativo dei massi lungo il versante del Ru de Sass Negher. Innanzitutto, sono state realizzate delle prove di simulazione preliminari volte a valutare le diverse condizioni nelle quali si presenta il fenomeno di *rockfall* e per individuare i parametri di input più adeguati alla modellazione del fenomeno, verificando l'affidabilità dei dati raccolti in campo.

Per quanto riguarda la risoluzione, le prove sono state realizzate con i file a 5 metri disponibili per quest'area.

Le diverse prove hanno previsto la contemporanea attività di distacco di tutte le 5 aree sorgente (Figura 30).

E' stata prestata particolare attenzione alle tre dimensioni dei blocchi e sono stati scelti i dati dei massi campionati nelle aree di saggio corrispondenti alla fascia più bassa del versante. A questo livello i massi presentano dimensioni inferiori rispetto a quelli misurati ai piedi delle zone sorgente, ma risultano descrivere in modo più corretto le dimensioni dei massi che raggiungono il fondovalle del

versante. Questa scelta è legata al fatto che il modello non tiene sufficientemente conto della naturale disgregazione dei frammenti litoidi in corsa, che, soprattutto nel sito caso di studio, a causa della geologia dei blocchi, risulta essere molto frequente, come è stato riscontrato con il rilievo di campo. Per ottenere una corretta valutazione del pericolo a livello del fondovalle, sono stati inseriti dei valori del parametro MOH che considerano la presenza degli edifici che compongono l'abitato sottostante di Col di Rocca, considerando che questi possono essere degli eventuali ostacoli per gli eventuali massi in transito.

Dai primi tentativi è stato inoltre osservato come il percorso preferenziale dei massi tenda verso il canale principale del rio, in quanto la morfologia del versante risulta essere particolarmente favorevole al movimento verso valle. Considerando che nessuna delle aree di saggio realizzate comprende il canale, ma solo le superfici adiacenti, sono stati incrementati i valori di scabrezza in corrispondenza del canale in quanto esso risulta essere particolarmente inciso e le sponde presentano massi di notevoli dimensioni come è possibile osservare dall'immagine sottostante.



*Figura 65 Tratto del canale del Ru de Sass Negher con presenza di elementi di scabrezza di varia natura. A monte si possono vedere le aree sorgente.*

Sulla base delle precedenti simulazioni, gli scenari di modellazione validi per il versante del Ru de Sass Negher sono i seguenti:

**SCENARIO 1:** analisi finalizzata alla valutazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante in assenza di foresta.

Questa simulazione non considera la presenza del popolamento forestale lungo il versante, ma tiene conto della scabrezza variabile all'interno dell'area. Il parametro MOH presenta valori molto variabili tra la fascia centrale della zona analizzata, dove il valore massimo considerato è di 3 metri in corrispondenza della fine del canale a monte dell'abitato, mentre il valore minimo è di 0,10 metri che si trova nella fascia esterna del versante. Valori molto più alti di attrito sono stati assegnati, invece,

alla fascia urbanizzata a valle in corrispondenza delle abitazioni e di altre opere quali muri o guard-rail.

Un ruolo importante nella definizione degli impatti dei blocchi in movimento viene svolto dalla definizione della tipologia di suolo (parametro *solitype*) i cui valori variano tra il tipo 6 “substrato roccioso” presente nella zona sorgente e nella fascia alta ed il tipo 4 “detrito di versante o suolo compatto con grandi massi” localizzato nella maggior parte del versante. Alla fascia urbanizzata, invece, viene associato il codice 7 che si riferisce alle strade “asfaltate” dove l’energia di impatto del masso al suolo viene attutita in maniera molto limitata.

**SCENARIO 2:** analisi finalizzata alla valutazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante con presenza di foresta nello stato attuale.

Nello scenario che comprende la presenza della foresta nelle condizioni attuali campionate nella fase di raccolta dati ai fini della modellazione, gli elementi che si oppongono al moto gravitativo non sono solo i tre parametri di MOH, ma anche la presenza della foresta.

Anche in questo caso, la superficie del versante è stata suddivisa in un numero di poligoni congrui alla variabilità delle condizioni del popolamento forestale. I parametri che sono stati inseriti nel raster che descrive la foresta all’interno del modello sono:

- densità della foresta con valori variabili tra 300 e 900 piante ad ettaro, i valori più elevati si trovano nella zona alla destra orografica del rio e diminuiscono verso sinistra;
- diametro medio a petto d’uomo con valori compresi tra 20 e 30 cm, con valori medi maggiori nella zona alla destra orografica rispetto alla parte opposta del canale;
- deviazione standard dei valori di diametro compresa tra 6 e 20 cm;
- percentuale di conifere presenti nel popolamento compresa tra 40% e 95%, dove i valori maggiori si presentano alle quote più basse del versante.

**SCENARIO 3:** analisi finalizzata alla valutazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante con presenza di foresta in uno stato ottimale ai fini della protezione.

Sono stati modificati i parametri di input relativi alla foresta utili alla modellazione prendendo in considerazione le esperienze gestionali delle regioni Piemonte e Valle d’Aosta come previsto all’interno del volume *Selvicoltura nelle Foreste di Protezione*. Come indicato nella tabella presente nel capitolo 2.2 relativa alle indicazioni gestionali delle foreste di protezione, i parametri descrittivi impiegati in questo caso sono:

- PIANTE/ETTARO: il valore medio di densità nelle zone forestate lungo tutto il versante è pari a 600 piante/ha.

- **DIAMETRO MEDIO:** il valore di diametro indicato in questo caso deve essere superiore a 12,5 cm, per cui sono stati mantenuti i diametri a petto d'uomo cavallettati nella fase di campionamento, essendo maggiori.
- **DEVIAZIONE STANDARD DEL DIAMETRO MEDIO:** il valore di deviazione standard anche in questo caso è stato mantenuto uguale in quanto descrive la condizione reale del popolamento forestale considerato.
- **PERCENTUALE DI CONIFERE:** il valore della percentuale di conifere è stato posto pari a 90% su tutta la superficie forestata del versante.

**SCENARIO 4:** analisi finalizzata alla valutazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante forestato (attuale) con la presenza delle opere di protezione (reti paramassi) attualmente presenti sul territorio.

In questo caso la scabrezza viene rappresentata dalla morfologia del territorio e dalla foresta di protezione posta a monte degli elementi sensibili, alla quale si somma la presenza, dell'opera di difesa permanente attualmente presente nella zona rappresentata da una rete paramassi posta a monte della strada provinciale, che si estende per una lunghezza di 70 metri per un'altezza di 3 metri.

**SCENARIO 5:** analisi finalizzata alla valutazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante forestato e la presenza di una nuova ipotesi di disposizione delle reti sia in termini di dimensioni che di numero.

In questo caso l'intervento simulato prevede l'incremento del numero e dell'estensione delle opere di difesa allo scopo di implementare l'azione già svolta dalla rete posta attualmente a monte della strada ed aumentare così l'efficienza di intercettazione dei massi da parte del versante. La progettazione delle opere di protezione consiste in due fasi: una fase di progettazione funzionale nella quale viene quantificata l'altezza della struttura a partire dalla distribuzione delle altezze di transito dei blocchi rocciosi e una fase di progettazione strutturale, dove viene valutata la capacità di trattenuta dell'opera a partire dalla distribuzione dei valori di energia dei massi simulati (Bourrier et al., 2016).

In particolare, la simulazione considerata più valida, ipotizza la posa di un totale di 3 elementi, tra cui:

- 1 briglia già in progetto per la difesa da colata detritica che svolge anche la funzione di barriera ai fini della protezione da caduta massi (per le caratteristiche della briglia si sono utilizzati i dati del progetto definitivo);
- 1 rete (A) di prolungamento dell'opera già esistente a monte della strada provinciale 641;
- 1 rete (B) a monte della strada forestale.

La tabella 9 descrive in sintesi le dimensioni delle opere utili ai fini della modellazione.

TIPO OPERA	LUNGHEZZA TOTALE (m)	ALTEZZA (m)
BRIGLIA	34	5
RETE A	85	3
RETE B	70	3

*Tabella 9 Descrizione delle caratteristiche delle opere simulate.*

Le reti che sono state scelte possono sopportare valori di energia cinetica dei massi fino a 3000 k J, questo è stato scelto nell'ambito di un ragionamento in termini cautelativi che permetta di assicurare protezione in caso di assenza della componente forestale o variazione dei parametri di stabilità minimi.

Per quanto riguarda le scelte relative al posizionamento delle opere, queste si basano sia sull'analisi soggettiva del versante caso di studio, ma anche della valutazione post simulazione con software Rockyfor3D.

- Nel caso della rete A, essa prevede il prolungamento della rete esistente posta a protezione della strada provinciale per una lunghezza sufficiente a proteggere un tratto del versante molto instabile, caratterizzato da un impluvio dove il popolamento forestale esistente non presenta un valore di densità ad ettaro sufficiente a garantire la stabilità. Scelta effettuata anche a seguito di recenti eventi verificatisi in questo punto.
- Nel caso della rete B, essa viene posizionata a partire dall'analisi dei file di output prodotti con le simulazioni. Viene localizzata in corrispondenza delle celle che si trovano a monte della strada forestale ai piedi della foresta, nelle quali i parametri di output hanno evidenziato lo sviluppo del fenomeno con valori ancora elevati nonostante la presenza della foresta stessa.
- Nel caso riguardante la briglia, si è voluto valutare l'effetto paramassi creato dall'opera di futura realizzazione a valle del versante, per gestire un altro disturbo presente lungo il versante: la colata detritica.

Nella fase di analisi delle combinazioni rete-foresta più efficienti, nell'ottica di incrementare il livello di sicurezza per gli elementi sensibili, è stata anche ipotizzata la posa di una doppia fila di reti ad altezze minori, ma il livello di protezione ottenuto in questo caso è risultato simile al caso precedente, dunque l'ipotesi che prevede la posa di una fila di reti garantisce già da sola il soddisfacimento delle esigenze di trattenuta.

## 7. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

I risultati dell'applicazione del modello Rockyfor3D al versante de Ru de Sass Negher, vengono distinti nei 5 scenari di modellazione sopra descritti.

Per quanto riguarda lo SCENARIO 1, esso si riferisce alle condizioni di maggiore pericolo, in quanto viene effettuata la simulazione su un versante in condizioni di notevole pendenza all'interno del quale gli elementi che si oppongono al moto sono rappresentati solamente dalla morfologia del territorio.

La tabella sottostante riporta i principali valori medi di output ottenuti da questa simulazione.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Energia media	kJ	511,13	819,29	5580,30
Massi arrestati	n	11,02	93,80	3748,0
Passaggi per cella	n	570,33	1832,10	20526,0
Altezza media del rimbalzo	m	0,40	0,61	7,82
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0,59	3,74	100
Velocità massima	m/s	10,92	15,77	69,43
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0,20	0,62	3,28

*Tabella 10 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 1.*

La simulazione ha visto lo svilupparsi di un'intensità il cui massimo valore di energia cinetica pari a 9053 kJ, mentre il valore massimo dei valori medi di energia cinetica raggiunta dai massi transitanti sulle singole celle ammonta a 5580,30 kJ. La distribuzione di questi valori ha visto un'ampia superficie interessata dal crollo che raggiunge tutti gli elementi sensibili, quali abitazioni e fienili, ed infrastrutture quali la strada transitante in fondovalle, arrivando talvolta ad arrestare il suo movimento in corrispondenza degli avvallamenti del terreno presenti a livello dei prati oppure, in alcuni casi limitati, addirittura nell'alveo del torrente Pettorina.

La lunghezza planimetrica massima raggiunta dal fenomeno supera gli 800 metri, dove le traiettorie seguono principalmente il canale del Ru de Sass Negher, nella parte alla sinistra orografica dello stesso, mentre nella parte destra i distacchi presentano runout minori che spesso non raggiungono il fondovalle.

Per quanto riguarda la distribuzione dei valori di energia cinetica, essa presenta valori massimi ai piedi dell'affioramento roccioso del Sass Negher, a metà del versante in corrispondenza del canale e nella fascia alla sinistra orografica in corrispondenza di un avvallamento del terreno. Valori di energia che poi si riducono progressivamente a seguito dell'attraversamento della strada. In paese l'energia residua risulta compresa tra 1000 e 300 kJ (Figura 66). Anche per quanto riguarda i valori di velocità, essi si presentano massimi nella zona sorgente (69,43 m/s), mentre nella fase di transito le velocità sono comprese tra 43 e 30 m/s, nella zona di deposito sottostante alla strada le velocità sono inferiori a 30 m/s.

Le altezze raggiunte dai blocchi in moto parabolico presentano valori medi di 0,40 metri, ma in corrispondenza della zona di transito il valore medio si attesta attorno ad 1 metro, questo valore aumenta ulteriormente nella porzione posta alla sinistra orografica del torrente, dove le altezze raggiungono anche i 3 metri con picchi di 5 metri in corrispondenza dei salti di versante interessando sia la strada che l'abitato sottostante in caso di evento.

Per quanto riguarda la distribuzione dei massi depositati, in questa simulazione si osserva come la maggior parte dei blocchi si arresti a monte dell'abitato in corrispondenza del canale del rio, grazie all'elevato grado di incisione di quest'ultimo ed all'elevato valore di scabrezza. Nella zona sottostante, i depositi non sono concentrati in una zona particolare, ma risultano distribuiti omogeneamente a livello di una superficie più ampia.

Il volume corrispondente ai massi depositati in questa simulazione presenta valori massimi che possono raggiungere anche i 3,28 m<sup>3</sup> a valle delle aree di innesco poste alla destra orografica del Ru de Sass Negher, mentre valori di volume inferiori, ma comunque importanti in quanto superiori a 1,5 m<sup>3</sup> sono presenti a livello del canale e si protraggono fino in corrispondenza del centro abitato. E' possibile dunque concludere che, all'interno di questo scenario sprovvisto di copertura forestale, i massi di grandi dimensioni tendono ad arrestarsi a pochi metri dal distacco, mentre quelli di dimensioni minori presentano una runout maggiore.

L'ultimo parametro valutato in questa simulazione è la probabilità di passaggio dei massi in ogni cella, considerando i 5000 lanci effettuati che corrispondono a 355000 massi simulati, le probabilità di passaggio nelle diverse celle hanno evidenziato una distribuzione abbastanza estesa sul versante, dove non si evidenzia un percorso preferenziale. Le percentuali di raggiungimento del canale o degli avvallamenti del terreno sono inferiori al 15%, mentre il valore medio che si registra nel fondovalle è inferiore al 5% per ogni cella.

Le immagini sottostanti rappresentano due dei raster di output più rappresentativi. La figura 66 indica l'energia cinetica media raggiunta dai massi suddivisa in tre categorie: i valori massimi indicati con il colore rosso sono superiori a 2000 kJ e i valori inferiori a 500 kJ in verde. La figura 67 rappresenta il numero di blocchi transitanti per ogni cella, si osserva come i valori massimi rappresentati dal colore rosso siano concentrati nella zona di distacco, i valori intermedi, di colore giallo e arancio siano concentrati lungo il canale e la maggior parte delle celle sia indicata con il colore verde, ciò rende evidente l'estensione areale del fenomeno di crollo.

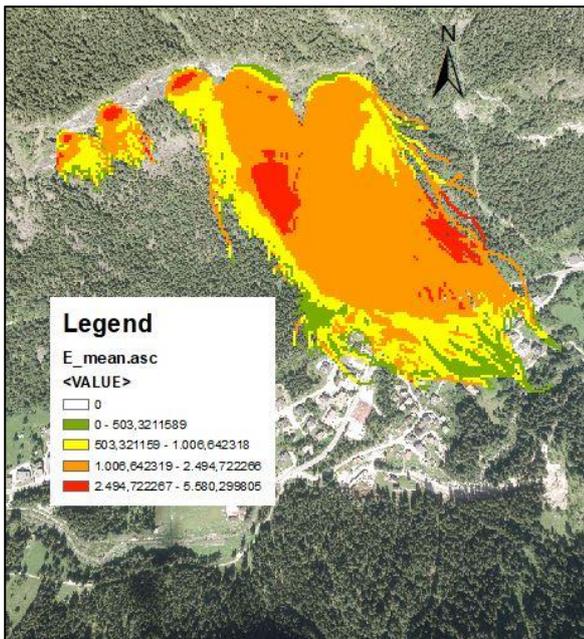


Figura 66 Energia cinetica media raggiunta dai massi durante nello SCENARIO 1.

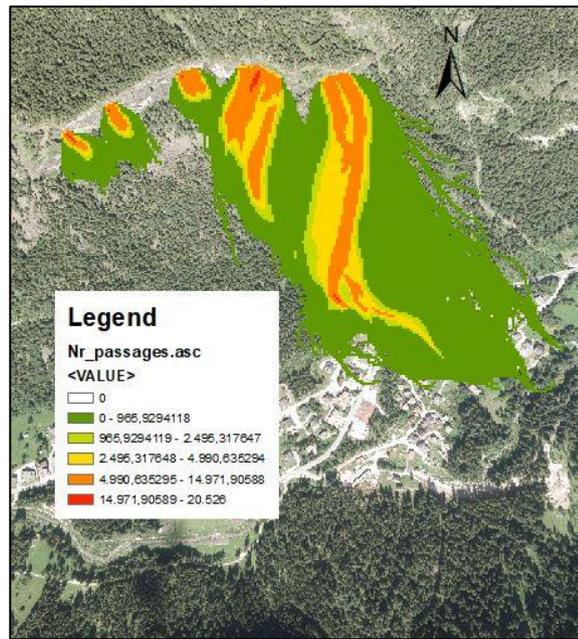


Figura 67 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 1.

Per quanto riguarda lo SCENARIO 2, esso si riferisce al versante caso di studio all'interno del quale il fenomeno di caduta massi nel suo moto gravitativo non incontra solamente la scabrezza dovuta alla morfologia del territorio, ma anche la presenza della foresta allo stato attuale con la sua capacità dissipativa dell'energia cinetica accumulata dal litoide in corsa attraverso gli impatti con le piante presenti.

La tabella sottostante riporta i principali valori medi di output ottenuti da questa simulazione.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Energia media	kJ	275,77	551,51	5328,09
Massi arrestati	n	11,02	77,75	2234,00
Passaggi per cella	n	341,98	1425,37	20451
Altezza media del rimbalzo	m	0,26	0,52	12,23
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0,44	3,62	100
Velocità massima	m/s	7,21	13,39	69,43
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0,25	0,67	3,28

Tabella 11 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 2.

I file di output relativi alla presenza della foresta vengono descritti nella tabella sottostante.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Numero di impatti sulla pianta	n	40,90	280,04	7522,00
Altezza di impatto sul tronco	m	0,21	0,93	22,18

Tabella 12 Principali parametri di output ottenuti.

In queste condizioni, l'evento di crollo simulato risulta essere più limitato nello spazio rispetto alla situazione precedente, con una lunghezza massima raggiunta inferiore ad 800 metri planimetrici con una larghezza inferiore ai 350 metri. I massi tendono a raggiungere, in pochi casi, solamente le

abitazioni localizzate a monte dell'abitato di Col di Rocca, ed in nessun caso il disturbo si protrae fino al torrente Pettorina.

Analizzando le traiettorie si osserva come esse tendono a convergere verso gli impluvi e le caratteristiche morfologiche favorevoli, non si notano molti percorsi divergenti da queste direzioni prevalenti.

La simulazione mostra un valore di energia cinetica massima puntuale di 9026,7 kJ, mentre il valore massimo dei valori medi di energia cinetica raggiunta dai massi transitanti sulle singole celle ammonta a 5328,10 kJ. Dalla mappa raster di output dell'energia cinetica è possibile osservare la distribuzione dei valori lungo il versante, essa risulta massima in corrispondenza delle rocce affioranti a monte, valori intermedi si trovano lungo il canale e nelle traiettorie isolate. Tutti i massi che superano la strada presentano valori molto bassi inferiori a 500 kJ. Grazie alla presenza del popolamento forestale, quota parte dell'energia iniziale viene dissipata lungo il percorso prima di raggiungere gli elementi sensibili.

Per definire l'estensione dell'evento a livello spaziale, il raster che viene impiegato è quello relativo al numero di passaggi per ogni cella, in questo caso è possibile affermare che, a livello del versante la forzante topografica ha indotto ad una concentrazione dei passaggi lungo gli impluvi (Figura 69 indicato in colore giallo-arancio), mentre, nel momento in cui la morfologia del territorio è risultata più omogenea, i blocchi hanno proseguito il loro movimento secondo traiettorie del tutto casuali (colore verde).

Questi dati sono supportati anche dai valori di probabilità di raggiungimento di ogni cella lungo il versante, osservando nel dettaglio, questi sono inferiori al 10% per buona parte del versante, mentre aumentano considerevolmente nelle aree sottostanti il punto di disacco.

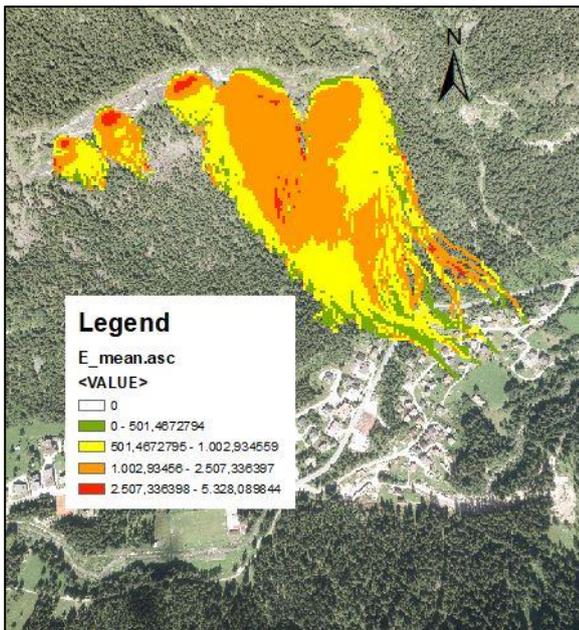


Figura 68 Energia cinetica media raggiunta dai massi durante nello SCENARIO 2.

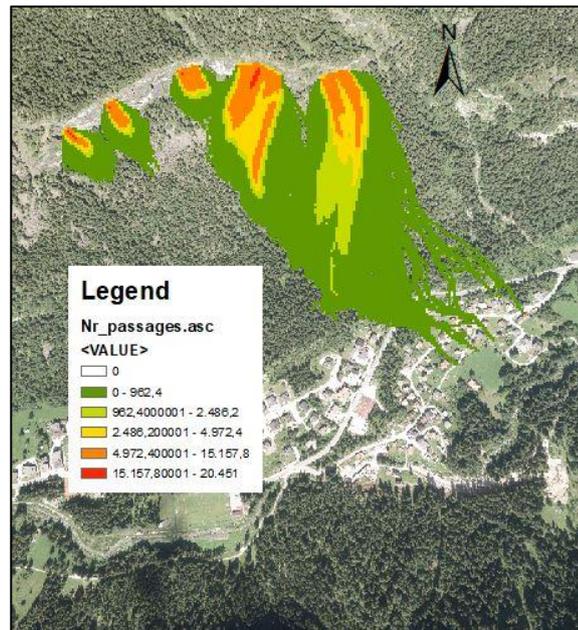


Figura 69 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 2.

Per quanto riguarda i valori di velocità raggiunta dai frammenti litoidi in corsa in caso di evento, la presenza della foresta permette di ridurre la velocità acquisita a monte fino ad un massimo di 10 m/s lungo il versante. Questo riduce notevolmente la pericolosità dell'evento in quanto i valori simulati in corrispondenza delle abitazioni risultano essere inferiori a 20 m/s, anche nel caso delle traiettorie più marginali. Direttamente collegata alla velocità di caduta risulta essere l'altezza massima di rimbalzo, legata al movimento parabolico dei blocchi che in questo scenario viene spesso interrotto dalla presenza di ostacoli quali tronchi in piedi. I valori di altezza di riferimento lungo il versante risultano essere in generale molto bassi rispetto ai valori iniziali, segnale dell'importanza della presenza della foresta. Lungo tutta l'estensione del versante, infatti, le altezze raggiunte sono inferiori al valore limite di 1,50 metri, per poi ridursi in presenza delle abitazioni a valori inferiori a 0,80 metri. Il ruolo protettivo della foresta può essere analizzato anche in termini di capacità di trattenuta a monte dei massi considerando il numero di massi depositati per ogni cella che compone il versante. Escludendo il numero di massi che si deposita a valle dell'affioramento roccioso del Sass Negher, la simulazione ha evidenziato come buona parte dei blocchi tende ad accumularsi in corrispondenza del canale, soprattutto per quanto concerne i massi provenienti dalla zona sorgente presente nella fascia centrale, mentre alla sinistra orografica, i massi tendono a distribuirsi omogeneamente su tutta la superficie, sempre considerando il ruolo predominante della morfologia del versante. Questa distribuzione può essere imputabile alla presenza della foresta che limita in modo notevole gli accumuli nel fondovalle.

Un altro aspetto considerato dai parametri di output del modello è il volume degli accumuli che si verificano nella zona di deposito. E' possibile notare come i valori di volume dei blocchi che si sono depositati nelle varie celle risultino elevati, cioè superiori ai 2 m<sup>3</sup> nella fascia sottostante al Sass Negher, soprattutto alla destra orografica; mentre per quanto riguarda la fascia sinistra i valori di volume stimato risultano essere pressoché costanti, con valori inferiori a 1,7 m<sup>3</sup> per tutta l'estensione del versante fino a livello del fondovalle. Da questi risultati, deve essere tuttavia tenuto in considerazione che il modello Rockyfor non simula la disgregazione del detrito minerale lungo il versante, ma solo il duo accumulo.

Questo può essere dedotto anche osservando che, nonostante il numero di impatti registrati contro le piante sia abbastanza elevato in quanto, soprattutto nella fascia più alta, essi non scendono mai sotto il valore di 1000, per poi ridursi nella fascia a quote più basse a valori inferiori a 200 per cella, i volumi rimangono costanti. Il numero di impatti medi si attesta attorno a 41, mentre il numero massimo può raggiungere i 7522 per le piante che si trovano in prossimità della zona sorgente. Come è possibile osservare dall'immagine sottostante (Figura 70), la distribuzione degli impatti avviene principalmente lungo le due direttrici principali sottostanti alle due zone sorgente alla sinistra idrografica. Il maggior numero di impatti si verifica nella fascia centrale (colore giallo), per poi ridurre progressivamente il numero (colore verde) man mano che ci si allontana dalla direzione preferenziale di caduta dei blocchi. Non si evidenziano impatti, invece, per quanto riguarda la parte del versante alla destra orografica in quanto il bosco è localizzato ad una distanza che supera quella di runout dei massi.

I massi infatti, si arrestano subito a valle dell'affioramento roccioso dove la scabrezza è molto elevata e caratterizzata principalmente da massi di grandi dimensioni, che limitano anche la formazione di suolo e, dunque, il popolamento forestale.

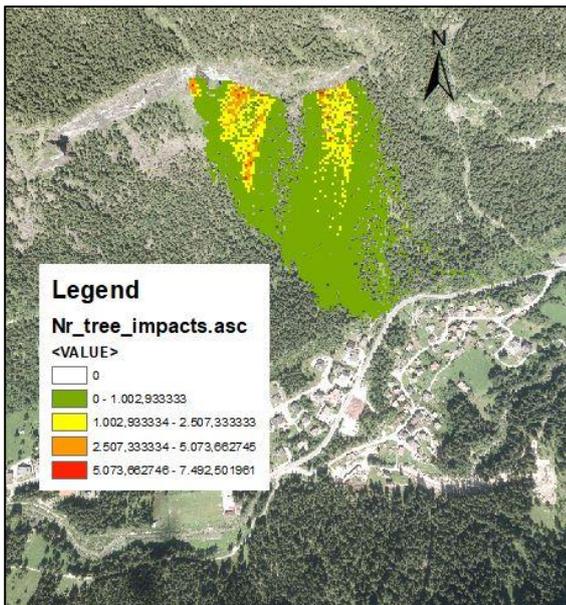


Figura 70 Distribuzione degli impatti all'interno del popolamento forestale per lo SCENARIO 2.

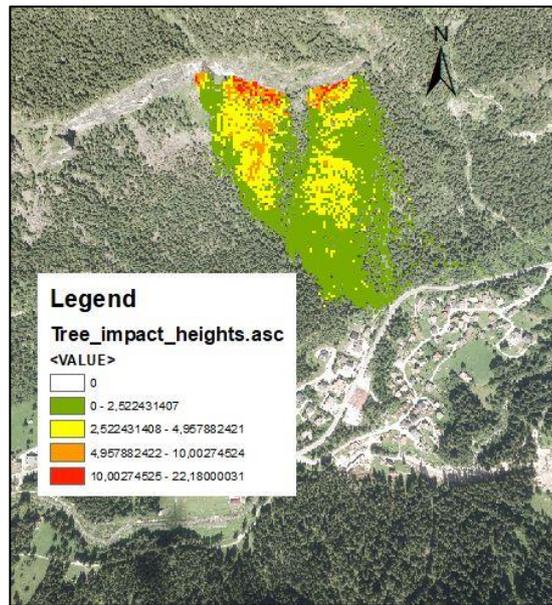


Figura 71 Distribuzione dei valori di altezza di impatto sulle piante all'interno del versante caso di studio nello SCENARIO 2.

Infine è stata valutata anche l'altezza di impatto sui tronchi, la cui distribuzione viene descritta dalla figura 71, anche in questo caso le maggiori altezze (valori superiori a 2 metri) si registrano nelle fasce centrali lungo la direzione preferenziale di caduta, i valori poi tendono a ridursi sia lateralmente che a quote inferiori.

Lo SCENARIO 3 prevede una simulazione all'interno della quale sono stati impostati i parametri necessari al soddisfacimento delle esigenze ideali di stabilità di un popolamento forestale in caso di caduta massi.

La tabella sottostante riporta i valori medi ottenuti dalla simulazione che ha previsto 5000 lanci per un evento che si verifica all'interno di un popolamento stabile.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Energia media	kJ	274.72	541.46	5325.59
Massi arrestati	n	11.02	77.73	2223
Passaggi per cella	n	344.07	1437.16	20507
Altezza media del rimbalzo	m	0.26	0.5	8.96
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0.44	3.61	100
Velocità massima	m/s	7.3	13.35	69.44
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0.25	0.67	3.28

Tabella 13 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 3.

In questo caso l'evento ha sviluppato un valore massimo di energia cinetica totale pari a 9383 kJ, mentre il valore massimo dei valori medi di energia cinetica raggiunta dai massi transitanti sulle singole celle ammonta pari a 5325.59 kJ.

L'evento simulato è arrivato a percorrere una distanza di 500 metri dalla zona sorgente fino a raggiungere il piano stradale solo per quanto riguarda i distacchi originati dai pixel sorgente più esterni alla sinistra orografica del canale. Il valore di probabilità di raggiungere questo livello risulta comunque molto ridotto in quanto, le celle presenti a quote inferiori presentano un valore di probabilità di passaggio inferiore al 5%. Il centro abitato, invece, in questo caso non è interessato dal fenomeno di rockfall.

L'energia media prodotta dalla simulazione di evento ammonta a valori omogenei compresi tra 1000 e 2000 kJ nella porzione alta del versante (indicato in colore arancio nella Figura 72), mentre si evidenziano valori molto variabili di energia nel fondovalle.

Per quanto riguarda il file relativo al numero di passaggi per ogni cella, esso evidenzia come la capacità protettiva del bosco svolga la sua funzione concentrando i valori maggiori in corrispondenza della fascia a quota più elevata del versante, mentre, verso valle i valori si distribuiscono omogeneamente lungo il versante senza individuare una traiettoria ben definita e concentrata. Per questo motivo nella simulazione il valore medio di passaggi per cella è di 344.07 su 5000 lanci.

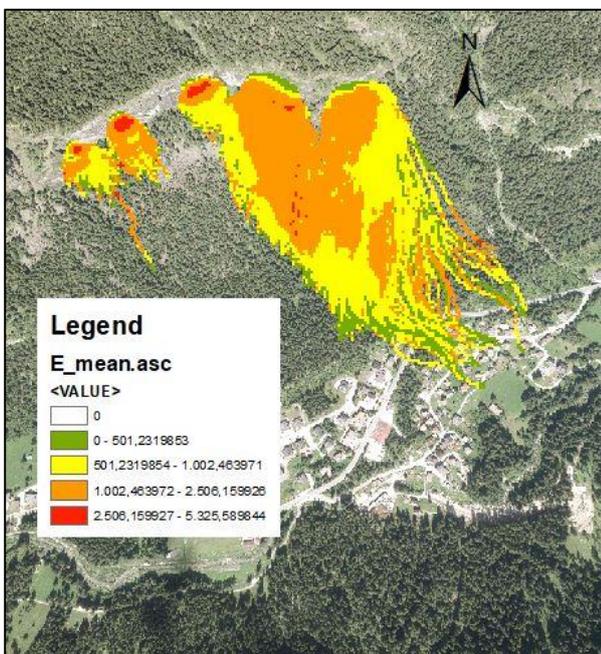


Figura 72 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 3.

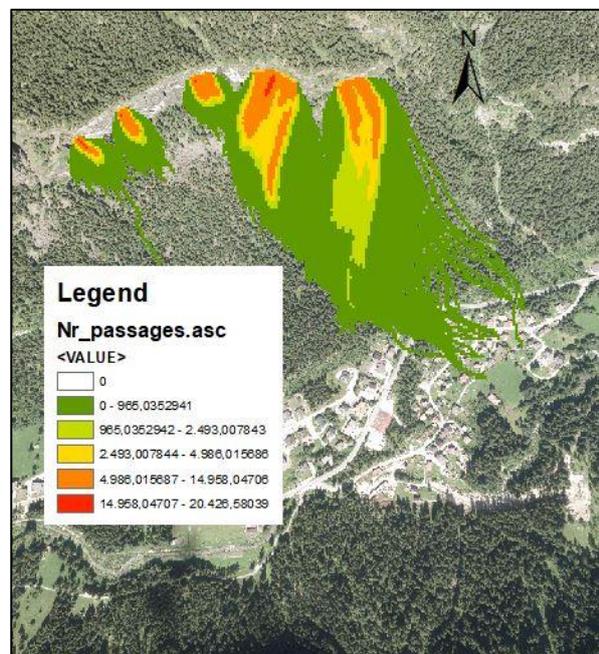


Figura 73 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 3.

La descrizione del movimento gravitativo dei massi avviene attraverso due file di output che permettono di definire la velocità massima raggiunta per ogni cella e l'altezza di rimbalzo a seguito dell'impatto con il suolo. Analizzando i valori di velocità raggiunti, essi sono compresi tra 25 e 50 m/s che interessano il moto di massi a livello del versante, mentre nel fondovalle le velocità risultano essere comprese tra 25 e 10 m/s in caso di attraversamento della sede stradale e dell'abitato di Col di

Rocca. Per quanto riguarda la distribuzione dei valori di altezza di rimbalzo dei massi in caduta, in condizioni di protezione ideale fornita dal bosco, escludendo la fascia immediatamente sottostante alle zone sorgente, i valori risultano essere inferiori a 2 metri su tutta la superficie del versante. Il valore medio registrato risulta ammontare infatti a 0,26 metri.

Un altro aspetto da considerare tra i risultati della simulazione riguarda la descrizione dei depositi in termini di distribuzione dei massi arrestati e volume degli stessi. L'effetto protettivo della foresta induce molti massi ad arrestarsi lungo il versante prima di raggiungere gli elementi sensibili, in quanto solo una quantità limitata raggiunge la strada e gli edifici. La descrizione dell'evento in termini di volume depositato vede valori medi di 0,25 m<sup>3</sup> che si presenta nel dettaglio con una distribuzione omogenea di massi dal volume compreso tra 1 e 2 m<sup>3</sup> lungo il versante boscato alla sinistra orografica, mentre si notano accumuli con volumetrie maggiori nella fascia destra dove i massi superano i 2 m<sup>3</sup>.

I file di output che analizzano i parametri forestali di questo popolamento sono indicati nella tabella sottostante.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Numero di impatti sulla pianta	n	44.55	308.67	11240
Altezza di impatto sul tronco	m	0.21	0.96	21.37

*Tabella 14 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 3.*

I valori di altezza di impatto sul tronco risultano avere valori fino ad 8 metri lungo il versante specialmente in corrispondenza delle porzioni di popolamento localizzate a valle delle zone di distacco, mentre, in corrispondenza della strada, i valori risultano essere inferiori a 2 metri. Per quanto riguarda la distribuzione del numero di impatti, essa presenta valori medi di 44.55 per 5000 lanci, questo indica che la variabilità a livello del versante è molto elevata e ci sono delle fasce di popolamento maggiormente interessate al fenomeno rispetto ad altre più marginali.

Per quanto riguarda lo SCENARIO 4 che viene preso in considerazione da questa analisi, essa prevede la simulazione di un evento di caduta massi secondo le condizioni attuali in cui si presenta il versante.

La simulazione ha previsto la realizzazione di 5000 lanci considerando i massi di dimensioni intermedie e la scabrezza presente nel canale del Ru de Sass Negher.

La tabella sottostante riporta i parametri principali ottenuti dalla simulazione.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Energia media	kJ	268,91	542,46	4548,79
Massi arrestati	n	11,02	77,34	2085,00
Passaggi per cella	n	341,20	1422,50	20349,00
Altezza media del rimbalzo	m	0,25	0,50	8,14
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0,44	3,61	100
Velocità massima	m/s	7,14	13,43	69,44
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0,25	0,65	2,81

*Tabella 15 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 4.*

Anche in questo scenario sono stati mantenuti gli stessi parametri reali del popolamento forestale che sono stati impiegati nello SCENARIO 2. I file di output del modello hanno permesso di ottenere anche in questo caso alcuni parametri descrittivi legati alla presenza della foresta, che vengono riportati nella seguente tabella.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Numero di impatti sulla pianta	n	41,20	281,39	7843,00
Altezza di impatto sul tronco	m	0,21	0,94	22,11

*Tabella 16 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 4.*

Il disturbo della caduta massi ha provocato in questo caso un evento che ha interessato il versante del Ru de Sass Negher per una lunghezza inferiore ad 800 metri ed una larghezza inferiore a 400 metri. E' possibile osservare facilmente come i massi raggiungano la strada solo in corrispondenza dell'attraversamento del canale e le abitazioni circostanti a quest'ultimo. Il fenomeno simulato non raggiunge, neanche in questo caso, il torrente Pettorina, ma tende a generare in casi particolari, delle traiettorie che vengono portate ad aggirare gli eventuali ostacoli presenti, come la rete paramassi.

Per quanto riguarda l'intensità dell'evento, è possibile descriverla attraverso i valori di energia cinetica massima prodotta che ammonta a 8018,4 kJ, con un valore medio di 4548,8 kJ. Come è possibile vedere da questi dati, l'energia non è distribuita uniformemente su tutto il versante bensì i valori maggiori sono concentrati nella fascia sottostante la zona di distacco, per poi ridursi in corrispondenza del canale e della porzione di popolamento forestale caratterizzato dalla maggiore presenza di conifere. A livello dell'attraversamento stradale i valori di energia posseduti dai massi non superano i 700 kJ, mentre si notano valori più elevati posseduti da traiettorie isolate costrette a modificare la loro direzione a causa del posizionamento della rete paramassi.

L'effetto dovuto alla presenza della rete paramassi a monte della strada è evidente nel file di output che si riferisce al numero di passaggi per ogni cella del raster (Figura 75). E' possibile osservare come il numero delle traiettorie nel punto coperto dall'opera è ridotto (vedi cerchio rosso in figura) ed i massi tendono maggiormente a transitare a livello del canale. La figura sottostante mette in evidenza la distribuzione del numero di passaggi per ogni cella, dove i valori maggiori si trovano nelle zone di

origine del fenomeno (indicati con il colore rosso), poi i valori intermedi di colore giallo e i passaggi con frequenza minore di colore verde in quanto a quote più basse non si presenta una direzione preferenziale, bensì una diffusione capillare dei massi sul versante. Ad ulteriore prova di queste affermazioni viene valutata anche la probabilità associata ad ogni cella di essere raggiunta da un masso in corsa. I valori osservati in questo caso sono inferiori al 60% nella zona di distacco, mentre nella rimanente parte del versante caso di studio le percentuali sono inferiori al 10%.

Anche in questo caso la diffusione del fenomeno di caduta massi non segue una direzione principale, ma si diffonde in maniera ampia lungo il versante dove i valori di probabilità di raggiungimento di una cella sono molto bassi poiché i massi transitano in maniera casuale in ogni cella esaminata. Lo stesso vale anche per la distribuzione dei massi la quale risulta tener conto della morfologia del territorio e della presenza della foresta con valori maggiori rilevati lungo in canale del rio.

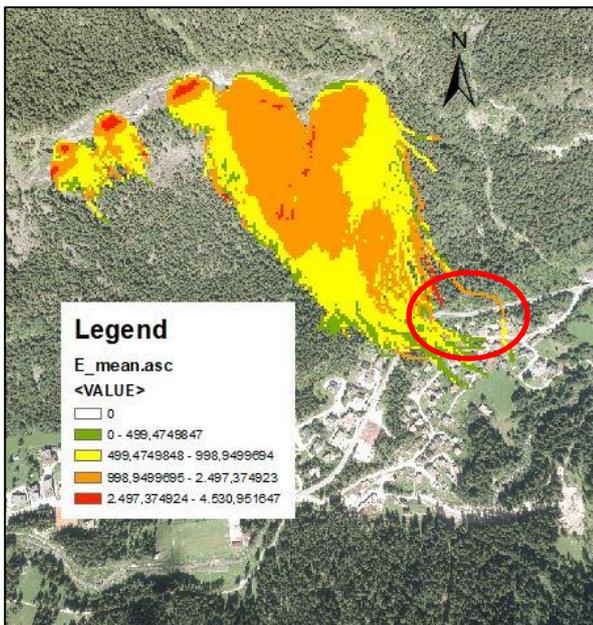


Figura 74 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 4.

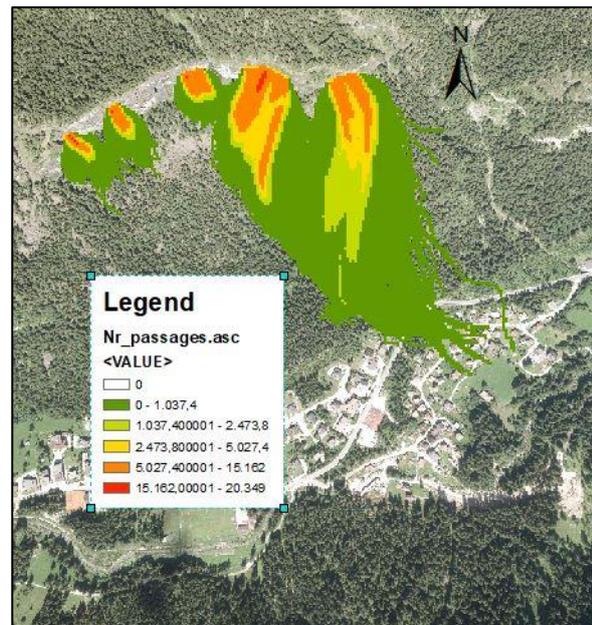


Figura 75 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 4.

Analizzando l'evento in termini di velocità massima raggiunta, essa presenta una progressiva diminuzione dei valori dalla fascia alta dove essi superano i 40 m/s, alla fascia a monte della strada con valori inferiori a 30 m/s fino al centro abitato dove i massi giungono con velocità inferiori a 20 m/s.

Considerando l'entità dei depositi stimati lungo il versante a seguito dell'evento, vengono rilevati valori massimi di volume (compresi tra 2,50 e 2,80 m<sup>3</sup>) all'interno di una fascia compresa entro i 100 metri dal punto di innesco del fenomeno nella porzione di versante alla destra orografica del canale. Nella parte sinistra, invece, i depositi presentano volumi compresi tra 1,70 e 1,40 m<sup>3</sup>.

Per quanto riguarda l'altezza da terra dei rimbalzi effettuati dai frammenti litoidi in movimento gravitativo, i valori sono sempre superiori ad 1 metro, mentre nella fascia compresa tra la zona di transito e l'abitato di Col di Rocca le altezze di transito non si riducono mai a valori inferiori di 0,80 metri.

L'analisi dei prodotti di output relativi alle condizioni della foresta in termini di numero di impatti per pianta e di altezza degli impatti risultano essere molto simili alle simulazioni realizzate senza la presenza della rete paramassi (SCENARI 3-4).

Lo SCENARIO 5 prevede alcune simulazioni nella quali è stata ipotizzata la realizzazione di opere di difesa dal fenomeno di caduta massi.

Nella tabella seguente vengono riportati alcuni parametri descrittivi del nuovo scenario di evento, il quale è stato analizzato, come nelle simulazioni precedenti, a partire da 5000 lanci.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Energia media	kJ	250.34	533.1	5306.64
Massi arrestati	n	11.02	77.86	2288
Passaggi per cella	n	341.65	1425.41	20362
Altezza media del rimbalzo	m	0.23	0.49	8.14
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0.44	3.61	100
Velocità massima	m/s	6.66	13.23	69.43
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0.25	0.66	3.28

*Tabella 17 Riassunto dei principali parametri di output ottenuti nella simulazione dello SCENARIO 5.*

L'evento di caduta massi simulato all'interno di questo contesto ha visto valori di energia massima pari a 9160.5 kJ, mentre i valori massimi di energia media registrati a livello delle celle in questo caso ammontano a 5306.64 kJ.

La presenza di barriere quali reti paramassi e la briglia, uniti all'effetto dissipativo dovuto alla presenza del bosco esistente ha portato ad una riduzione dell'estensione dell'evento che rimane contenuto a livello del versante senza raggiungere in nessun caso né la strada provinciale né le abitazioni. Per quanto riguarda l'analisi del numero di passaggi dei massi per cella, il file denominato *Nr\_passages* indica la distribuzione del fenomeno lungo il versante, i valori di passaggio maggiori vengono evidenziati con il colore rosso, mentre di colore verde vengono indicate le celle caratterizzate da minori passaggi. Le opere di difesa vengono indicate invece con il colore blu e si trovano in corrispondenza di un numero di passaggi inferiori a 2000 su 5000 lanci.

Per quanto riguarda i valori di energia media di transito dei massi a livello delle opere di difesa, come si può vedere dalla figura, nella maggior parte dei casi esse si trovano a contrastare un'energia inferiore a 1000 kJ (celle di colore giallo), mentre per un numero inferiore di casi, espressi in colore

arancio, i valori sono maggiori e possono raggiungere anche i 2000 kJ nonostante il ruolo di dissipazione svolto dalla foresta nella fascia sovrastante.

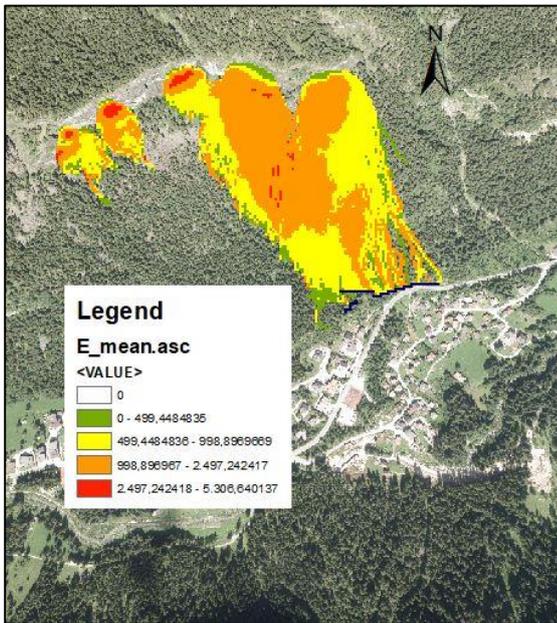


Figura 76 Energia cinetica media raggiunta dai massi nello SCENARIO 5.

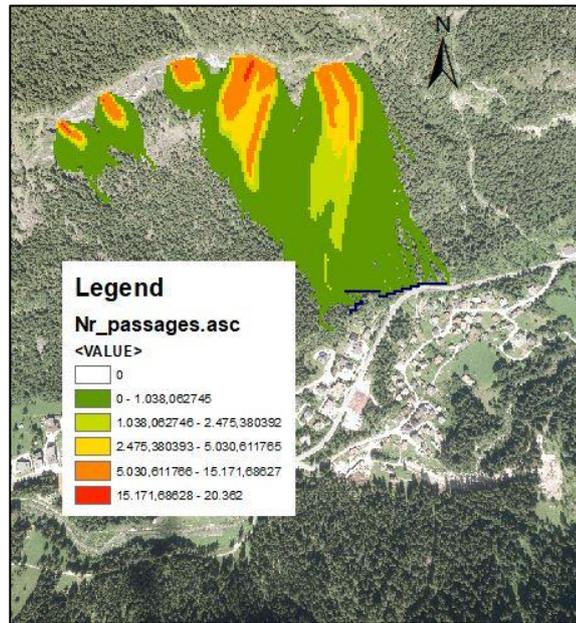


Figura 77 Numero di passaggi dei massi per ogni cella nello SCENARIO 5

A partire da queste considerazioni ne consegue un valore medio di velocità massima per cella che ammonta a 6,66 m/s, il quale in corrispondenza delle opere paramassi generalmente è compreso tra 10 e 25 m/s, anche se in alcuni casi esso è risultato superare i 25 m/s soprattutto nel caso della briglia posta più a monte.

Il numero medio di massi arrestati in ogni cella è di 11,02 mentre il valore massimo è 2288 massi totali depositati. La distribuzione evidenzia come questi accumuli in caso di evento si verificano sia in corrispondenza degli avvallamenti del terreno, ma anche il popolamento forestale garantisce una deposizione omogenea lungo il versante. Infine, una porzione rimanente di massi (valori inferiori ai 50 massi per cella) viene bloccata dalle opere posizionate a monte degli elementi sensibili in modo da garantire un ulteriore livello di sicurezza.

Analizzando il fenomeno in termini di volumi depositati, si osserva come, l'azione combinata di foresta e opere di trattenuta induca il deposito di massi i cui valori di volume possono arrivare anche a 2 m<sup>3</sup>. In particolare, i massi che non vengono arrestati a monte a livello della foresta, sono trattenuti poi successivamente dalle reti nel fondovalle.

Nella fase di valutazione di efficienza delle opere di trattenuta installate, è possibile valutare un altro importante parametro di output quale l'altezza media realizzata dal masso nella fase di rimbalzo descritta dal file *Ph\_mean*. Il valore di altezza media di rimbalzo lungo tutto il versante è pari a 0,23

metri, anche se la maggior parte delle altezze risulta essere inferiore ad un 1 metro, un numero inferiore di celle è localizzato in corrispondenza del canale e dei salti morfologici del versante, dove le altezze aumentano fino a 2 metri.

Per quanto riguarda i parametri di output relativi alle caratteristiche del soprassuolo forestale, i valori non si differenziano molto dalle simulazioni precedenti in quanto le opere di difesa sono poste a valle della foresta. Alcuni dati vengono riassunti nella tabella sottostante.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE MEDIO	DEV. STANDARD	VALORE MASSIMO
Numero di impatti sulla pianta	n	40.89	280.83	7843
Altezza di impatto sul tronco	m	0.21	0.93	22.11

*Tabella 18 Riassunto dei principali parametri di output riferiti alla foresta nello SCENARIO 5.*

## 7.1 CONFRONTO TRA I DIVERSI SCENARI

Una volta realizzate le simulazioni per i diversi scenari ipotizzati, sono stati effettuati dei confronti con l'obiettivo di conoscere e quantificare l'effetto protettivo della foresta (nelle condizioni attuali e nelle condizioni ideali) e degli elementi protettivi antropici (opere paramassi attualmente presenti e secondo le ipotesi di un loro ampliamento).

A questo scopo vengono effettuate alcune analisi:

Il primo confronto viene realizzato tra i file di output della simulazione che non prevede la presenza di soprassuolo forestato (SCENARIO 1) ed i risultati della modellazione che prevede la presenza della foresta in condizioni attuali (SCENARIO 2). A questo scopo viene realizzata la differenza tra i valori medi dello scenario realizzato in assenza di copertura forestale ed i valori medi della simulazione realizzata secondo le condizioni attuali del versante.

I risultati ottenuti si riferiscono alla variazione percentuale dalla condizione più sfavorevole alla condizione più favorevole. I diversi parametri vengono riassunti nella tabella sottostante.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VAL. MEDIO	% VAL. MEDIO
Energia media	kJ	235.36	46.05
Massi arrestati	n	0.00	0
Passaggi per cella	n	228.35	40.04
Altezza media del rimbalzo	m	0.14	35
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0.15	25.42
Velocità massima	m/s	3.71	33.97
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0.05	25

*Tabella 19 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 1 a SCENARIO 2.*

La presenza della foresta in condizioni attuali a livello del versante caso di studio permette di ridurre in modo considerevole alcuni parametri che caratterizzano il fenomeno di caduta massi simulato. In particolare si osserva che il valore medio registrato di energia cinetica si riduce in misura considerevole e, precisamente, del 46% rispetto allo scenario senza soprassuolo forestato, passando da un valore di 500 kJ a 275 kJ.

Per quanto riguarda le modifiche al movimento gravitativo tradotte in termini di passaggi per singola cella, il valore medio nello scenario forestato ha subito una flessione del 40% rispetto allo scenario precedente privo di soprassuolo. Questa riduzione viene confermata anche dal dato di probabilità di passaggio dei frammenti litoidi per ogni cella, il quale si riduce al 25% della condizione precedente, in quanto la presenza delle piante diminuisce la probabilità di transito verso valle.

La variazione di estensione spaziale della superficie interessata dal disturbo in esame viene visualizzata nell'immagine sottostante che pone a confronto i due raster di output relativi alla probabilità di passaggio (*Reach\_probability*) nei due casi. Viene indicato con il colore rosso una percentuale superiore al 75% di probabilità, con il colore arancione tra 50 e 75%, verde chiaro tra 5% e 15 %, verde scuro nel caso in cui i valori siano inferiori a 5%. La superficie interessata dal passaggio dei massi si riduce notevolmente dalla prima alla seconda situazione, in particolare è possibile osservare come celle a cui sono associati valori di probabilità inferiori al 5% raggiungono la strada e l'abitato sottostante solo se il versante non è forestato, mentre in presenza di foresta, i massi raggiungono il fondovalle solo interessando un numero di celle limitato.

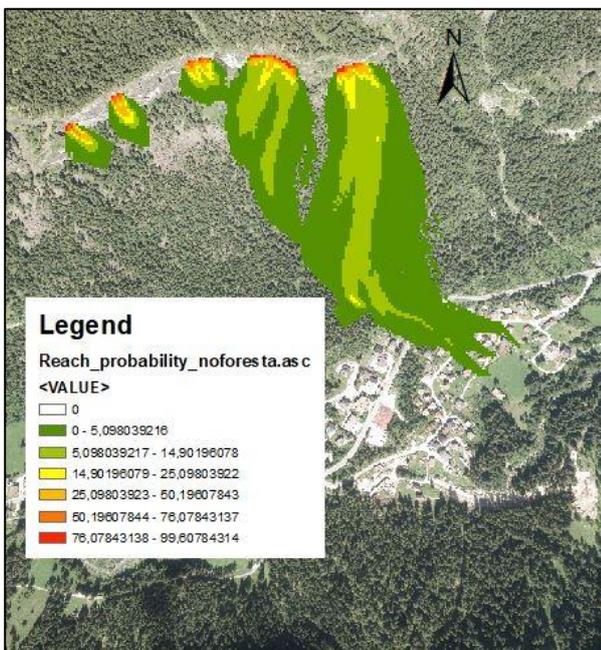


Figura 78 Probabilità di passaggio dei blocchi in moto gravitativo in caso di assenza di copertura forestale, SCENARIO 1.

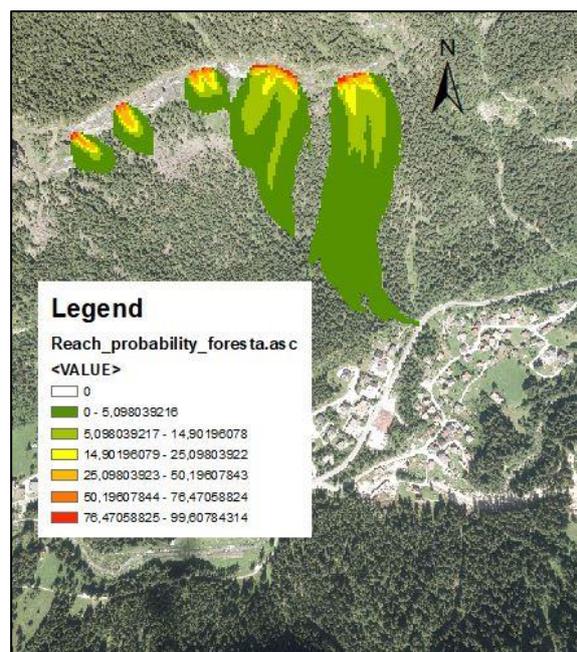


Figura 79 Probabilità di passaggio dei blocchi in moto gravitativo con presenza di soprassuolo forestato, SCENARIO 2.

Il movimento gravitativo dei massi presenta alcune caratteristiche quali velocità ed altezza media del rimbalzo in caso di impatto con il suolo. Il confronto dei valori medi di velocità massima registrati durante la simulazione dell'evento ha visto una riduzione del 34% nel caso in cui è prevista la presenza di foresta lungo il versante. Un valore simile, pari al 35%, è stato osservato anche per quanto riguarda la differenza di altezza media di rimbalzo eseguito dal masso in caso di impatto con il suolo. Non vengono registrate variazioni, invece, per quanto riguarda il numero medio di massi arrestati, dei quali si osserva una diversa dislocazione dei depositi lungo il versante in funzione della distribuzione del popolamento forestale e della morfologia del territorio. Le immagini seguenti, relative al file *Nr\_deposited*, permettono di osservare l'effetto imputabile alla presenza della foresta che comporta la deposizione di un maggior numero di massi a quote più elevate in corrispondenza delle piante, diminuendo così la runout del disturbo. E' possibile notare l'effetto di trattenuta dalla foresta nei confronti dei blocchi in caduta che avviene in modo omogeneo, con valori limitati (colore verde), ma ben distribuiti nello spazio. In entrambe le immagini si nota anche la maggiore deposizione di massi a livello del canale (colore giallo in figura), nella simulazione senza foresta questo fenomeno si protrae fino in corrispondenza del fondovalle, mentre nella simulazione con versante forestato questo fenomeno si limita alla porzione più a monte dove la densità del popolamento è ridotta. Un'ultima considerazione riguarda l'estensione del fenomeno che, nel secondo caso è molto più ridotto rispetto al primo, in quanto un numero molto limitato di massi raggiunge la strada ed il centro abitato in caso di evento.

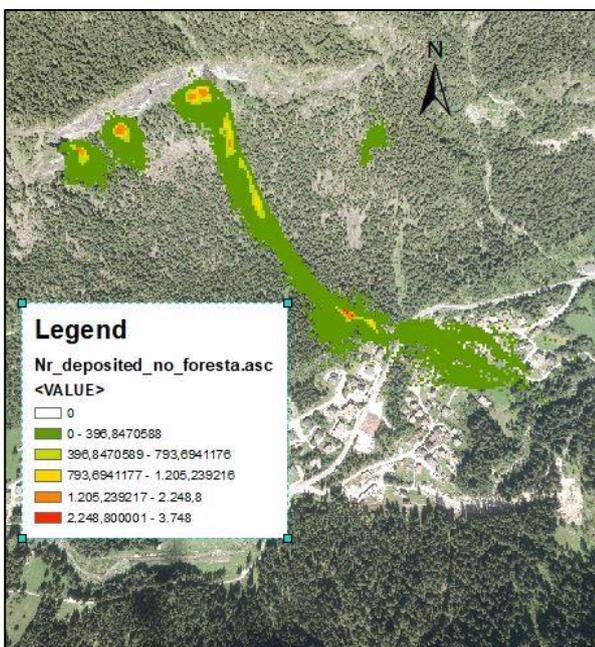


Figura 80 Numero di massi depositati lungo il versante in caso di simulazione senza foresta, SCENARIO1.

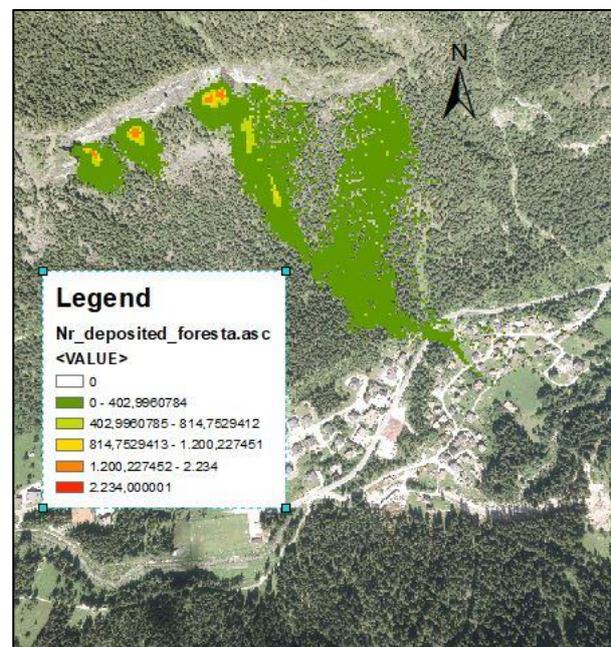


Figura 81 Distribuzione dei valori del numero di massi depositati lungo il versante in caso di simulazione con foresta, SCENARIO 2.

Infine, l'ultimo parametro di differenza ottenuto dallo studio delle due simulazioni è quello relativo al volume dei massi depositati lungo il versante. In questo caso il valore medio è maggiore per un valore pari al 25% nella simulazione che prevede la presenza di foresta, grazie alla capacità di trattenuta delle piante dislocate all'interno del sito.

Il secondo confronto che viene effettuato interessa i files di output ottenuti dalla simulazione di evento di rockfall in presenza di foresta nelle condizioni attuali contrapposta alla simulazione che prevede un effetto protettivo della foresta in condizioni ideali di stabilità (SCENARIO 2 e 3).

In particolare, i parametri più significativi che sono stati modificati nella seconda simulazione interessano la densità ad ettaro e la percentuale di conifere presenti poiché, per quanto riguarda i valori di diametro reale rilevati in campo, essi risultano già superiori ai valori minimi utili alla stabilità presenti in letteratura. Anche in questo caso è stata realizzata la differenza tra i parametri di output ottenuti nelle condizioni più favorevoli e quelle meno in modo da valutare la variazione percentuale tra i due casi.

La tabella sottostante riporta i valori che sono stati ottenuti.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VAL. MEDIO	% VAL. MEDIO
Energia media	kJ	1.05	0.38
Massi arrestati	n	0	0
Passaggi per cella	n	2.09	0.61
Altezza media del rimbalzo	m	0	0
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0	0
Velocità massima	m/s	0.09	1.23
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0	0
Numero di impatti sulla pianta	n	3.65	8.19
Altezza di impatto sul tronco	m	0	0

Tabella 20 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 2 a SCENARIO 3.

Il confronto tra le due simulazioni ha evidenziato come il popolamento attuale presenti già, sotto molti aspetti, le caratteristiche idonee ad essere considerato valido ai fini della protezione. Le differenze evidenziate nella tabella non sono molto elevate e riguardano, infatti, solamente alcuni parametri di output del modello.

In particolare alcune variazioni minime sono state osservate per quanto riguarda i valori di energia media e di conseguenza i valori massimi di velocità media registrati. Il numero medio di passaggi di massi per ogni cella risulta essere leggermente superiore in condizioni ideali, a causa del maggior numero di piante ad ettaro che favorisce la formazione di accumuli minerali.

L'unico parametro che ha visto una maggiore variazione con la parziale modifica delle caratteristiche del popolamento forestale è il numero medio di impatti causati dai blocchi sulle piante, il quale viene descritto dalle seguenti figure che rappresentano i file di output *Nr\_Tree\_Impacts* nelle due simulazioni.

Nella figura di sinistra, che descrive la situazione reale, si osserva come nella fascia alta centrale al fenomeno (contrassegnata dal colore giallo) il numero di impatti medi è maggiore con valori massimi fino a 7492 impatti. Nel caso della simulazione con presenza di foresta in condizioni ideali, il numero medio di impatti presenti per tronco raggiunge valori maggiori, come evidenziato nell'immagine sottostante di destra (valori maggiori di colore rosso). Il numero massimo di impatti medi, infatti, può arrivare fino a 11240.

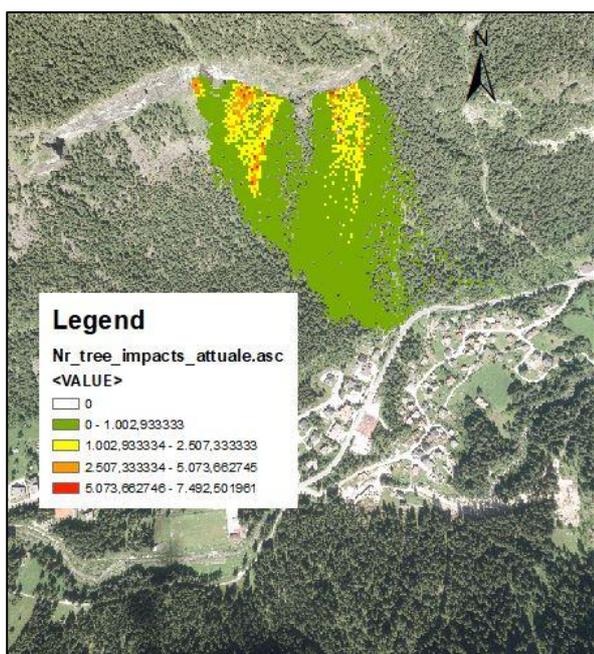


Figura 82 Distribuzione del numero medio di impatti dei blocchi sulle piante lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 2.

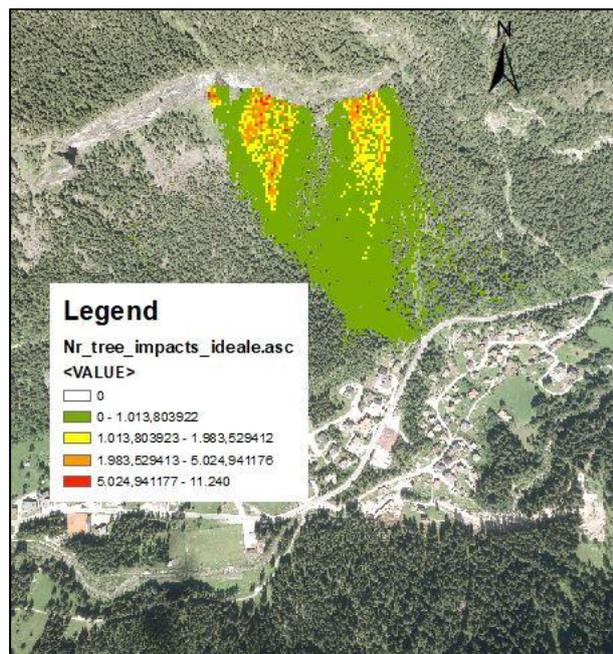


Figura 83 Distribuzione del numero medio di impatti dei blocchi sulle piante lungo il versante in condizioni ideali, SCENARIO 3.

I valori medi relativi a tutti gli altri parametri non citati sopra non presentano alcuna variazione a seguito di questo confronto tra le condizioni attuali e le condizioni ideali di una foresta di protezione.

Il terzo confronto che viene effettuato intende paragonare i file ottenuti nella simulazione di evento realizzata sul versante in condizioni attuali (SCENARIO 4) che prevede la presenza di foresta e rete paramassi a monte della strada, con la situazione migliorativa scelta (SCENARIO 5) attraverso le varie simulazioni che prevedono il mantenimento della foresta in condizioni attuali e la posa di opere finalizzate alla protezione degli elementi sensibili.

La tabella riportata di seguito descrive i valori di differenza calcolati confrontando le due simulazioni, a differenza dei confronti precedenti, è stato scelto di valutare i diversi parametri in termini cautelativi e per questo sono stati considerati i dati massimi.

DESCRIZIONE	UNITA' DI MISURA	VAL. MAX	VAL. MAX %
Energia media	kJ	758.45	14
Massi arrestati	n	203	9
Passaggi per cella	n	13	0.06
Altezza media del rimbalzo	m	0	0
Probabilità di passaggio del masso nella cella	%	0	0
Velocità massima	m/s	0	0
Volume del masso arrestato	m <sup>3</sup>	0.47	14
Numero di impatti sulla pianta	n	0	0
Altezza di impatto sul tronco	m	0	0

*Tabella 21 Variazioni percentuali dei vari parametri da SCENARIO 4 a SCENARIO 5.*

Da questo confronto, che prende in considerazione la variazione dei valori massimi di ogni parametro di output del modello, è possibile notare come sotto alcuni aspetti si verificano dei cambiamenti, mentre altri rimangono invariati.

In particolare si nota una variazione del 14% dei valori massimi di energia cinetica registrata all'interno della singola cella. Di seguito viene riportato il confronto tra la distribuzione dell'energia massima lungo il versante nella simulazione di un evento di caduta massi in condizioni attuali con la simulazione realizzata considerando l'ipotesi di sistemazione del versante mediante opere di difesa. E' dunque possibile osservare come le strutture paramassi possano ostacolare la diffusione del fenomeno a valle delle stesse nel caso in cui i valori di energia in questo punto siano inferiori a 4000 kJ (celle di colore arancio) oppure, come nella maggior parte delle celle inferiori a 2000 kJ (celle di colore giallo). Talvolta i valori di energia massima per ogni cella possono raggiungere anche valori massimi di 1000 kJ come è reso evidente dalle celle di colore verde. Confrontando tra loro le immagini relative alle due simulazioni è possibile osservare come i valori massimi di energia verificabile in corrispondenza delle infrastrutture possa arrivare fino a 4000 kJ evidenziando in modo inequivocabile la pericolosità intrinseca del fenomeno in caso di evento.

Tramite la realizzazione delle opere e l'azione dissipatrice del bosco, l'energia massima può essere limitata notevolmente per la maggioranza delle celle, a parte una piccola porzione di versante a sinistra della briglia dove si nota una deviazione energetica con valori comunque inferiori a 1000 kJ.

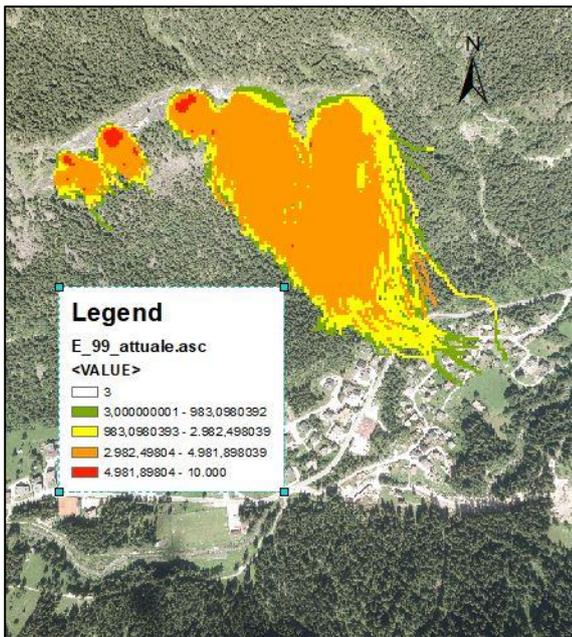


Figura 84 Distribuzione dei valori di energia massima dei massi in movimento lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.

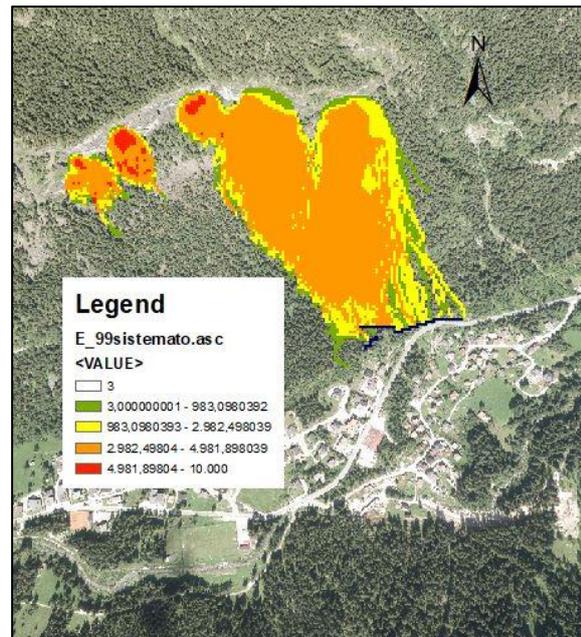


Figura 85 Distribuzione dei valori di energia massima dei massi in movimento lungo il versante secondo le ipotesi di sistemazione, SCENARIO 5.

Il parametro direttamente collegato ai valori energetici è quello della velocità massima raggiunta dai massi in moto gravitativo lungo il versante come viene riportato nel file di output  $V_{max}$ , i cui valori non sono risultati cambiare tra le due simulazioni. La velocità massima dei massi transitanti in corrispondenza delle opere è compresa tra 25 e 50 m/s.

Un altro parametro i cui valori massimi rimangono invariati tra le condizioni attuali e l'ipotesi di miglioramento del versante, è quello dell'altezza di rimbalzo dei massi in caso di impatto con il suolo, che, in corrispondenza delle opere presenta valori compresi tra 1 e 2 metri.

Gli aspetti che subiscono delle variazioni a seguito della posa di opere di difesa sono, invece, i parametri che riguardano le caratteristiche dei massi, sia in termini di numero che in termini di volumi depositati.

Il numero massimo di massi arrestati per cella aumenta del 9% nella simulazione con reti, in quanto viene concentrato a monte di esse un maggior numero di blocchi, i quali, nella situazione attuale, invece, risultano essere anche distribuiti nel fondovalle.

Per quanto riguarda il valore di volume massimo dei blocchi depositati per cella, esso risulta aumentare del 14% nel caso della simulazione con opere. Le immagini sottostanti evidenziano le condizioni migliorative che potrebbero essere raggiunte in caso di sistemazione del versante, nel primo caso il confronto riguarda il numero di massi depositati descritti dal file  $Nr\_deposited$ , nel secondo caso viene posto a confronto il file  $Rvol\_deposit$ .

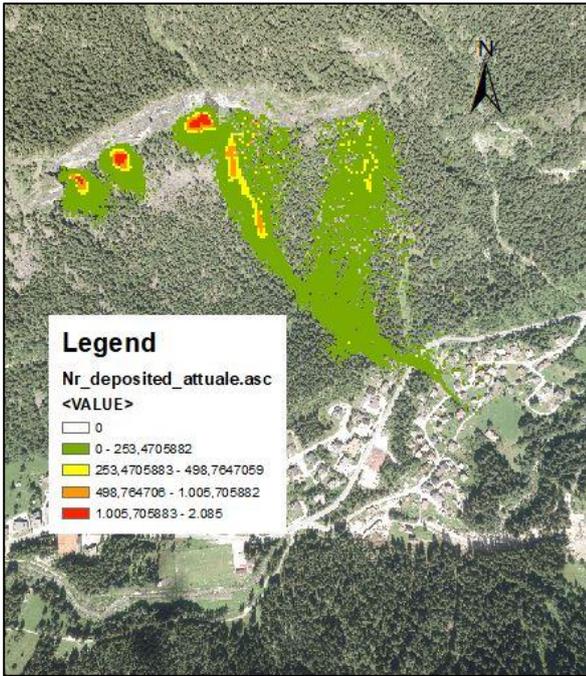


Figura 86 Distribuzione del numero massimo di massi depositati in ogni cella lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.

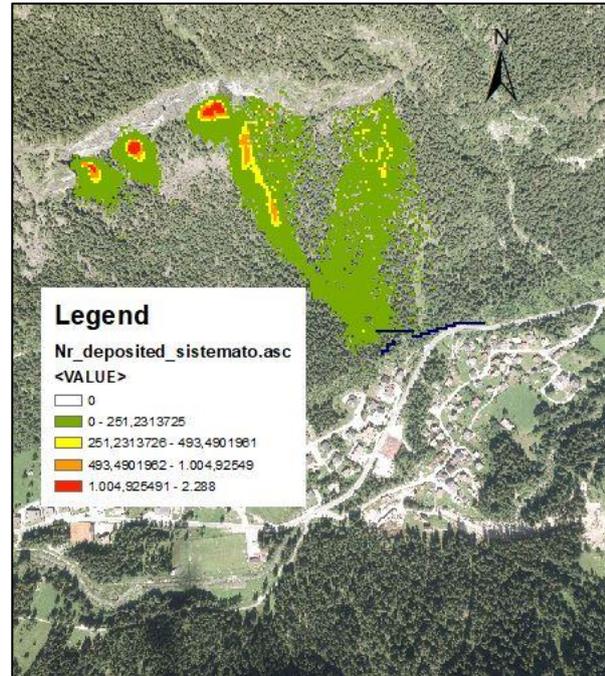


Figura 87 Distribuzione del numero massimo di massi depositati in ogni cella lungo il versante secondo le ipotesi di sistemazione, SCENARIO 5.

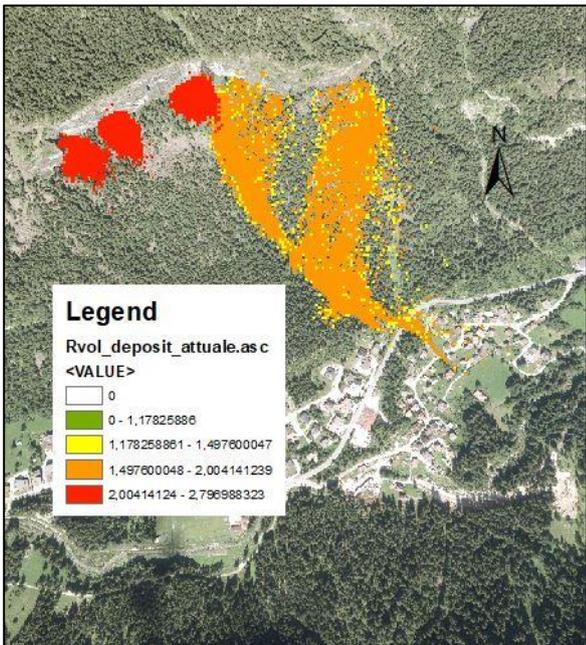


Figura 88 Distribuzione dei valori di volume dei massi depositati in ogni cella lungo il versante in condizioni attuali, SCENARIO 4.

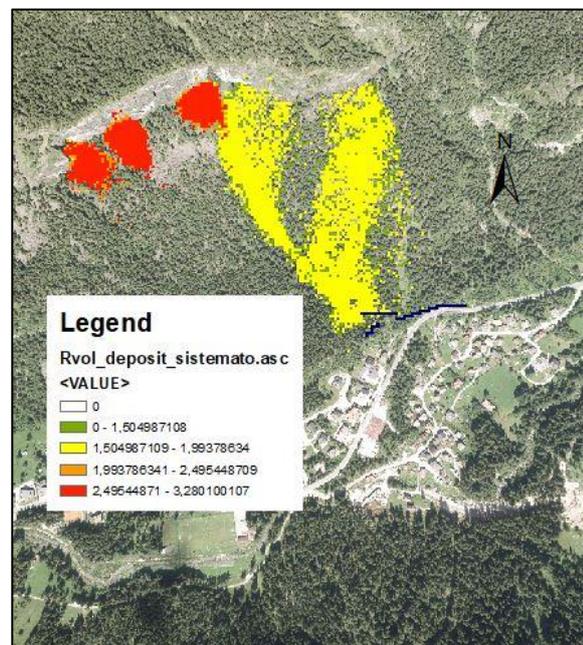


Figura 89 Distribuzione dei valori di volume dei massi in ogni cella lungo il versante secondo le ipotesi di sistemazione, SCENARIO 5.

Come è possibile osservare dai confronti nei due casi, la presenza delle opere di protezione permette di limitare ulteriormente l'entità dell'evento di rockfall in quanto in corrispondenza delle reti si depositano tutti i massi che non sono stati precedentemente trattenuti dalla foresta riducendo la runout per più di 200 metri verso valle.

I valori di volume depositati in corrispondenza della zona di arresto del fenomeno sono compresi tra 1,50 e 2,00 m<sup>3</sup> ed il numero dei massi in questo punto è inferiore a 1000 massi su 5000 lanci che caratterizzano la simulazione.

## 8. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' DA CADUTA MASSI NELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

La realizzazione delle simulazioni di rockfall con il software Rockyfor3D hanno permesso di prendere coscienza del potenziale sviluppo del fenomeno, della sua entità e propagazione lungo il versante, comprendendone la pericolosità sotto diversi aspetti. E' stato quantificato l'importante ruolo della foresta come principale opera di difesa naturale, effetto soltanto migliorabile dalla realizzazione di manufatti antropici, che migliorino le condizioni già esistenti.

A partire dai diversi scenari di simulazione, ai fini della mappatura sono stati mantenuti i parametri di output delle condizioni attuali che prevedono la presenza di foresta e della rete paramassi a monte della strada provinciale.

La valutazione del pericolo richiede la previsione di: probabilità temporale di accadimento (frequenza annuale o periodo di ritorno), predisposizione spaziale degli eventi, traiettoria nello spazio, massima runout dei blocchi e distribuzione delle intensità associata alla caduta massi in ogni posizione e lungo ciascun percorso (Dorren et al., 2004). Il presente studio risulta carente per quanto riguarda alcune informazioni relative in particolare alla probabilità temporale di accadimento. La mancanza di una serie storica relativa ai fenomeni gravitativi che hanno interessato la zona nel passato è un limite importante nel processo di mappatura del pericolo.

### 8.1 IL METODO RHV

Per conoscere le condizioni di sicurezza nelle quali si presenta attualmente l'area oggetto di studio è utile realizzare una mappatura che permetta di suddividere il territorio in tre livelli di gravità del fenomeno. Ci sono diversi metodi che permettono queste operazioni in funzione dei dati a disposizione e della scala spaziale alla quale si vuole operare. In questo caso la scala di analisi scelta è di tipo locale ed avviene a partire dai parametri di output ottenuti come risultati della modellazione 3D descritta precedentemente.

L'approccio scelto è il *Rockfall Hazard Vector* sigla RHV ideato da Crosta e Agliardi nel 2003.

Si tratta in particolare di una classificazione vettoriale che permette di comprendere in maniera più chiara la localizzazione e la classificazione del pericolo.

Gli elementi fondamentali che garantiscono la validità della mappatura del pericolo sono:

- un approccio modellistico fisicamente basato, il quale permette una descrizione accurata dei fenomeni di caduta massi;

- l'accuratezza dei dati di input, che influisce molto sulla qualità della mappatura finale;

Nell'approccio RHV, la suscettibilità in un determinato punto si presume essere una funzione di tre variabili: frequenza di transito, energia cinetica del blocco e altezza della traiettoria (Kranitz F., Mariani R., 2013). Questo approccio permette di valutare la suscettibilità tenendo conto sia della frequenza che dell'intensità del disturbo.

Le tre componenti sopra elencate vengono opportunamente rappresentate all'interno di uno spazio tridimensionale, attraverso la definizione di una matrice 3-D che ritrae il pericolo come una funzione degli indicatori adottati (Crosta et al., 2003).

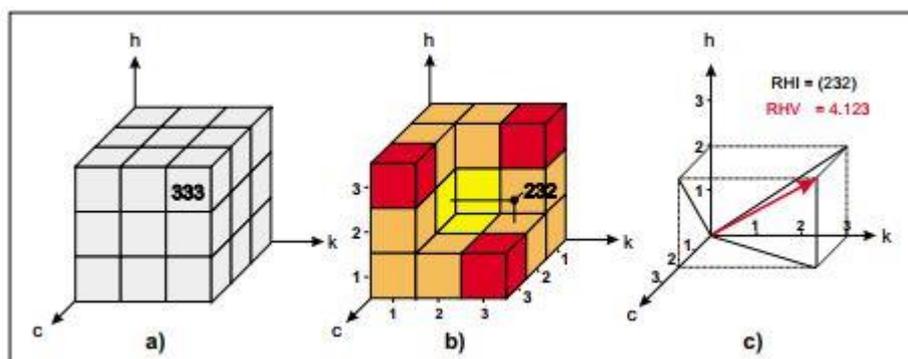


Figura 90 Matrice tridimensionale impiegata per la stima del pericolo di caduta massi secondo il metodo RHV, dove a indica il posizionamento dell'indice RHI, b indica questo valore riportato nella matrice cubica, c indica il valore finale di RHV.

Dal momento in cui queste tre variabili sono caratterizzate da diversi significati fisici in termini di magnitudo, i loro valori devono essere riclassificati adeguatamente in tre classi (Crosta et al, 2003). Le condizioni di pericolo da caduta massi definite dalla matrice 3-D possono essere espresse utilizzando il *Rockfall Hazard Index* definito dalla sigla RHI, il quale necessita di una riclassificazione dei valori delle variabili adottate in funzione della scala spaziale per ottenere il parametro *Rockfall Hazard Vector* dalla sigla RHV. Un numero di classi limitato permette, infatti, di semplificare la classificazione e la distribuzione dei valori di RHI per ottenere una mappatura più chiara. Partendo dal presupposto che spesso la valutazione del pericolo avviene a fini di pianificazione delle misure di mitigazione nei confronti del fenomeno, la riclassificazione dei parametri c, k e h è direttamente correlata a questo possibile impiego finale. Per quanto riguarda la riclassificazione del parametro c, essa risulta particolarmente difficile in quanto il numero dei massi transitanti attraverso una cella dipende dalla topografia e dal numero dei lanci, variando fortemente da caso a caso. Per questo motivo, il parametro viene riclassificato mediante due diversi approcci in funzione del fatto che la modellazione sia stata realizzata su scala locale o regionale (Crosta et al., 2003). Nel caso di questo studio, l'analisi riguarda una scala locale dove i parametri geomeccanici e la localizzazione delle aree sorgente sono noti con maggiore approfondimento.

Una volta che i parametri sono stati riclassificati si ottengono i valori di RHI, i quali, a seguito del raggruppamento in tre classi di pericolo (molto elevato, elevato ed intermedio), è possibile ottenere una classificazione che trasforma un valore di indice posizionale in un indice con valori sequenziali che viene definito RHV.

La metodologia per la mappatura tramite l'approccio RHV ha seguito, dunque, i seguenti step:

- Individuazione delle sorgenti potenziali di caduta massi e caratterizzazione della loro suscettibilità all'innesco;
- Modellazione della propagazione della caduta massi impiegando il software Rockyfor3D;
- Estrazione e riclassificazione per ogni cella del modello dei valori di: frequenza di transito ( $c$  espressa nel file di output del modello come *Reach\_probability.asc*), altezza massima ( $h$ , espressa nel file di output del modello come *Ph\_99.asc*), ed energia cinetica massima ( $k$ , espressa nel file di output del modello come *E\_99.asc*) come descritto dalla tabella riportata di seguito;

class	c (normalised)		k (kJ)	h (m)
	regional scale	local scale		
1	< 0.2	< 0.01	≤ 700	≤ 4
2	0.2 – 1	0.01 – 0.1	700 – 2500	4 – 10
3	> 1	> 0.1	≥ 2500	≥ 10

Tabella 22 Tabella di riferimento per la riclassificazione dei parametri del metodo RHV.

- Calcolo dell'indice RHV definito dalla formula:

$$|RHV| = \sqrt{c^2 + k^2 + h^2}$$

(12)

Il risultato dell'applicazione di questo approccio al versante caso di studio ha permesso di realizzare la zonazione del sito secondo la scala spaziale locale come riportato nell'immagine sottostante.

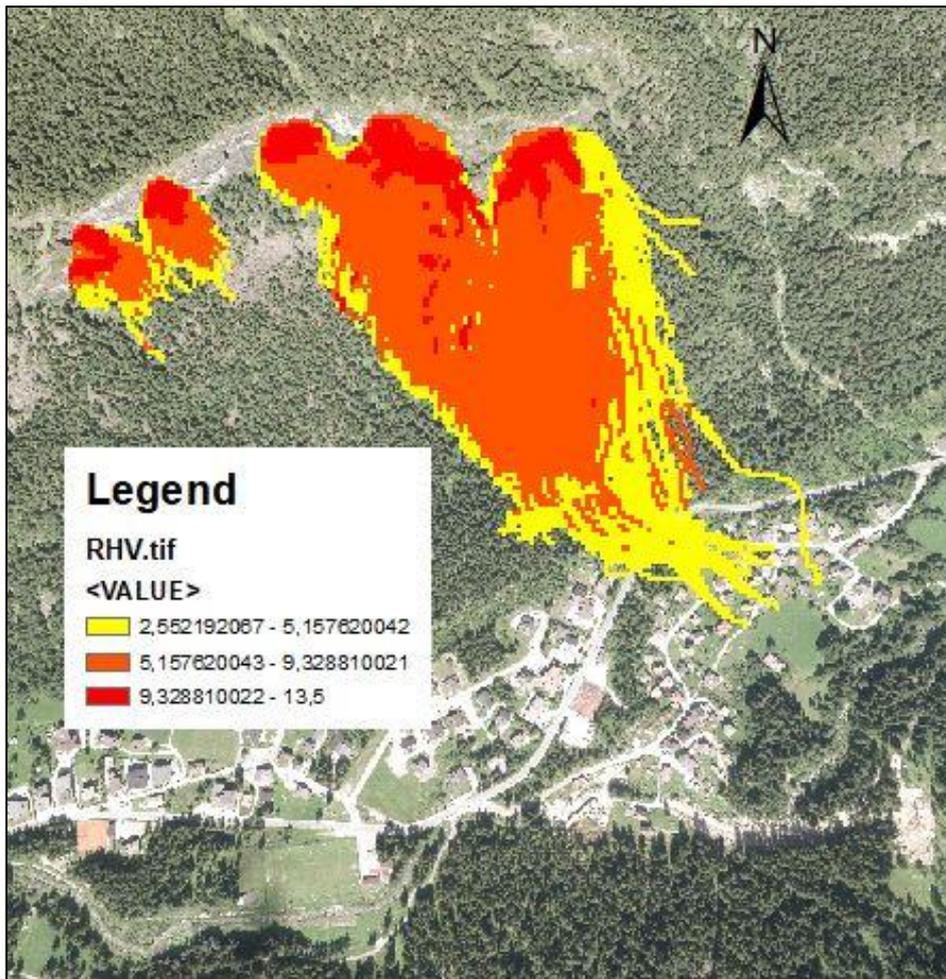


Figura 91 Mappatura del versante in esame con il metodo RHV secondo il quale si possono distinguere le tre classi di pericolo (colori rosso, arancio e giallo).

L'applicazione del metodo RHV ha portato alla definizione di tre classi di suscettibilità le quali poi permettono, a seguito del confronto con i valori di frequenza del disturbo, la mappatura del pericolo da crollo. Esse sono:

- Classe di RHV MOLTO ELEVATO descritta dalle celle di colore rosso, che interessa valori di RHV compresi tra 9 e 13,5;
- Classe di RHV ELEVATO descritta dalle celle di colore arancio, che riguarda valori di RHV compresi tra 5 e 9;
- Classe di RHV INTERMEDIO descritta dalle celle di colore giallo, che interessa valori compresi tra 2,5 e 5;

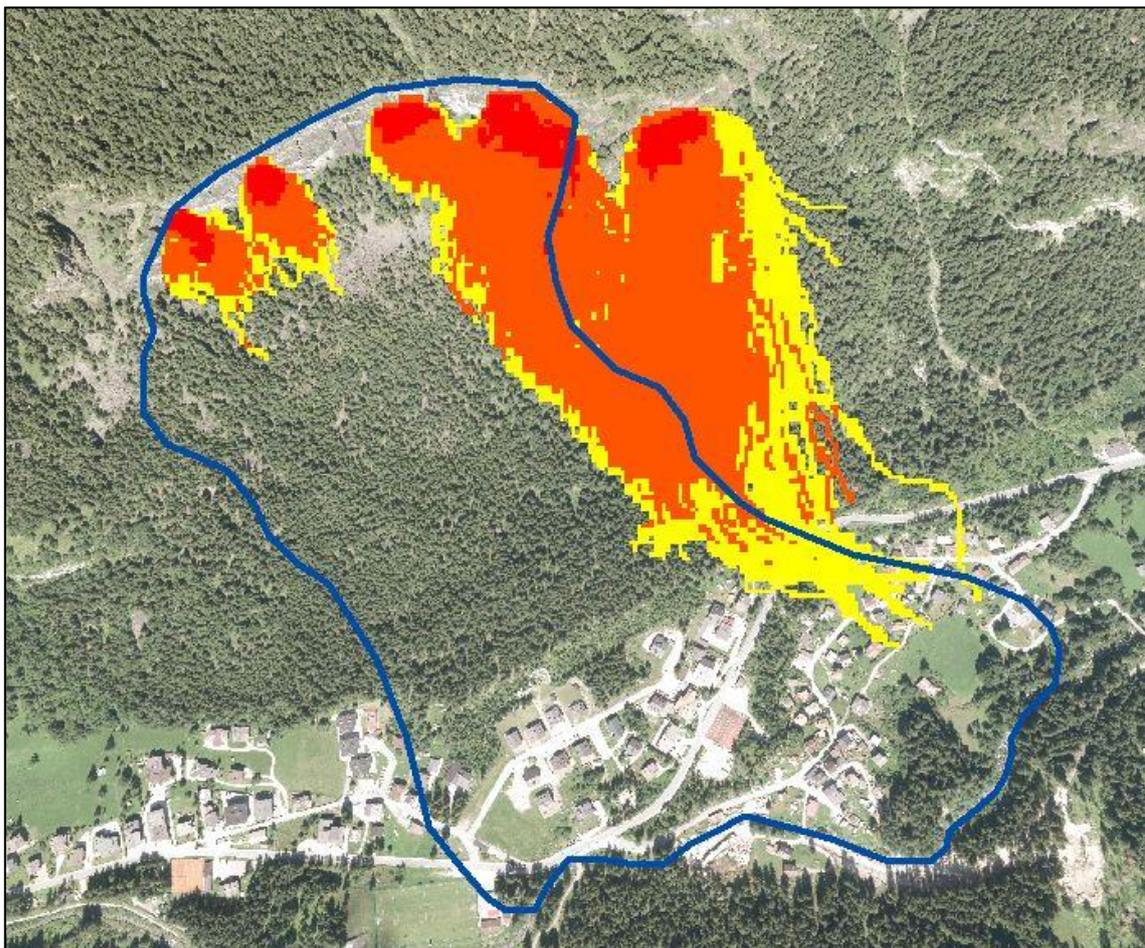
La classificazione dell'indice RHV può essere estremamente utile nella definizione delle priorità di intervento ai fini della mitigazione, mentre non è direttamente trasponibile nella definizione della pericolosità PAI dove sono necessarie delle valutazioni anche sulla storicità degli eventi e sulla ricorrenza temporale (Kranitz e Mariani, 2013). Questo è dovuto al fatto che la definizione dei

parametri di ingresso del metodo avviene in modo soggettivo, nonostante il fatto che poi la loro determinazione sia oggettiva.

La stima del parametro RHV e le simulazioni che sono state realizzate nel sito caso di studio possono essere impiegate, oltre che per una maggiore conoscenza del fenomeno gravitativo, anche ai fini pianificatori in quanto si tratta di analisi utili ai fini della mappatura oppure dell'aggiornamento delle mappe di pericolo esistenti.

Dalla consultazione del Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del fiume Piave, si osserva come la zona corrispondente al sito di studio viene classificata come P1, dunque definita di pericolosità geologica moderata. A seguito dello studio delle dinamiche di caduta massi a livello di questo versante, mediante una serie di simulazioni nell'ambito di diversi scenari, è stato possibile realizzare un confronto tra i risultati ottenuti in queste analisi e la mappatura attuale presente nell'ambito del PAI.

Di seguito viene riportata la figura relativa a questo confronto.



*Figura 92 Confronto tra la mappatura attuale della zona prevista dal PAI (poligono con perimetro di colore blu) e i risultati della mappatura secondo il metodo RHV.*

Come è possibile osservare dalla figura, la mappatura prevista dal PAI, il cui perimetro viene evidenziato con il colore blu, descrive solo parzialmente le condizioni nelle quali si presenta il

versante caso di studio. Per quanto riguarda la zona di innesco del fenomeno (tra quota 1650 m e quota 1350 m s.l.m.), la fascia alla destra orografica del rio è stata adeguatamente mappata, mentre alla sinistra orografica non considera tutte le aree sorgente del fenomeno di caduta massi. In questa zona è consigliato un aumento della superficie definita di pericolosità geologica moderata (P1) mantenendo come supporto di riferimento il metodo RHV applicato.

Un discorso analogo va fatto per quanto riguarda la mappatura della zona di transito (indicativamente tra quota 1350 m e quota 1200 m s.l.m.), nel cui caso si suggerisce un ampliamento alla sinistra orografica.

La zona di deposito o arresto del fenomeno (approssimativamente da quota 1200 m. s.l.m.), invece, può essere definita adeguatamente mappata all'interno del PAI.

Per quanto riguarda la porzione della mappa alla destra orografica del canale che viene compresa nella mappatura PAI, ma dai parametri di output ottenuti da questo studio non si rileva una presenza del fenomeno, devono essere compiute alcune osservazioni.

Il presente studio è stato realizzato attribuendo al modello i parametri di scabrezza rilevati in campo ma, a scopo cautelativo e per una mappatura PAI più precisa ed accurata è consigliabile realizzare delle simulazioni a scabrezza ridotta in questa particolare fascia, analizzando il fenomeno di transito anche dove le simulazioni non lo prevedono.

Come è possibile dedurre dalle considerazioni di cui sopra, il presente studio può essere definito un supporto importante (anche se non esaustivo per tutta la zona) in fase di revisione del Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Fiume Piave ai fini di ottenere una mappatura del pericolo adeguata alle condizioni attuali del versante in esame.

Per condizioni attuali del versante in esame si intendono il mantenimento delle condizioni di scabrezza del suolo e delle caratteristiche del soprassuolo forestale così come si presenta oggi. Se i parametri che permettono di garantire il ruolo protettivo attuale della foresta dovessero per qualche motivo essere modificati, sia i valori delle classificazioni RHV che PAI subirebbero dei cambiamenti.

## 8.2 GESTIONE FORESTALE MIRATA ALLA PROTEZIONE

Tenuto conto dei risultati ottenuti nelle simulazioni, che hanno permesso di definire un determinato livello di RHV e il ruolo della foresta in esame a fini protettivi nei confronti degli elementi sensibili localizzati a valle, vengono definite alcune linee guida per la gestione del popolamento forestale.

In questo approccio, infatti, la foresta viene considerata alla pari delle altre misure protettive, sia in termini di adeguata capacità di resistenza sia in termini di gestione (Dorren et al., 2012).

L'obiettivo che deve essere perseguito tramite la gestione forestale è il mantenimento, o il miglioramento, dei valori attuali di *Stand Density Index*, parametro legato alla densità ipotetica ideato da Reineke (1933) ai fini di conoscere e confrontare tra loro le foreste di protezione. La formula utilizzata è  $SDI = N \left( \frac{dm}{25} \right)^{1.065}$  (13)

dove le variabili sono il numero delle piante (N) ed il diametro medio (dm).

Questo parametro deve essere stimato, possibilmente, su aree di saggio dal raggio di 10 metri.

La tabella sottostante riporta i valori medi delle due variabili utili al calcolo dell'SDI nella condizione in cui si presenta il versante (ATTUALE) e nelle condizioni utili a garantire la stabilità del popolamento sulla base dei parametri definiti dalle esperienze gestionali delle regioni Piemonte e Valle d'Aosta (IDEALE).

	ATTUALE	IDEALE
dm (cm)	26	30
N	570	600

*Tabella 23 Descrizione dei parametri per la stima dell'indice SDI, sia in condizioni attuali in cui si presenta il popolamento, sia nelle condizioni ideali definite dalla letteratura.*

Nel popolamento caso di studio il valore ottenuto del coefficiente SDI è pari a 607, corrispondente nella tabella di riferimento ad un livello protettivo intermedio (intervallo 400-800), con area basale media compresa tra 19 e 41 m<sup>2</sup>/ha.

Nel caso in cui la foresta presenti parametri ideali di stabilità, il valore medio di SDI è pari a 804 equivalente, nella tabella di Reineke, al livello di protezione buono (intervallo 801-1200) con un popolamento denso ed un'area basale media compresa tra 42 e 65 m<sup>2</sup>/ha come descritto dalla tabella seguente.

Protective effect <sup>1</sup>	Stand density SDI	Comparable basal area (m <sup>2</sup> /ha)	Control stands <sup>2</sup>
Low	Up to 400	Up to 18	Sparse and open stands
Medium	401–800	19–41	Normal and loose stands, thinned stands
Good	801–1200	42–65	Dense stands
Very good	Over 1200	Over 65	Very dense stands

*Tabella 24 Diversi livelli di protezione associati a valori di SDI calcolati (Reineke, 1933).*

Nell'ottica del mantenimento del livello di protezione sopra descritto, o del suo incremento a condizioni ideali, è fondamentale garantire la perpetuità delle presenti condizioni del bosco, per fare ciò è importante mantenere costanti alcuni elementi nella realizzazione delle così dette "cure minime per le foreste protettive".

- In primo luogo deve essere considerato il valore di *diametro minimo efficace* che, in questo caso va mantenuto  $\geq 30$  cm tenendo in considerazione sia la pendenza del versante la quale supera i  $35^\circ$ , che l'entità dei volumi dei blocchi in movimento (fino a  $2,8 \text{ m}^3$ ). Il perpetuarsi del popolamento con questo valore soglia di diametro permette di garantire la sicurezza a livello del fondovalle, considerando che la forma prevalente dei massi transitanti tende ad essere sub-sferica nel momento in cui interessa la fascia boscata, per cui un valore alto in questo caso è necessario.
- Per garantire le condizioni sopra descritte, è fondamentale che il popolamento sia in continuo rinnovamento, con lo sviluppo di nuovi individui che potranno garantire la perpetuità del servizio protettivo. A questi fini viene prevista la realizzazione di *aperture (o gaps)* in modo da favorire lo sviluppo della rinnovazione naturale e la crescita della nuova generazione di piantine. Queste buche non devono però ostacolare il regolare svolgimento dell'attività primaria di protezione, la cui larghezza deve essere inferiore a 20 metri lungo la linea di massima pendenza.
- In caso di interventi di alleggerimento del versante, con rimozione delle piante più grandi, instabili o deperenti, si consiglia di rilasciare la necromassa a terra per molteplici motivazioni. Da un lato perché la presenza di maggiore sostanza organica favorisce lo sviluppo della rinnovazione o garantisce l'attecchimento delle piantine in corrispondenza di punti favorevoli, rialzati o protetti che costituiscono una garanzia di sopravvivenza dell'individuo. Dall'altro lato, la presenza di tronchi a terra, anche non sramati permette di ottenere un maggiore effetto "rete" e favorire la deposizione di frammenti litoidi in quanto costituisce essa stessa un ostacolo al moto, prestando attenzione a non creare accumuli che possano favorire il movimento, originando un effetto "trampolino". La necromassa svolge un importante ruolo all'interno del ciclo biogeochimico, nella catena trofica, nella rigenerazione naturale e come stock di carbonio. Essa costituisce la chiave per lo sviluppo di specie di nicchia (Lachat et al., 2013).

Infine, in caso di abbattimento di individui di Abete rosso si consiglia di scortecciare la pianta in modo da limitare la diffusione di scolitidi.

- Un'ulteriore osservazione riguarda la composizione specifica del popolamento forestale la quale è caratterizzata principalmente da Abete rosso, specie a scarsa consistenza e sensibile all'attacco parassitario che causa marciumi e carie a livello del fusto. Anche il Faggio, nonostante sia meccanicamente resistente, è soggetto ad indebolimenti strutturali. Alla luce di queste considerazioni, sono consigliati gli interventi di eliminazione degli individui instabili o deperenti favorendo la presenza di latifoglie i cui polloni possono contribuire alla trattenuta

nella porzione del versante a monte attraverso l'effetto "rete". In caso di interventi finalizzati all'alleggerimento del versante, il taglio degli individui di maggiori dimensioni deve avvenire con il mantenimento di ceppaie alte per incrementare la superficie forestale sottoposta ad impatti con l'obiettivo di limitare l'energia cinetica posseduta dai massi.

- Per quanto riguarda la struttura del popolamento nella fascia sottostante al Sass Negher, dove le condizioni stazionali, sia per quanto riguarda la potenza dell'orizzonte organico molto limitata o assente, che a causa dei notevoli accumuli detritici presenti non favorevoli, la soluzione potrebbe essere favorire la presenza di collettivi o microcollettivi. Questa struttura particolare permetterebbe al bosco di svilupparsi svolgendo una funzione di trattenuta di cui, al momento questo tratto di versante è sprovvisto.
- In caso di utilizzazioni, soprattutto per quanto riguarda la porzione del versante alla sinistra orografica dove attualmente il fenomeno è attivo a causa di una notevole instabilità della scogliera a monte, un possibile efficace intervento di approccio più naturalistico riguarda la formazione di barriere naturali mantenendo le ceppaie alte ed il tronco a monte con un angolazione dello stesso compresa tra i 15 e i 35° nei confronti della linea di massima pendenza. Questa procedura ha l'obiettivo di deviare il masso nella sua corsa senza causarne l'arresto, ma inducendo una perdita considerevole di energia cinetica che limita il fenomeno a valle.

### 8.3 IPOTESI DI INTERVENTI FUTURI

Storicamente, nelle Alpi, le misure tecniche di intervento sono state posizionate nei versanti non forestati o nei versanti nei quali la foresta da sola non può provvedere ad un sufficiente livello di protezione (Dorren et al., 2012). Nel sito caso di studio, la foresta svolge un ruolo molto importante in termini di riduzione dell'entità del fenomeno gravitativo come è stato osservato attraverso le simulazioni. Nonostante ciò, per incrementare il livello di sicurezza soprattutto nei confronti degli elementi sensibili quali la strada provinciale 641 ed il centro abitato di Col di Rocca, è stata valutata la possibilità di incrementare il numero e l'estensione delle reti paramassi già esistenti, ma presenti in condizioni marginali rispetto al disturbo.

Nelle simulazioni realizzate nell'ambito dello SCENARIO 5 sono state valutate le seguenti opzioni:

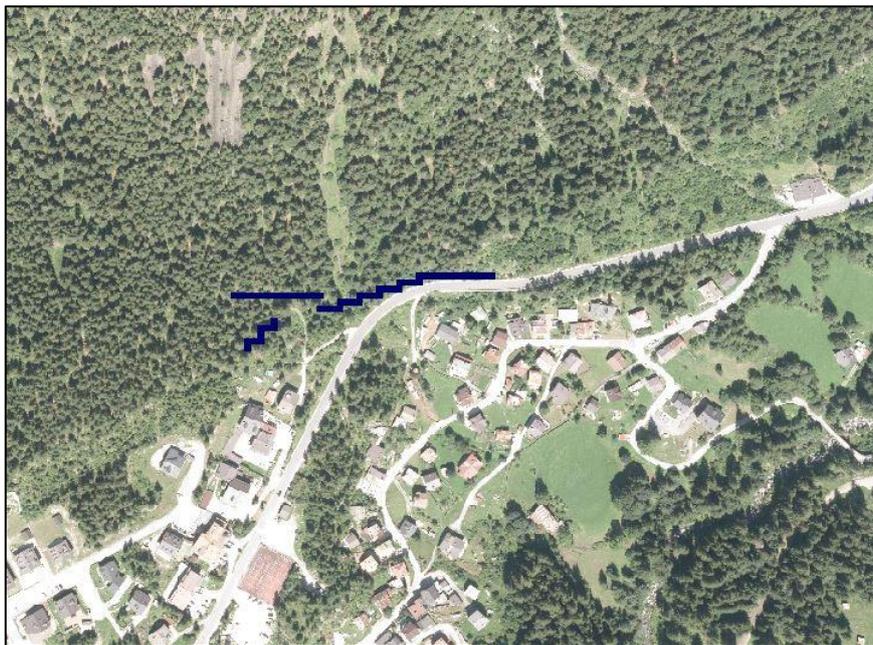
- Due file di reti paramassi disposte in serie con altezza dell'opera pari a 2 metri;
- Una fila di reti paramassi di altezza 4 metri, in quanto superiore al valore massimo di rimbalzo simulato in condizioni di assenza di foresta (pari a 3,5 metri).

- Una fila di reti paramassi di altezza 3 metri, in quanto superiore al valore massimo di rimbalzo simulato in condizioni di versante boscato (compresa tra 1 e 2 metri).

Il confronto tra queste prove ha permesso di valutare la soluzione più adatta nelle condizioni attuali del versante sia dal punto di vista dell'efficienza di trattenuta che dal punto di vista economico. Si ipotizza il posizionamento di una sola fila di reti di acciaio ad alta resistenza alte 3 metri con categoria (ETA) 6 in grado di sopportare un'energia cinetica di 3000 kJ.

Si tratta in particolare di strutture caratterizzate da funi longitudinali di trasmissione che ancorano la struttura al versante e collegate alla rete tramite un montante.

Come anticipato nel capitolo 5.3.1.2 nell'ambito della seconda simulazione del III° scenario, le opere di mitigazione ipotizzate sono localizzate principalmente a monte della strada provinciale 641 e della strada forestale che porta in località Sofedera. La loro posizione viene indicata nell'immagine sottostante ed evidenziata con il colore blu.



*Figura 93 Localizzazione delle opere di difesa nel sito caso di studio.*

Nella figura sottostante sono invece riportate le caratteristiche tecniche della tipologia di reti scelte per la sistemazione del versante caso di studio (cerchio rosso).

SPECIFICHE TECNICHE	GBE-100A-R <sup>2</sup>	GBE-500A	GBE-500A-R <sup>2</sup>	GBE-1000A	GBE-1000A-R <sup>2</sup>	GBE-2000A	GBE-3000A
Categoria energetica <sup>3</sup> ETA	0 (100 kJ)	2 (500 kJ)	2 (500 kJ)	3 (1000 kJ)	3 (1000 kJ)	5 (2000 kJ)	6 (3000 kJ)
Approvazione ETA <sup>2</sup> n.	ETA 15/0304	ETA-09/0085	ETA 16/0329	ETA 09/0262	WSL <sup>1</sup>	ETA 09/0369	ETA 10/0084
Certificazione UFAM <sup>4</sup> n.	S 14-6	-	-	-	-	-	-
Marchio CE	1301-CPR-1117	1301-CPD-0572	1301-CPR-1172	1301-CPR-0573	-	1301-CPR-0622	1301-CPD-0630
Rete in fune spiroidale SPIDER <sup>®</sup>	-	-	-	-	-	S4-130	S4-130
Fune spiroidale Ø	-	-	-	-	-	8.6 mm	8.6 mm
Tipo di maglia	TECCO <sup>®</sup> G80/4	-	TECCO <sup>®</sup> G80/4				
Filo Ø	4 mm	-	4 mm				
Maglia Ø	80 mm	130 mm	80/130 mm				
Montante tipo	Flanged profile	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA	HEA
Interasse montante	6-12 m	8-12 m	8-12 m				
Fune Ø min./max.	12/14 mm	14/18 mm	12/18 mm	14/20 mm	14/20 mm	16/22 mm	20/22 mm
Numero di elementi frenanti nella fune di supporto inferiore Per circa 80-100 metri lineari	-	4 x U-150	4 x U-150	4 x U-300	4 x U-300	4 x U-300-R16	4 x U-300-R20
Altezza barriera min./max.	2/3 m	2/3/4/5 m	2/3/4 m	3/4/5 m	3/4/5 m	3/4/5 m	4/5/6 m
Con omologazione ETAG -027	2-2.5 m	3-3.5 m	3-3.5 m	4-5 m	-	4-5 m	5-6 m
Altezze con omologazione UFAM	2-3 m	-	-	-	-	-	-
Altezza utile residua nella zona di impatto <sup>1</sup>	> 50% (Cat. A)	> 50% (Cat. A)	> 50% (Cat. A)				

Tabella 25 Caratteristiche tecniche delle reti ipotizzate per la sistemazione del versante.

Per quanto riguarda le reti già esistenti ubicate a monte della strada provinciale, si ipotizza la loro completa sostituzione in quanto attualmente la loro efficienza risulta inferiore a causa dell'evidente usura che è stata indotta dagli agenti atmosferici.



## 9. DISCUSSIONE GENERALE E CONCLUSIONI

Il presente studio si prefigge l'obiettivo di studiare il ruolo della foresta nella mitigazione del fenomeno di caduta massi lungo il versante boscato sottostante all'affioramento roccioso denominato Sass Negher a monte dell'abitato di Col di Rocca. Il sito caso di studio non presenta caratteristiche omogenee dal punto di vista dell'attività di rockfall in quanto si distinguono principalmente due aree: la prima, alla destra orografica del Ru de Sass Negher, la quale non viene considerata attualmente disturbata, ma porta i segni di eventi passati; la seconda, posta invece alla sinistra orografica, viene definita molto disturbata. Con lo scopo di conoscere meglio l'attività in atto ed i suoi effetti a livello del popolamento forestale è stata realizzata un'analisi descrittiva preliminare.

Le piante presenti in quest'area hanno un'altezza media di 20 metri, un DPU medio generalmente compreso tra 25 e 30 cm, da cui deriva un valore di area basimetrica media di 500 cm<sup>2</sup>.

Analizzando il popolamento ai fini del fenomeno di rockfall è stata misurata un'estensione media del gap tra le piante di 80 cm, stato fitosanitario buono con presenza di danni mediamente cicatrizzati. Il 94% degli individui analizzati presenta cicatrici, queste sono generalmente di forma ellittica o tonda e si trovano principalmente in posizione frontale; questo parametro indica che la densità della foresta è buona ai fini della dissipazione dell'energia cinetica dei massi in movimento. Un'ulteriore prova dell'utilità della foresta ai fini della mitigazione del disturbo è legato al fatto che il 63% degli individui presenta uno o più massi depositati alla base.

L'applicazione del software Rockyfor3D nella fase di modellazione del fenomeno di caduta massi è stata indispensabile per conoscere in modo approfondito lo sviluppo e le caratteristiche di questa tipologia di disturbo.

Nella fase preliminare sono stati valutati alcuni aspetti relativi ai parametri di input ed alle scelte di modellazione, basandosi su quanto riportato in letteratura o su analisi di campo precedentemente realizzate.

Il modello impiegato è risultato essere, come spesso evidenziato in letteratura, particolarmente sensibile alla risoluzione spaziale dei dati di input. Per quanto riguarda questo caso studio, non c'è stata la possibilità di realizzare più simulazioni con diverse risoluzioni, in quanto l'unico DTM a disposizione per l'area è di 5 x 5 metri.

La scelta del numero di lanci da realizzare ha visto la ricerca dei valori presenti in letteratura relativi a simulazioni in condizioni simili al presente caso di studio e a un'analisi di sensitività preliminare che ha portato alla scelta di un valore pari a 5000 lanci.

Per quanto riguarda la taratura dei diametri dei massi da simulare, il modello richiede valori del blocco più rappresentativo per ogni area di saggio realizzata. In un primo momento le simulazioni sono state

realizzate a partire dai dati dei massi localizzati immediatamente ai piedi delle zone sorgente, successivamente sono stati inseriti i diametri dei massi misurati nelle quote più basse del versante. Confrontando le due prove, è stato visto che i parametri di input più adeguati ed attinenti alla realtà sono quelli relativi alla seconda prova, in quanto i valori inseriti tengono conto del naturale processo di disgregazione dei massi a seguito degli impatti con il suolo e gli ostacoli incontrati lungo il versante.

Nella definizione della percentuale di variazione del volume dei blocchi simulati, la scelta è ricaduta su un valore medio del 20% sia dal confronto con casi analoghi presenti in letteratura, sia perché le analisi di campo preliminari hanno evidenziato come non ci sia una grande variabilità nei valori di diametro.

Il modello richiede anche l'inserimento di un eventuale valore di altezza iniziale di caduta del masso, ma in questo caso, essendo la zona sorgente di chiara individuazione, i cui valori di quota sono ben descritti dal DTM, il parametro è stato mantenuto pari a 0.

Un altro aspetto molto importante della modellazione con il software Rockyfor3D è il parametro di scabrezza MOH, che condiziona i file di output della simulazione. La taratura del modello in questi termini ha portato alla definizione dei valori medi degli ostacoli che un masso incontra in corrispondenza del canale del Ru de Sass Negher, infatti, le evidenze di campo hanno permesso di comprendere come questo impluvio favorisca la deposizione di una parte dei massi in transito.

In questo studio è stata prestata particolare attenzione al ruolo della foresta nella mitigazione del fenomeno di rockfall attraverso la valutazione degli effetti in condizioni di assenza di soprassuolo arboreo (SCENARIO 1), nelle condizioni attuali in cui si presenta la foresta (SCENARIO 2) e nelle condizioni ideali secondo i parametri presenti in letteratura (SCENARIO 3).

I confronti, realizzati tra le diverse simulazioni hanno portato a quantificare questo importante effetto ed a comprenderne l'importanza.

Nel primo confronto tra versante in condizioni attuali e versante non forestato, viene messa in evidenza la riduzione del valore di energia media per cella tra le due condizioni che ammonta al 46%; sempre dello stesso ordine di grandezza risulta essere la riduzione del numero di passaggi per cella, pari al 40%, segnale inequivocabile del ruolo di trattenuta dei frammenti litoidi svolto dalle piante poste lungo il pendio. Il valore medio di velocità che caratterizza il moto dei blocchi verso valle è risultato in riduzione del 34% grazie al ruolo dissipativo della foresta presente. La deposizione dei massi, infatti, risulta essere molto omogenea in corrispondenza del soprassuolo forestale, con un'importante ruolo di riduzione della runout soprattutto in corrispondenza degli elementi sensibili del fondovalle. Anche il volume medio dei massi depositati per cella è risultato in riduzione del 25% in quanto il numero degli impatti contro gli ostacoli aumenta grazie alla presenza dei tronchi che

garantisce accumuli di minore entità e più frequenti. La presenza delle piante ha portato, inoltre, ad un'altra conseguenza importante che riguarda la riduzione del 35% dei valori di altezza media di rimbalzo durante il moto dei massi verso valle.

E' possibile affermare come la presenza della foresta in condizioni attuali lungo il pendio rivesta un ruolo positivo molto importante, in quanto svolge una discreta azione di contenimento del fenomeno di caduta massi, limitando il coinvolgimento delle infrastrutture e degli elementi sensibili a valle. Nonostante ciò, nelle condizioni attuali, essa non garantisce condizioni di massima sicurezza, come testimoniano sia i risultati della modellazione, ma anche episodi sporadici verificatisi anche recentemente.

Per incrementare la funzione protettiva svolta dalla foresta, sono stati applicati alcuni parametri, studiati a partire dalle esperienze maturate delle regioni Piemonte e Valle d'Aosta, relative a foreste di protezione in condizioni ideali. Il secondo confronto realizzato prevede, infatti, la modifica in particolare dei parametri di percentuale di conifere e densità di piante ad ettaro del popolamento in esame.

In questo caso i parametri di output del modello non hanno subito grandi variazioni rispetto alle condizioni attuali, in quanto il popolamento forestale svolge già un buon ruolo protettivo come descritto dall'indice SDI stimato per un valore pari a 607 che corrisponde ad un livello di protezione medio.

Le variazioni più significative osservate riguardano i valori medi di velocità per singola cella e del numero di impatti sulle piante. Nel primo caso si è registrata una riduzione del 1,2 % della velocità, mentre nel secondo caso si è verificato un aumento pari ad 8,2% del numero di impatti. Entrambe le variazioni sono imputabili alla presenza di un maggior numero di piante a seguito dell'aumento della densità e del numero di conifere su tutta la superficie boscata.

Considerando che la presenza della foresta garantisce un effetto protettivo, seppur molto importante, non ottimale, l'analisi ha posto la sua attenzione sulle opere di difesa da caduta massi. Il software Rockyfor3D prevede la possibilità di simulare l'effetto combinato garantito dalla foresta, unito al ruolo di protezione fornito dalle reti paramassi.

Sono state realizzate diverse ipotesi di sistemazione modificando principalmente i parametri di altezza, estensione ed energia dissipata dalle opere.

Sono state incontrate alcune difficoltà in questa fase di impostazione del software, in quanto le informazioni presenti nel manuale del modello relative alla realizzazione di queste simulazioni sono molto limitate e sintetiche. La scelta dei parametri di altezza del manufatto e di energia massima attutita dall'opera sono stati definiti in funzione dei valori massimi ottenuti come risultato delle modellazioni più cautelative, confrontati con i valori presenti nelle schede tecniche delle opere reali.

La taratura di questi parametri ha definito sufficiente il posizionamento di una fila di reti di acciaio ad alta resistenza alte 3 metri e appartenenti alla categoria ETA 6 in grado cioè di dissipare un'energia cinetica fino ad un valore di 3000 kJ. La localizzazione delle opere è stata ipotizzata a partire dall'analisi di alcuni file di output della simulazione senza foresta per considerare le condizioni più cautelative possibili, anche in caso di cambiamento dei parametri del popolamento forestale. Gli aspetti analizzati sono principalmente l'altezza massima di rimbalzo del litoide ed energia cinetica massima.

Partendo dalle considerazioni di cui sopra, è stato realizzato il terzo ed ultimo confronto.

Esso riguarda il paragone tra le condizioni attuali in cui si presenta il versante, considerando sia il ruolo della foresta, che la presenza della rete paramassi ubicata a monte della strada provinciale (SCENARIO 4) e lo scenario relativo all'ipotesi di sistemazione sopra descritta (SCENARIO 5). I risultati di questo confronto sono stati paragonati in termini di valori massimi, in quanto l'obiettivo primario dell'analisi è la sicurezza delle infrastrutture presenti nel fondovalle.

In primo luogo, il risultato più importante ottenuto a seguito di questo confronto è l'ulteriore riduzione della runout del fenomeno, la quale non supera le opere ipotizzate dalla simulazione in nessun caso, confermando, in questo modo, l'indispensabile ruolo svolto dalle reti paramassi come dispositivo di protezione che completa la funzione protettiva della foresta.

In secondo luogo è possibile osservare come le ipotesi iniziali di variazione di alcuni parametri di output siano state rispettate. In particolare il numero di massi arrestati per singola cella, a seguito dell'inserimento delle opere di difesa, è aumentato del 9% e anche il volume dei blocchi depositati ha subito un incremento del 14%.

Il ruolo svolto dalle opere di difesa si è tradotto anche in una diminuzione dei valori di energia massima registrata nelle diverse celle del versante, il quale è stato osservato con una percentuale pari al 14%.

Dai risultati che si sono resi particolarmente evidenti a seguito dei confronti fra le diverse simulazioni, è possibile affermare che:

- La foresta in esame, se vengono soddisfatti alcuni parametri ideali di stabilità, può essere considerata una misura di protezione efficace contro il fenomeno di caduta massi.
- La presenza di elementi sensibili a livello del fondovalle richiede un ulteriore livello di protezione che viene fornito dalle reti paramassi.
- Il servizio protettivo totale si considera fornito da entrambi gli elementi, naturali ed antropici, dei quali viene evidenziata l'importanza della loro complementarietà.

Il modello Rockyfor3D è risultato essere valido nella modellazione del fenomeno di caduta massi nel caso della simulazione di un evento che si verifica a livello di singolo versante come in questo caso

in quanto richiede una conoscenza dettagliata del pendio ed una dettagliata suddivisione in aree omogenee ed individuazione precisa delle zone sorgente.

Per quanto riguarda la simulazione che prevede la presenza della foresta, si suggerisce l'inserimento di ulteriori parametri di input che permettano di descrivere in modo più dettagliato il popolamento forestale presente come ad esempio le dimensioni medie delle aperture lungo la linea di massima pendenza, il valore percentuale di alberi stabili e la tipologia di specie presenti ai fini dello studio di una gestione forestale mirata in funzione della tipologia di disturbo.

Come è stato osservato da questo studio, infatti, i risultati delle due simulazioni con foresta in condizioni attuali ed ideali non ha portato a grandi valori di differenza, in quanto i parametri di input richiesti nei due casi non sono molto approfonditi.

Il presente studio ha permesso anche di valutare il livello di suscettibilità del sito in esame nei confronti del fenomeno di caduta massi. A questi fini è stato applicato il metodo RHV (Crosta et al., 2003) mediante il quale è stata prevista la suddivisione del versante in tre livelli. Il calcolo di questo indice non può essere utile alla mappatura del pericolo in quanto il valore dovrebbe tener conto anche del tempo di ritorno del fenomeno, peraltro non certo facile da stimare nel caso di fenomeno di rockfall se non si possiedono osservazioni sistematiche su un numero di anni di osservazione significativo.

Per questo motivo, una difficoltà incontrata in fase di mappatura è stata la ricerca di informazioni relative ad eventi passati, in quanto è stata riscontrata la mancanza di un catasto specifico ed aggiornato per questa tipologia di disturbi che presenti parametri descrittivi utili alla mappatura del pericolo come avviene per altri fenomeni gravitativi. L'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (I.F.F.I.) risulta non essere, infatti, molto dettagliato per quanto riguarda il sito caso di studio.

Nonostante ciò, è stato possibile realizzare un confronto tra la mappatura del pericolo P.A.I. esistente per questo versante e i risultati ottenuti dalla modellazione del fenomeno nell'ambito di questo studio. Sono state ipotizzate delle modifiche alla superficie attualmente definita di pericolosità geologica moderata (P1) sulla base delle analisi di campo e delle successive simulazioni di evento con il software Rockyfor3D.

## 10. RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare alcune persone che mi hanno accompagnato in questi due anni del mio percorso di studi e nella stesura della tesi.

Grazie a mia mamma Lucia che mi ha sempre sostenuto e supportato in ogni momento.

A mio papà Sandro che ha condiviso con me le varie fasi di analisi di campo, devo proprio dire che i ruoli di assistente si sono invertiti nel tempo.

Ringrazio mio fratello Valerio per i confronti costruttivi in materia ambientale.

Grazie a mio fratello Luca che a modo suo mi sprona a dare sempre il meglio.

Vorrei ringraziare Francesco Bettella per la disponibilità e per la pazienza nella fase di stesura della tesi.

Grazie a Sara, Nicole e tutti gli amici e compagni di corso che sono stati parte di questa avventura universitaria.

Grazie al mio pazzo gruppo di amici che ormai è diventata una seconda famiglia.

A ciò che ha reso più difficile il mio percorso ma doppio il traguardo...

A na pi bela!

## 11. BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. (2008), “Pericoli naturali in Svizzera, misure contro la caduta di singoli elementi di roccia o crolli in massa”, [www.planat.ch](http://www.planat.ch)
- AA.VV. (2017), “Relazione Paesaggistica per interventi ed opere di cat.B”
- AA.VV., (2017), “Relazione geomorfologica”
- AA.VV., “La soluzione economica alla caduta massi- Barriere di protezione paramassi GBE (100-3000 kJ)”, Geobruigg
- Agliardi F., Crosta G.B. (2003), “High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, n.40, pp. 455-471
- Asteriou P., Tsiambaos G., (2016), “Empirical Model for Predicting Rockfall Trajectory Direction”, *Springer-Verlag, Wien 2015*, pp. 927-941.
- Azzoni A., Barbera G. L., Zaninetti A., (1995), “Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model”, *International Journal of rock mechanics and Mining Science*, n. 32, pp.709-724.
- Berger F., Dorren L.K.A., (2007), “Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest”, *Schweiz Z Forstwes* 158, n°6, pp.157-165.
- Berger F., Dorren L.K.A. (2006), “Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts”, *Tree Physiol*, n.26, pp 63-71
- Berger F., Dorren L.K.A., Putters US, (2006), “Real size experiments and 3d simulation of rockfall on forest slopes”, *Nat. Hazards Earth Syst*, n.6, pp.145-153.
- Berger F., Quetel C., Dorren L. K. A., (2002), “Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency?” *International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, Conference Proceedings, vol.2, Matsumoto, Japan*, pp. 815-826-
- Bozzolo D., Palmi R., (1986), “Simulation of rock falls down a valley side”, *Acta Mechanica*, n°63, pp. 113-130.
- Bourrier F., Baroth J., Lambert S., (2016), “Accounting for the variability of rock detachment conditions in designing rockfall protection structures”, *Natural Hazards* 81, pp. 365-385.
- Bourrier F., Dorren L., Hungr O., (2013), “The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation”, *Earth Surface Processes and Landforms* 38, pp. 435-440.
- Bourrier F., Dorren L., Nicot F., Berger F., Darve F., (2009), “Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model”, *Geomorphology* 110, pp. 68-79.

- Brang P. (2001), “Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the Alps”, *For. Ecol. Managem.*, n.145 (1), pp. 107-117.
- Broili L., (1974), “Ein Felssturz in Grossvesuch”, *Rock Mechanics Suppl.*, n°3, pp. 69-78.
- Corona C., Lopez-Saez J., Favillier A., Mainieri R., Eckert N., Trappmann D., Stoffel M., Bourrier F., Berger F.(2017), “Modeling rockfall frequency and bounce height from three-dimensional simulation process models and growth disturbances in submontane broadleaved trees”, *Geomorphology* 281. Pp 66-77.
- Corona C., Trappmann D., Stoffel M., (2013), “Parameterization of rockfall source areas and magnitudes with ecological recorders: When disturbances in trees serve the calibration and validation of simulation runs”, *Geomorphology (ELSEVIER)*, pp.33-42
- Crosta G. B., (2000), "Rainfall thresholds for the triggering of soil slips and debris flows", *Proceeding 2<sup>nd</sup> Plinius Conference on Mediterranean Storms*, GNDICI, pp.463-488.
- Crosta G.B., Agliardi F.,(2003), “A methodology for physically based rockfall hazard assessment”, *Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union* (5), pp.407-422 <hal-00301598>
- Del Favero R. (2004), “I boschi delle regioni alpine italiane”, *Coop. Libreria Editrice Università di Padova (CLEUP)*, pp.448-459.
- Dorren L.K.A, (2007), “State of the art in rockfall – forest interactions”, *Schweiz Z. Forstwes* 158 6: pp.128-141.
- Dorren L.K.A. & Simoni, S., 2014. Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi. ecorisQ Paper (www.ecorisq.org);
- Dorren L.K.A., Berger F., Anton C.I., Maier B., Rey F., (2004) “Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps”, *Forest Ecology and Management* 195, pp. 165-176.
- Dorren L.K.A., Berger F., Le Hir C., Mermin E., Tardi f P., (2005). “Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests”. *For. Ecol. Manag.* 215. Pp 183-195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.012>
- Dorren, L.K.A. & Berger, F. 2012. “Integrating forests in the analysis and management of rockfall risks: experience from research and practice in the Alps”. in Eberhardt et al. *Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. Taylor and Francis Group, London pp. 117-127.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R., (2005), “Continuità nel bosco di protezione e controllo dell’efficacia (NaiS)”, allegato 1, *UFAM Berna*, pp.14-18.

- Gerber W., (1998), “Waldwirkung und Steinschlag”, *Documentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN*, Ed. Schwitter R., Grafenort/Engelberg, pp.15.
- Gsteiger P., (1993), “Steinschlag Schutzwald, Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung”, *Schweiz Z Forstwes*, n.144, pp.131-138.
- Habib P., (1977), “Note sur le rebondissement des blocs rocheux”, *Reports on meeting: Rockfall Dynamics and Protective Works*, ISMES, Publication n. 90, pp. 123-125.
- Jahn J., (1988), “Entwaldung und Steinschlag”, *Interpraevent, Graz. Tagungspubl. Bd.*, n.1, pp. 185-198.
- Jonnson M., Dorren L.K.A., Berger F., Krautblatter M., Molk M., Stoffel M., Wehrli A., (2007), “State of the art in rockfall- forest interactions”, *Scweiz Z. Forstwes* 158, N° 6, pp. 128-141.
- Kohm K.A., Franklin J.F., (1997), “Creating a Forestry for the 21<sup>st</sup> Century: the science of ecosystem management.” *Island Press, Washington D.C.*
- Kranitz F., Mariani R., (2013), “Standard minimi per la stesura di carte di suscettibilità e pericolosità per le frane di crollo”, *Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Ambiente ed Energia- Servizio Geologico; Regione del Veneto – Segreteria per l’Ambiente – Direzione Difesa del Suolo.*
- Kräuchi N., Brang P., Schönenberger W., (2000), “Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs”, *Forest Ecology and management*, 132 (1), pp. 73-82.
- Lachat T., Bouget C., Büttler R., Müller J., (2013), “Deadwood: quantitative and qualitative requirements for the conservation of saproxylic biodiversity”, *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. European Forest Institute*, pp. 92-102.
- Lewis P. A. W., Orav E.J., (1989), “Simulation Metodology for Statisticians, Operations Analysts, and Engineers” *vol. 1 Wadsworth & Brooks/Cole*, pp.375.
- Motta R., Haudemand J. C., (1999) “Selvicoltura nelle foreste di protezione diretta delle Alpi. Il bosco “Ban de Ville” di Courmayeur (AO). *Monti e boschi.*
- Mowrer H.T., (1997), “Propagatin Uncertainly through spatial estimation processes for old-growth subalpine forests using sequential Gaussian simulation in Gis.” *Ecological Modelling* 98. pp. 73-86.
- Netti T., Castelli M., De Biagi V., (2016). “Effect of the number of simulations on the accuracy of a rockfall analysis”. *Science Direct- Procedia Engineering* 158. Pp 464-469.
- O’Hara K. L., (2006), “Multiaged forest stands for protection forests: concepts and applications”, *Forest, Snow and Landscape Research*, 80 (1), pp.45-55.

- Pfeifer T.J., Bowen T.D. (1989), “Computer simulation of rockfalls” *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, n. XXVI (I), pp. 135-146.
- Pichler B., Hellmich C., Mang H. (2005), “Impact of rocks into gravel – Design and evaluation experiments”, *Int. J. Impact Eng.*, n.31, pp.559-578.
- Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D., Tripet J., (2002), “Hazard assessment in Switzerland – Codes of Practice for mass movements”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment n° 61*, pp. 263-268.
- Rammer W., Brauner M., Dorren L.K.A., Berger F., Lexer M.J, (2010). “Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model”. *Natural Hazards and Earth System Sciences. European Geosciences Union 10 (4)*. Pp. 699-711.
- Regione Autonoma Valle d’Aosta – Regione Piemonte, 2006 – Selvicoltura nelle foreste di protezione, Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d’Aosta. *Compagnia delle Foreste, Arezzo*.
- Richtie A.M., (1963), “Evaluation of rockfall and its control”, *Highway Research Record, Washington DC: Highway research Board, National research Council*, n.17, pp.13-28.
- Rickli C., Graf F., Gerber W., Frei M., Boll A., (2004), “Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs”, *Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Schutzwald und Naturgefahren, Wissen 2004, Bruhin AG, Ed.Freienbach*, pp. 27-34.
- Schönenberger W., Brang P., (2001), “Structure of mountain forest”, *Forest ecology and management*, pp.145 (1-2).
- Selby M.J., (1982), “Hillslope materials and processes”, *New York: Oxford University Press*.
- Sellmeier B., Thuro K., (2017), “Comparison of two 3D rockfall codes on behalf of a case study in the Bavarian Alps”, *Geomechanics and Tunnelling 10, n°1*, pp. 15.
- Slides corso di Protezione dal Rischio Idrogeologico prof. D’Agostino
- Slides del corso di Incendi e Disturbi di Natura Abiotica prof. Lingua
- Spang R.M., Krauter E. (2001), “Rockfall simulation – a state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriere”, in *Kühne M., et al., International Conference on Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures*, Unides Foundation Engineering Davos, Switzerland, pp. 607-613.
- Stoffel M., Lievre I., Monbasiron M., Perret S. (2006), “Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Taschgufer (Swiss Alps) – a dendrochronological approach”, *Zeit. Geom. N.F.*
- Varnes D.J. (1984), “Landslide hazard zonation: a review of principles and practice”, *UNESCO Press, Paris*, pp. 63

- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L.K.A., Gerber W., Jaboyedoff M., (2011) “Rockfall caraterisation and structural protection – a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 pp 2617-2651. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>.
- Wesser B., Frehner M., (1996), “Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion Wegleitung”, *Bern: Bundesamt Umwelt Wald landschaft*, pp. 122.
- [www.regione.vda.it/risorsenaturali/risorsenaturali/Foresteprot/default\\_i.aspx](http://www.regione.vda.it/risorsenaturali/risorsenaturali/Foresteprot/default_i.aspx)
- Zevenbergen L.W. & Thorne C.R., 1987. “Quantitative analysis of land surface topography”, in *Earth surface processes and landforms*, vol 12, pp. 47-56