

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



Tesi di Laurea Magistrale

A.A. 2018/2019

**Analisi di problemi connessi alla modellazione di crolli in roccia
diffusi: un caso studio in Valsesia**

Relatori:

Prof. Ing. Monica Barbero

Prof. Ing. Marta Castelli

Ing. Gianmarco Vallero

Relatore esterno:

Giovanni Cavagnino

Candidato:

Ivan Crobu 241279

Sommario

Sommario	i
Indice delle figure.....	v
Indice delle tabelle	xiii
Introduzione	1
1. Il fenomeno della caduta massi	4
1.1. Caratteristiche della caduta massi.....	5
1.2. Fasi del moto	6
1.2.1. Distacco del blocco dal versante	7
1.2.2. Moto del blocco in aria.....	8
1.2.3. Impatto del blocco sul versante.....	10
1.2.4. Modo del blocco lungo il versante	14
1.2.5. Arresto del blocco	18
1.3. Effetto di forma e volume del blocco	19
1.3.1. Effetto del volume	19
1.3.2. Effetto della forma	20
1.4. Effetto della vegetazione	22
2. Metodi per l'analisi della dinamica di propagazione	25
2.1. Modelli cinematici	26
2.1.1. Modelli numerici.....	27
2.1.2. Metodi analitici	28
2.2. Modelli empirici	33
2.2.1. Il metodo dello Shadow Angle.....	33

2.2.2.	Il metodo dei coni.....	35
2.2.3.	Codici di calcolo basati sul metodo dei coni.....	36
2.3.	Modelli di recente concezione.....	38
2.3.1.	Modelli GIS-Based.....	38
2.4.	Dati input necessari alla modellazione.....	40
2.4.1.	Scelta della nicchia di distacco.....	42
2.4.2.	Volume caratteristico del blocco.....	43
2.4.3.	Velocità iniziale del blocco.....	44
2.4.4.	Angolo di attrito equivalente blocco-versante.....	45
2.4.5.	Scabrezza del versante.....	45
2.5.	Scelta del numero di simulazioni.....	46
2.6.	Risultati delle analisi.....	46
2.7.	Osservazioni sulla modellazione.....	47
3.	Il software di simulazione Rockyfor3D.....	48
3.1.	Introduzione.....	48
3.2.	Dati input del modello.....	50
3.3.	Simulazione in presenza di una foresta.....	52
3.4.	Simulazione in presenza di reti paramassi.....	53
3.5.	Impostazione delle simulazioni.....	54
3.6.	Caratteristiche principali del modello di Rockyfor3D.....	56
3.3.1.	Modellazione della forma dei blocchi.....	56
3.3.2.	Modellazione della caduta con moto parabolico.....	57
3.3.3.	Modellazione dei rimbalzi sul versante.....	57
3.3.4.	Modellazione dell'impatto con un albero.....	61
3.3.5.	Modellazione e calcolo della direzione di caduta.....	65
3.7.	Output delle simulazioni.....	67
3.8.	Considerazioni sulla modellazione.....	70

4.	Caso studio: il comune di Rassa.....	71
4.1.	Introduzione storico-geografica del comune di Rassa.....	72
4.2.	Contesto climatico	74
4.3.	Contesto geomorfologico	77
4.4.	Stima dei potenziali volumi instabili.....	83
5.	Analisi del fenomeno di caduta massi (Back Analysis).....	86
5.1.	Descrizione dell'evento del 30/10/2018.....	87
5.2.	Back Analysis dell'evento del 30/10/2018.....	92
5.2.1.	Caricamento delle mappe di base.....	92
5.2.2.	Creazione dei raster di input.....	93
5.2.3.	Parametri di scabrezza e tipologia di suolo	99
5.2.4.	Copertura forestale	103
5.2.5.	Definizione della nicchia di distacco	106
5.3.	Analisi dei risultati delle simulazioni	108
5.3.1.	Area di invasione.....	109
5.3.2.	Energia cinetica	111
5.3.3.	Velocità	114
5.3.4.	Altezze di volo	115
5.3.5.	Zone di arresto.....	116
5.3.6.	Collettore sugli edifici.....	118
5.4.	Simulazione del fenomeno con QPROTO.....	126
5.4.1.	Introduzione al plugin	126
5.4.2.	Dati input per QPROTO.....	128
5.4.3.	Dati in output di QPROTO.....	129
5.4.4.	Principi di funzionamento dell'algoritmo	131
5.4.5.	Costruzione del modello.....	134
5.4.6.	Analisi e confronto dei risultati.....	144

5.5.	Analisi con barriera estesa.....	150
6.	Analisi previsionale.....	151
6.1.	Distacco da roccia intensamente fratturata - Rockyfor3D.....	154
6.1.1.	Scenario di 0,1 m ³	155
6.1.2.	Scenario di 1,0 m ³	157
6.1.3.	Scenario di 5,0 m ³	160
6.2.	Confronto analisi Rockyfor3D-QPROTO – Scenario di roccia intensamente fratturata	
	163	
6.2.1.	Scenario di 0,1 m ³	163
6.2.2.	Scenario di 1,0 m ³	166
6.2.3.	Scenario di 5,0 m ³	172
6.3.	Distacco da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata – Rockyfor3D.....	177
6.3.1.	Scenario di 0,1 m ³	178
6.3.2.	Scenario di 1,0 m ³	181
6.3.3.	Scenario di 5,0 m ³	183
6.4.	Confronto analisi Rockyfor3D-QPROTO – Scenario di roccia esposta e di roccia intensamente fratturata	185
6.4.1.	Scenario di 0,1 m ³	186
6.4.2.	Scenario di 1,0 m ³	189
6.4.3.	Scenario di 5,0 m ³	193
6.5.	Considerazioni sulla propensione al distacco I _D	197
7.	Progetto e analisi del danneggiamento delle opere di difesa	200
7.1.	Cenni sui parametri caratterizzanti le opere di difesa.....	201
7.2.	Cenni sulla progettazione delle opere di difesa	206
7.3.	Progetto delle barriere paramassi	211
7.4.	Ipotesi di danneggiamento delle barriere paramassi.....	233
7.4.1.	Distacco del blocco da 1,0 m ³	239
7.4.2.	Distacco del blocco da 5,0 m ³	248

Conclusioni.....	258
Sviluppi futuri	264
Bibliografia citata.....	265
Bibliografia di carattere generale	271
Sitografia.....	275
Ringraziamenti	276

Indice delle figure

Figura 1.2-1: Cinematismi scatenanti della caduta massi	7
Figura 1.2-2: Traiettoria del blocco e interazione con il versante.....	9
Figura 1.2-3: Angolo della velocità in uscita rispetto al versante	14
Figura 1.2-4: Modello di interazione Pariseau e Voight (1979)	15
Figura 1.3-1: Rapporto volume del blocco-volume rappresentativo del versante (Giani, 1992)	20
Figura 2.1-1: Algoritmo “flow to the lowest neighbor” (Dorren et al., 2013).....	30
<i>Figura 2.2-1: Principio dello Shadow Angle (Castelli et al., 2019)</i>	<i>34</i>
Figura 2.2-2: Valori tipici dei travel angles e degli shadow angles (Jaboyedoff M., Labiouse V., 2011).....	34
Figura 2.2-3: Rappresentazione grafica del Cone Method (adattato da Jaboyedoff et al., 2011)	35
Figura 2.2-4: Interfaccia grafica del software CONEFALL	37
Figura 2.2-5: Interfaccia del plugin QPROTO.....	37
Figura 2.3-1: (a) D-8 Method, (b) D-16 Method (Dorren et al., 2003).....	39
Figura 2.4-1: Distribuzione esponenziale negativo.....	41
Figura 3.1-1: Diagramma di flusso seguito dal software, con evidenziate in blu le situazioni nelle quali il blocco può cambiare direzione.....	49
Figura 3.2-1: Intestazione della mappa raster dem.asc	50
Figura 3.2-2: Rappresentazione della scabrezza del versante	51

Figura 3.4-1: Esempio dell'output di Rockyfor3D in simulazioni con reti paramassi	54
Figura 3.5-1: Interfaccia grafica del software Rockyfor3D	55
Figura 3.5-2: File log salvato al termine delle simulazioni.....	56
Figura 3.6-1: Meccanismo di rimbalzo implementato in Rockyfor3D (Dorren et al., 2014) ..	58
Figura 3.6-2: Funzioni per il calcolo della dissipazione energetica da impatto con un albero (Dorren et al., 2014)	62
Figura 3.6-3: Tipologie di impatto su un albero (Dorren et al., 2014).....	65
Figura 3.6-4: Algoritmo di calcolo della variazione di direzione del blocco post-impatto (Dorren et	66
Figura 3.7-1: Schematizzazione della conversione della traiettoria 3D nei dati raster forniti in output.....	67
Figura 4.1-1: Limiti del comune di Rassa (Google Maps).....	72
Figura 4.1-2: Collocazione di Rassa nel Piemonte (Google Earth)	73
Figura 4.1-3: Cantoni del comune di Rassa (VC) (Tecnosesia, 2019).....	74
Figura 4.3-1: Stralcio della carta geologica-geomorfologica (Tecnosesia, 2019)	77
Figura 4.3-2: Stazioni geomeccaniche (Tecnosesia, 2019).....	78
Figura 4.3-3: Esempio di parete in roccia intensamente fratturata (Tecnosesia, 2019).....	79
Figura 4.3-4: Posizione delle opere di difesa sul versante (Tecnosesia, 2019).....	79
Figura 4.3-5: Stereogramma delle discontinuità nel sito 1, San Giovanni (Tecnosesia, 2019).....	80
Figura 4.3-6: Stereogramma delle discontinuità nel sito 2, Concentrico (Tecnosesia, 2019)..	81
Figura 4.3-7: Stereogramma delle discontinuità nel sito 3, Ottobre 2018 – Aprile 2019 (Tecnosesia, 2019)	82
Figura 5.1-1: in merito all'evento di ottobre 2018 (adattato da Tecnosesia, 2019).....	87
Figura 5.1-2: Dati idrometrici nella stazione del fiume Sesia nella stazione di Borgosesia (Arpa Piemonte, 2018)	88
Figura 5.1-3: Dati pluviometrici della stazione Arpa Piemonte di Fobello (Arpa Piemonte, 2018).....	88
Figura 5.1-4: Ceppaia ribaltata durante l'evento meteorico tra 27 e 30/10/2018 (Tecnosesia, 2019).....	89
Figura 5.1-5: Panoramica del versante a monte della Chiesta di Santa Croce in località Centro (Tecnosesia, 2019)	90
Figura 5.1-6: Zona di arresto del blocco (Tecnosesia, 2019).....	90
Figura 5.2-1: Caricamento dell'ortofoto Google 2016.....	92
Figura 5.2-2: Caricamento dell'Ortofoto Google 2016.....	93

Figura 5.2-3: File raster di input.....	94
Figura 5.2-4: Discretizzazione del versante	94
Figura 5.2-5: Tabella attributi della tipologia di terreno	95
Figura 5.2-6: Comando Georeferencer.....	95
Figura 5.2-7: Corrispondenza dei punti tra carta geomorfologica e ortofoto.....	96
Figura 5.2-8: Copertura forestale sul versante	96
Figura 5.2-9: Esecuzione del comando Rasterize	97
Figura 5.2-10: Conversione dei raster in formato ASCII GRID	98
Figura 5.2-11: Raster del soiltype in formato ASCII GRID utilizzato in Rockyfor3D	98
Figura 5.2-12: Mappa raster Rg70	99
Figura 5.2-13: Mappa raster Rg20	99
Figura 5.2-14: Mappa raster Rg10	100
Figura 5.2-15: Dettaglio di scabrezza del soiltype 3 (Tecnosesia, 2019)	101
Figura 5.2-16: Esempio di scabrezza del soiltype 5 e 6 - 1 (Tecnosesia, 2019)	102
Figura 5.2-17: Esempio di scabrezza del soiltype 5 e 6 - 2 (Tecnosesia, 2019)	102
Figura 5.2-18: Esempio della tipologia di vegetazione che ricopre il versante – 1	104
Figura 5.2-19: Esempio della tipologia di vegetazione che ricopre il versante - 2	105
Figura 5.2-20: Posizionamento della nicchia di distacco (Tecnosesia, 2019)	106
Figura 5.2-21: Ammasso roccioso altamente fratturato, nicchia di distacco dell’evento	107
Figura 5.2-22: Interfaccia di Rockyfor3D configurata per le simulazioni di back analysis ..	107
Figura 5.3-1: Area di invasione del fenomeno di propagazione	109
Figura 5.3-2: Profilo del versante lungo il canale dell’evento del 30/10/2018	110
Figura 5.3-3: Configurazione dell’evento del 30/10/2018 (Tecnosesia, 2019).....	110
Figura 5.3-4: Andamento della media dei massimi di energia E_mean [kJ]	112
Figura 5.3-5: Mappa raster delle pendenze [°].....	112
Figura 5.3-6: Andamento dei massimi di energia E_95CI [kJ].....	113
Figura 5.3-7: Andamento dei massimi di velocità V_max [m/s].....	114
Figura 5.3-8: Andamento delle altezze medie di rimbalzo Ph_mean [m].....	115
Figura 5.3-9: Andamento delle altezze massime di rimbalzo Ph_95CI [m]	116
Figura 5.3-10: Distribuzione dei depositi Nr_deposited [-]	117
Figura 5.3-11: Collettore in prossimità degli edifici limitrofi all’evento del 30/10/2018 (Linea tratteggiata blu)	118
Figura 5.3-12: Frequenza della velocità - Collettore 1.....	119
Figura 5.3-13: Frequenza cumulata della velocità - Collettore 1	120

Figura 5.3-14: Frequenza dell'energia - Collettore 1	120
Figura 5.3-15: Frequenza cumulata dell'energia - Collettore 1	121
Figura 5.3-16: Frequenza della velocità - Collettore 10.....	122
Figura 5.3-17: Frequenza cumulata della velocità - Collettore 10.....	122
Figura 5.3-18: Frequenza dell'energia - Collettore 10.....	123
Figura 5.3-19: Frequenza cumulata dell'energia - Collettore 10	123
Figura 5.4-1: Rappresentazione tridimensionale del Cone Method (Castelli et al., 2019) ...	126
Figura 5.4-2: Sezione 2D del modello del Cone Method (Jaboyedoff & Labiouse, 2011) ...	127
Figura 5.4-3: Generica sezione di calcolo dell'algoritmo di QPROTO (Castelli et al. 2019)	131
Figura 5.4-4: Zone nascoste durante un'analisi di visibilità (Castelli et al., 2019).....	133
Figura 5.4-5: Rappresentazione schematica delle elaborazioni grafiche condotte da QPROTO (Manuale di QPROTO ver. 1.4).....	133
Figura 5.4-6: Mappa raster EL_angles (scale di arancione) e misura della lunghezza dell'area di invasione	135
Figura 5.4-7: Misura dell'angolo di dispersione laterale 2α	136
Figura 5.4-8: DTM in risoluzione 5x5 m della Regione Piemonte.....	137
Figura 5.4-9: Calcolo dell'Aspect (Esposizione).....	138
Figura 5.4-10: Mappa raster dell'aspect.....	138
Figura 5.4-11: Conversione dei raster DTM e Aspect a layer vettoriale di punti.....	139
Figura 5.4-12: Unione dei layer vettoriali di punti delle quote e dell'aspect.....	139
Figura 5.4-13: Tabella attributi del vettore unione	140
Figura 5.4-14: Intersezione dal layer di punti con la nicchia di distacco.....	140
Figura 5.4-15: Caricamento del file di testo delimitato	141
Figura 5.4-16: Comando Join nelle proprietà del layer vettoriale.....	142
Figura 5.4-17: Interfaccia principale di QPROTO.....	143
Figura 5.4-18: Confronto aree invasione/energie QPROTO (sx) eRockyfor3D (dx).....	144
Figura 5.4-19: v_max ottenuta da QPROTO	145
Figura 5.4-20: Output w_en di QPROTO	146
Figura 5.4-21: Output w_tot_en di QPROTO.....	147
Figura 5.4-22: Output count di QPROTO.....	148
Figura 5.4-23: Output susceptibility di QPROTO	149
Figura 5.5-1: Inserimento della barriera continua fittizia trasversalmente al versante	150
Figura 6.1-1: Nicchie di distacco da roccia intensamente fratturata	154
Figura 6.1-2: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 0,1 m ³	156

Figura 6.1-3: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m ³ - Centro.....	157
Figura 6.1-4: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 1,0 m ³	158
Figura 6.1-5: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m ³ – Centro	159
Figura 6.1-6: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m ³ – San Giovanni	159
Figura 6.1-7: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 5,0 m ³	160
Figura 6.1-8: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m ³ – Centro	162
Figura 6.1-9: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m ³ – San Giovanni	162
Figura 6.2-1: Energia media fornita da QPROTO per 0,1 m ³	164
Figura 6.2-2: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 0,1 m ³	165
Figura 6.2-3: Confronto energie medie 0,1 m ³ – Centro.....	166
Figura 6.2-4: Energia media fornita da QPROTO per 1,0 m ³	167
Figura 6.2-5: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 1,0 m ³	168
Figura 6.2-6: Profilo altimetrico in località San Giovanni.....	169
Figura 6.2-7: Profilo altimetrico di Figura 6.2-6.....	169
Figura 6.2-8: Confronto energie medie 1,0 m ³ – Centro.....	170
Figura 6.2-9: Confronto energie medie 1,0 m ³ – San Giovanni.....	170
Figura 6.2-10: Energia media fornita da QPROTO per 5,0 m ³	172
Figura 6.2-11: Profili longitudinale (linea verde) e trasversale (linea blu).....	173
Figura 6.2-12: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 5,0 m ³	174
Figura 6.2-13: Confronto energie medie 5,0 m ³ – Centro.....	175
Figura 6.2-14: Confronto energie medie 5,0 m ³ – San Giovanni.....	175
Figura 6.2-15: Profilo altimetrico lungo il collettore San Giovanni (sx) e altimetrico lungo la linea rossa (dx)	176
Figura 6.3-1: Zone di distacco da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata	178
Figura 6.3-2: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – 0,1 m ³	179
Figura 6.3-3: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m ³ – Centro	180
Figura 6.3-4: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m ³ – San Giovanni	180
Figura 6.3-5: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – 1,0 m ³	181
Figura 6.3-6: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m ³ – Centro	182

Figura 6.3-7: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m ³ – San Giovanni	182
Figura 6.3-8: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – 5,0 m ³	183
Figura 6.3-9: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m ³ – Centro	184
Figura 6.3-10: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m ³ – San Giovanni	185
Figura 6.4-1: Energia media fornita da QPROTO per 0,1 m ³	186
Figura 6.4-2: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 0,1 m ³	187
Figura 6.4-3: Confronto energie medie 0,1 m ³ - Centro	188
Figura 6.4-4: Confronto energie medie 0,1 m ³ – San Giovanni.....	188
Figura 6.4-5: Energia media fornita da QPROTO per 1,0 m ³	190
Figura 6.4-6: Profilo altimetrico trasversale al versante ovest.....	190
Figura 6.4-7: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 1,0 m ³	191
Figura 6.4-8: Confronto energie medie 1,0 m ³ - Centro	192
Figura 6.4-9: Confronto energie medie 1,0 m ³ – San Giovanni.....	192
Figura 6.4-10: Energia media fornita da QPROTO per 5,0 m ³ (QGIS 3.4.7).....	193
Figura 6.4-11: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 5,0 m ³	194
Figura 6.4-12: Sezione trasversale in corrispondenza dell'anomalia dell'area di invasione .	195
Figura 6.4-13: Confronto energie medie 5,0 m ³ - Centro	195
Figura 6.4-14: Confronto energie medie 5,0 m ³ – San Giovanni.....	196
Figura 6.5-1: w_en.tif nello scenario con I _{D-RF} =1,0 e I _{D-RE} = 0,1	198
Figura 6.5-2: w_en.tif nello scenario con I _{D-RF} =1,0 e I _{D-RE} = 0,5	199
Figura 6.5-3: w_en.tif nello scenario con I _{D-RF} =1,0 e I _{D-RE} = 1,0	199
Figura 7.1-1: Massima energia assorbibile dalla barriera, con impatto di blocco avente velocità V (Barbero, 2017)	202
Figura 7.1-2: Massima elongazione della barriera (EOTA2018).....	202
Figura 7.1-3: Altezza residua dopo l'impatto (EOTA2018)	203
Figura 7.1-4: Forze agenti sugli elementi strutturali (Barbero, 2017)	203
Figura 7.1-5: Vista laterale del sistema di intercettazione (EOTA2018).....	205
Figura 7.1-6: Vista frontale del sistema di intercettazione (EOTA2018)	206
Figura 7.2-1: Schema dell'altezza di intercettazione della barriera (Barbero, 2017)	208
Figura 7.3-1: Schema del posizionamento delle opere di difesa.....	211

Figura 7.3-2: Posizione delle barriere in relazione alla posizione delle nicchie di distacco..	213
Figura 7.3-3: Schema delle nicchie di distacco.....	213
Figura 7.3-4: Mappa raster E_mean.asc della simulazione con il blocco di progetto da 5.0 m ³	214
Figura 7.3-5: Cumulata della velocità al collettore 1	216
Figura 7.3-6: Cumulata dell'energia al collettore 1	216
Figura 7.3-7: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 1	217
Figura 7.3-8: Cumulata della velocità al collettore 2	217
Figura 7.3-9: Cumulata dell'energia al collettore 2	218
Figura 7.3-10: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 2	218
Figura 7.3-11: Cumulata della velocità al collettore 3	219
Figura 7.3-12: Cumulata dell'energia al collettore 3	219
Figura 7.3-13: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 3	220
Figura 7.3-14: Cumulata della velocità al collettore 4	220
Figura 7.3-15: Cumulata dell'energia al collettore 4	221
Figura 7.3-16: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 4	221
Figura 7.3-17: Cumulata della velocità al collettore 5	222
Figura 7.3-18: Cumulata dell'energia al collettore 5	222
Figura 7.3-19: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 5	223
Figura 7.3-20: Cumulata della velocità al collettore 6	223
Figura 7.3-21: Cumulata dell'energia al collettore 6	224
Figura 7.3-22: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 6	224
Figura 7.3-23: Cumulata della velocità al collettore 7	225
Figura 7.3-24: Cumulata dell'energia al collettore 7	225
Figura 7.3-25: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 7	226
Figura 7.3-26: Energia media barriere a capacità nominale – 5,0 m ³	229
Figura 7.3-27: Numero passaggi barriere a capacità nominale – 5,0 m ³	229
Figura 7.3-28: Energia media barriere a capacità nominale – 1,0 m ³	230
Figura 7.3-29: Numero passaggi barriere a capacità nominale – 1,0 m ³	230
Figura 7.3-30: Sezioni di misura energie (linee centrali) e passaggi (linee a monte e a valle dei raster delle barriere)	232
Figura 7.4-1: Percentuali delle tipologie di danno in funzione della tipologia di barriera (Govoni et al., 2016).....	233

Figura 7.4-2: Massima elongazione-energia di impatto (alto) ed energia residua-energia di impatto (Govoni et al., 2016)	235
Figura 7.4-3: Energia residua barriera da 2000 kJ	235
Figura 7.4-4: Energia residua barriera da 3000 kJ	236
Figura 7.4-5: Energia residua barriera da 5000 kJ	236
Figura 7.4-6: Energia per danno da 1,0 m ³ – impatto da 1,0 m ³	239
Figura 7.4-7: Numero passaggi per danno da 1,0 m ³ – impatto da 1,0 m ³	240
Figura 7.4-8: Energia per danno da 5,0 m ³ – impatto da 1,0 m ³	240
Figura 7.4-9: Numero passaggi per danno da 5,0 m ³ – impatto da 1,0 m ³	241
Figura 7.4-10: Energie residue alla barriera 1	242
Figura 7.4-11: Percentuale di passaggi alla barriera 1	242
Figura 7.4-12: Energia per danno da 1,0 m ³ – impatto da 5,0 m ³	248
Figura 7.4-13: Numero passaggi per danno da 1,0 m ³ – impatto da 5,0 m ³	249
Figura 7.4-14: Energia per danno da 5,0 m ³ – impatto da 5,0 m ³	249
Figura 7.4-15: Numero passaggi per danno da 5,0 m ³ – impatto da 5,0 m ³	250
Figura 7.4-16: Energie residue alla barriera 1	251
Figura 7.4-17: Percentuale di passaggi alla barriera 1	251
Figura 7.4-18: Energie residue alla barriera 2	253
Figura 7.4-19: Percentuale di passaggi alla barriera 2	253
Figura 7.4-20: Energie residue alla barriera 3	254
Figura 7.4-21: Percentuale di passaggi alla barriera 3	254
Figura 7.4-22: Energie residue alla barriera 4	254
Figura 7.4-23: Percentuale di passaggi alla barriera 4	255
Figura 7.4-24: Energie residue alla barriera 5	255
Figura 7.4-25: Percentuale di passaggi alla barriera 5	255
Figura 7.4-26: Energie residue alla barriera 6	256
Figura 7.4-27: Percentuale di passaggi alla barriera 6	256
Figura 7.4-28: Energie residue alla barriera 7	256
Figura 7.4-29: Percentuale di passaggi alla barriera 7	257

Indice delle tabelle

Tabella 1.2-1: Coefficienti di restituzione secondo Richards (1988).....	13
Tabella 1.2-2: Coefficienti di restituzione secondo Pfeiffer e Bowen (1989)	13
Tabella 1.2-3: Coefficienti di restituzione secondo Rocscience (2000).....	13
Tabella 1.4-1: Coefficienti di restituzione in presenza di vegetazione (Dorren, Berger e Putters, 2006).....	23
Tabella 3.2-1: Tipologie di sottosuolo definite in Rockyfor3D	52
Tabella 3.6-1: Probabilità, in percentuale, di deviazione della direzione del blocco.....	66
Tabella 3.6-2: Probabilità, in percentuale, della deviazione del blocco dopo l’impatto con un albero	67
Tabella 4.2-1: Andamento dei massimi e dei minimi di temperatura dal 1994 al 2018 (Arpa-Piemonte)	75
Tabella 4.2-2: Precipitazioni mensili dal 1994 al 2018 (Arpa Piemonte).....	76
Tabella 4.3-1: Giacitura delle discontinuità nel sito 1, San Giovanni (Tecnosesia, 2019)	80
Tabella 4.3-2: Giacitura delle discontinuità nel sito 2, Concentrico (Tecnosesia, 2019).....	81
Tabella 4.3-3: Giacitura delle discontinuità nel sito 3, Ottobre 2018 – Aprile 2019 (Tecnosesia, 2019).....	82
Tabella 4.4-1: Volumi da misure in situ, sito 1 (Tecnosesia, 2019)	83
Tabella 4.4-2: Volumi da misure in situ, sito 2 (Tecnosesia, 2019)	84
Tabella 4.4-3: Calcolo volumi da spaziature (Tecnosesia, 2019)	84
Tabella 5.2-1: Soiltype adottati dal software Rockyfor3D (Versione 5.1)	101
Tabella 5.2-2: Parametri di scabrezza ottenuti dalla back analysis.....	103
Tabella 5.2-3: Riepilogo del rilievo in situ della vegetazione.....	103
Tabella 5.2-4: Parametri input per le simulazioni	108
Tabella 5.3-1: Principali dati raccolti ai collettori coinvolti nell’evento del 30/10/2018	119
Tabella 5.3-2: Riepilogo dati raccolti ai collettori 1 e 10.....	124
Tabella 5.3-3: Parametri di scabrezza ottenuti dalla back analysis.....	125
Tabella 5.4-1: Valori di EL_angles.asc nelle celle prossime alla zona di arresto.....	134
Tabella 6.1-1: Valori post processati al collettore per il volume 0,1 m ³	156
Tabella 6.1-2: Valori post-processati ai collettori per il volume 1,0 m ³	158
Tabella 6.1-3: Valori post-processati ai collettori per il volume 5,0 m ³	161

Tabella 6.3-1: Valori post-processati ai collettori per il volume 0,1 m ³	179
Tabella 6.3-2: Valori post-processati ai collettori per il volume 1,0 m ³	181
Tabella 6.3-3: Valori post processati ai collettori per il volume 5,0 m ³	184
Tabella 7.1-1: Classificazione in base ai livelli energetici SEL e MEL	204
Tabella 7.3-1: Frattili al 95% dei dati raccolti in corrispondenza delle barriere.....	215
Tabella 7.3-2: Dati comuni nel progetto delle barriere	227
Tabella 7.3-3: Valori di progetto di velocità, massa, energia ed altezza.....	227
Tabella 7.3-4: Altezze ed energia effettiva delle barriere	227
Tabella 7.3-5: Verifiche di sicurezza per energia, massima elongazione ed altezza residua.	227
Tabella 7.3-6: Coefficienti utilizzati nel progetto e nella verifica	227
Tabella 7.3-7: Percentuali di arresto e di passaggio – 5,0 m ³ e capacità nominale.....	231
Tabella 7.3-8: Percentuali di arresto e di passaggio – 1,0 m ³ e capacità nominale.....	231
Tabella 7.4-1: Normalizzazione per barriera da 3000 kJ	237
Tabella 7.4-2: Normalizzazione per barriera da 2000 kJ	237
Tabella 7.4-3: Normalizzazione per barriera da 5000 kJ	237
Tabella 7.4-4: Energie di impatto e residue per distacco del blocco da 1,0 m ³	238
Tabella 7.4-5: Energie di impatto e residue per distacco del blocco da 5,0 m ³	238
Tabella 7.4-6: Percentuale di arresto nei tre casi – 1,0 m ³	243
Tabella 7.4-7: Percentuale di passaggio nei tre casi – 1,0 m ³	243
Tabella 7.4-8: Energie residue alla barriera 2	244
Tabella 7.4-9: Percentuale di passaggi alla barriera 2.....	244
Tabella 7.4-10: Energie residue alla barriera 3	244
Tabella 7.4-11: Percentuale di passaggi alla barriera 3.....	245
Tabella 7.4-12: Energie residue alla barriera 4	245
Tabella 7.4-13: Percentuale di passaggi alla barriera 4.....	245
Tabella 7.4-14: Energie residue alla barriera 5	246
Tabella 7.4-15: Percentuale di passaggi alla barriera 5.....	246
Tabella 7.4-16: Energie residue alla barriera 6	246
Tabella 7.4-17: Percentuale di passaggi alla barriera 6.....	247
Tabella 7.4-18: Energie residue alla barriera 7	247
Tabella 7.4-19: Percentuale di passaggi alla barriera 7.....	247
Tabella 7.4-20: Percentuale di arresto nei tre casi – 5,0 m ³	252
Tabella 7.4-21: Percentuale di passaggio nei tre casi – 5,0 m ³	252

Introduzione

Nell'ambito di questa tesi verranno affrontate alcune problematiche legate alla modellazione dei fenomeni di crolli in roccia diffusi, facendo riferimento nello specifico al comune di Rassa (VC) situato in Valsesia, sul torrente Sorba. In particolare si affronteranno due principali tematiche, in primo luogo la modellazione del fenomeno della caduta massi al fine di ottenere l'area di invasione con due modelli differenti ed in secondo luogo verrà affrontata l'ipotesi di danneggiamento delle opere di difesa e le conseguenti influenze sull'area di invasione.

Nella comunità scientifica queste tematiche sono state e sono tutt'ora oggetto di numerosi studi, sia dal punto di vista analitico sia con sperimentazioni in vera grandezza. In funzione della tipologia di risultato che si desidera ottenere esistono differenti approcci, in particolare per l'analisi della dinamica della propagazione si può parlare di analisi semplificate che permettono di ottenere delle informazioni di tipo qualitativo sul fenomeno e che possono essere utilizzate come base di partenza per analisi più dettagliate, le quali a loro volta si avvalgono di approcci numerici di tipo probabilistico e fisicamente basati e che richiedono chiaramente un set di parametri ad alto livello di dettaglio. Per quanto riguarda la modellazione del danno sulle opere di difesa vengono in genere utilizzati approcci con software agli elementi finiti, preventivamente calibrati su prove in vera grandezza.

Nell'ambito di questa tesi verranno utilizzati i software Rockyfor3D (probabilistico e fisicamente basato) e QPROTO (deterministico) per l'analisi del fenomeno di propagazione e nell'ottica del confronto tra i risultati dei due modelli. Per quanto riguardale ipotesi di danneggiamento, esse si basano su precedenti lavori di alcuni autori (Govoni et al., 2016) e le simulazioni post-danneggiamento verranno condotte sul software Rockyfor3D. Allo scopo di ottenere i risultati cercati la tesi è organizzata in 7 capitoli il cui contenuto è brevemente descritto di seguito.

Nel Capitolo 1 verranno discusse le principali caratteristiche e problematiche legate al fenomeno della caduta massi, partendo dalla sua definizione fino alla descrizione delle diverse fasi del moto, nonché degli approcci proposti da vari autori per tenere in conto alcune dinamiche di interazione del blocco in caduta con il versante e la foresta. Verrà inoltre rimarcato il carattere di aleatorietà del fenomeno e la conseguente necessità di un approccio stocastico al problema.

Nel Capitolo 2 verranno brevemente passati in rassegna alcuni degli approcci alla modellazione del fenomeno proposti negli anni da diversi autori, con particolare attenzione ad alcuni modelli di recente concezione basati sull'ambiente GIS. In particolare si farà riferimento al plugin di QGIS QPROTO e al software Rockyfor3D.

Nel Capitolo 3 verrà introdotto nel dettaglio il software di modellazione Rockyfor3D, che si avvale di un approccio statistico associato ad un modello fisicamente basato. Verranno descritti nel dettaglio gli algoritmi utilizzati nel processo di simulazione, la sua configurazione, gli input richiesti e gli output restituiti.

Nel Capitolo 4 verrà descritto il sito in esame, sulla base di rilievi in situ e della documentazione disponibile. Sempre con riferimento al sito in esame, nel Capitolo 5, verrà eseguita la calibrazione dei parametri di scabrezza del versante (back analysis) relativamente all'evento di caduta massi registrato in data 30/10/2018. Le simulazioni verranno condotte con il software Rockyfor3D fino ad una completa riproduzione del fenomeno così come registrato. Verranno quindi descritti e commentati gli output delle simulazioni.

Nel Capitolo 5, sempre nell'ambito della riproduzione dell'evento del 30/10/2018, verranno condotte delle simulazioni con il plugin QPROTO che consente di eseguire analisi traiettografiche speditive, del quale ne verrà data una breve descrizione in termini di algoritmo e di input richiesti/output restituiti. Infine verranno posti a confronto i risultati ottenuti dalle simulazioni con Rockyfor3D e QPROTO.

Nel Capitolo 6, sulla base dei dati raccolti in situ e nell'ottica del confronto tra gli output di Rockyfor3D e QPROTO, verranno esaminati diversi scenari previsionali. In primo luogo verrà esaminato lo scenario di distacco da roccia intensamente fratturata con tre diversi volumi, descrivendone gli output in termini di energie medie. Successivamente verrà confrontato tale output con il corrispondente fornito da QPROTO, mettendo in evidenza similitudini/differenze, nonché le più plausibili ragioni di queste ultime. In secondo luogo verrà condotta l'analisi dello scenario previsionale, con i medesimi volumi, di distacco contemporaneo da roccia

intensamente fratturata e roccia esposta. Verrà infine mostrata la capacità di QPROTO di tenere in conto la differente probabilità spaziale di accadimento del fenomeno nel medesimo scenario di distacco, fornendo una mappa di pericolosità indipendente dal tempo.

Nel Capitolo 7 verrà progettato un sistema di difesa per gli elementi a rischio esposti al fenomeno, ricorrendo a barriere flessibili, secondo le attuali norme e linee guida europee. Si seguirà un processo iterativo di ottimizzazione della posizione delle barriere sul versante, al fine di ridurre le dimensioni pur mantenendo l'obiettivo di protezione dell'abitato. Ne verrà quindi descritto l'effetto sul fenomeno di propagazione. Successivamente a tale progettazione verranno formulate delle ipotesi di danneggiamento delle barriere installate, sulla base di studi condotti da alcuni autori nell'ambito dell'arco alpino italiano. Tali ipotesi verranno testate sul sito in esame, data la compatibilità geografica e climatica, al fine di simulare gli effetti di tale danneggiamento sul fenomeno di propagazione. Le simulazioni verranno condotte con il software Rockyfor3D e gli output verranno descritti in termini di energia media e di numero di passaggi dei blocchi attraverso le opere. Verranno quindi messi a confronto gli scenari di danneggiamento con lo scenario avente le barriere alla loro capacità di assorbimento nominale, durante il distacco dei volumi utilizzati nello scenario previsionale descritto nel Capitolo 6. Ad ogni barriera, per ogni scenario di danneggiamento e di distacco, verrà associata una percentuale di arresto, simbolica della riduzione di efficienza della barriera, ed una percentuale di passaggio, complemento a 100 della percentuale di arresto, ad indicare quanto l'abitato risulta essere ancora esposto al fenomeno di caduta massi nel medesimo scenario di danneggiamento.

1. Il fenomeno della caduta massi

Il presente capitolo trae spunto dalle lezioni del corso di Stabilità degli scavi e delle opere di sostegno sostenuto dalla prof.ssa Barbero (2017).

La caduta massi è un fenomeno diffuso nei versanti in roccia ed avviene in presenza di cause scatenanti (spinte idrauliche, radici degli alberi, ghiaccio) che rimuovono le condizioni di equilibrio di blocchi separati da discontinuità naturali. Il distacco avviene principalmente in zone acclivi, al quale segue un moto verso valle per gravità, caratterizzato da una serie di cinematismi (scivolamento, rotolamento, roto-traslazione, rimbalzi, moto in aria) legati all'interazione con il versante. Il fenomeno si conclude con l'arresto del blocco, quando l'energia cinetica si esaurisce.

La caduta massi è caratterizzata da elevati contenuti energetici che si traducono in possibili ingenti danni a cose e persone. Lo studio del fenomeno diventa quindi di fondamentale importanza nelle zone a ridosso dei centri abitati e di opere di interesse quali infrastrutture e monumenti.

Risulta chiaro che il fenomeno debba quindi essere caratterizzato in termini di energia cinetica e non solo di velocità, in quanto l'entità del danno è legata anche alla massa dei blocchi (e quindi al volume). Le velocità dei blocchi che normalmente transitano lungo il versante possono raggiungere i 30-40 m/s, mentre le volumetrie in gioco variano in genere tra 0,02 m³ e 5 m³, senza escludere casi in cui si possono raggiungere volumi dell'ordine dei 10-15 m³, con casi estremamente rari ma non impossibili, con volumetrie di circa 50 m³. Nonostante le piccole volumetrie in gioco rispetto ad altri fenomeni di frana, le elevate velocità portano i massi all'accumulo di grandi energie e da ciò scaturisce il potere distruttivo di tale fenomeno.

1.1. Caratteristiche della caduta massi

Lo studio del fenomeno di propagazione della caduta massi nasce allo scopo di effettuare analisi di rischio nell'ottica della progettazione di interventi di difesa utili alla mitigazione del rischio stesso. L'analisi di rischio è un approccio probabilistico sugli effetti del fenomeno in esame e risulta utile definire i seguenti elementi:

- *Pericolosità H*: probabilità di accadimento di un particolare evento potenzialmente distruttivo relativamente ad una data area all'interno di un predefinito arco temporale;
- *Elementi a rischio E*: elementi potenzialmente esposti al fenomeno (vite umane, edifici, impianti, infrastrutture ecc.);
- *Vulnerabilità degli elementi a rischio V*: potenziale livello di danno degli elementi esposti al rischio (indice variabile tra 0, assenza di vulnerabilità, e 1 ovvero la totale distruzione degli elementi).

La combinazione di pericolosità, di elementi a rischio e di vulnerabilità permette di definire il livello di rischio atteso per la zona in esame, che può risultare alto o basso, in relazione alla scala di valutazione adottata.

Alla luce di quanto esposto, risulta necessario uno studio approfondito delle fasi della propagazione e di un modello che descriva in maniera dettagliata i legami esistenti tra le variabili che ne governano l'evoluzione.

In merito al fenomeno di propagazione interessa conoscere sostanzialmente due elementi:

- *Area di invasione*, intesa come unione delle traiettorie, ovvero il percorso che possono seguire i massi una volta definiti i punti di distacco, fino ai punti di arresto. Le traiettorie interessano in quanto nel percorso possono essere presenti degli elementi a rischio (sentieri, strade, edifici) e quindi da queste informazioni è possibile definire degli interventi di protezione. I punti di arresto invece interessano per capire se nei diversi scenari il fenomeno può portare dei massi in corrispondenza di edifici o strade più a valle del versante.
- *Intensità (velocità ed energia)* con la quale i massi transitano in una determinata zona per definire il potere d'arresto di un'eventuale opera di difesa, qualora le energie in gioco la rendessero necessaria.

È quindi chiara la necessità di definire dei metodi che permettano di prevedere le più probabili traiettorie e i corrispondenti contenuti energetici in ogni punto della zona interessata.

1.2. Fasi del moto

Innanzitutto occorre definire il fenomeno in termini delle fasi che ne contraddistinguono l'evoluzione. Si possono evidenziare cinque fasi principali:

- a) Distacco del blocco dal versante
- b) Moto del blocco in aria
- c) Impatto del blocco sul versante
- d) Moto del blocco lungo il versante
- e) Arresto del blocco.

1.2.1. Distacco del blocco dal versante

Le informazioni inerenti questa fase possono essere ricavate dall'analisi strutturale dell'ammasso roccioso in termini di giaciture delle discontinuità, in quanto deve esistere la possibilità geometrica di distacco, ovvero le principali famiglie di discontinuità devono assumere orientamenti, reciproci e rispetto al fronte del versante, tali da permettere il cinematismo di distacco. Si rende quindi necessaria un'analisi cinematica preliminare all'analisi di stabilità di versante i principali cinematismi possono essere lo scivolamento planare, lo scivolamento di un cuneo e il ribaltamento (Figura 1.2-1). Quest'analisi permette di risalire sia alla posizione delle possibili nicchie/aree di distacco, sia alla geometria del blocco, schematizzabile con forma e volume.

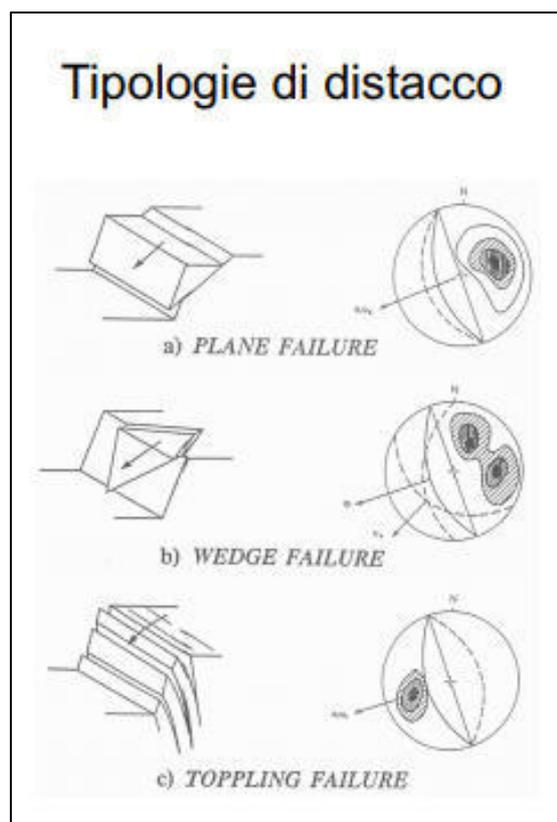


Figura 1.2-1: Cinematismi scatenanti della caduta massi

Altro elemento fondamentale nella fase di distacco è la *velocità iniziale* (intensità e direzione) del blocco. Essa è legata alla causa scatenante, che può essere di natura idraulica (spinte idrauliche dovute alle acque meteoriche o di falda che si infiltrano nelle discontinuità) o meccanica (sisma, spinta dovuta all'apparato radicale degli alberi all'interno della discontinuità, azione del ghiaccio).

Questi elementi (forma, volume e velocità iniziale), sono affetti da grandi incertezze e occorre quindi far riferimento a metodi stocastici che tengano conto sia della variabilità intrinseca dei parametri sia della scarsa conoscenza della stessa, in relazione al grado di approfondimento dei rilievi di terreno. Il fenomeno stesso di caduta massi è un fenomeno caratterizzato da un'elevata aleatorietà intrinseca, ovvero non è un fenomeno meramente deterministico, ma è legato ad una probabilità di occorrenza. Di conseguenza la somma dell'aleatorietà dei parametri in gioco e di quella legata all'occorrenza del fenomeno rende la caduta massi un fenomeno ad elevatissima aleatorietà che non può essere studiato con metodi deterministici, ma solo con metodi di tipo probabilistico.

In genere il distacco non avviene puntualmente, ma si hanno fenomeni diffusi, ovvero il distacco può avvenire da più zone, non necessariamente in maniera simultanea, il che rende questa fase altamente variabile. Ciò si riflette anche sulla velocità iniziale, in quanto non conoscendo il punto esatto di distacco non è possibile definirne a priori intensità e direzione in modo deterministico.

1.2.2. Moto del blocco in aria

Una volta avvenuto il distacco il blocco si muove in aria seguendo delle traiettorie descritte da una legge parabolica. Alla traiettoria, cioè la posizione nello spazio e nel tempo del blocco, è associata la velocità del blocco in ogni suo punto. Una volta nota la velocità iniziale la traiettoria è un'informazione che si riesce a calcolare con buona approssimazione, applicando le classiche leggi della balistica e trascurando l'effetto dell'attrito del blocco con l'aria.

Ogni qualvolta il blocco si muove in aria il cinematismo può essere di due tipi

- a) *a gittata*, quando il blocco possiede una velocità iniziale diversa da zero;
- b) *di caduta libera*, quando la velocità iniziale è nulla e sul blocco agisce solo la gravità.

Grazie alle equazioni del problema (equazioni (1.1) e (1.2)) è possibile conoscere la posizione del blocco in ogni istante di tempo t e in questo modo si ricostruisce la sua traiettoria.

Nel caso di *caduta a gittata* la velocità iniziale possiede componenti diverse da zero e la traiettoria è una parabola. Le condizioni al contorno sono:

$$\begin{cases} P_0(x_0, y_0) & \text{Posizione iniziale} \\ V_0(V_{0x}, V_{0y}) & \text{Velocità iniziale} \end{cases} \quad (1.1)$$

Mentre le equazioni del sistema all'istante t sono:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_{0y} \cdot t + y_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Dove $g=9,81$ è l'accelerazione di gravità [m/s^2] e t il generico istante di tempo [s].

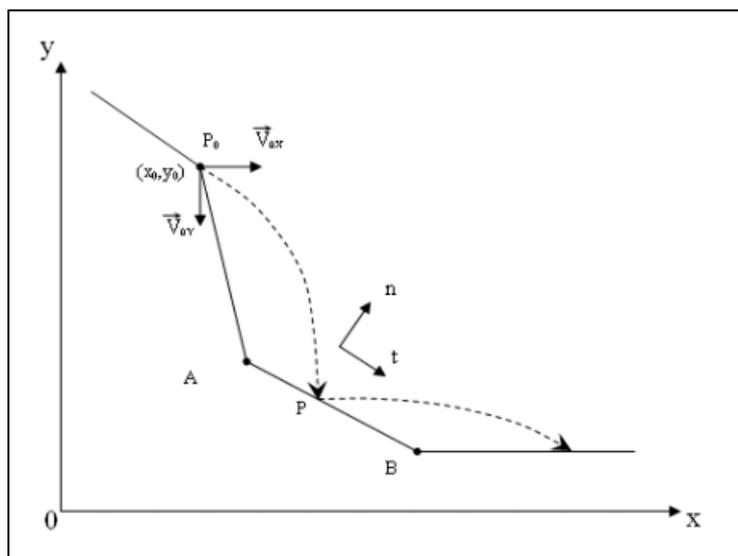


Figura 1.2-2: Traiettoria del blocco e interazione con il versante

Poste le condizioni iniziali per il blocco (che negli step successivi sono rappresentate dalla velocità di uscita dopo l'impatto e dalle coordinate dell'impatto) risolvendo il sistema (1.2) è possibile calcolare le coordinate di impatto con il versante $P(x_p, y_p)$, appartenenti al segmento AB rappresentante una porzione di profilo, le cui coordinate estreme valgono $A(x_1, y_1)$ e $B(x_2, y_2)$ (Figura 1.2-2).

$$\begin{cases} y = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{(x - x_0)^2}{V_{0x}^2} + V_{0y} \cdot \frac{(x - x_0)}{V_{0x}} + y_0 \\ y = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases} \quad (1.3)$$

Nel caso di *caduta libera* il blocco ha velocità iniziale nulla ed è soggetto esclusivamente all'azione della gravità. Si trascura l'effetto dell'attrito con l'aria e il sistema risolvente è il medesimo esposto per la caduta a gittata (equazioni (1.3)), ma nel quale la componente orizzontale della velocità iniziale V_{0x} è posta pari a zero. Infatti in tale tipo di moto il distacco avviene solo ed esclusivamente per effetto della gravità, che ha componente orizzontale nulla.

1.2.3. Impatto del blocco sul versante

Nella fase di interazione blocco-versante sono di fondamentale importanza i seguenti aspetti:

- Massa, forma e dimensioni del blocco
- Topografia del versante
- Tipologia e caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti il versante

In merito al tipo di fenomeno di interazione si può avere

- Scivolamento
- Rotolamento
- Impatto
- Frantumazione del blocco

Al termine del moto in aria il blocco entra quindi a contatto con il versante. Tale fenomeno è di carattere impulsivo, poiché il blocco è dotato di velocità con una certa direzione rispetto al versante e le sue coordinate possono essere ricavate analiticamente dalle equazioni precedentemente esposte per il moto in aria (equazioni (1.1), (1.2) e (1.3)). I software di calcolo effettuano sistematicamente la risoluzione del sistema tra le equazioni delle traiettorie in aria e le equazioni dei segmenti secondo i quali è discretizzato il versante. Il sistema che fornirà una soluzione reale restituirà automaticamente le coordinate di impatto con il versante.

Nell'istante in cui il blocco impatta contro il versante le forze esterne agenti (attrito, gravità ecc..) sono trascurabili rispetto alle forze impulsive interne, che agiscono senza modificare la quantità di moto totale del sistema: ciò implica la valenza del principio di conservazione della quantità di moto e dell'energia totale durante l'impatto. In funzione della variazione dell'energia cinetica del blocco, l'impatto può essere definito come anelastico o elastico, il primo quando l'impatto provoca la plasticizzazione locale del versante e quindi perdita di energia per deformazione, il secondo quando l'impatto non causa la perdita di energia cinetica del blocco.

L'impatto è comunque un fenomeno superficiale, che al massimo interessa 1-2 metri di profondità, ed è sufficiente conoscere il tipo di copertura del versante e le relative caratteristiche di scabrezza e deformabilità. Tali informazioni sono comunque affette da incertezze poiché non essendo di facile determinazione, vengono ricavate sperimentalmente da prove in sito, tenendo conto di un comportamento medio e non puntuale, quale è la natura del rilievo. Inoltre la copertura del versante è soggetta a variazioni stagionali, che devono essere tenute in conto, in quanto a differenti tipologie di copertura corrispondono differenti risposte all'impatto del blocco.

A fronte di queste grandi incertezze il problema della dinamica dell'impatto con il versante viene semplificato introducendo i *coefficienti di restituzione*. Questi forniscono il rapporto tra la velocità in uscita e la velocità in ingresso (ovvero rapporto tra velocità dopo l'impatto e velocità prima dell'impatto) del blocco, generalmente inferiore all'unità a causa della dissipazione energetica subita. In questo modo si riassumono in maniera molto semplice i rapporti esistenti tra le caratteristiche meccaniche del blocco e della copertura del versante, fornendo una misura della dissipazione energetica dovuta all'impatto, senza entrare in merito al tipo di processo deformativo.

Definite v'_1 la velocità dopo l'impatto e v_1 la velocità prima dell'impatto, il coefficiente di restituzione R è determinato come segue:

$$R = \frac{v'_1}{v_1} \quad (1.4)$$

I coefficienti di restituzione sono tabellati in funzione del tipo di copertura del versante e sono ricavati da prove sperimentali in situ e da osservazione di casi reali (cioè calibrati tramite back analysis).

Sostanzialmente, una volta assegnati i diversi coefficienti di restituzione in funzione della copertura del tratto di versante, il software applica in automatico la riduzione di velocità al blocco in base punto in cui avviene l'impatto.

Il coefficiente di restituzione è sempre minore di 1, compreso tra gli estremi 1 quando l'impatto è completamente elastico e 0 quando tutta l'energia viene dissipata nella deformazione anelastica del versante e il blocco si arresta (acqua, fango o terreni molto deformabili ecc). Il range di variazione è comunemente compreso nell'intervallo 0,28 e 0,90.

Generalmente, per l'agevolazione dei calcoli, ci si riferisce alle componenti normale R_n e tangenziale R_t del coefficiente di restituzione rispetto al versante. Questa suddivisione è legata alla differente natura dei fenomeni che influiscono sulla riduzione delle due componenti di velocità: per la componente normale è predominante la riduzione a causa della deformazione plastica del versante mentre per la componente tangenziale prevale l'attrito con il versante. In questo modo si rende più semplice e precisa la taratura dei coefficienti di restituzione, definiti come segue:

$$R_n = \frac{v'_{1n}}{v_{1n}} \quad (1.5)$$

$$R_t = \frac{v'_{1t}}{v_{1t}} \quad (1.6)$$

In assenza di informazioni più precise ci si può ricondurre alle tabelle dei coefficienti di restituzione disponibili in letteratura (Tabella 1.2-1, Tabella 1.2-2 e Tabella 1.2-3), secondo diversi autori (Richards, 1988; Pfeiffer e Bowen, 1989; Rocscience, 2000). Tuttavia, nella pratica comune, è preferibile ricavare a ritroso i coefficienti di restituzione, tarandoli sulla base dei dati, qualora disponibili, su casi realmente avvenuti in passato nel sito in esame (back analysis). Si considera come affidabile la riproduzione dell'evento quando il risultato

dell'analisi (traiettorie, velocità, punti di arresto, energia cinetica totale) approssima all'80% ciò che è stato osservato.

Materiale	R_n [-]	R_t [-]
Roccia compatta	0,9 - 0,8	0,75 - 0,65
Materiale detritico misto a grandi blocchi di roccia	0,8 - 0,5	0,65 - 0,45
Materiale detritico compatto misto a piccoli blocchi di roccia	0,5 - 0,4	0,45 - 0,35
Pendio ricoperto d'erba	0,4 - 0,2	0,3 - 0,2
Bedrock dura	0,53	0,99
Strada asfaltata	0,4	0,9
Affioramento di bedrock con grandi blocchi e superfici dure	0,35	0,85
Ricoprimento pendio	0,32	0,82
Pendio ricoperto da vegetazione	0,32	0,8
Terreno soffice con poca vegetazione	0,3	0,8

Tabella 1.2-1: Coefficienti di restituzione secondo Richards (1988)

Materiale	R_n [-]	R_t [-]
Superfici lisce di materiale resistente come pavimentazione stradale o superficie rocciosa	0,87 - 0,92	0,37 - 0,42
Prevalenza di substrato roccioso intatto con blocchi isolati	0,83 - 0,87	0,33 - 0,37
Detrito costituito da grandi blocchi con scarsa vegetazione affiorante	0,82 - 0,85	0,30 - 0,33
Detrito ricoperto da abbondante vegetazione e terreno scarsamente vegetato	0,80 - 0,83	0,28 - 0,30
Pendio in terra	0,78 - 0,82	-

Tabella 1.2-2: Coefficienti di restituzione secondo Pfeiffer e Bowen (1989)

Materiale	R_n [-]	R_t [-]
Materiale duro di superficie	0,37 - 0,42	0,87 - 0,92
Bedrock o blocchi con poco terreno o vegetazione	0,33 - 0,37	0,83 - 0,87
Pendio con poca vegetazione	0,30 - 0,33	0,83 - 0,87
Pendio con vegetazione	0,30 - 0,33	0,80 - 0,83
Terreno soffice con poca vegetazione	0,28 - 0,32	0,80 - 0,83
Pendio ricoperto da terreno e vegetazione	0,28 - 0,32	0,78 - 0,82
Parete di calcare	0,315	0,712
Breccia di calcare coperta parzialmente da vegetazione	0,303	0,615
Blocchi di calcare dolomitico su superfici rocciose o depositi ghiaiosi	0,20	0,53

Tabella 1.2-3: Coefficienti di restituzione secondo Rocscience (2000)

1.2.4. Modo del blocco lungo il versante

Dopo l'impatto si possono presentare diverse situazioni in funzione dell'energia residua del blocco (e quindi, parallelamente, da quanta energia viene dissipata nell'impatto):

- Il blocco ha sufficiente energia residua e rimbalza sul versante, assumendo una nuova velocità iniziale e seguendo una nuova traiettoria parabolica in aria;
- Il blocco non possiede sufficiente energia per rimbalzare e inizia a muoversi lungo il versante. Il tipo di moto è legato alle caratteristiche del materiale di copertura del versante nel punto di impatto. Può scivolare se il versante è costituito da materiale a basso coefficiente d'attrito, oppure può rotolare se incontra un ostacolo o ancora può avere un moto che è combinazione dei due precedenti (roto-traslazione);
- Il blocco esaurisce l'energia residua e si arresta.

La previsione del cinematismo post-impatto è affetta da elevate incertezze, poiché è difficile prevedere con certezza cosa incontrerà il blocco lungo il versante e quindi in genere i software di calcolo simulano il fenomeno come una serie di moti in aria e di rimbalzi, trascurando gli altri fenomeni di interazione.

Oltre alla copertura del versante, sul cinematismo post-impatto agisce l'entità dell'angolo β_r tra la direzione della velocità di uscita e la pendenza locale del versante β_c (Figura 1.2-3).

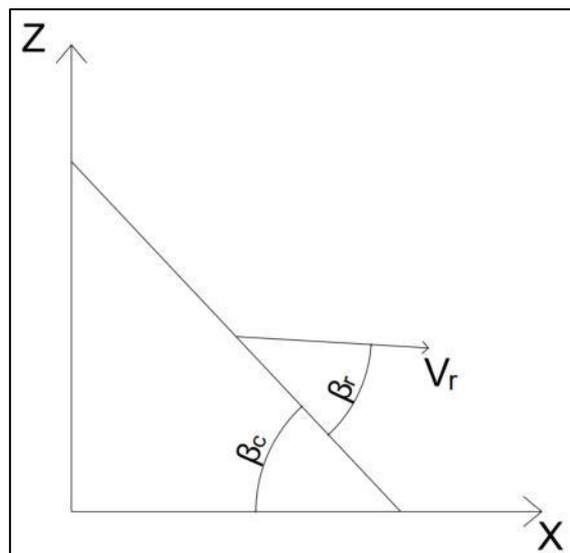


Figura 1.2-3: Angolo della velocità in uscita rispetto al versante

Se tale angolo è sufficientemente elevato (in genere ogni software di calcolo adotta un proprio valore soglia) il blocco rimbalza e nello step successivo si analizza il cinematismo in termini di energia residua, con l'applicazione dei coefficienti di restituzione. Al contrario se l'angolo è al di sotto di una determinata soglia il blocco non avrà più energia sufficiente per effettuare un rimbalzo e quindi inizierà un moto lungo il versante che può essere di scivolamento, di rotolamento o di rototraslazione.

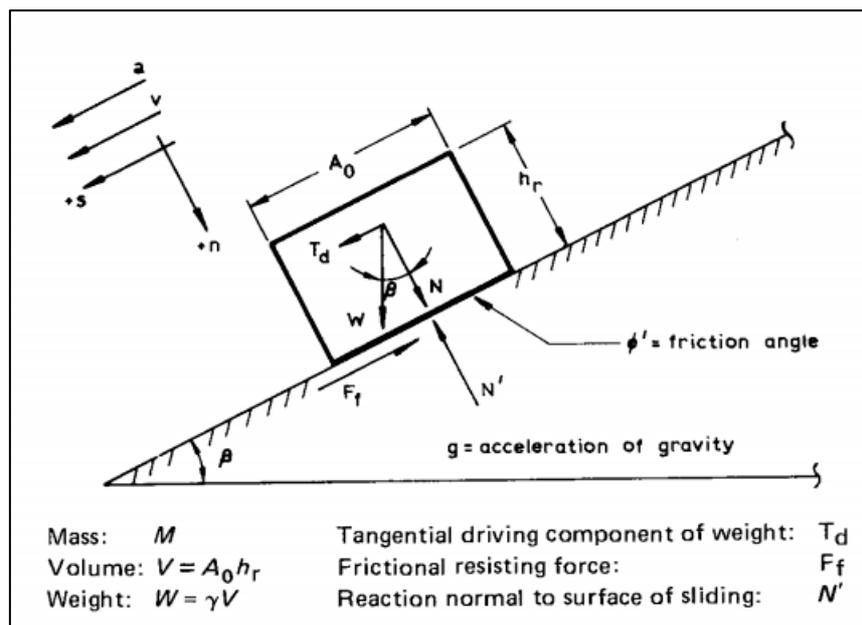


Figura 1.2-4: Modello di interazione Pariseau e Voight (1979)

Generalmente, però, il criterio di scelta è legato ai valori assunti delle velocità traslazionale e rotazionale:

- *Scivolamento*, quando la velocità angolare è nulla. Le perdite di energia sono maggiori rispetto agli altri cinematismi a causa dell'attrito. Secondo il modello di interazione blocco-versante di Pariseau e Voight (1979) (Figura 1.2-4), lo scivolamento avviene al superamento di un angolo di attrito soglia tra blocco e versante. Le velocità tangenziale v_t (moto uniformemente accelerato su versante a pendenza costante e attrito costante) e lineare sul segmento di lunghezza s v_s sono calcolabili come segue:

$$v_t = v_0 + g \cdot t \cdot (\sin\beta - \cos\beta \cdot \tan\delta_{SL}) \quad (1.7)$$

$$v_s = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot s \cdot (\sin\beta - \cos\beta \cdot \tan\delta_{SL})} \quad (1.8)$$

Dove:

v_0 = velocità iniziale del blocco;

s = lunghezza del percorso considerato;

t = generico istante di tempo;

g = accelerazione di gravità;

β = inclinazione del piano medio che schematizza la pendenza del versante;

δ_{SL} = angolo di attrito dinamico tra blocco e versante.

- *Rotolamento*, quando la velocità angolare è non nulla e la velocità traslazionale è minore rispetto al caso precedente. Sulla base degli studi condotti sulla cinematica di rotazione dei corpi rigidi (Paiola, 1978; Bassato, Cocco e Silvano, 1985) è possibile calcolare la velocità di avanzamento del blocco lungo il versante:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \alpha \cdot g \cdot s \cdot (\tan\beta - \tan\delta_{rot}) \cdot \cos\beta} \quad (1.9)$$

Dove:

v_0 = velocità normale del masso, ottenuta come combinazione delle sue componenti verticale e orizzontale;

s = lunghezza del percorso considerato;

α = coefficiente che tiene conto della forma del blocco (pari a 10/7 per sfera e 4/3 per cilindro)

g = accelerazione di gravità;

β = inclinazione del piano medio che schematizza la pendenza del versante;

δ_{rot} = angolo di attrito dinamico tra blocco e versante in condizioni di rotolamento.

- *Rototraslazione*, che si classifica come situazione intermedia tra traslazione e rotolamento.

Nel caso di rototraslazione è stata proposta una formulazione empirica che permette di calcolare la velocità con la quale il blocco avanza lungo il versante (Hoek, 1987) (Equazione (1.10)):

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot s \cdot g \cdot K} \quad (1.10)$$

Dove:

v_0 = velocità iniziale di discesa;

s = distanza percorsa;

g = accelerazione di gravità;

K = costante funzione della pendenza del versante θ e dell'angolo di attrito del materiale di copertura φ .

Lo stesso Hoek suggerisce di approssimare la costante K con la funzione $\sin\theta$, di cui sono disponibili dei grafici che ne consentono una buona stima. Risulta evidente che l'espressione empirica fornita da Hoek non considera la forma del blocco e viene quindi considerata ininfluenza ai fini dell'evoluzione del fenomeno, il che non è vero in quanto durante i diversi rimbalzi, scivolamenti, rotolamenti il blocco può rompersi o semplicemente cambiare forma, influenzando le caratteristiche di dissipazione che il versante ha sullo stesso e di conseguenza sull'evoluzione del fenomeno.

Sostanzialmente, per quanto esposto, nel caso di scivolamento il blocco si muove più velocemente, ma a causa dell'elevata dissipazione energetica si arresta prima rispetto al caso di rotolamento. Chiaramente il moto di rototraslazione prevede distanze di arresto intermedie tra quelle competenti ai due tipi di moto.

Un altro importante fenomeno di interazione con il versante è quello della frantumazione del blocco. Qualora il blocco impatti con un materiale di resistenza pari o superiore può incorrere nella frantumazione, con conseguente suddivisione in frammenti di varie dimensioni e differenti velocità e direzioni di rimbalzo, che si riflettono in nuove possibili traiettorie paraboliche. La difficoltà di previsione e quindi di implementazione di tale fenomeno nei codici di calcolo ha portato la maggior parte degli autori a trascurarne l'effetto nella trattazione della propagazione, mantenendo il volume del blocco costante dal punto di distacco al punto di arresto.

1.2.5. Arresto del blocco

L'arresto del blocco è la fase terminale del fenomeno di caduta massi. Il punto d'arresto è funzione di molti parametri:

- forma, volume e massa del blocco, che si legano principalmente ai fenomeni dissipativi nell'impatto;
- velocità del blocco, legata essenzialmente all'energia accumulata dal blocco lungo il versante e che ne determina la distanza percorsa (a parità di condizioni al contorno, una volumetria maggiore si traduce in maggiori distanze);
- scabrezza del versante, che influisce sulla dissipazione energetica da impatto modificando la velocità in uscita del blocco e il tipo di cinematismo a valle;
- pendenza del versante, che agisce sulla velocità acquisita dal blocco e quindi sull'energia cinetica immagazzinata;
- caratteristiche meccaniche della copertura del versante, che si legano fondamentalmente all'energia dissipata per deformazione dello stesso;
- presenza di vegetazione, che devia, rallenta e talvolta può anche arrestare il blocco;
- presenza di ostacoli al moto, quali opere antropiche (opere di difesa, edifici) o naturali e tali da impedire l'avanzamento del blocco (blocchi di grandi dimensioni arrestatisi in fenomeni passati, specchi d'acqua, alberi).

In termini analitici il blocco può essere considerato fermo quando la velocità si assesta al di sotto di un certo valore soglia che può essere fissato nei diversi software di calcolo.

1.3. Effetto di forma e volume del blocco

Di fondamentale importanza nello sviluppo della propagazione è il rapporto esistente tra la forma e il volume del blocco e forma e volume dell'elemento rappresentativo del versante. Queste caratteristiche reciproche modificano la tipologia di contatto blocco-versante, nonché le conseguenti dissipazioni energetiche e cinematismo post-impatto. Nel seguito vengono esposti i principali elementi caratteristici di tale interazione.

1.3.1. Effetto del volume

La perdita di energia a causa dell'impatto è strettamente legata al volume del blocco. A parità di massa, infatti, un differente volume provoca effetti diversi all'impatto con il versante (Figura 1.3-1):

- Se il volume del blocco è molto maggiore del volume rappresentativo dell'elemento del versante l'impatto è simile a quello che si avverrebbe in presenza di un terreno granulare, con forte dissipazione energetica per deformazione plastica del versante e per attrito;
- Se il volume del blocco è paragonabile al volume rappresentativo dell'elemento del versante l'impatto è simile a quello che avverrebbe tra roccia e roccia, quindi di tipo simil-elastico con possibile frantumazione del blocco e smussatura degli spigoli. La dispersione energetica per attrito e per deformazione è minore rispetto al caso precedente;
- Se il volume del blocco è molto minore del volume rappresentativo dell'elemento del versante, si ha elevata probabilità che il blocco possa arrestarsi in quel tratto.

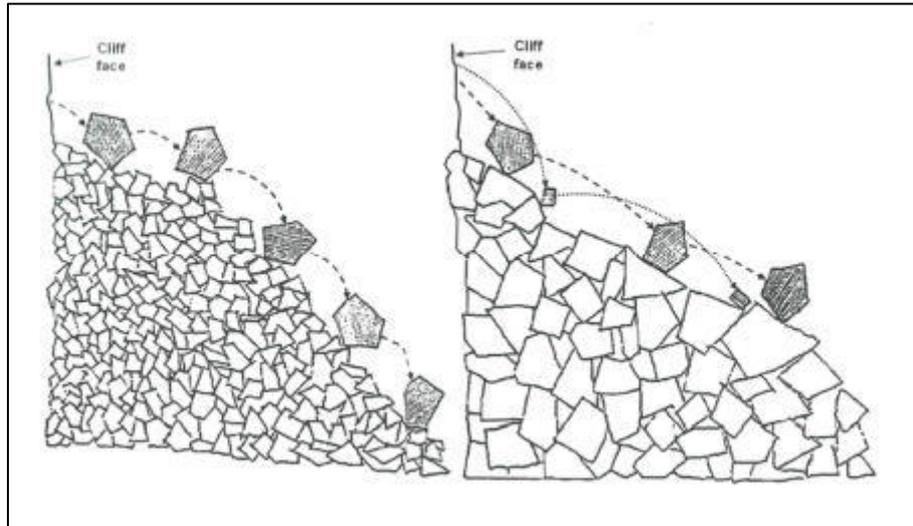


Figura 1.3-1: Rapporto volume del blocco-volume rappresentativo del versante (Giani, 1992)

1.3.2. Effetto della forma

La forma del blocco influisce sul tipo di impatto e sul cinematismo post impatto, in funzione anche del tipo di contatto con il versante (spigolo-spigolo, spigolo piano, piano-piano). Per esempio ci si aspetta un rotolamento da parte di una sfera e una traslazione da parte di una lastra. Infatti le irregolarità del blocco interagiscono con quelle della superficie del versante modificando il numero e l'altezza dei rimbalzi (una maggiore scabrezza del versante aumenta il numero e l'altezza dei rimbalzi) e l'energia e la velocità dopo l'impatto (una scabrezza maggiore riduce maggiormente l'energia e la velocità del blocco). Risulta quindi di grande importanza associare alla forma del blocco la scabrezza del versante, che deve essere definita lungo il versante per almeno una lunghezza pari al raggio del blocco di progetto. In sostanza l'irregolarità nella forma del blocco, nei confronti degli effetti sul cinematismo della caduta massi, ha ruolo simile a quello della scabrezza del versante. Per esempio, se il blocco si muove lungo un versante rappresentabile con una superficie piana, per tenere in conto delle irregolarità della forma del blocco, al versante può essere assegnata una scabrezza pari a circa il 25%-50% del raggio del blocco di progetto.

Fondamentalmente il problema risiede nel fatto che considerando la forma del blocco non si conosce comunque a priori la sua evoluzione nel corso del fenomeno (frantumazione, smussatura degli spigoli). Esistono delle formulazioni empiriche (equazione (1.11) ed equazione (1.12) (Pfeiffer e Bowen, 1989) che permettono di tenere conto del volume del

blocco riducendo il coefficiente di restituzione normale (nei metodi lumped mass, vedi Paragrafo 2.1.2.2):

$$R_n = R_{n_{iniziale}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{m}{C}\right)^2} \quad (1.11)$$

Dove:

- m = massa del blocco [kg]
- $C=1000$ [kg] costante derivata empiricamente.

Sostanzialmente l'espressione (1.11) mette in evidenza l'osservazione, che trova riscontro empiricamente, che un blocco di massa elevata (quindi di volume elevato) perderà più energia per deformazione e per attrito nell'impatto rispetto ad un blocco di piccole dimensioni. Gli stessi autori (Pfeiffer e Bowen, 1989) hanno proposto una modifica simile al coefficiente di restituzione normale, ma in termini di velocità, rispecchiando l'osservazione empirica che un blocco che impatta sul versante con una velocità elevata dissiperà più energia rispetto ad un blocco che impatta con una bassa velocità (equazione (1.12)):

$$R_n = R_{n_{iniziale}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{pre-impatto}}{k}\right)^2} \quad (1.12)$$

Dove:

- $V_{pre-impatto}$ = velocità del blocco prima dell'impatto sul versante [m/s]
- $k=9,144$ m/s, costante derivata empiricamente.

La forma del blocco governa quindi il moto dopo l’impatto, la traiettoria e il punto di arresto, poiché essa è fortemente correlata al tipo di contatto con il versante e quindi alla quantità di energia dissipata.

Anche se in alcuni casi è possibile ipotizzare la forma del blocco non si può dire a priori se tale forma rimarrà invariata durante il moto e quindi sono state proposte diverse soluzioni:

- Si trascura tale informazione;
- Si considera comunque la forma del blocco ma si ignora la sua variazione lungo il versante;
- Si tiene conto della forma del blocco facendo variare l’angolo di attrito di contatto con il versante da un valore nullo ad un valore tipico del contatto roccia-roccia.

1.4. Effetto della vegetazione

Negli ultimi anni, con l’avvento di calcolatori sempre più performanti e l’introduzione di nuove tecnologie per l’acquisizione di dati spaziali relativi al terreno e agli elementi su esso presenti, è stato possibile sviluppare ed eseguire algoritmi di calcolo che possano tenere conto in maniera quantitativa della presenza delle foreste lungo il versante. Un software di calcolo in grado di svolgere tali elaborazioni è Rockyfor3D (Dorren et al. 2014), che verrà descritto nel dettaglio nel Capitolo 3.

Le foreste, in termini di effetti sulla propagazione del fenomeno di caduta massi, hanno principalmente due effetti:

- 1) Gli strati che costituiscono la foresta (arboreo, arbustivo ed erbaceo) possono arrestare, rallentare e deviare i blocchi riducendone il contenuto energetico. Inoltre le radici hanno l’effetto di trattenere i blocchi, riducendone la probabilità di distacco.
- 2) Allo stesso tempo le radici di grossi alberi possono indurre azioni statiche sui blocchi, crescendo all’interno delle discontinuità dell’ammasso roccioso. Inoltre le azioni statiche e dinamiche (neve, vento) sui tronchi vengono trasmesse alle radici che a loro volta esercitano delle azioni sfavorevoli sui blocchi potenzialmente instabili.

In merito agli effetti positivi delle foreste nei confronti della propagazione si può parlare di protezione attiva e di protezione passiva:

- 1) si parla di *protezione attiva* quando un elemento agisce sulla probabilità di accadimento di un particolare evento. Nella caduta massi agisce quindi sulla probabilità di distacco. La protezione attiva è esplicata dalla foresta grazie al sistema radicale che:
 - fissa i blocchi impedendone il distacco;
 - riduce il potere erosivo dell'acqua;
 - intercetta la circolazione generale dell'acqua in superficie e in profondità;

- 2) si parla di *protezione passiva* quando un elemento agisce sull'entità di un particolare avvenimento. Nella caduta massi agisce quindi sull'entità dell'area di propagazione. La protezione passiva è esplicata dai tronchi degli alberi che:
 - deviano i blocchi;
 - rallentano i blocchi;
 - arrestano i blocchi.

Risulta evidente che il ruolo più importante è ricoperto dalla protezione passiva, che dissipa una grande quantità di energia dei blocchi, favorendo il contenimento dell'area di propagazione e riducendo le distanze di arresto.

Un primo modo di tenere conto dell'effetto della vegetazione nella modellazione è quello di modificare i coefficienti di restituzione, ovvero di ridurli, in quanto l'effetto sulla propagazione è quello di ridurre l'energia cinetica dei blocchi. Diversi autori (Dorren, Berger e Putters, 2006) hanno proposto la correzione dei coefficienti di restituzione normale e tangenziale riportata in Tabella 1.4-1:

Sito	Senza vegetazione		Con vegetazione	
	R_n [-]	R_t [-]	R_n [-]	R_t [-]
Media	0,26	0,70	0,36	0,77
Dev. Std.	0,09	0,12	0,13	0,10
Min	0,11	0,50	0,21	0,57
Max	0,41	0,95	0,68	0,96

Tabella 1.4-1: Coefficienti di restituzione in presenza di vegetazione (Dorren, Berger e Putters, 2006)

RockyFor è l'abbreviazione usata dagli autori (Dorren et al., 2014) per Rocky Forest, poiché l'algoritmo implementa i parametri che governano gli effetti della foresta, di seguito riportati:

- densità degli alberi
- diametro medio degli alberi
- tipologia di albero, che influisce sulla quantità di energia dissipata nell'impatto.

Tutti questi elementi possono essere ottenuti da un rilievo in situ e la loro modellazione nei confronti dell'evoluzione del fenomeno verrà trattata nel Capitolo 3.

2. Metodi per l'analisi della dinamica di propagazione

Lo studio della fase di propagazione nel fenomeno della caduta massi costituisce la parte principale delle analisi e la cui accuratezza si riflette sulla capacità di interpretare correttamente il fenomeno. Più l'analisi si addentra nel dettaglio più è possibile risalire con precisione all'evoluzione della propagazione, garantendo, con un adeguato margine d'errore, di definire i possibili interventi atti a mitigarne gli effetti. Duplice effetto dell'utilizzo di modellazioni più rigorose, che tengono in conto più parametri, è l'introduzione di elevate incertezze legate alla natura aleatoria dei parametri stessi. Questo comporta la necessità di adottare software di calcolo che effettuano analisi di tipo stocastico, nei quali le traiettorie sono calcolate sulla base di equazioni che attingono i parametri in maniera casuale dalle distribuzioni di probabilità ad essi assegnati (la distribuzione di probabilità di un parametro ha una dispersione tanto maggiore quanto è maggiore l'incertezza sul valore misurato/stimato).

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi modelli, dai tanti autori impegnati nello studio del fenomeno della caduta massi, uno dei quali si è occupato del software Rockyfor3D utilizzato nell'ambito di questa tesi (Dorren et al., 2014). Di seguito vengono esposti i modelli più comunemente utilizzati in campo progettuale ed alcuni dei modelli di recente concezione.

La principale distinzione tra i modelli disponibili può essere fatta tra:

- *Modelli cinematici*
 - *Modelli numerici*
 - *Modelli analitici*
- *Modelli empirici*
- *Modelli GIS*

2.1. Modelli cinematici

I modelli cinematici consentono di ricostruire la dinamica del fenomeno effettuando analisi basate sulla risoluzione delle equazioni del moto, mettendo in relazione le caratteristiche dei blocchi con quelle relative al versante (Agliardi e Crosta, 2003, Azzoni et al., 1995). Tra i tanti modelli di calcolo disponibili sono preferibili quelli ad approccio probabilistico nell'ottica della progettazione degli interventi di difesa così come richiesto dalla norma. I parametri input sono assegnati con una distribuzione probabilistica attorno ad un valore medio e gli output sono rappresentati dalle più probabili traiettorie dei blocchi con associati, in ogni punto, i valori di energia cinetica, velocità, altezze di rimbalzo e punti di arresto. I modelli cinematici possono essere suddivisi principalmente in modelli numerici e modelli analitici.

2.1.1. Modelli numerici

I modelli numerici suddividono il dominio di studio in un numero finito di elementi ognuno dei quali è caratterizzato da una forma e dalle proprietà geomeccaniche in riferimento alla porzione di versante rappresentata. Gli output del modello sono ottenuti analizzando l'interazione reciproca dei singoli elementi sotto l'azione delle forze esterne. Si possono individuare principalmente il Distinct Element Method, il Discontinuous Deformation Analysis e il Finite Discrete Element Method.

- a) *Discrete Element Method (DEM)*: il DEM sviluppato da Cundall nel 1971, (Cundall et al., 2004) è un modello discontinuo in cui è possibile simulare la natura del fenomeno di caduta massi, governata dall'interazione tra i blocchi intatti e le discontinuità che li separano. Vengono quindi introdotte separatamente le caratteristiche di resistenza e di deformabilità dei blocchi e delle discontinuità, nonché le leggi di interazione. Questo permette, attraverso analisi che devono essere necessariamente di tipo stocastico, di prevedere sia le nicchie di distacco sia i fenomeni di separazione dei blocchi e di interazione con il versante durante la fase di propagazione.
- b) *Discontinuous Deformation Analysis (DDA)*: il modello DDA sviluppato da Shi G. H. nel 1988, (Shi G. H. et al., 2018) si basa sulla ricostruzione a ritroso di un fenomeno (back analysis) risalendo alla configurazione di equilibrio dei blocchi tramite il calcolo di deformazioni e spostamenti, che sono considerate come incognite nella soluzione del problema. Il modello consente di simulare l'interazione dei blocchi all'interno dell'ammasso roccioso fratturato, risolvendo un sistema lineare di equazioni del moto, discretizzante secondo il metodo di Newmark, basate sul principio di minimizzazione dell'energia potenziale.
- c) *Finite Discrete Element Method (FDEM)*: il modello FDEM sviluppato da Munjiza nel 1992, (Munjiza et al., 2004) è un modello combinato che consente di sfruttare i vantaggi offerti dai modelli FEM (Finite Element Method) e DEM (Discrete Element Method). A differenza dei modelli DEM, dove ogni blocco (elemento discreto) viene rappresentato da un'unica entità, nei modelli FDEM i blocchi sono ulteriormente discretizzati attraverso una mesh (tipica dei modelli FEM) in genere di forma triangolare e di densità variabile, in modo da poter fissare il livello di precisione con il quale si

intende svolgere le simulazioni (una densità maggiore consente di calcolare i parametri con un passo di discretizzazione minore). Le discontinuità vengono ancora una volta modellate secondo il modello discontinuo del DEM, introducendo i parametri di deformabilità e i criteri di resistenza a seconda della tipologia di materiale. Con questo metodo è possibile simulare sia l'insacco della frattura sia la sua propagazione. L'analisi viene condotta risolvendo, con un opportuno passo temporale, l'equazione del moto (2.1):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p \quad (2.1)$$

Con m massa dell'elemento, c viscosità del sistema, k rigidità del sistema, p forzante del sistema nell'intervallo Δt considerato mentre x , \dot{x} e \ddot{x} rappresentano, rispettivamente posizione, velocità e accelerazione dell'elemento.

2.1.2. Metodi analitici

I modelli analitici analizzano il fenomeno della caduta massi tramite la risoluzione delle equazioni che simulano i diversi moti dei blocchi e le interazioni con il versante (Dorren, 2003). Questo richiede l'introduzione dei parametri geomeccanici che caratterizzano i blocchi e la copertura del versante, generalmente tarati tramite back analysis. I processi di simulazione si basano quasi sempre su metodi stocastici, atti alla compensazione delle incertezze sui parametri e sull'evoluzione del fenomeno, con un numero elevato di simulazioni, in modo da raggiungere la validità statistica dei risultati.

In merito ai modelli analitici la prima distinzione può essere fatta in funzione delle coordinate spaziali utilizzate per la simulazione del fenomeno. Si può parlare di:

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

Un'altra distinzione può essere effettuata in funzione del modello adottato per la rappresentazione del blocco:

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

Si può operare una distinzione anche in base a come viene modellata l'interazione tra il blocco ed il versante (rimbalzo, scivolamento, rotolamento e rototraslazione).

2.1.2.1. Metodi che si distinguono in funzione delle coordinate spaziali considerate

a) Metodi Bidimensionali (2D)

Nei metodi 2D si considera la sezione trasversale del versante ritenuta più critica (generalmente il profilo di massima pendenza) rappresentata da un asse verticale della quota e da una asse orizzontale riportante l'ascissa curvilinea. Il fenomeno è quindi schematizzato in un dominio 2D in cui vengono rappresentate le possibili traiettorie dei blocchi mediante l'esecuzione di algoritmi di calcolo stocastici. Le equazioni utilizzate per il moto del blocco sono quelle descritte nel paragrafo 1.2.2, mentre per l'interazione con il versante si ricorre ai coefficienti di restituzione normale e tangenziale. Tutti i parametri adottati nelle simulazioni vengono assegnati con una distribuzione probabilistica legata al livello di dettaglio delle informazioni di cui si è in possesso (Dorren et al. 2013).

b) Metodi quasi tridimensionali (quasi 3D)

I metodi quasi tridimensionali sono definiti metodi misti, nei quali viene prima effettuata un'analisi tridimensionale per individuare le più probabili traiettorie su un modello digitale del terreno e successivamente tra tutte le traiettorie individuate viene scelta la più probabile o critica, sulla quale viene condotta un'analisi stocastica in un dominio 2D. Il percorso del blocco può essere costruito utilizzando algoritmi di calcolo del tipo “*flow to the lowest neighbor*” (Dorren et al., 2013) riportato in Figura 2.1-1.

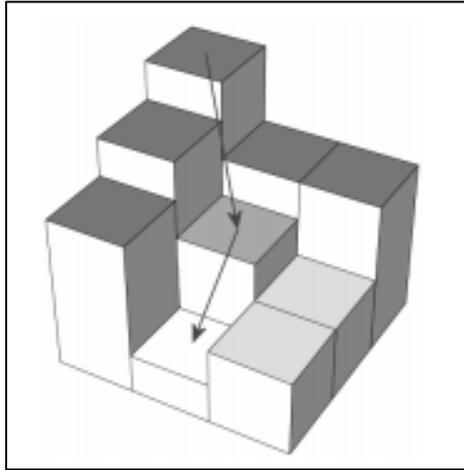


Figura 2.1-1: Algoritmo “flow to the lowest neighbor” (Dorren et al., 2013)

L’algoritmo calcola il percorso del blocco individuando la cella a quota minore tra quelle adiacenti alla cella sorgente (Dorren et al., 2013). Tali metodi si costituiscono quindi di due analisi separate:

- 1) Una prima analisi in ambito GIS (DTM) su un dominio 3D per l’individuazione della più probabile traiettoria;
- 2) Un’analisi stocastica in un dominio 2D individuato dalla sezione del modello 3D, corrispondente allo sviluppo della traiettoria individuata.

a) *Metodi Tridimensionali (3D)*

Generalmente sono programmi implementati in GIS (Geographic Information System o sistema informativo geografico) e lavorano sulla mappa tridimensionale del terreno (DTM e DEM). Le traiettorie sono calcolate in un dominio tridimensionale (X,Y,Quota) offrendo il vantaggio di una rappresentazione più realistica del fenomeno, ma al contempo necessitano di un numero elevato di parametri rispetto agli altri algoritmi di calcolo, il che si traduce nell’introduzione di ulteriori incertezze e variabilità nella modellazione del fenomeno. In questi metodi viene inoltre implementato un codice che permette la simulazione dell’interazione con le foreste, che possiedono un’azione non trascurabile sul fenomeno di caduta massi.

2.1.2.2. Metodi in funzione della rappresentazione del blocco

Esistono tre approcci fondamentali:

- Metodi lumped mass
- Metodi Rigid Body
- Metodi Ibridi.

Nel seguito vengono descritte le caratteristiche principali dei metodi che si distinguono in funzione della modalità di rappresentazione della forma dei blocchi:

a) *Metodi Lumped mass*

Tale approccio prevede di trascurare forma e dimensione del blocco, schematizzandolo come un punto materiale. Ciò implica la non dipendenza delle traiettorie dalla massa. Per tenere conto del differente effetto della massa negli impatti con il versante, e quindi nelle possibili diverse traiettorie, Pfeiffer e Bowen (1989) hanno proposto una modifica del coefficiente di restituzione normale sulla base di osservazioni empiriche, come già accennato nel Paragrafo 1.3.2, (Equazione (2.2)):

$$R_n = R_{n\text{iniziale}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{m}{C}\right)^2} \quad (2.2)$$

Dove:

- m = massa del blocco [kg]
- $C=1000$ [kg] costante derivata empiricamente.

Gli stessi Pfeiffer e Bowen (1989) hanno proposto un'ulteriore modifica del coefficiente di restituzione normale per poter tenere in conto l'effetto della velocità del blocco pre-impatto sulla dissipazione energetica durante l'impatto stesso (Equazione (2.3)):

$$R_n = R_{n\text{iniziale}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{\text{pre-impatto normale}}}{k}\right)^2} \quad (2.3)$$

Con $k = 9.144$ [m/s], costante di derivazione empirica.

Si può notare come un incremento della velocità pre-impatto porti ad una riduzione del coefficiente di restituzione normale, indicando quindi una maggiore perdita di energia cinetica.

b) Metodi Rigid Body (o del blocco rigido)

Tale approccio considera forma e dimensione del blocco schematizzandolo attraverso geometrie semplici (sfera, cubo, ellissoide, cilindro, parallelepipedo). È un modello più realistico dal punto di vista della fisica del fenomeno poiché considera i diversi moti del blocco sul versante (traslazione, rotolamento, rototraslazione), tramite le equazioni fisiche del corpo rigido, ma introduce ulteriori variabilità legate all'introduzione di nuovi parametri. Il moto in aria, come nel metodo lumped mass è modellato secondo le leggi della balistica. Tipici modelli che adottano l'approccio rigid body sono quelli numerici descritti nel Paragrafo. 2.1.1.

c) Metodi ibridi

I metodi ibridi sfruttano i punti di forza dei metodi lumped mass e rigid body, per massimizzare l'accuratezza di rappresentazione del fenomeno da una parte e dall'altra per minimizzare l'onere computazionale: il blocco è simulato secondo il modello lumped mass nelle fasi di moto in aria mentre nelle fasi di interazione con il versante (rimbalzo, rotolamento e scivolamento) viene modellato secondo l'approccio rigid body, tenendo quindi in conto le relazioni di interazione tra versante e blocco, con l'introduzione dei relativi parametri meccanici e geometrici.

2.2. Modelli empirici

I modelli empirici/geomorfolologici consentono di stimare in maniera speditiva l'area di invasione del fenomeno di caduta massi. Tali metodi si basano sui risultati di analisi statistiche condotte su dati raccolti in situ e il loro nucleo può ruotare attorno ad una funzione o ad un singolo valore, che può essere usato per riprodurre un fenomeno già avvenuto o prevedere l'area di invasione su un sito di caratteristiche simili (Llorens R. C., Vilaplana J. M., 2009). La loro semplicità non ne permette l'utilizzo per una descrizione dei fenomeni di interazione con il versante durante l'evoluzione del fenomeno e quindi sono adatti per analisi preliminari locali o a grande scala. I modelli più diffusi in letteratura sono il metodo dello *Shadow Angle* (Evans and Hungr, 1993) e il *Cone Method* (Jaboyedoff & Labiouse, 2011). I due metodi sono molto simili in quanto si basano sempre sul principio dell'energy line (Heim, 1932), ma il primo si avvale di un profilo bidimensionale, mentre il secondo effettua un'analisi tridimensionale su una superficie.

Questi modelli operano su un profilo 2D (x,z) o su un dominio spaziale (x,y) con valori di quota associati ad ogni cella. Le traiettorie sono calcolate con algoritmi "flow to the lowest neighbor" (Dorren et al., 2013) e per esempio attraverso funzione di visibilità implementata in Grass 7 di QGIS e della quale si avvale il plugin QPROTO (descritto nel dettaglio nel Capitolo 5).

2.2.1. Il metodo dello Shadow Angle

La costruzione del modello, proposta da Evans & Hungr (1993) e basato sugli studi condotti da Heim nel 1932 (Dorren et al., 2003), consiste nel collegare la nicchia di distacco con il punto di arresto più lontano raggiunto dai blocchi attraverso una retta di inclinazione β (Jaboyedoff M., Labiouse V., 2011; Llorens R. C., Vilaplana J. M., 2009). Più precisamente possono essere definiti due angoli, lo shadow angle β_s e il travel angle β_t (Castelli et al., 2019) (*Figura 2.2-1*). Il primo, ovvero lo shadow angle β_s secondo il modello originale di Evans & Hungr (1993) è quello misurato, rispetto al piano orizzontale, dalla linea che collega la base del pendio con il punto di arresto più lontano dei blocchi, nell'ipotesi che nella prima fase il blocco perda la gran parte dell'energia posseduta. In questo caso la traiettoria viene spezzata in due tratti, la prima

di moto libero in aria e la seconda caratterizzata dall'interazione con il versante (rimbalzo, scivolamento, rotolamento, rototraslazione ecc.). In questo modo si tiene in conto in maniera più efficace di tutte le componenti dissipative che agiscono sul blocco durante l'interazione con il versante e si compensa, in parte, la difficoltà nel determinare con precisione l'effettivo punto di distacco. Il secondo angolo, definito travel angle β_t da diversi autori (Castelli et al., 2019), è quello che si ottiene collegando il punto di distacco effettivo con il punto di arresto più lontano raggiunto dai blocchi (Figura 2.2-1). In Figura 2.2-2 sono rappresentati i tipici valori assunti dagli energy line angles secondo diversi autori.

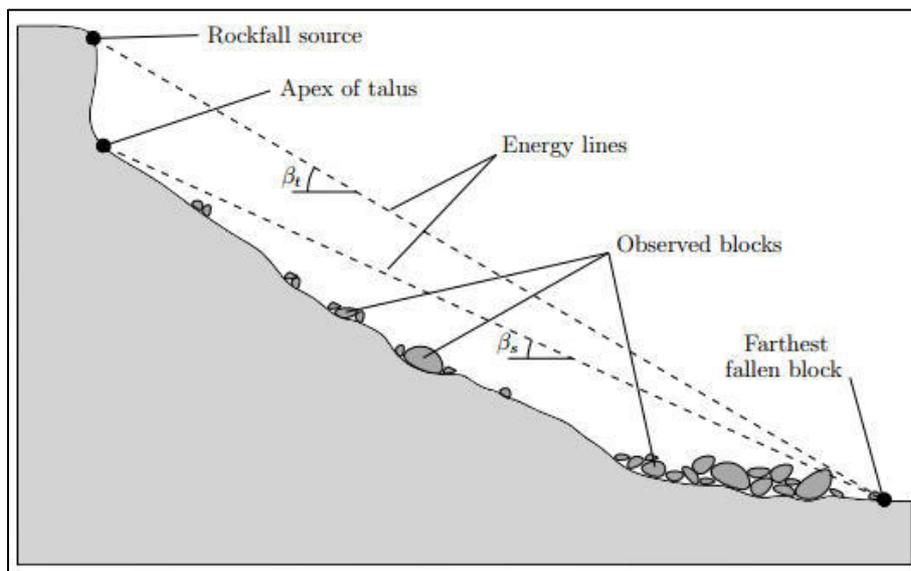


Figura 2.2-1: Principio dello Shadow Angle (Castelli et al., 2019)

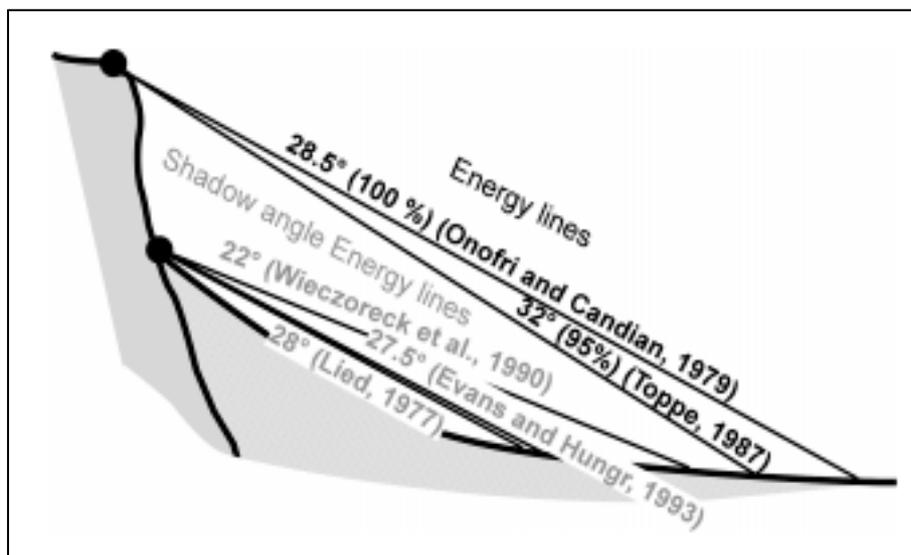


Figura 2.2-2: Valori tipici dei travel angles e degli shadow angles (Jaboyedoff M., Labiouse V., 2011)

2.2.2. Il metodo dei coni

In linea generale il metodo dei coni, o più semplicemente cone method, si basa sui concetti di energy line (Heim 1932) e di angolo di attrito equivalente e venne inizialmente proposto da Onofri e Candian (1979) (Castelli et al., 2019). Nasce sostanzialmente come evoluzione del metodo dello shadow angle e a differenza di quest'ultimo effettua un'analisi tridimensionale, tipicamente su un modello digitale del terreno (DTM), attraverso la costruzione di un cono definito geometricamente da due angoli, l'energy line angle φ_p e l'apertura laterale 2α . Il primo, misurato tra il piano orizzontale e l'asse del cono, rappresenta la perdita di energia media per dissipazione a causa di tutti i fenomeni di interazione che intervengono durante la fase di moto del blocco, mentre il secondo rappresenta l'apertura laterale del cono, per tenere conto della dispersione laterale durante la fase propagazione, consentendo quindi una modellazione conservativa. Il vertice del cono coincide con la nicchia di distacco e la sua direzione viene definita attraverso un terzo angolo, ovvero l'immersione ω (Figura 2.2-3), individuando con la sua geometria l'area di invasione del fenomeno che si conclude all'intersezione tra la sua superficie e quella del DTM.

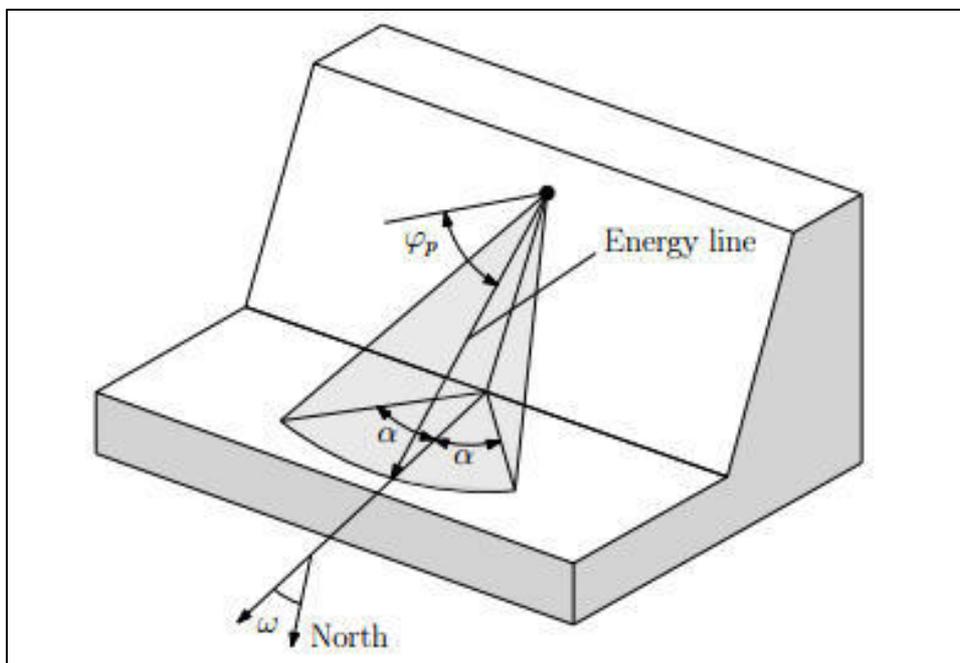


Figura 2.2-3: Rappresentazione grafica del Cone Method (adattato da Jaboyedoff et al., 2011)

2.2.3. Codici di calcolo basati sul metodo dei coni

Il metodo dei coni possiede un elevato potenziale, perché consente analisi speditive di propagazione su grandi aree senza la necessità di rilievi di dettaglio del versante, in quanto necessita di un numero esiguo di parametri tutti facilmente ricavabili da un modello digitale del terreno (DTM). Per tale motivo è stato implementato da diversi autori in differenti modelli di calcolo, tra cui:

- CONEFALL: sviluppato da Jaboyedoff & Labiouse (2003), a partire dalla definizione delle nicchie di distacco, dai parametri di apertura dei coni d'ombra e dalla massa del blocco, è possibile stimare energie, velocità e numero di celle sorgenti che alimentano una data cella;
- QPROTO: è un plugin sviluppato da Castelli et al. (2019) il quale opera all'interno del software open source QGIS. Sulla base del DTM della zona interessata e su alcuni parametri geometrici e meccanici facilmente ricavabili, come descritto più avanti nel paragrafo 5.4, è possibile stimare l'area di invasione, le energie e le velocità in gioco, nonché la pericolosità relativa (spaziale) della zona analizzata.

A titolo di esempio in Figura 2.2-4 e in Figura 2.2-5 vengono riportate le interfacce grafiche dei codici di calcolo appena citati.

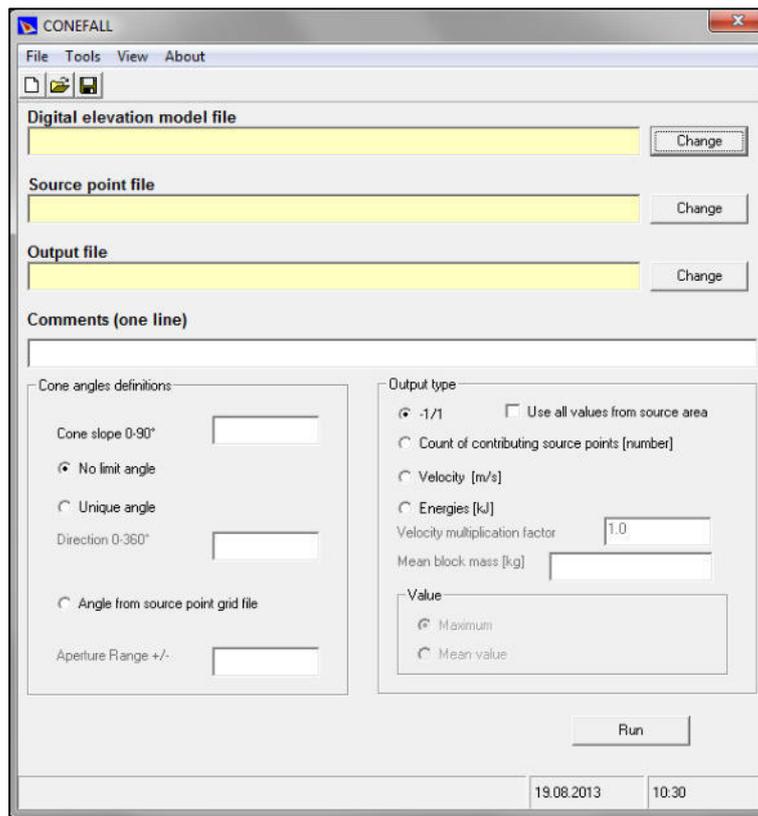


Figura 2.2-4: Interfaccia grafica del software CONEFALL

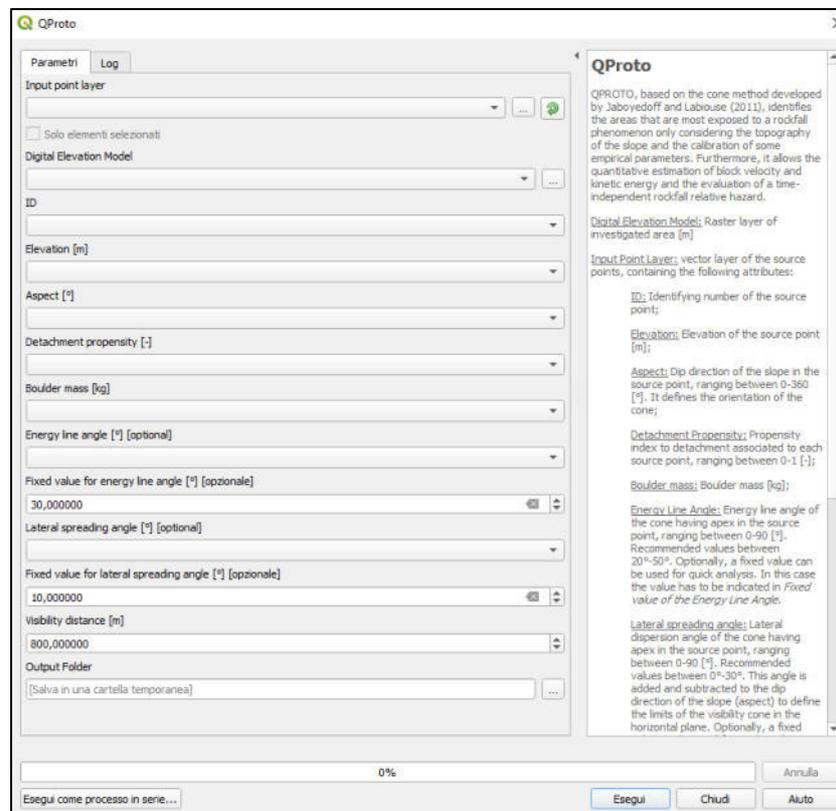


Figura 2.2-5: Interfaccia del plugin QPROTO

2.3. Modelli di recente concezione

Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie di acquisizione ed elaborazione dati, è stato possibile sviluppare modelli di previsione e analisi del fenomeno di caduta massi, basandosi su informazioni spaziali e geomorfologiche memorizzate in modelli digitali del terreno georeferenziati e acquisiti tramite fotogrammetria e strumenti laser (Lidar). I metodi si basano sia su analisi empiriche (come nel caso del software QPROTO) che su modellazioni più rigorose del fenomeno, simulando anche le interazioni blocco-versante (Agliardi e Crosta, 2003). Di seguito vengono descritte le caratteristiche dei principali modelli.

2.3.1. Modelli GIS-Based

Sono modelli di analisi utilizzati per la previsione delle traiettorie dei blocchi e le aree di invasione attraverso l'utilizzo di dati input di tipo raster su software GIS (Geographic Information System). I software GIS elaborano i dati secondo tre fasi (Dorren et al., 2003): la prima consiste nell'identificazione delle aree sorgente, la seconda nella determinazione delle traiettorie dei blocchi e la terza nella stima dell'area di invasione.

Una prima formulazione di modello GIS per la previsione delle traiettorie dei blocchi è dovuta a Meissl negli anni '90 (Dorren et al., 2003). Successivamente Meissl sviluppò due modelli nel 1998, *Schattenwinkel* basato sul metodo dello shadow angle (Evans & Hungr, 1993) e il modello *Geometrische Gefälle*, basato sul minimo segmento che collega la nicchia di distacco con il punto di arresto (Dorren et al., 2003). Oltre alla distinzione nominale, i metodi sono sostanzialmente identici per quanto riguarda l'algoritmo di calcolo della traiettoria (Dorren et al., 2003), basato su un algoritmo del tipo “*flow to the lowest neighbor*”. L'algoritmo calcola la massima differenza d'altezza tra la cella sorgente e le 16 celle distanti di due posizioni, detto D-16 Method (Dorren et al., 2003), evoluzione del D-8 Method sviluppato da O'Callaghan e Mark nel 1984 (Dorren et al., 2003), nel quale la differenza d'altezza viene calcolata solo nelle 8 celle adiacenti alla cella sorgente (Figura 2.3-1).

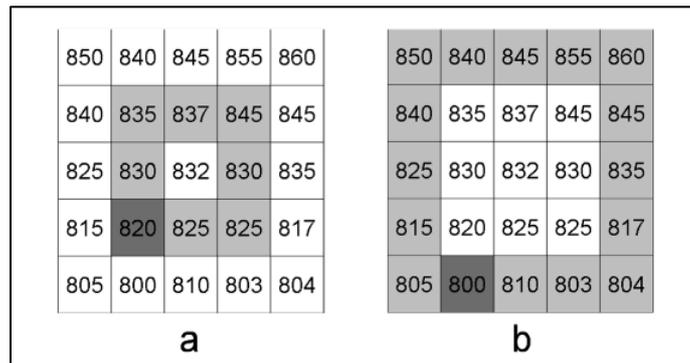


Figura 2.3-1: (a) D-8 Method, (b) D-16 Method (Dorren et al., 2003)

Le nicchie di distacco sono individuate nelle celle cui corrisponde una pendenza del versante superiore a 60° (Dorren et al., 2003). Per il calcolo della velocità in ogni cella si fa riferimento al principio di conservazione dell'energia descritto da Scheiddeger nel 1975 (Dorren et al., 2003), espresso tramite l'equazione (2.5):

$$v = \sqrt{v_0 + 2 \cdot g \cdot (h - \mu_f \cdot X)} \quad (2.5)$$

Dove:

v = velocità dei blocchi

v_0 = velocità iniziale dei blocchi

g = accelerazione di gravità

h = altezza di caduta

μ_f = coefficiente di attrito

X = distanza percorsa lungo il versante.

Sempre nel 1998 Meissl ha sviluppato un modello distribuito nominato *Sturzgeschwindigkeit* (Dorren et al., 2003). Questo modello identifica le potenziali nicchie di distacco dall'analisi di mappe topografiche e dall'evidenziazione di zone danneggiate o ad elevata pendenza e simula il moto del blocco lungo il versante come successione di rimbalzi e scivolamenti (Dorren et al., 2003). La velocità nel primo impatto è calcolata con la classica equazione del moto dei gravi $v = \sqrt{2gh}$, ma come osservato da Broili nel 1974 (Dorren et al., 2003) l'energia del blocco

viene ridotta del 75%. La velocità nelle successive celle è calcolata tramite la stessa espressione utilizzata nel D-16 Method.

2.4. Dati input necessari alla modellazione

Per quanto riguarda la scelta della tipologia e il livello di dettaglio necessari alla modellazione è necessario focalizzarsi su due aspetti:

1. *Scala della modellazione*, che può essere su grandi aree o locale (Fell et al., 2008) (Corominas et al., 2014). La prima qualora le analisi siano finalizzate all'individuazione delle zone critiche sulle quali poi effettuare analisi di dettaglio, con queste ultime che si rivolgono quindi alla seconda tipologia, ovvero la scala locale, utilizzate principalmente nell'ottica della progettazione degli interventi di difesa.
2. *Incertezza epistemica*, ovvero l'incertezza legata alla variabilità intrinseca dei parametri che governano il fenomeno e alla scarsa conoscenza che si ha, per quanto possa essere dettagliato un rilievo, sulle distribuzioni secondo le quali variano i parametri stessi.

È quindi chiaro che il livello di dettaglio è principalmente condizionato dallo scopo delle analisi e dai dati disponibili (Corominas et al., 2014). In particolare, per quanto riguarda le analisi a scala locale, ovvero di dettaglio, per far fronte all'incertezza epistemica relativa ai parametri è necessario un approccio attraverso modelli probabilistici che si basino sull'uso di distribuzioni di frequenza calibrate per far fronte a tali incertezze. Tra i dati fondamentali per le analisi sono presenti:

- Nicchia di distacco
- Geometria del blocco
- Velocità iniziale in termini di direzione e intensità
- Topografia del versante
- Proprietà meccaniche della copertura del versante
- Densità, diametro e tipologia di vegetazione (il ruolo della vegetazione e la conseguente modellazione dell'interazione con il fenomeno di propagazione vengono trattati nel dettaglio nel Capitolo 3).

I dati in input richiesti per un'analisi stocastica quindi sono assegnati con una distribuzione probabilistica legata, come sopra accennato, alla variabilità intrinseca degli stessi e alla precisione con la quale si dispone della misura (ad un dato stimato corrisponde una dispersione maggiore rispetto ad un dato misurato sul campo). La scelta della distribuzione ricade in genere sulla gaussiana, in particolare quando si è in possesso di una buona misura del parametro, associata ad una deviazione standard. Tanto più è incerta la misura del parametro tanto più grande sarà la variazione statistica associata. Qualora non si disponga di una buona misura si può assumere una distribuzione uniforme, dove tra il valore minimo e il valore massimo la probabilità del valore assunto dal parametro è costante. Un'ulteriore distribuzione adottata in ambito della caduta massi è la distribuzione esponenziale negativa, in particolar modo per il volume del blocco, poiché ne è stata osservata sperimentalmente la validità, riportata schematicamente in Figura 2.4-1.

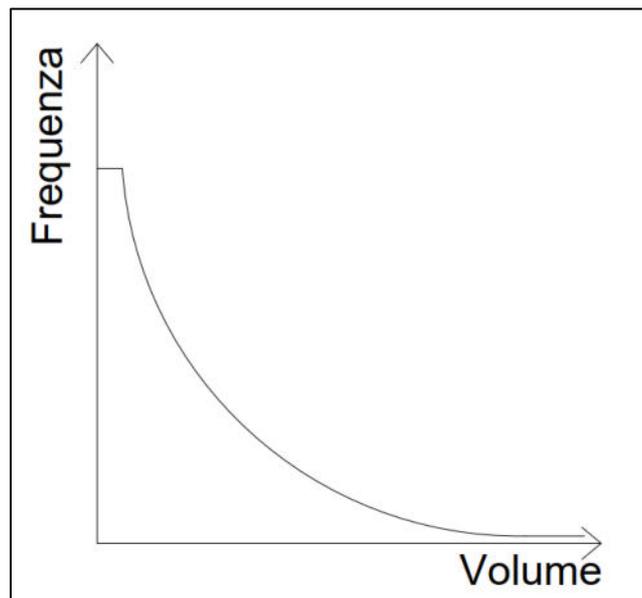


Figura 2.4-1: Distribuzione esponenziale negativa

Questa distribuzione mostra come la probabilità di distacco di un volume piccolo sia molto maggiore della probabilità di distacco di un volume grande. Tale distribuzione si adotta anche per la spaziatura delle discontinuità ad indicare che a spaziature maggiori corrispondono volumi maggiori. Al valore di volume nullo è presente un gradino che assume una probabilità costante, altrimenti ai volumi molto piccoli sarebbe associata una frequenza di occorrenza infinita.

I parametri vengono in genere estratti casualmente con tecniche matematiche (Monte Carlo) dalla distribuzione degli stessi.

L'analisi deve essere eseguita con un numero sufficientemente elevato di simulazioni nelle quali i parametri vengono estratti casualmente dalle loro distribuzioni. Le simulazioni sono considerate statisticamente valide quando all'aumentare del numero di simulazioni i risultati delle stesse rimangono costanti (Castelli et al., 2016).

Date le enormi incertezze in gioco il modello deve essere tarato anteriormente alle simulazioni, basandosi sui dati, qualora disponibili, di un fenomeno avvenuto in passato nel sito in esame. Si parla quindi di back analysis, che è tanto più affidabile quanti più dati sono disponibili in merito all'evento. I parametri in gioco vengono variati ad ogni simulazione fino alla completa ricostruzione dell'evento storico. Le simulazioni di back analysis si considerano adeguate quando i risultati da essa forniti approssimano all'80% i dati osservati.

2.4.1. Scelta della nicchia di distacco

Le potenziali nicchie di distacco non sono sempre di facile determinazione e possono essere individuate dall'osservazione del versante nelle zone più a monte, prestando attenzione a:

- Eventi passati per i quali è stata documentata l'area di distacco;
- Dati visivi sulla morfologia del versante per l'individuazione delle zone più acclivi;
- Elementi indicatori di volumi di roccia distaccatisi sulla parete;
- Roccia nuda in evidente stato di fratturazione;
- Analisi della struttura dell'ammasso roccioso (giacitura, spaziatura e persistenza delle discontinuità);

La nicchia di distacco può essere definita sia in termini puntuali che in termini areali.

2.4.2. Volume caratteristico del blocco

La determinazione del volume del blocco è uno dei problemi principali nell'analisi del fenomeno della caduta massi. Infatti la sua entità non è di facile determinazione a causa dei complessi e non completamente prevedibili fenomeni che ne provocano il distacco. Per la sua determinazione si può fare riferimento a:

- Testimonianze di eventi passati;
- Misura dei blocchi al piede del versante, depositati a seguito di eventi passati;
- Analisi della struttura dell'ammasso roccioso (giacitura, spaziatura e persistenza delle discontinuità);

In merito all'ultimo punto del precedente elenco esistono delle formulazioni che permettono la stima del volume del blocco, per esempio nel caso di cunei (wedge):

- Si individuano le due famiglie di discontinuità che danno origine, intersecandosi reciprocamente e con il fronte del versante, ad un cuneo potenzialmente instabile;
- Si calcola l'angolo θ di apertura del cuneo;
- Si calcolano la spaziatura media L_1 e L_2 , la persistenza media l_1 e l_2 e il valore N , pari al minimo tra l_1 e l_2 ;
- Il volume del blocco è ottenuto come (Equazione (2.6)):

$$V_m = \frac{2}{\pi \cdot \sin\theta} \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot N \quad (2.6)$$

Naturalmente i valori di spaziatura e persistenza sono associati alle rispettive distribuzioni di probabilità e di conseguenza, utilizzando queste distribuzioni nell'espressione del volume, si ottiene una distribuzione di probabilità dei volumi che empiricamente rispecchia quella dell'esponenziale negativo. La distribuzione dei volumi nella zona di arresto si ottiene dalla misura dei blocchi al piede e sul versante, attraverso diverse procedure proposte nel corso degli anni, come per esempio quella suggerita da De Biagi et al., (2017). La distribuzione è governata dai parametri che ne descrivono la forma, legati principalmente ad informazioni sulla finestra temporale di osservazione degli eventi storici, sulla quantità di blocchi rilevati sul versante e al piede ricadenti in delle prefissate classi e all'introduzione di errori che sono funzione della precisione delle misure effettuate all'interno di un'area campione.

Le distribuzioni di probabilità finora discusse riguardano solo la variabilità spaziale dei volumi dei blocchi, mentre si rende necessario conoscerne anche la variabilità temporale, in particolare per le analisi di pericolosità e di rischio, nonché per la progettazione delle opere di difesa. Tale informazione permette di tenere in conto possibili volumetrie elevate che si manifestano con una frequenza molto minore rispetto ai crolli di volumi ridotti. Quindi si rende necessario sovrapporre alla distribuzione di probabilità spaziale-volumi una distribuzione di probabilità temporale-volumi, in quanto nel progetto di un'opera si deve tenere conto della vita utile della stessa o del manufatto che si vuole mettere in sicurezza, al fine di garantire un intervento efficace ed economico.

2.4.3. Velocità iniziale del blocco

La velocità iniziale del blocco può essere stimata a partire da una modellazione numerica del cinematismo nella nicchia di distacco sotto diverse condizioni e individuando la situazione più probabile. Al fine di ottenere un valore di velocità ragionevole “*il modello numerico deve essere attendibile*” (Barbero, 2017). Alternativamente possono essere fatte diverse considerazioni:

- Se il blocco si distacca da fermo si può assumere una velocità iniziale nulla;
- Se il blocco si distacca per effetto di azioni statiche (pressione idraulica, radici, azione del ghiaccio ecc.) o dinamiche (sisma, impatto di altri blocchi ecc.) la velocità iniziale può assumere un valore non nullo, ma comunque inferiore ad 1 m/s.

A prescindere dalle analisi i valori di velocità iniziale del blocco variano ragionevolmente tra 0 m/s e 1,5 m/s ed è uno dei parametri che viene modificato iterativamente durante la taratura dei parametri (back analysis). Anche per la velocità viene generalmente assunta una distribuzione gaussiana per tenere conto dell'incertezza nella sua determinazione.

La velocità pre-impatto del blocco influenza non solo la dissipazione energetica ma anche il tipo di cinematismo post-impatto, a seconda dell'angolo di incidenza con il versante:

- Un angolo di incidenza piccolo porta generalmente ad un moto di scivolamento post-impatto;
- Un angolo di incidenza elevato porta generalmente ad un moto di rimbalzo post-impatto.

Tanto maggiore è l'intensità della velocità pre-impatto tanto più probabile è la frantumazione del blocco e la deformazione plastica del versante, con conseguente elevata dissipazione di energia cinetica. Per tenere conto di questi effetti Pfeiffer e Bowen (1989) hanno proposto una modifica del coefficiente di restituzione normale R_n , come esposto nel Paragrafo 2.1.2.2 (Equazione (2.7)):

$$R_n = R_{n\text{iniziale}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{pre-impatto\text{normale}}}{k}\right)^2} \quad (2.7)$$

In assenza di informazioni dettagliate i coefficienti di restituzione possono essere dedotti dalla letteratura e poi modificati durante la back analysis fino alla completa simulazione dell'evento passato.

2.4.4. Angolo di attrito equivalente blocco-versante

L'angolo di attrito tra blocco e versante può essere dedotto da considerazioni sulla forma del blocco e dalla tipologia del versante (pezzatura degli elementi di riferimento) e dalla tipologia della copertura del versante. In assenza di informazioni sulla forma del blocco si può assumere un valore medio tra la situazione di contatto puntiforme (sfera) e contatto roccia-roccia (parallelepipedo). Anche per questo parametro è assegnata una distribuzione probabilistica in funzione del livello di dettaglio delle informazioni che si possiedono. È necessario ricordare che nonostante esista la possibilità di modellare tale aspetto, non tutti i codici di calcolo ne tengono conto.

2.4.5. Scabrezza del versante

Tale parametro è legato alla natura della copertura del versante e alla tipologia di elemento presente (detrito, roccia intatta, vegetazione) ed è di difficile determinazione. Nei modelli più semplici non viene considerata, facendo invece variare l'angolo di attrito blocco-versante. Anche in questo caso può essere assegnata una distribuzione probabilistica. Nei modelli più

sofisticati, quali quello adottato da Rockyfor3D (Dorren et al., 2014), la scabrezza del versante viene esplicitamente tenuta in conto, in modo da rappresentare il più fedelmente possibile il fenomeno, che sarà oggetto di calibrazione nel Capitolo 5.

2.5. Scelta del numero di simulazioni

Il numero di simulazioni va fissato in modo tale da ottenere la validità statistica per l'analisi condotta. Le Norme UNI suggeriscono di assumere almeno 1000 simulazioni. Generalmente tale numero viene incrementato finché i risultati non rimangono costanti (Castelli et al., 2016). Un numero di simulazioni maggiore comporta comunque un tempo di elaborazione maggiore e si rende quindi necessario sceglierlo con cura, al fine di ottimizzare il tempo e la potenza di calcolo disponibile.

2.6. Risultati delle analisi

Al termine delle simulazioni si ottiene una serie di dati in output che permettono l'interpretazione del fenomeno. Tra essi i più significativi sono:

- traiettorie dei blocchi;
- contenuti energetici;
- velocità;
- altezze di rimbalzo o di volo;
- distanze di arresto.

Anche gli output, come i dati input, vengono restituiti attraverso delle distribuzioni statistiche. Una volta fissato il numero di simulazioni, il software esegue le analisi estraendo i parametri, ad ogni simulazione, in maniera casuale dalle loro distribuzioni. In termini di output, per ogni punto del modello si avranno tanti valori quante sono le simulazioni. Verrà quindi restituito sia l'andamento dei parametri lungo il versante (medi), sia la distribuzione di frequenza (cumulata) degli output in diverse zone del versante. La cumulata di frequenza mostra quanto è probabile che si manifesti un parametro con un valore minore o uguale al valore considerato. Questa

distribuzione è utile in quanto le opere di difesa vengono progettate per i valori degli output al 95esimo percentile (il 95% delle simulazioni ha fornito valori inferiori o uguali al valore dell'output corrispondente). Questo aspetto è importante in quanto conoscere tali valori in ogni punto permette di ottimizzare la posizione dell'opera di difesa, oppure, in presenza di vincoli sulla sua posizione, di dimensionare adeguatamente l'opera in funzione dei valori degli output nel punto prestabilito, ricavati dal posizionamento nei software di calcolo di appositi elementi detti collettori.

2.7. Osservazioni sulla modellazione

Al fine di condurre un'analisi di dettaglio realistica (e quindi con un approccio probabilistico), è necessario eseguire un'analisi di sensibilità, che consiste nell'individuazione dei parametri ai quali la modellazione è più sensibile, detti parametri critici. Da una parte essi sono quelli che vengono variati durante la back analysis, ma dall'altra parte sono anche quei parametri sui quali si hanno le maggiori incertezze. Nella caduta massi questi parametri critici sono sostanzialmente la velocità iniziale del blocco e la scabrezza del versante, che influiscono sulle traiettorie e sui contenuti energetici.

È inoltre bene usare sempre lo stesso software sia per la back analysis che per le simulazioni, poiché i coefficienti ottenuti potrebbero essere elaborati in maniera differente da altri software.

L'analisi di sensibilità ha come scopo l'individuazione dei i parametri che più influenzano la variazione del fenomeno, o meglio una loro piccola variazione produce variazioni significative dei risultati. Visto inoltre l'elevato numero di variabili in gioco esiste sicuramente una combinazione di valori dei parametri che permette di riprodurre il fenomeno, ma tale combinazione potrebbe non rispecchiare la reale combinazione dei parametri presenti sul versante. Una scorretta valutazione di tali parametri critici può quindi portare a risultati completamente errati.

Riassumendo quanto esposto, al fine di condurre un'analisi affidabile è necessario:

- Eseguire una back analysis (validazione del modello su un evento passato);
- Eseguire un'analisi di sensibilità (individuazione dei parametri critici).

3. Il software di simulazione Rockyfor3D

3.1. Introduzione

Tutte le informazioni e gli autori menzionati di seguito prendono spunto dal manuale del software di Rockyfor3D v5.1 (Dorren et al., 2014)

Rockyfor3D è un software di simulazione che consente il calcolo delle traiettorie tridimensionali di singoli blocchi rocciosi in un evento di caduta massi. Il software combina algoritmi deterministici di un modello fisicamente basato di blocco rigido con approcci stocastici. I primi vengono utilizzati per la descrizione dei processi di caduta massi mentre i secondi per l'estrazione dei parametri in maniera casuale all'interno di un determinato intervallo nell'intorno del valore più probabile, a causa delle incertezze legate a tali parametri, come discusso nei capitoli precedenti.

Il software Rockyfor3D nasce dapprima in linguaggio Matlab (1998) sulla base delle ricerche svolte da diversi autori quali Habib (1977), Azimi et al. (1982), Falcetta (1985) Wu (1985), Bozzolo e Pamini (1986), Spang e Krauter (2001), Pfiffer e Bowen (1989), Van Dijke e Van Westen (1990), Zinggeler (1990), Descoedres (1997), Meissl (1998), Guzzetti et al. (2002), Dorren e Seijmonsbergen (2003). In seguito sono stati integrati i dati derivanti dalle osservazioni sperimentali in situ realizzate da Frédéric Berger oltre che algoritmi sviluppati autonomamente o pubblicati. Attualmente il codice sorgente è scritto in linguaggio C. Il software viene distribuito gratuitamente ai membri dell'associazione internazionale ecorisQ (www.ecorisq.org).

Il software Rockyfor3D simula la traiettoria dei massi attraverso un vettore nel quale sono memorizzati i valori di posizione e velocità nelle tre dimensioni. Il moto del blocco è simulato attraverso una sequenza di cadute libere (descritte della legge parabolica di volo in aria) e di rimbalzi. Il rotolamento viene simulato attraverso una sequenza di rimbalzi ravvicinati mentre lo scivolamento non è rappresentato. Rockyfor3D è inoltre in grado di simulare gli urti contro gli alberi.

Il software, per il suo funzionamento, richiede in ingresso un set di raster ASCII in formato ESRI (mappa_raster.asc è la classica nomenclatura dei file raster, di estensione .asc) rappresentanti la topografia e le caratteristiche della superficie del pendio nonché i parametri base (posizione e densità della roccia) che definiscono le condizioni di distacco.

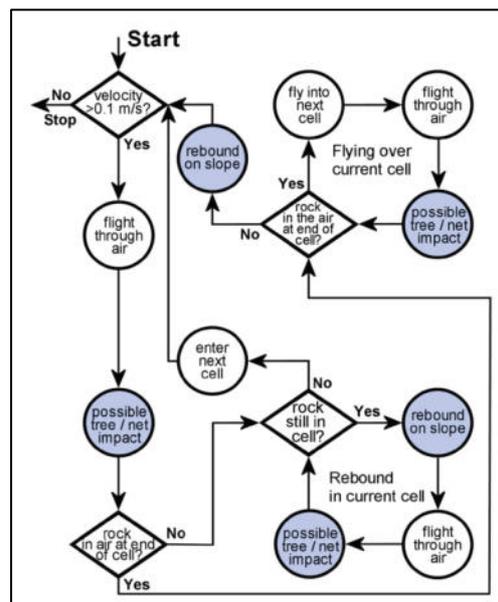


Figura 3.1-1: Diagramma di flusso seguito dal software, con evidenziate in blu le situazioni nelle quali il blocco può cambiare direzione

3.2. Dati input del modello

I dati input fondamentali per il corretto funzionamento di Rockyfor3D consistono in un set di 10 mapper raster di dimensioni e risoluzione uguali tra loro ed identiche a quelle del DTM/DSM utilizzato come rappresentazione del versante. In questa tesi si fa riferimento al DTM fornito dalla Regione Piemonte di risoluzione 5×5 m (dimensione della cella). Nel seguito una descrizione sintetica delle mappe raster appena citate:

1. *dem.asc*: mappa raster rappresentante il modello digitale del terreno (DEM – Digital Elevation Model), alle cui celle sono associate le quote del terreno in m (Figura 3.2-1).

```
ncols 5
nrows 3
xllcorner 123456.123
yllcorner 1234567.123
cellsize 2.5
NODATA_value -9999
1115.81 1114.28 1109.25 1107.74 1105.01
1110.31 1109.35 1107.33 1103.57 -9999
1006.55 1005.00 999.05 -9999 -9999
```

Figura 3.2-1: Intestazione della mappa raster *dem.asc*

2. *rockdensity.asc*: mappa raster che descrive le nicchie di distacco, associando alle celle di distacco la densità delle rocce presenti (in kg/m³) e il valore 0 alle celle non identificate come nicchie di distacco.
3. *d1.asc*: una delle tre dimensioni definite per il blocco. Questa dimensione, insieme alle due mappe *d2.asc* e *d3.asc* rappresentanti le altre due dimensioni del blocco, vengono variate in maniera casuale prima di ogni simulazione, all'interno di un range percentuale prefissato dall'utente (in genere 5%). In alternativa le dimensioni del blocco possono essere definite direttamente dall'interfaccia grafica del software.
4. *d2.asc*: Seconda mappa raster della dimensione del blocco.
5. *d3.asc*: Terza mappa raster della dimensione del blocco.
6. *blshape.asc*: mappa raster che definisce la forma del blocco tramite un numero intero compreso tra 0 e 4:
 - 0 = blocco senza forma
 - 1 = blocco parallelepipedo

- 2 = blocco ellissoidale
- 3 = blocco sferico
- 4 = blocco discoidale

Anche in questo caso la forma può essere definita direttamente dall'interfaccia grafica.

7. *rg70.asc*: mappa raster che definisce, insieme alle mappe *rg20.asc* e *rg10.asc*, la scabrezza del versante (Figura 3.2-2). In particolare *rg70.asc* definisce la scabrezza rappresentativa del 70% della superficie del versante. Il parametro MOH (Mean Obstacle Height) è definito come intero tra 0 e 100 m e rappresenta l'altezza media dell'ostacolo che il blocco incontra (in genere *rg70.asc* ha il valore minore e cresce fino a *rg10.asc*).

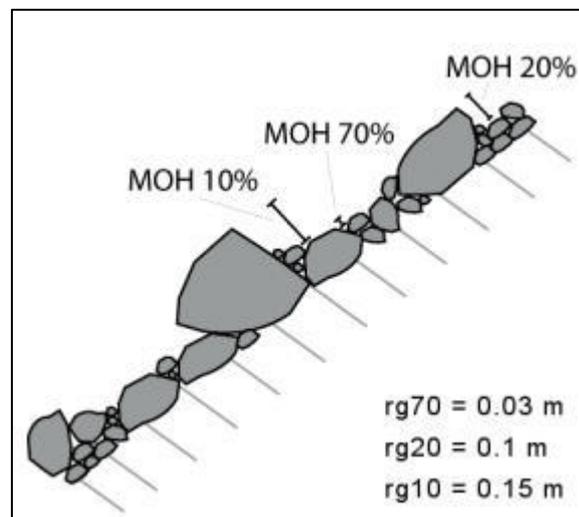


Figura 3.2-2: Rappresentazione della scabrezza del versante

8. *rg20.asc*: definisce la scabrezza rappresentativa del 20% della superficie del versante.
9. *rg10.asc*: definisce la scabrezza rappresentativa del 10% della superficie del versante.
10. *soiltype.asc*: mappa raster che definisce, tramite un numero intero che va da 0 a 7, la tipologia di suolo incontrato. In tale modo è possibile associare alle diverse zone del versante il coefficiente di restituzione normale R_n (Tabella 3.2-1).

Tipo di suolo	Descrizione generale del suolo	R _n valori medi	R _n intervallo di valori
0	Fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	0	0
1	Materiale fine (spessore > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Materiale fine fluviale (spessore < ~100 cm) o sabbia/ghiaia mista	0,28	0,25 - 0,31
3	Detrito di falda (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 3.2-1: Tipologie di sottosuolo definite in Rockyfor3D

3.3. Simulazione in presenza di una foresta

In Rockyfor3D la foresta può essere simulata in due modi:

1. Attraverso un file di testo denominato *treefile.txt* contenente le coordinate in metri degli alberi, ottenute mediante laserscanner, e il diametro del fusto all'altezza del petto d'uomo.
2. Attraverso 4 mapper raster rappresentanti le caratteristiche principali della foresta:
 - *nrtrees.asc*: nelle celle di questo file è rappresentato il numero di alberi per ettaro con un numero intero in un intervallo compreso tra 0 e 10000 alberi/ha.
 - *dbhmean.asc*: nelle celle di questo file è rappresentato il diametro medio degli alberi con un numero intero compreso tra 0 e 250 cm.
 - *dbhstd.asc*: nelle celle di questo file è rappresentata la deviazione standard del diametro degli alberi, ricavata da misure in situ, con un numero intero compreso tra 0 e 250 cm.
 - *conif_percent.asc*: nelle celle di questo file è rappresentata la percentuale media di conifere con un numero intero compreso tra 0 e 100%:

Definiti questi quattro raster il modello assegna all'interno di ogni cella, in modo casuale, un certo numero di alberi aventi un dato diametro. Successivamente assembla un file denominato *treefile.txt* contenente le coordinate x e y di tutti gli alberi e il relativo diametro. Nell'ambito di

questa tesi si fa riferimento al secondo metodo, per il quale i file raster sono stati ricavati sulla base delle misure in situ e di elaborazioni grafiche effettuate sul software QGIS, sulla base dell'ortofoto.

3.4. Simulazione in presenza di reti paramassi

In questo caso è necessario definire tre mappe raster contenenti le informazioni chiave sulle reti:

1. *net_number.asc*: mappa raster rappresentante il numero della barriera con un numero intero compreso tra 0 e 999.
2. *net_energy.asc*: mappa raster rappresentante la capacità di assorbimento delle barriere in kJ, con un numero intero compreso tra 0 e 20000.
3. *net_height.asc*: mappa raster rappresentante l'altezza delle barriere misurata perpendicolarmente al terreno in m, con un numero intero compreso tra 0 e 10.

Al termine delle simulazioni con barriera viene salvato, nella directory di lavoro, un file denominato *Rockyfor3D_v5.2.11_Calc_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt* nel quale sono riepilogati i risultati delle elaborazioni, in particolare (Figura 3.4-1):

- E = energia cinetica di traslazione e di rotazione in kJ;
- Ph = altezza del passaggio in metri nella direzione normale al terreno in m;
- V = velocità del blocco in m/s;
- V_{rot} = velocità rotazionale calcolata in rad/s;
- Imp_a = angolo di impatto, ovvero l'angolo compreso tra il piano orizzontale e la traiettoria del blocco nell'istante di impatto sulla rete. Vengono usati valori negativi per un blocco in caduta, mentre vengono usati valori positivi per un blocco in allontanamento dalla rete verso l'alto.

Oltre a questi parametri vengono memorizzati:

- n : numero totale di blocchi che arriva alla rete;
- I valori post-processati contengono la mediana ed i valori corrispondenti al 90%, 95% e 98% (x_{50} , x_{90} , x_{95} , x_{98}) della funzione densità di probabilità della variabile indicata

al di sopra, per ogni numero di barriera di calcolo scr_nr, il medesimo rappresentato nella mappa raster net_number.asc.

```

Rockyfor3D_v5.2.11_CalC_SCR_31-5-2019_22h28.txt - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
scr_nr      n      E_50      E_90      E_95      E_98      Ph_50      Ph_90      Ph_95
Ph_98      V_50      V_95      Vrot_50      Vrot_95      Imp_a50      Imp_a95

      1      69      26.6      37.6      40.6      42.6      0.3      0.3      0.3
      0.3      11.1      13.8      37.2      47.2      -23.0      -17.0

Sim_data
scr_nr      V      E      Ph_vert      Vrot      Imp_a      Ph_norm
      1      13.8      40.4      0.3      47.5      -26.5      0.3
      1      11.7      29.7      0.3      39.9      -28.6      0.3
      1      9.8      20.3      0.3      32.9      -21.9      0.3
      1      11.8      31.4      0.3      42.9      -19.3      0.3
      1      7.8      10.5      0.3      23.1      -33.7      0.3
      1      10.5      23.7      0.3      33.5      -23.5      0.3
      1      10.3      21.9      0.3      32.6      -24.2      0.3
  
```

Figura 3.4-1: Esempio dell'output di Rockyfor3D in simulazioni con reti paramassi

3.5. Impostazione delle simulazioni

L'avvio delle simulazioni in Rockyfor3D avviene attraverso una semplice interfaccia grafica (Figura 3.5-1) nella quale è possibile definire la cartella di lavoro, (dove vengono salvati gli output delle simulazione e nella quale devono essere presenti le mappe raster input), il numero di simulazioni, la percentuale di variazione del volume durante le simulazioni, l'altezza di caduta iniziale (che permette di attribuire un'ulteriore velocità iniziale al blocco nel momento del distacco), la possibilità di utilizzare la foresta e le reti paramassi, la densità della roccia e la forma e dimensioni del blocco. Di default al momento del distacco il software attribuisce al blocco una velocità di 0,5 m/s sia in verticale che in orizzontale.

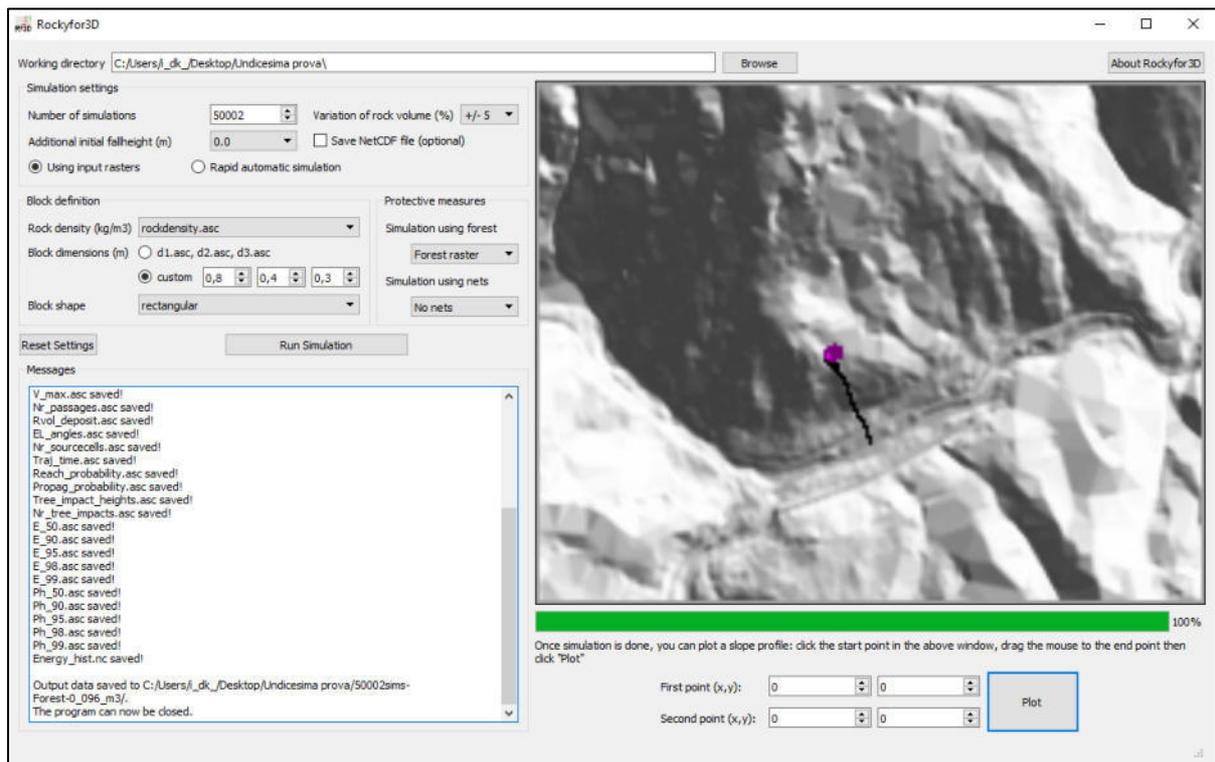


Figura 3.5-1: Interfaccia grafica del software Rockyfor3D

Al termine della configurazione iniziale è possibile avviare le simulazioni con il comando *Run Simulation* e al termine delle quali è possibile visualizzare una rappresentazione schematica della propagazione del fenomeno, interrogabile dall'interfaccia stessa, con la possibilità di definire dei profili bidimensionali sui quali leggere l'involuppo delle energie simulate, altezza di volo e distanza percorsa dai blocchi. Nella directory di lavoro vengono salvati gli output del modello, descritti nel dettaglio nei paragrafi successivi, oltre ad un file di testo denominato Rockyfor3D_V5.1_ProfileData_dd-mmm-yyyy.txt, nel quale vengono riepilogati data e ora di inizio e fine simulazioni, le impostazioni principali delle simulazioni appena svolte, i massimi ed i minimi delle energie, il volume simulato ed il suo range di variazione e le statistiche (frequenza assoluta e relativa) sull'Energy Line Angle (Figura 3.5-2).

```

Rockyfor3D v5.2.11_logfile_31-5-2019_22h28.txt - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
Rockyfor3D v5.2.11 - Simulations completed on Fri May 31 22:28:21 2019

simulation started on Fri May 31 22:24:47 2019

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 5
- nr. of simulations per source cell = 50000
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 1300000
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation with forest and with nets

Overall simulated block volumes:
- min = 0.090000 m3
- mean = 0.100000 m3
- max = 0.100000 m3

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 41.400000 kj
- maximum energy value = 80.300000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated
trajectories:
EL_angle[°] frequency[-] frequency[%]
24.00 50043.00 7.59
25.00 0.00 0.00
26.00 50014.00 7.59
27.00 111927.00 16.98
28.00 56220.00 8.53

```

Figura 3.5-2: File log salvato al termine delle simulazioni

3.6. Caratteristiche principali del modello di Rockyfor3D

3.3.1. Modellazione della forma dei blocchi

Rockyfor3D consente di simulare diverse forme del blocco: parallelepipedo, ellissoidale, sferica, discoidale. In base a tale parametro cambia il modo con il quale il software calcola il volume del blocco e quindi la sua massa, nonché il suo momento di inerzia. Le dimensioni di input sono i diametri d1, d2 e d3 (come precedentemente definiti nell'ambito delle mappe raster). Il software utilizza la forma sferica sia per il calcolo della posizione e del rimbalzo del

blocco sulla superficie del versante, che per il calcolo dell'impatto contro gli alberi. La forma sferica assume diversa dimensione a seconda dei casi:

- 3) viene assunto il minore tra d_1 , d_2 e d_3 per gli impatti con alberi;
- 4) viene assunto come diametro il valore medio tra i due diametri maggiori, per il calcolo della perdita di energia durante l'impatto con il versante.

Nonostante venga utilizzata principalmente la forma sferica per il calcolo degli impatti, gli algoritmi su cui si basa il software sono derivati da osservazioni sul campo in cui sono presenti multiple forme dei blocchi e quindi implicitamente si tiene conto degli effetti delle diverse forme che un blocco può assumere.

3.3.2. Modellazione della caduta con moto parabolico

Il moto di caduta libera è simulato mediante le classiche leggi a parabola con moto uniformemente accelerato, consentendo la determinazione della posizione del blocco sul versante, come già esposto al Paragrafo 1.2.2. Il software elabora la traiettoria in uno spazio tridimensionale dove l'asse x è rappresentato dalla direzione Est-Ovest, l'asse y dalla direzione Nord-Sud e l'asse z dalla direzione verticale (ovvero le quote).

3.3.3. Modellazione dei rimbalzi sul versante

La velocità del blocco dopo un rimbalzo è calcolata attraverso 10 funzioni. Il primo step consiste nel calcolare le componenti normale V_n e tangenziale V_t della velocità in ingresso rispetto alla pendenza locale, partendo dalle componenti orizzontale e verticale ricavabili dalla legge di moto parabolico. In Figura 3.6-1 viene rappresentato schematicamente il meccanismo con il quale il software simula il rimbalzo.

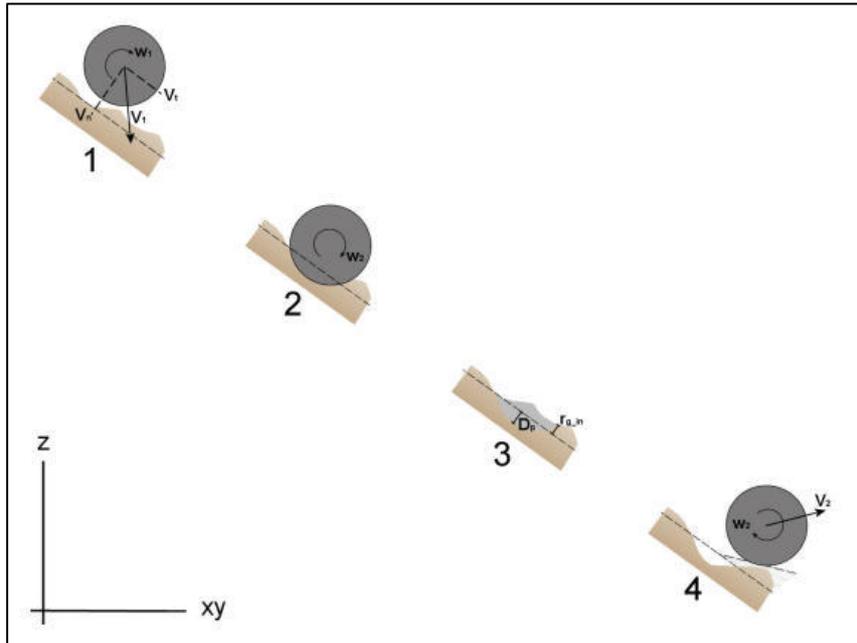


Figura 3.6-1: Meccanismo di rimbalzo implementato in Rockyfor3D (Dorren et al., 2014)

La profondità con la quale il blocco sprofonda nel terreno durante l'impatto D_p (il cui massimo è pari al raggio della sfera equivalente) è calcolata secondo l'espressione del lavoro di Pichler et al., 2005 (Dorren et al., 2014). Tale formulazione richiede in input diversi parametri, quali il coefficiente di restituzione normale R_n , il diametro del blocco in m, la massa del blocco in kg (denominata RockMass nelle espressioni seguenti) e la velocità in ingresso del blocco in m/s (velocità di impatto). Nelle espressioni contenute nell'algoritmo intervengono diverse costanti quali k , adimensionale e pari a 1,207, legata alla determinazione della forma sferica del blocco, B , adimensionale e pari a 1,2 (varia, anche se poco, a seconda del materiale - Pichler et al., 2005, Dorren et al., 2014) legata alla compressibilità del materiale di cui è costituita la superficie del versante.

Vengono di seguito riportate le dieci espressioni sopra citate per il calcolo della profondità di penetrazione del blocco (Dorren et al., 2014).

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left[\frac{1 + \frac{I_e}{N}}{1 + \frac{k\pi}{4N}} \right] + k \quad \text{per } \frac{D_p}{d} > k \quad (3.1)$$

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + \frac{k\pi}{4N} \frac{4k}{\pi} I_e}{1 + \frac{I_e}{N}}} \quad \text{per } \frac{D_p}{d} \leq k \quad (3.2)$$

Con

$$I_e = \frac{RockMass \cdot V^2}{R_i \cdot d^3} \quad (\text{momento di inerzia}) \quad (3.3)$$

Dove il termine R_i rappresenta la resistenza alla penetrazione offerta dal terreno in MPa, con valori compresi tra 1 e 5 Mpa per terreni a grana fine e tra 200 e 500 MPa per il substrato roccioso. La resistenza a penetrazione R_i può essere calcolata con la seguente espressione:

$$R_i = 55 \cdot 10^9 \cdot R_n^7 \quad (3.4)$$

Il termine N è funzione della densità del terreno ρ_{soil} a sua volta legato al coefficiente di restituzione normale R_n tramite una relazione empirica:

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} \cdot d^3 \cdot B \cdot 0,5} \quad (3.5)$$

Dove ρ_{soil} è espresso in kg/m^3 e varia tra 1500 kg/m^3 per terreni a grana fine e 2500 kg/m^3 per il substrato roccioso, secondo la seguente relazione

$$\rho_{soil} = 1200 \cdot \ln(R_n) + 3300 \quad (3.6)$$

Noti questi parametri e calcolato D_p si può procedere al secondo step, che consiste nel calcolo della velocità del blocco dopo l'impatto. A tale scopo è necessario determinare il coefficiente di restituzione tangenziale R_t (Chau et al., 2002) che secondo Dorren et al. (2005) (Dorren et al., 2014) può essere calcolato in base ad una relazione che lega la scabrezza del terreno, rappresentata dal MOH, al raggio del blocco stesso. Questa relazione sussiste in quanto al crescere delle dimensioni del blocco la scabrezza effettivamente incontrata dal blocco risulta più piccola rispetto a quella che incontrerebbero massi più piccoli (Kirby e Statham, (1975), Dorren e Seikmonsbergen (2003), Dorren et al., (2014)).

Sulla base di queste considerazioni Dorren et al., (2006) (Dorren et al., 2014) hanno proposto la seguente relazione:

$$R_t = \frac{1}{1 + \frac{MOH + D_p}{R}} \quad (3.7)$$

Dove MOH è l'altezza espressa in m dell'ostacolo incontrato dal blocco lungo il versante, come prima definito nell'ambito delle mappe raster, D_p è la profondità di penetrazione appena calcolata, espressa in m, mentre R è il raggio del blocco espresso in m. Data l'impossibilità di mappare punto per punto la scabrezza del versante vengono utilizzati i valori di scabrezza con probabilità di incontro pari a 70%, 20% e 10%, definendo quindi tre classi di copertura del terreno con le mappe raster già descritte precedentemente (Rg70, Rg20, Rg10). Sulla base di tali classi di scabrezza il software assegna in maniera casuale il valore di MOH per poi calcolare, secondo la relazione di Pfiffer e Bowen (1989) (Dorren et al., 2014) la velocità tangenziale dopo il rimbalzo V_{t2} :

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot V_{rot}^2 + RockMass \cdot V_{t1}^2) \cdot R_t}{I + RockMAss \cdot R^2}} \quad (3.8)$$

Dove V_{t1} rappresenta la componente tangenziale della velocità di impatto del blocco, V_{rot} rappresenta la velocità rotazionale del blocco prima dell'impatto e I rappresenta il momento di inerzia relativo alla forma effettiva del blocco, ovvero quella definita in sede di configurazione iniziale delle simulazioni. Il software assegna una variazione al coefficiente R_t pari a $\pm 10\%$ in modo da rappresentare la naturale variazione della scabrezza sul versante.

Identica variazione viene assegnata al coefficiente di restituzione normale R_n , con il quale viene calcolata la velocità dopo l'impatto V_{n2} , secondo la relazione di Pfiffer e Bowen (1989) (Dorren et al., 2014):

$$V_{n2} = \frac{-V_{n1} \cdot R_n}{1 + \left| \frac{V_{n1}}{9} \right|^2} \quad (3.9)$$

Nella quale V_{n1} è la componente normale della velocità del blocco prima dell'impatto sul versante. Il secondo termine a denominatore ha lo scopo di tenere in conto della riduzione di R_n all'aumentare della velocità di impatto. Infatti al crescere della velocità si passa da impatti di tipo elastico, con velocità basse, a impatti di tipo plastico per velocità maggiori, con conseguente formazione di fratture lungo il blocco e deformazioni anelastiche sulla superficie del versante (Habib, 1977, Dorren et al., 2014). Con questa espressione si tiene indirettamente conto degli effetti di differenti angoli di impatto sulla tipologia di rimbalzo e quindi sulla quantità di energia dissipata (Wu, 1985, Dorren et al., 2014).

Tramite la velocità tangenziale post impatto V_{t2} è possibile calcolare la velocità rotazionale del blocco dopo l'impatto V_{rot2} :

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) \cdot 2}{5R} \right] \quad (3.10)$$

Se il versante ha inclinazione compresa tra 0° e 30° , il rotolamento è rappresentato da una sequenza di rimbalzi di piccola entità a distanza ravvicinata (con un minimo di 0,2 m) e ad ogni rimbalzo la pendenza locale del versante è ridotta in maniera casuale ed uniforme, con un valore di decremento massimo pari a 4° . Al di fuori del range di inclinazione $[0^\circ-30^\circ]$ queste condizioni non vengono considerate.

3.3.4. Modellazione dell'impatto con un albero

Il software si avvale di soluzioni analitiche per il calcolo della posizione del blocco, senza iterazioni, ed è quindi nota in maniera continua. È quindi possibile calcolare sia la posizione dell'impatto con un albero sia la perdita di energia da esso causata. Il modello si avvale inoltre del diametro dell'albero, della tipologia (conifere o latifolia) e dell'energia posseduta dal blocco al momento dell'impatto. Le coordinate e i diametri degli alberi sono memorizzate nel file `treefile.txt`. L'energia cinetica persa dal blocco è legata a quattro espressioni i cui grafici sono riportati in Figura 3.6-2.

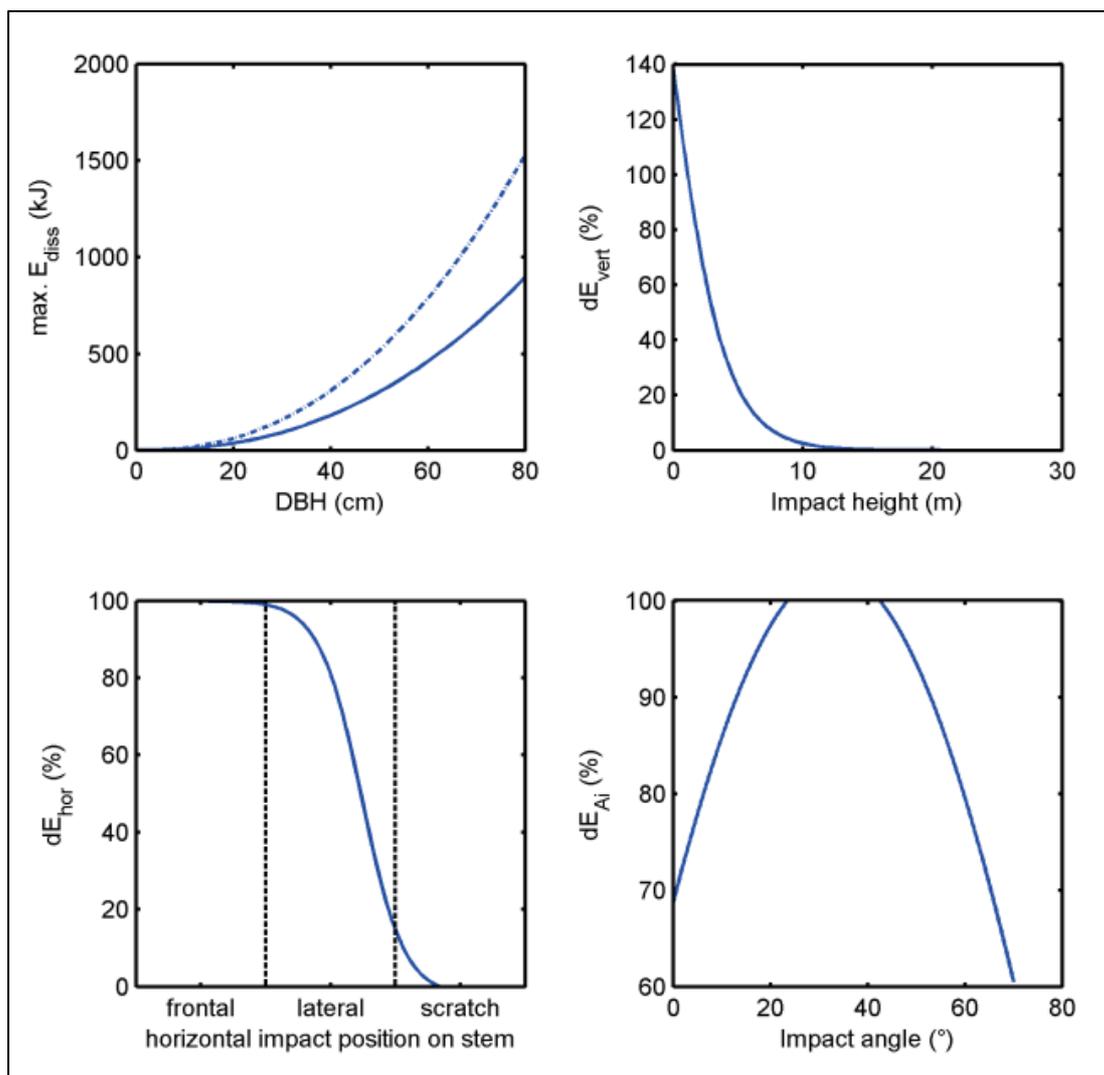


Figura 3.6-2: Funzioni per il calcolo della dissipazione energetica da impatto con un albero (Dorren et al., 2014)

Le relazioni empiriche rappresentate in Figura 3.6-2 sono riportate di seguito.

$$E_{dissM} = FE_ratio \cdot 38.7 \cdot DBH^{2.31} \quad (3.11)$$

Secondo Dorren e Berger (2006) (Doren et al., 2014) la massima energia che può essere dissipata nell’impatto con un albero (E_{dissM} in kJ) è legata al diametro dell’albero all’altezza al petto d’uomo (DBH, in cm) e al rapporto energia/rottura della tipologia d’albero FE_ratio , pari ai valori medi 0,93 per le conifere e 1,93 per le latifoglie.

Nota la massima quantità di energia dissipabile, non è detto che questa venga effettivamente dissipata in tutto il suo valore, poiché dipende dalla posizione orizzontale e verticale

dell'impatto sull'albero, i cui effetti sono calcolabili secondo le relazioni proposte da Dorren e Berger (2006) (Dorren et al, 2014).

$$dE_{hor} = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{\left(0.58 - \frac{P_i-CTA}{0.5DBH}(-8)\right)}} \quad (3.12)$$

Dove:

- dE_{hor} = massima energia dissipabile relativamente alla posizione orizzontale dell'impatto [-];
- P_i-CTA = distanza misurata lungo l'orizzontale tra il punto di impatto e l'asse verticale per il centro dell'albero [m];
- DBH = diametro dell'albero [m].

L'effetto della posizione verticale dell'impatto è invece legato all'altezza teorica dell'albero H_{tree} , in metri, calcolata sulla base del DBH grazie ad una relazione empirica basata su osservazioni di campo nell'arco alpino:

$$H_{tree} = 1.22 \cdot DBH^{0.8} \quad (3.13)$$

L'effetto in termini energetici è invece calcolato come segue:

$$dE_{vert} = 1.62 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{18.04 \cdot \left(\frac{Z_i}{H_{tree}} + 0.02 \cdot DBH - 2.35\right)}} - \frac{1}{1 + e^{15.69 + 0.02 \cdot DBH}} \right) \quad (3.14)$$

Dove Z_i è l'altezza di impatto espressa in metri.

Viene inoltre considerato un contributo massimo di dissipazione energetica legato all'angolo di impatto del blocco con l'albero α_{imp} in gradi rispetto al punto verticale di impatto $dE_{\alpha_{imp}}$ [-] (Jonsson, 2007, Dorren et al., 2014):

$$dE_{\alpha_{imp}} = \min \left[1; 1.03 \cdot \sin \left(1.46 \cdot \frac{\min(\alpha_{imp}, 70)}{180} \cdot \pi + 0.73 \right) \right] \quad (3.15)$$

Le ultime due espressioni si basano su ricerche recentemente sviluppate da Dorren e Berger (2006), Jonsson (2007), Lundström et al. (2009) (Dorren et al., 2014).

Da queste componenti di dissipazione energetica è quindi possibile calcolare la quantità totale di energia che può essere dissipata da un impatto con un albero, in kJ:

$$E_{dtree} = \frac{E_{dissM} \cdot dE_{vert} \cdot dE_{hor} \cdot dE_{\alpha_{imp}}}{1000} \quad (3.16)$$

Dove i contributi energetici sono quelli calcolati con le espressioni (3.11), (3.12), (3.14) e (3.15).

In Figura 3.6-3 sono riportate le tre principali tipologie di impatto con un albero che si possono verificare in funzione della distanza che intercorre tra l'asse verticale (CTA) per il baricentro dell'albero e il punto di impatto.

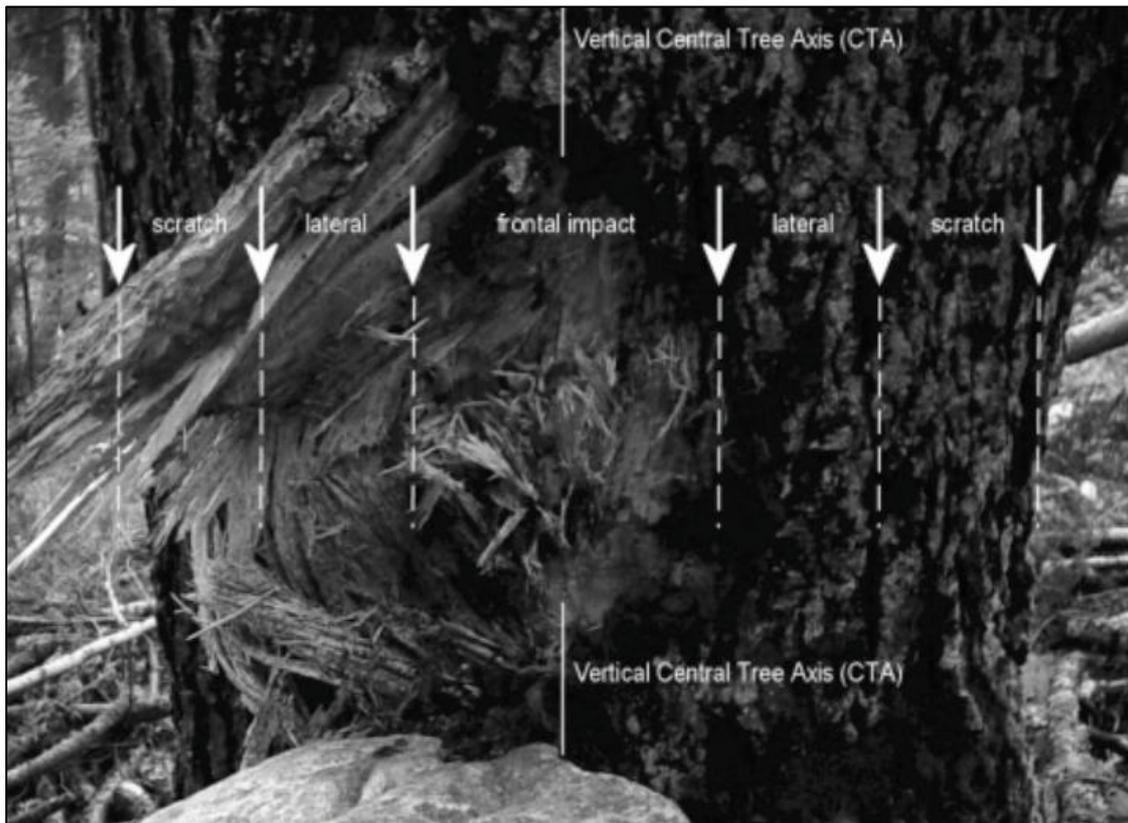


Figura 3.6-3: Tipologie di impatto su un albero (Dorren et al., 2014)

3.3.5. Modellazione e calcolo della direzione di caduta

La direzione di caduta di un blocco è in prima approssimazione calcolata in base alla direzione di massima pendenza a partire della cella sorgente (esposizione o aspect). In seguito il software affina il calcolo della direzione di caduta in funzione dei rimbalzi sul versante e degli impatti sugli alberi.

In merito alla variazione della direzione di caduta a causa dei rimbalzi sul versante influiscono la topografia del versante, la direzione di caduta pre-impatto e la velocità del blocco pre-impatto. Il modello valuta la slope aspect, secondo il modello proposto da Zevenbergen e Thorne, 1987 (Dorren et al., 2014) mostrato in Figura 3.6-4, ovvero la direzione nella quale si realizza la massima variazione di pendenza verso valle valutata tra la cella e le quattro adiacenti nella mappa raster.

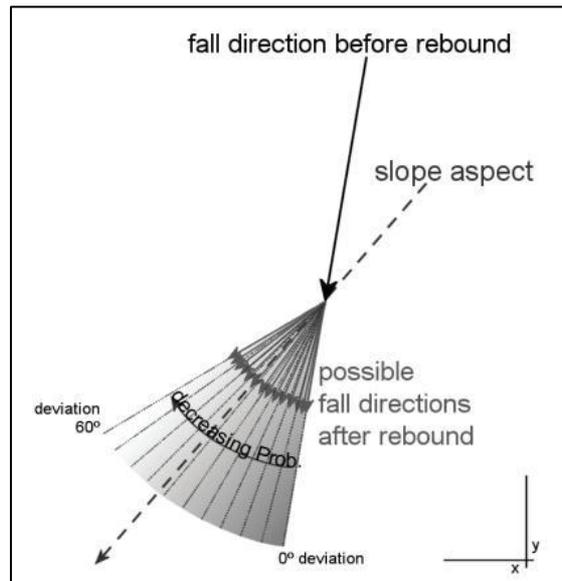


Figura 3.6-4: Algoritmo di calcolo della variazione di direzione del blocco post-impatto (Dorren et al., 2014)

L'algoritmo prevede di assegnare l'angolo di deviazione del blocco in funzione della sua velocità pre-impatto e di un numero casuale, ricavato in termini di probabilità di accadimento. Nota la velocità di ingresso del blocco tramite la Tabella 3.6-1 è possibile assegnare la probabilità che il blocco assuma un determinato angolo di deviazione dopo il rimbalzo in intervalli di 5° nel range 0° e 55°, per un totale di 11 intervalli nei quali la probabilità decresce al crescere dell'angolo di deviazione e della velocità. In Tabella 3.6-1 sono riportati i risultati delle analisi statistiche eseguite da Dorren et al. (2006) (Dorren et al., 2014) a seguito di esperimenti di campo.

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
$V < 10 \text{ m/s}$	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15 \text{ m/s}$	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15 \text{ m/s}$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Tabella 3.6-1: Probabilità, in percentuale, di deviazione della direzione del blocco

La direzione del blocco può variare, come sopra accennato, anche a causa dell’impatto con un albero. Secondo Dorren et al., (2005) la direzione del blocco può subire una variazione fino a 76°, con direzione di ingresso e di uscita valutate in un raggio di 5 m nell’intorno dell’albero impattato. L’entità effettiva della deviazione della direzione dipende dalla posizione relativa del baricentro del blocco rispetto al tronco e ciò ha permesso di evidenziare tre tipologie di impatto e quindi tre range di deviazione in gradi, ai quali è associata una probabilità di accadimento, mostrati in Figura 3.6-3 e riportati numericamente in Tabella 3.6-2.

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

Tabella 3.6-2: Probabilità, in percentuale, della deviazione del blocco dopo l’impatto con un albero

3.7. Output delle simulazioni

Il modello di calcolo fornisce in output una serie di mappe raster di dimensioni e risoluzione identiche a quelle in ingresso, tutte visualizzabili in software GIS, nelle quali sono memorizzati, per ogni cella, i valori massimi degli output delle simulazioni (Figura 3.7-1).

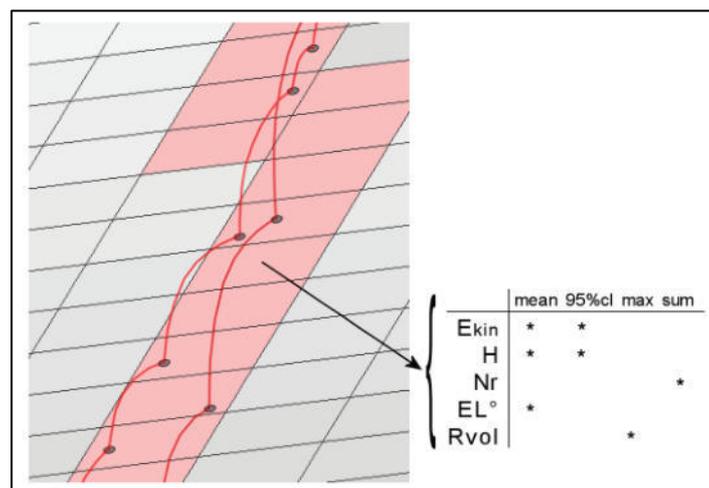


Figura 3.7-1: Schematizzazione della conversione della traiettoria 3D nei dati raster forniti in output

Di seguito vengono elencate nel dettaglio le mappe raster fornite come output delle simulazioni eseguite da Rockyfor3D:

- *E_mean.asc*: rappresenta la media dei massimi valori assunti dall'energia cinetica (rotazionale e traslazionale) dei blocchi passanti per quella cella;
- *E_50.asc*, *E_90.asc*, *E_95.asc*, *E_98.asc*: rappresentano, con un numero intero, rispettivamente il 50, 90, 95 e 98esimo percentile dell'energia cinetica simulata in ogni cella. L'output è suddiviso in classi: ≤ 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, 1'000, 1'500, 3'000, 5'000, 10'000, >10'000 espresse in kJ.
- *E_95CI*: rappresenta l'intervallo di confidenza pari al 95% (CI) dei massimi di energia cinetica simulati in ogni cella, con:
 - $95\%CI = E_mean + 2 \cdot \sigma$, con σ deviazione standard del valore massimo registrato in una cella, secondo una distribuzione normale. La deviazione standard è calcolata secondo la seguente espressione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)} \quad (3.16)$$

Sulla base dell'esperienza è possibile assumere i valori di output 95%CI come massimi delle energie, invece del classico 95%, usato nelle simulazioni 2D, che si dimostra essere inferiore.

- *Ph_mean.asc*: valore medio dell'altezza massima di passaggio dei blocchi transitati nella cella considerata. È misurata in metri in direzione perpendicolare al versante.
- *Ph_50.asc*, *Ph_90.asc*, *Ph_95.asc*, *Ph_98.asc*, *Ph_99.asc*: rappresentano, rispettivamente il 50, 90, 95, 98 e 99esimo percentile delle altezze di passaggio dei blocchi nella cella considerata, misurate in metri in direzione perpendicolare al versante. Il valore di output è fornito con un numero intero secondo delle classi di altezza: ≤ 0.5 , 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20.
- *Ph_95CI.asc*: rappresenta l'intervallo di confidenza pari al 95% (CI) dei massimi di altezza simulati in ogni cella e il principio di calcolo è il medesimo adottato per il 95%CI delle energie. Può quindi essere adottato come massimo valore delle altezze di passaggio in una data cella.
- *Nr_passages.asc*: rappresenta il numero dei passaggi simulati in ogni cella.

- *Nr_sorcecells.asc*: rappresenta il numero di celle dalle quali, almeno un blocco, è arrivato alla cella considerata.
- *Reach_probability.asc*: rappresenta la probabilità che un blocco raggiunga la cella considerata, con valori di probabilità maggiori di zero, espressi in percentuale, calcolati secondo la seguente espressione:

$$\frac{Nr_{passages} \cdot 100}{Nr_{simulations\ per\ source\ cell} \cdot Nr_{sourcecells}} \quad (3.17)$$

- *Nr_deposited*: rappresenta il numero degli arresti dei blocchi simulati nella cella considerata.
- *Rvol_deposit.asc*: rappresenta il massimo volume di un blocco arrestato nella cella considerata.
- *EL_angles.asc*: rappresenta i valori minimi degli angoli sottesi alla linea dell'energia calcolata in gradi secondo Heim (1932), Scheidegger (1973), Toppe (1987), Jaboyedoff e Labiouse (2003) (Dorren et al., 2014). Tale linea collega la nicchia di distacco e il punto più lontano raggiunto da un blocco ed assume valori compresi tra 27° e 33° per versanti spogli da vegetazione, mentre assume valori maggiori in presenza di vegetazione.
- *Traj_time.asc*: rappresenta il tempo minimo necessario perché un blocco raggiunga la cella considerata a partire dalle celle sorgenti.
- *V_max.asc*: rappresenta il massimo valore della velocità assunta dal blocco nella cella considerata ed è in valore assoluto. Non essendo presenti informazioni sulla distribuzione statistica delle velocità è un parametro che va utilizzato con i dovuti accorgimenti (Dorren et al., 2014).
- *Tree_impact_heights.asc*: rappresenta la massima altezza di impatto simulata su un albero presente nella cella considerata.
- *Nr_tree_impacts.asc*: rappresenta il numero di impatti su un albero presente nella cella considerata.

Chiaramente le ultime due mappe raster vengono fornite solo in presenza di vegetazione. Insieme agli output viene salvato un file di testo che riporta il riepilogo delle informazioni di input e di output delle simulazioni come già esposto (Figura 3.5-2).

3.8. Considerazioni sulla modellazione

In aggiunta a quanto già esposto nel paragrafo 2.7, è necessario soffermarsi su alcune limitazioni/accorgimenti legati all'utilizzo del software.

La risoluzione del modello digitale del terreno, ovvero la dimensione delle celle, deve essere compresa tra 2x2 m (elevato dettaglio) e 10x10 m (basso dettaglio) (Dorren e Heuvelink, 2004) (Dorren et al., 2014) affinché si riesca a rappresentare correttamente il versante nei suoi elementi chiave dal punto di vista della modellazione del fenomeno di caduta massi (asperità, variazioni di pendenza, ostacoli in generale, variazioni di quota) e che le simulazioni portino a delle elaborazioni con un livello di accuratezza accettabile. Al diminuire della dimensione delle celle aumenta il livello di dettaglio con il quale si rappresenta il versante, ma non è detto che ciò comporti una maggiore accuratezza delle elaborazioni, ma certamente aumenta in maniera considerevole la mole di dati da elaborare (Dorren et al., 2014). Occorre trovare il giusto compromesso tra mole di dati da elaborare e accuratezza delle elaborazioni.

In questa tesi si fa riferimento ad un modello digitale del terreno con risoluzione 5x5 m (Regione Piemonte), che si pone come valore medio tra le risoluzioni proposte dagli autori.

Come già osservato nel paragrafo 2.7 un parametro chiave è il numero di simulazioni da utilizzare, infatti tale numero deve garantire l'affidabilità statistica dei risultati, ovvero con un numero superiore di simulazioni i risultati ottenuti rimangono costanti.

4. Caso studio: il comune di Rassa

Nel seguente capitolo si descrive il fenomeno di caduta massi registrato in data 30/10/2018 nel comune di Rassa (VC). Per fare ciò verranno prima descritti il contesto storico, geografico e climatico della zona in esame.

In seguito verrà descritto ed analizzato l'evento di caduta massi avvenuto nella notte tra il 29 e il 30 ottobre 2018. Sullo stesso evento verranno tarati i parametri di scabrezza del versante utilizzati per le successive analisi. Per le informazioni necessarie allo svolgimento di tale analisi si è fatto riferimento sia alle relazioni tecniche redatte dal Dott. Cavagnino (Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnosesia) che in passato e che tutt'ora si occupa dell'attività di monitoraggio degli eventi nel sito, sia ai dati raccolti con i rilievi in situ e descritti più nel dettaglio nei paragrafi successivi.

4.1. Introduzione storico-geografica del comune di Rassa

Il comune di Rassa (VC), è situato in Valsesia nella parte settentrionale del Piemonte (Figura 4.1-1 e Figura 4.1-2), in provincia di Vercelli, alla quota media di circa 917 m.s.l.m. ed è un piccolo borgo di 66 abitanti che mantiene le strutture abitative utilizzate molti anni fa, principalmente edifici tradizionali in muratura. L'abitato sorge in corrispondenza della confluenza dei torrenti Gronda e Sorba, quest'ultimo tributario in destra idrografica del fiume Sesia. Il possesso della valle è stato conteso per diversi secoli tra i vescovi di Vercelli e Novara. Nel 1300 circa Rassa fu teatro dello scontro tra gli apostolici di Fra Dolcino e i seguaci dei vescovi di Novara e Vercelli. Nel corso del XVII secolo la Valsesia passò dal ducato di Milano allo Stato Sabauda mentre alla fine del Settecento i comuni della valle furono separati: quelli sulla riva sinistra del fiume Sesia passarono al dipartimento dell'Agogna avente Novara come capoluogo, mentre quelli sulla riva destra entrarono a far parte del dipartimento della Sesia, legata invece a Vercelli. Nel 1814 questi comuni furono riuniti nella "provincia di Valsesia", con la Restaurazione. Tale provincia venne smantellata nel 1836 e venne aggregata a quella di Novara. Dal 1927 il comune di Rassa entrò a far parte della provincia di Vercelli (Rinaldi, 2016). Il comune è suddiviso in cantoni (Figura 4.1-3), Tangin, Spinfoj (anche chiamato Centro), Pavaraj, San Giovanni e Sant'Antonio, accumulate dalle caratteristiche abitazioni e struttura e rimaste invariate dal passato (Molino, 2006).



Figura 4.1-1: Limiti del comune di Rassa (Google Maps)

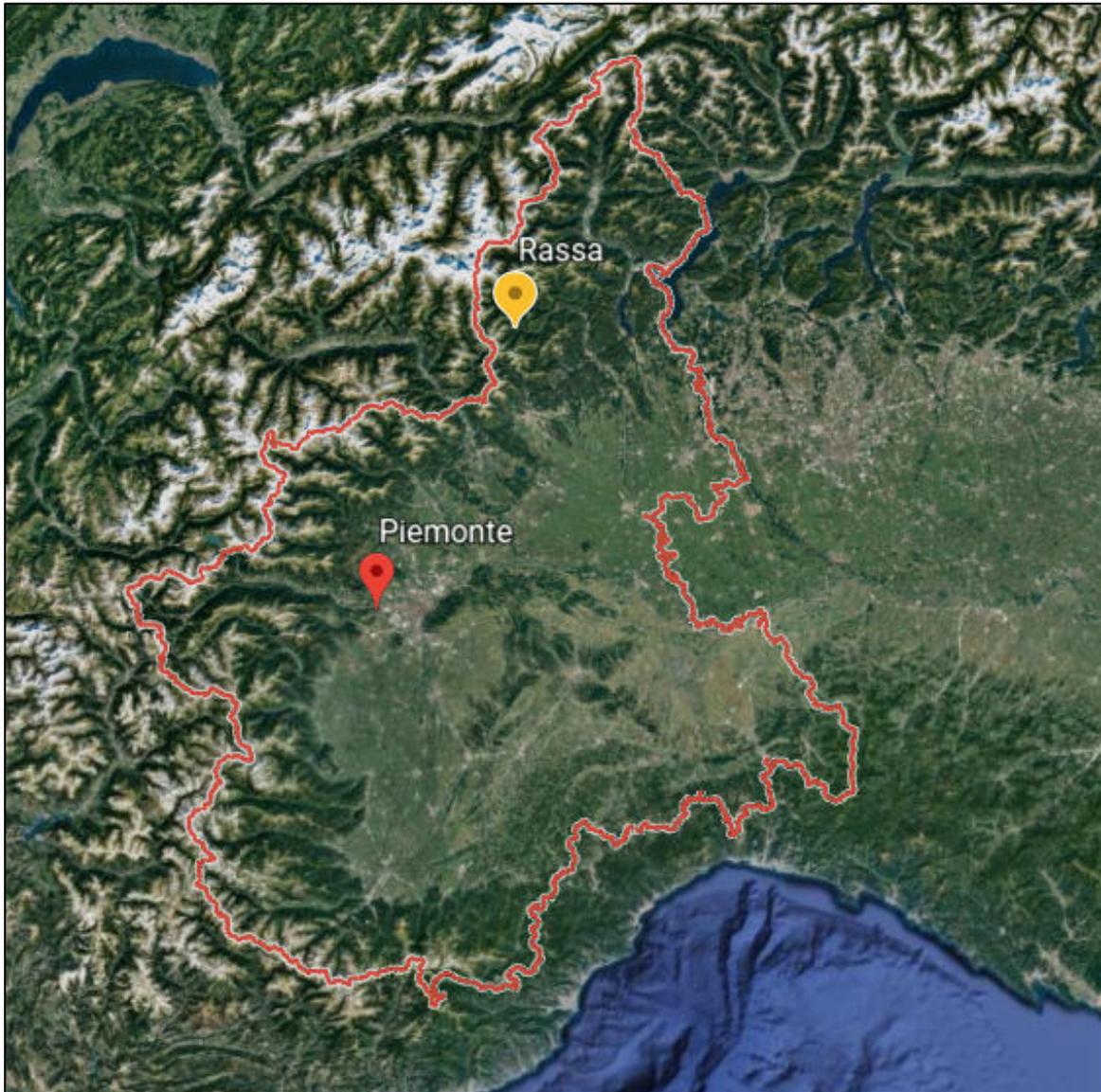


Figura 4.1-2: Collocazione di Rassa nel Piemonte (Google Earth)

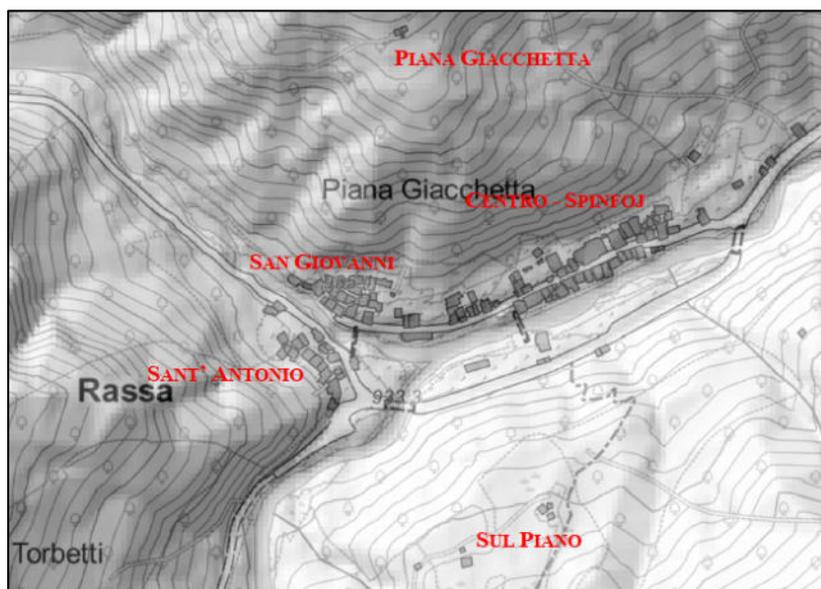


Figura 4.1-3: Cantoni del comune di Rassa (VC) (Tecnosesia, 2019)

4.2. Contesto climatico

Il clima nella valle ospitante il comune di Rassa è di tipo temperato umido con estate tiepida (zone nelle quali l'estate ha una temperatura media inferiore ai 22°) secondo la classificazione di Köppen. Le temperature medie annue oscillano tra -1° e 17°, con una variazione di circa 18°. Le temperature minime vengono raggiunte nella stagione invernale (gennaio), mentre le massime nel mese di luglio. Di seguito viene riportato l'andamento dei massimi e dei minimi delle temperature mensili dal 1994 al 2018 registrati dall'Arpa Piemonte (Tabella 4.2-1):

Anno	Mese												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
1994	Max	9,5	10,5	20,3	21,8	25,1	27,2	28,9	29,8	22,2	20,7	15,1	11,6
	Min	-8,4	-10,9	-1,0	-1,7	3,6	4,5	12,3	9,4	2,1	1,3	0,2	-5,6
1995	Max	8,8	-	17,8	22,3	24,5	26,0	28,6	27,5	21,1	22,0	15,6	5,2
	Min	-9,9	-3,7	-5,5	-1,3	1,1	3,6	8,8	3,7	1,7	2,1	-3,8	-7,0
1996	Max	6,7	12,7	14,0	19,0	25,2	28,6	26,3	24,2	22,5	-	15,0	9,4
	Min	-5,0	-9,5	-8,3	-0,7	-	5,1	6,2	7,0	-	-	-5,6	-11,6
1997	Max	8,5	12,9	22,4	21,1	23,8	23,4	25,9	27,7	25,6	24,4	13,7	5,6
	Min	-5,6	-7,0	-0,9	-2,7	0,1	4,5	6,8	6,7	6,4	-4,9	-2,5	-6,6
1998	Max	7,6	14,7	19,1	18,2	25,3	28,8	28,3	29,9	21,4	17,7	13,9	8,7
	Min	-9,0	-9,9	-	-3,8	2,2	4,0	7,6	7,4	2,6	0,9	-9,3	-7,7
1999	Max	8,0	12,6	16,1	20,0	24,1	25,9	25,9	24,4	24,1	20,1	12,8	5,2
	Min	-10,1	-11,2	-	-2,8	5,3	5,9	9,4	8,0	6,9	0,7	-5,7	-8,3

		Mese											
Anno		Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
2000	Max	15,2	11,7	22,6	21,8	22,4	26,6	25,6	28,4	23,4	17,9	12,1	7,3
	Min	-11,7	-4,7	-2,7	0,1	6,0	8,3	4,7	8,5	5,8	1,6	-1,8	-7,5
2001	Max	6,3	17,1	17,8	17,7	28,7	27,1	28,3	28,2	-	22,3	15,2	10,7
	Min	-9,3	-8,1	-8,7	-1,3	4,5	2,5	7,4	8,5	1,7	4,0	-4,2	-11,1
2002	Max	10,8	12,1	22,7	22,0	22,7	29,6	-	25,2	24,8	19,8	15,0	7,3
	Min	-9,8	-5,8	-2,2	0,1	0,4	3,9	8,7	8,6	2,3	1,6	-1,4	-5,5
2003	Max	12,6	9,4	17,9	20,0	24,1	30,5	29,6	33,7	23,6	19,9	11,6	10,8
	Min	-8,4	-10,7	-3,4	-5,4	2,0	10,7	9,2	11,2	3,7	-3,4	-2,7	-7,8
2004	Max	8,7	10,9	15,3	22,1	25,5	28,1	28,5	28,1	26,3	19,2	16,1	6,3
	Min	-9,5	-8,3	-8,3	-1,3	0,2	6,4	7,1	7,5	3,3	0,2	-3,0	-6,9
2005	Max	12,0	10,8	22,8	22,7	27,3	28,9	28,7	25,9	27,1	16,9	16,0	9,7
	Min	-10,9	-9,3	-12,0	-0,1	3,7	4,7	8,1	7,0	6,2	2,5	-7,0	-11,2
2006	Max	9,3	9,3	17,0	19,5	26,6	28,3	30,9	26,6	29,1	20,5	17,1	7,8
	Min	-10,7	-8,4	-9,0	-0,3	0,4	1,7	11,2	5,5	7,9	4,5	-2,1	-4,5
2007	Max	20,3	14,8	17,7	23,3	26,6	25,7	28,5	26,9	26,5	21,7	13,7	6,3
	Min	-7,2	-2,3	-3,5	0,4	2,7	5,9	6,2	7,7	2,5	-1,6	-5,9	-7,7
2008	Max	9,8	12,7	19,2	19,8	20,7	27,5	26,8	27,8	24,0	20,2	14,2	5,2
	Min	-4,9	-6,6	-5,0	-0,4	2,0	6,5	8,5	8,0	3,7	0,5	-5,0	-9,9
2009	Max	6,1	11,5	15,5	20,8	28,9	25,9	28,1	28,4	25,2	20,1	13,3	6,4
	Min	-9,5	-8,9	-4,5	0,3	4,1	6,6	7,7	10,4	7,7	-1,2	-1,0	-11,3
2010	Max	4,4	10,5	14,8	20,1	23,9	26,4	28,1	27,2	21,7	18,4	13,6	7,3
	Min	-11,0	-10,3	-8,1	-1,6	2,4	6,2	9,3	6,4	4,0	-0,6	-7,2	-10,8
2011	Max	7,6	11,1	17,3	27,7	25,1	29,7	25,4	29,4	26,1	23,1	13,1	10,3
	Min	-7,3	-4,1	-5,0	2,2	3,2	7,5	6,5	8,0	4,6	-0,8	-0,5	-6,9
2012	Max	19,9	22,7	21,6	26,6	26,9	28,6	30,8	24,3	19,4	13,4	-	-
	Min	-15,2	-2,9	-1,5	0,6	6,5	7,7	8,6	4,7	-2,0	-1,8	-	-
2013	Max	11,8	11,8	13,2	22,3	20,0	28,1	27,9	29,5	25,7	18,5	17,2	5,5
	Min	-7,0	-9,3	-5,8	-1,9	0,8	5,0	9,7	8,1	5,1	0,1	-7,2	-5,6
2014	Max	8,5	13,9	17,4	21,7	21,8	29,7	27,5	25,9	23,6	21,7	15,8	8,2
	Min	-6,7	-4,6	-2,1	0,6	2,4	5,7	7,0	7,5	6,6	0,9	0,3	-6,8
2015	Max	12,5	12,5	21,1	22,6	24,5	27,8	30,5	32,2	22,6	20,8	19,1	10,4
	Min	-7,3	-7,7	-3,7	-3,0	3,7	7,3	11,5	5,1	4,0	1,1	-4,0	-2,5
2016	Max	10,9	13,5	17,5	-	-	-	27,9	26,8	26,3	18,0	12,7	8,2
	Min	-8,7	-5,2	-5,4	-	-	-	6,9	8,2	7,1	0,6	-3,6	-3,5
2017	Max	7,5	12,3	21,1	20,1	-	29,7	28,6	30,4	22,2	22,7	13,6	5,2
	Min	-9,5	-2,6	-1,8	-1,7	-	6,7	8,5	7,8	3,6	3,1	-4,6	-9,1
2018	Max	8,6	7,6	13,5	23,4	23,9	28,6	29,5	29,5	25,1	19,9	12,3	14,7
	Min	-4,8	-13,0	-8,0	-0,6	4,7	8,5	11,5	7,6	5,5	0,7	-1,8	-6,0

Tabella 4.2-1: Andamento dei massimi e dei minimi di temperatura dal 1994 al 2018 (Arpa-Piemonte)

Per quanto riguarda le piogge esse sono abbondantemente presenti durante tutto l'anno con i massimi nella stagione primaverile. La piovosità media annua è di circa 1050 mm, quindi un'abbondante precipitazione se rapportata al totale di 1400 mm registrati in media in Piemonte per l'anno 2018 (ARPA Piemonte). In Tabella 4.2-2 è riportato l'andamento delle piogge dal 1994 al 2018.

Anno	Mese											
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
1994	240,0	202,0	4,8	180,8	307,2	128,4	74,8	265,2	408,2	82,0	356,4	6,4
1995	15,8	26,6	9,0	508,4	253,4	137,6	53,4	116,6	325,4	35,2	136,6	47,4
1996	261,2	46,4	26,4	41,4	359,8	56,2	166,8	132,8	112,8	193,8	480,4	123,0
1997	75,4	1,4	1,0	21,4	92,8	324,6	67,0	155,4	30,2	6,2	173,8	121,4
1998	32,2	19,6	4,6	279,8	315,6	83,4	45,8	106,2	188,2	132,0	3,4	10,4
1999	27,4	7,0	192,8	141,2	262,0	125,8	135,2	119,6	325,4	113,2	108,2	41,0
2000	0,2	3,8	87,2	353,8	127,8	138,4	135,4	133,0	533,8	678,4	299,8	35,4
2001	48,0	56,2	86,2	32,2	217,0	111,2	203,2	74,8	55,4	71,2	29,4	10,0
2002	8,0	180,8	51,0	50,0	579,4	326,8	147,6	211,4	113,4	76,6	597,4	33,8
2003	25,0	12,4	1,8	69,4	58,0	49,8	67,4	49,6	96,4	95,2	220,2	250,6
2004	21,0	-	29,2	277,0	168,0	7,4	67,2	132,2	21,2	252,6	286,2	43,2
2005	2,2	2,2	54,8	173,2	128,6	147,6	63,4	282,6	188,4	-	5,0	23,6
2006	73,0	57,8	26,0	58,2	92,8	33,6	95,2	118,0	400,2	55,2	23,6	132,0
2007	56,0	2,2	72,6	62,0	395,4	242,0	29,2	193,6	74,2	33,4	86,8	8,4
2008	87,2	18,2	38,2	176,6	266,6	107,4	113,2	71,4	175,8	105,0	331,6	419,4
2009	61,8	129,2	138,4	472,0	71,8	166,2	153,8	54,4	176,2	47,2	135,4	-
2010	59,2	67,2	124,0	41,4	273,4	276,4	38,6	169,6	108,2	252,6	185,4	109,4
2011	11,6	30,4	183,6	47,8	54,2	264,4	219,8	59,8	78,0	32,2	382,0	13,2
2012	-	0,2	77,8	212,8	147,4	61,2	81,6	114,6	148,8	94,2	248,6	-
2013	-	32,0	50,8	417,0	395,2	96,2	169,2	191,0	119,2	107,6	134,2	206,6
2014	126,8	175,2	120,2	162,2	137,0	79,6	209,6	83,6	72,2	77,8	632,2	43,4
2015	54,2	125,4	116,6	77,6	103,8	149,8	30,4	248,4	130,0	211,2	1,2	0,0
2016	13,0	160,0	76,8	-	-	-	76,4	52,8	84,8	80,2	320,6	61,8
2017	2,0	29,6	202,2	71,6	-	160,0	39,4	115,4	29,0	2,2	46,8	58,6
2018	297,2	15,8	138,6	218,8	339,6	109,8	69,4	96,6	45,4	474,4	309,8	5,6

Tabella 4.2-2: Precipitazioni mensili dal 1994 al 2018 (Arpa Piemonte)

4.3. Contesto geomorfologico

La maggior parte delle informazioni tecniche riguardanti lo stato geomorfologico del versante sono state reperite grazie ai sopralluoghi ed ai rilievi di dettaglio eseguiti dallo studio Tecnosesia (2019) ed al materiale realizzato dal Dott. Cavagnino.

Il versante, ai piedi del quale si colloca il comune di Rassa, è caratterizzato da forti pendenze che raggiungono il 50% a ridosso dell'abitato e si eleva per un'altezza di circa 290 m dalla quota del paese, posta a circa 917 m.s.l.m. Il versante è interamente forestato, con vegetazione costituita da bosco misti a latifoglie, con prevalenza di castagno (alcuni esemplari molto vecchi e di grande diametro), rovere, nocciolo, betulla nelle radure e ontano bianco negli impluvi. La densità stimata è di circa 2500 alberi per ettaro (si può far riferimento al Paragrafo 5.2.4).

La roccia presente è prevalentemente composta da gneiss talvolta affioranti dal substrato principalmente composto da materiale di deposito alluvionale. In particolare, facendo riferimento alla carta geologica-geomorfologica ed alla relazione generale redatti dallo studio tecnico Tecnosesia è possibile osservare la presenza di pareti rocciose intensamente fratturate (reticoli neri in Figura 4.3-1) collocate in maniera diffusa lungo tutto il versante tra le quote di circa 932 m e 1055 m e una lunghezza trasversale tra le pareti più esterne di circa 360 m.

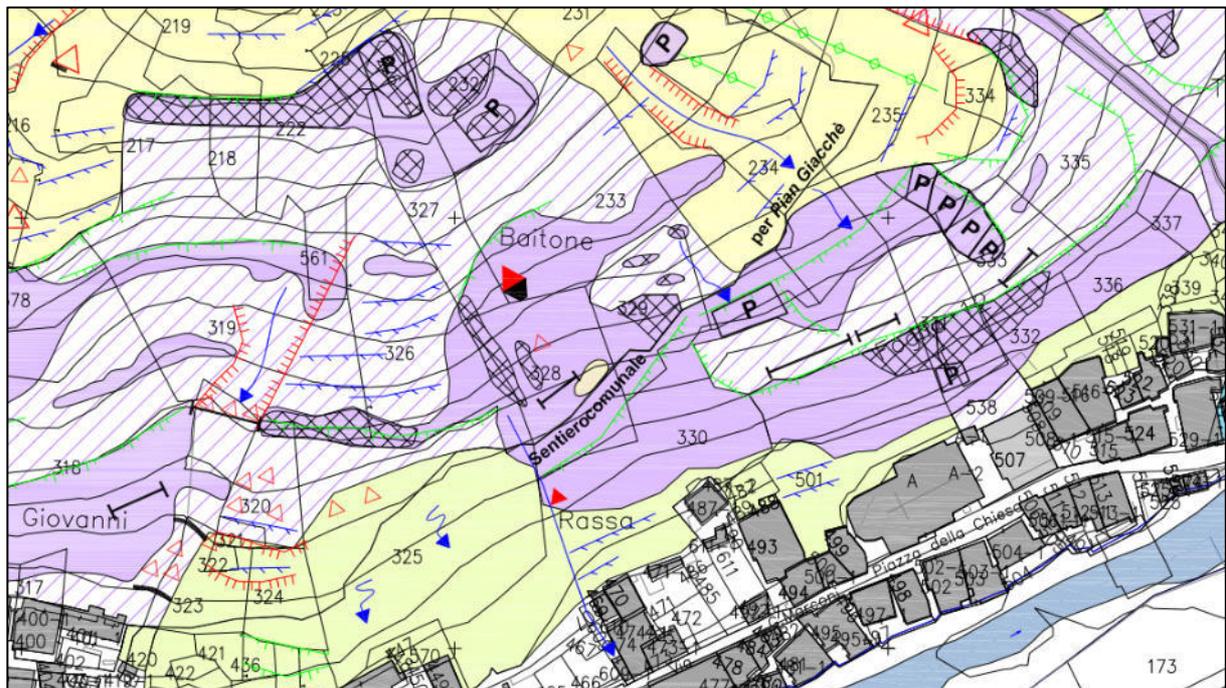


Figura 4.3-1: Stralcio della carta geologica-geomorfologica (Tecnosesia, 2019)

Alcune di tali aree si estendono in media su un dislivello di circa 20 m e in alcuni casi con aree superiori ai 300 m². Sono presenti in maniera diffusa altre zone caratterizzate da elevata fratturazione, ma di dimensioni minori, su tutto il versante a ridosso della località centro. Nello stesso versante sono presenti dei muri a secco non di recente posa e altamente degradati anche a causa dell'infiltrazione della vegetazione e che possono essere causa di eventi di crollo di piccola entità, per distacco di rocce che li compongono. Stesso discorso può essere fatto per i depositi sciolti debolmente immorsati nel terreno, che tendono alla rimobilitazione a seguito di eventi di precipitazione intensi.

Sul sito in esame sono state posizionate tre stazioni geomeccaniche dallo studio tecnico che si occupa dei rilievi e sopra già menzionato, le quali hanno consentito la ricostruzione dettagliata dello stato geo-meccanico del versante, le cui posizioni sono riportate in Figura 4.3-2.

Tale studio ha permesso di ricavare lo stato di fratturazione della roccia costituente le pareti (esempio in Figura 4.3-3) di mettere in evidenza le principali famiglie di discontinuità esistenti e di prevedere quindi i principali tipi di cinematismo che si possono generare. È stato inoltre possibile ottenere una stima dei volumi potenzialmente instabili e di avere quindi un dato di partenza sulla magnitudo e sugli scenari di evento attesi sul sito. Le giaciture delle discontinuità sono di seguito riportate (Figura 4.3-5, Figura 4.3-6, Figura 4.3-7 e Tabella 4.3-1, Tabella 4.3-2, Tabella 4.3-3).

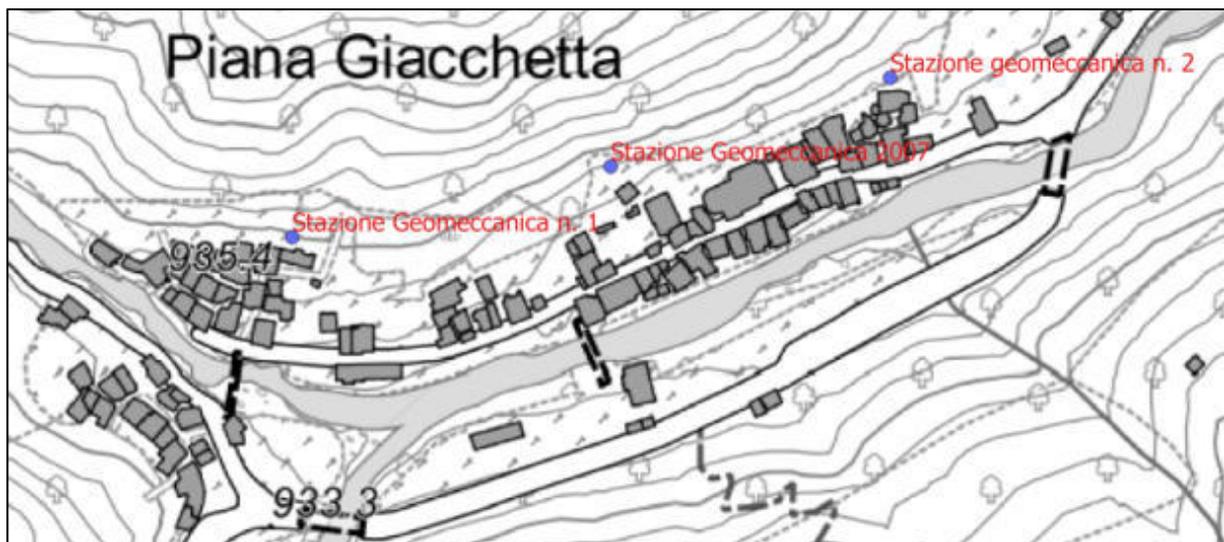


Figura 4.3-2: Stazioni geomeccaniche (Tecnosesia, 2019)



Figura 4.3-3: Esempio di parete in roccia intensamente fratturata (Tecnosesia, 2019)

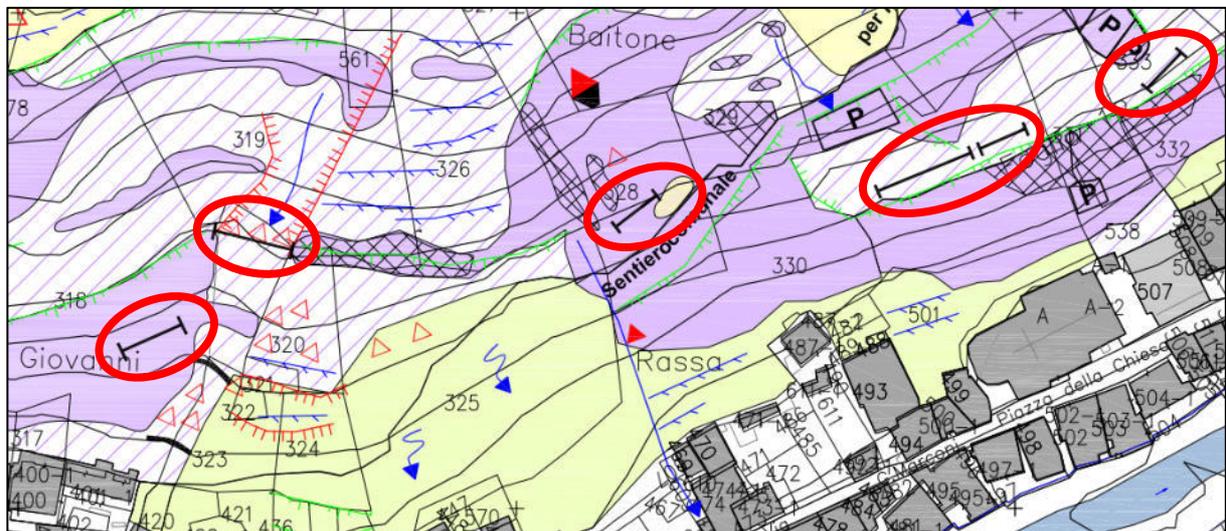


Figura 4.3-4: Posizione delle opere di difesa sul versante (Tecnosesia, 2019)

Nel sito sono inoltre presenti delle opere di difesa, di altezza pari a 4 m e capacità di assorbimento pari a 1000 kJ e rappresentate da segmenti neri all'interno delle ellissi rosse in Figura 4.3-4. Tali opere di difesa sono inserite sul versante come opere isolate a seguito di segnalazioni di eventi passati e non sono quindi raccordate da uno studio di dettaglio finalizzato alla protezione del versante.

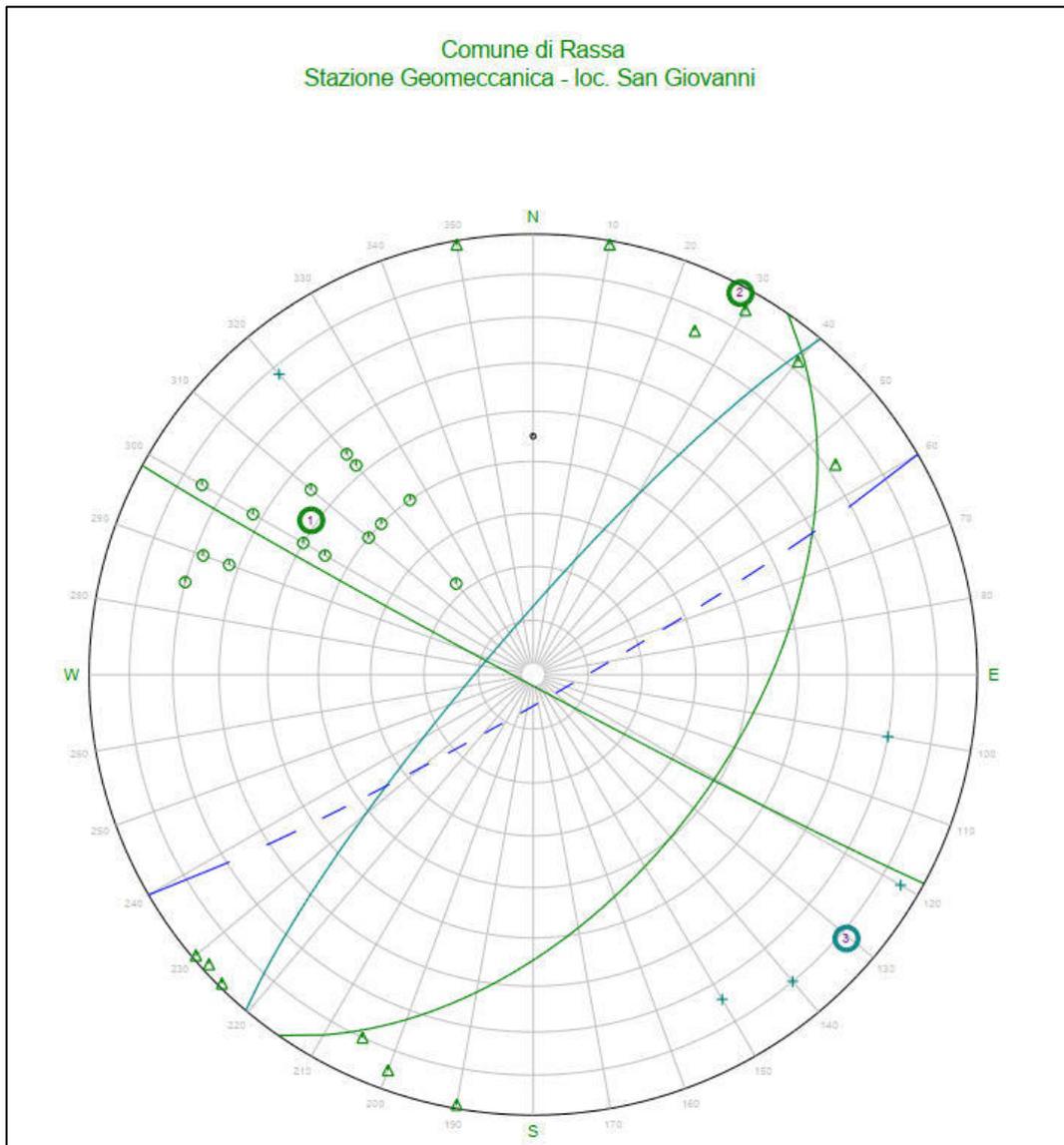


Figura 4.3-5: Stereogramma delle discontinuità nel sito 1, San Giovanni (Tecnosesia, 2019)

N° - Famiglia	Immersione [°]	Inclinazione [°]
1 - K1	125	51
3 - K2	208	88
4 - K3	310	82

Tabella 4.3-1: Giacitura delle discontinuità nel sito 1, San Giovanni (Tecnosesia, 2019)

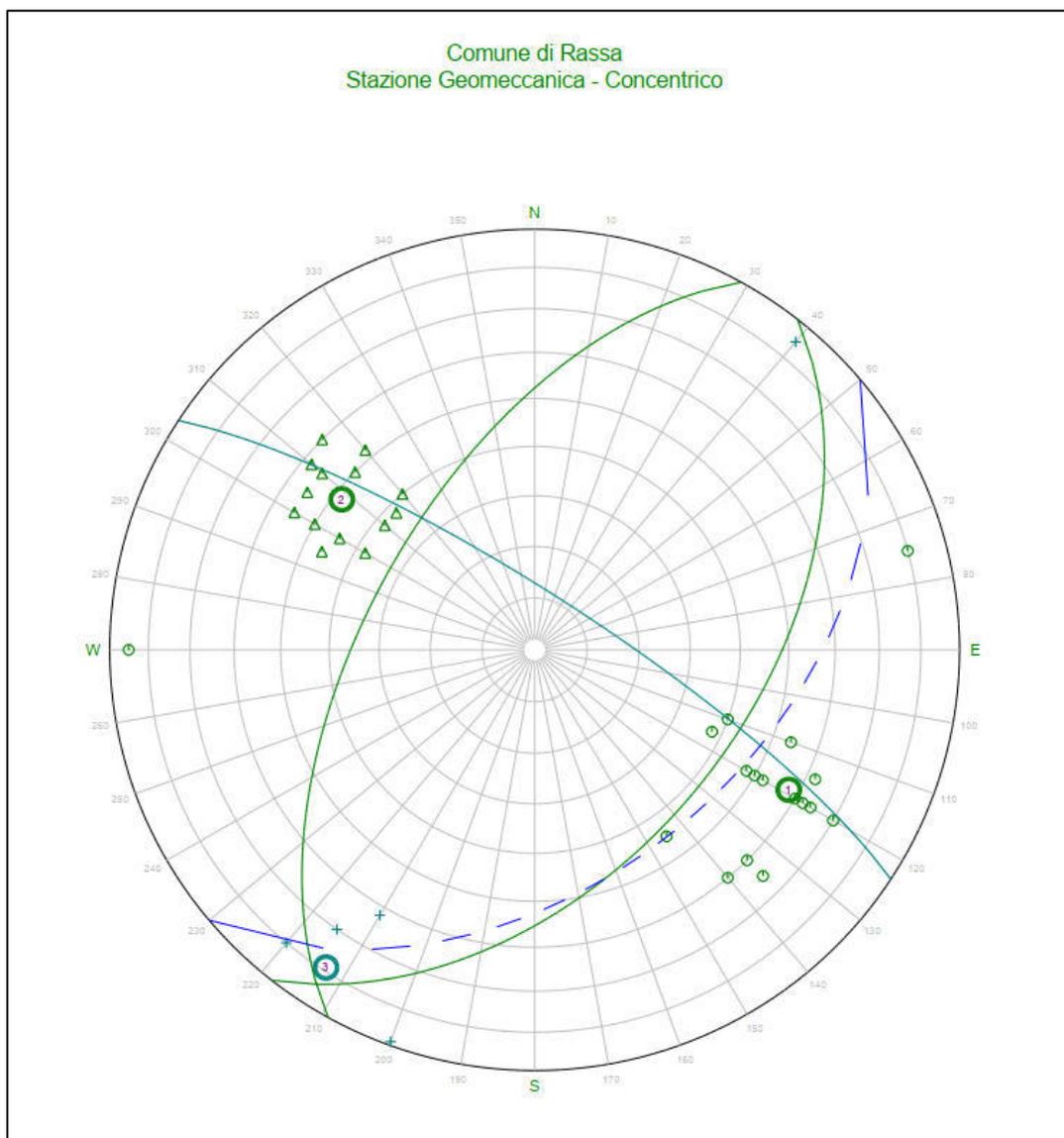


Figura 4.3-6: Stereogramma delle discontinuità nel sito 2, Concentrico (Tecnosesia, 2019)

N° - Famiglia	Immersione [°]	Inclinazione [°]
1 - Sc	299	58
3 - K1	128	48
4 - K2	33	79

Tabella 4.3-2: Giacitura delle discontinuità nel sito 2, Concentrico (Tecnosesia, 2019)

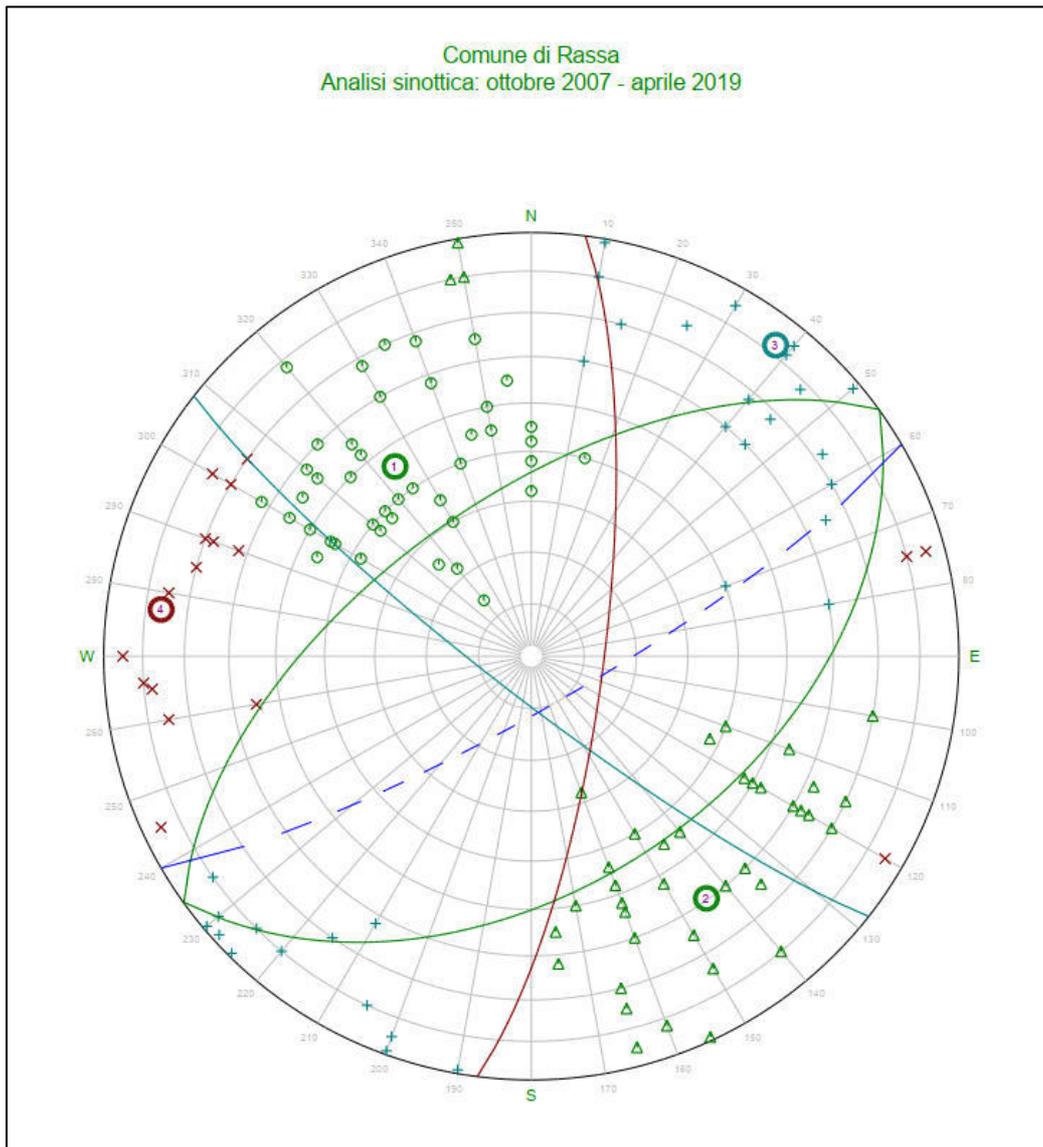


Figura 4.3-7: Stereogramma delle discontinuità nel sito 3, Ottobre 2018 – Aprile 2019 (Tecnosesia, 2019)

N° - Famiglia	Immersione [°]	Inclinazione [°]
1 - K1	161	52
3 - K2	233	65
4 - K3	92	74
2 - K4	340	50

Tabella 4.3-3: Giacitura delle discontinuità nel sito 3, Ottobre 2018 – Aprile 2019 (Tecnosesia, 2019)

In tutte le figure sopra riportate, con una linea blu tratteggiata viene indicata la giacitura del fronte del versante, nonché le giaciture delle principali famiglie di discontinuità. Da un'analisi degli stereogrammi si è potuto dedurre che i cinematismi attivabili sono principalmente di scivolamento e ribaltamento. In particolare, come mostrato in Figura 4.3-7, si può notare che nella zona a ridosso della Chiesa di Santa Croce (si trova nella regione Sud-Est dello stereogramma) è possibile un fenomeno di scivolamento tridimensionale a causa dell'intersezione delle giaciture delle famiglie di discontinuità K3 e K4. Ciò risulta pienamente compatibile con il fenomeno di caduta massi osservato nell'ottobre 2018 e dettagliatamente descritto nel prossimo paragrafo.

4.4. Stima dei potenziali volumi instabili

A seguito dello studio della configurazione geomeccanica delle discontinuità è stato possibile ottenere una stima dei volumi di roccia potenzialmente instabili, sia attraverso l'analisi della spaziatura delle discontinuità sia attraverso misure in situ. Di seguito è riportato un estratto di tale studio.

n° blocco	[m]	[m]	[m]	[m ³]
1	2,30	0,92	1,60	3,39
2	1,30	1,50	1,20	2,34
3	0,50	0,40	0,37	0,07
4	1,70	0,30	1,10	0,56
5	0,56	0,20	0,70	0,08
6	0,70	0,20	0,30	0,04
7	0,30	0,10	0,20	0,01
8	0,80	1,00	0,65	0,52
9	1,30	0,60	1,60	1,25
10	0,80	0,90	0,50	0,36
			media	0,86

Tabella 4.4-1: Volumi da misure in situ, sito 1 (Tecnosesia, 2019)

n° blocco	[m]	[m]	[m]	[m ³]
1	0,70	0,57	1,00	0,40
2	0,30	0,10	0,30	0,01
3	0,60	1,00	1,20	0,72
4	0,50	0,90	0,60	0,27
5	0,30	0,08	0,30	0,01
6	1,00	1,10	0,78	0,86
7	0,30	0,12	0,40	0,01
8	0,70	0,60	0,40	0,17
9	1,10	0,80	1,00	0,88
			media	0,37

Tabella 4.4-2: Volumi da misure in situ, sito 2 (Tecnosesia, 2019)

Calcolo da spazature – Stazione 1:		
volume medio:	0,19	[m ³]
V2Dm:	0,54	[m ³]
Vm:	5,60	[m ³]
Calcolo da spazature – Stazione 2:		
volume medio:	0,15	[m ³]
V2Dm:	0,31	[m ³]
Vm:	1,68	[m ³]

Tabella 4.4-3: Calcolo volumi da spazature (Tecnosesia, 2019)

In Tabella 4.4-3 il volume medio è calcolato dalla media delle dimensioni delle spazature nelle direzioni orizzontali e verticale, il V2Dm è il volume ottenuto dal valore medio di spazatura su due assi e una dimensione massima mentre Vm è il volume calcolato sui valori massimi di spazatura. Dalle Tabella 4.4-1, Tabella 4.4-2 e Tabella 4.4-3 si può osservare come i volumi dedotti dalle misure in situ e dal calcolo sulle spazature abbiano una buona corrispondenza (Tecnosesia, 2019). Questi volumi verranno utilizzati come dato di partenza per la predisposizione di un'analisi previsionale, ovvero la simulazione di possibili scenari futuri nell'ottica di dedurre le caratteristiche del fenomeno in intensità e distribuzione sul versante (energie, velocità, altezze di passaggio ecc.).

In particolare l'analisi previsionale, descritta nel Capitolo 6, verrà condotta anche nell'ottica del confronto dei risultati ottenuti da Rockyfor3D con quelli forniti dal plugin QPROTO sui seguenti volumi:

- 0,10 m³
- 1,00 m³
- 5,00 m³.

Tali volumetrie sono state scelte incrociando i dati raccolti dai rilievi in situ condotti dallo studio Tecnosesia e dagli studi in corso nel dipartimento DISEG (Torsello, 2019) nei quali, analizzando la dinamica del fenomeno di caduta massi su pendii creati artificialmente e aventi prefissate condizioni (volume del blocco, pendenza, vegetazione, opere di difesa, scabrezza del versante, risoluzione del modello digitale del terreno), vengono calibrati gli angoli di attrito equivalente ϕ_p (che rappresenta la dissipazione energetica media del blocco a causa dei fenomeni che intervengono durante il moto e che racchiude quindi tutti i parametri geomeccanici del blocco, ovvero dello scenario, e del versante). Tale calibrazione consiste nell'ottenere dei valori di ϕ_p tali che il plugin QPROTO fornisca in output un'area di invasione compatibile e valori di energie e velocità compatibili con quelle ottenute dalle simulazioni condotte su Rockyfor3D, assunte come riferimento in quanto si basa su un modello probabilistico e fisicamente basato.

5. Analisi del fenomeno di caduta massi (Back Analysis)

In questo capitolo si procederà all'analisi dell'evento di caduta massi avvenuto in data 30 ottobre 2018 nel comune di Rassa. In primo luogo è stata condotta una back analysis dell'evento con il software Rockyfor3D in modo da calibrare i parametri rappresentativi del sito per poter condurre analisi previsionali di dettaglio. A tale scopo verranno quindi utilizzati due software, Rockyfor3D (già descritto nel Capitolo 3) sul quale verranno condotte le simulazioni e QGIS (Versione 3.4.7) per la creazione dei file raster di input necessari e per la visualizzazione dei raster di output forniti da Rockyfor3D. Per la costruzione del modello verranno utilizzati:

- Ortofoto Google 2016
- DTM con risoluzione 5 m (Regione Piemonte)
- Dati sulla vegetazione da rilievi in situ (essenze arboree e densità)
- Relazioni tecniche effettuate dallo studio Tecnosesia

I valori di scabrezza così ottenuti verranno utilizzati per tutte le simulazioni successive, come parametri caratterizzanti del versante oggetto di studio.

5.1. Descrizione dell'evento del 30/10/2018

I rilievi strutturali effettuati dallo studio Tecnosesia tra ottobre 2018 e aprile 2019 hanno mostrato come l'ammasso roccioso costituente il versante sia caratterizzato da zone di roccia altamente fratturata che possono essere nicchie di distacco di blocchi, come infatti accaduto nella notte del 30 ottobre 2018 e come riassunto nello stralcio della carta geomorfologica del versante riportato in Figura 5.1-1. Un blocco delle dimensioni di $0,80 \cdot 0,40 \cdot 0,30 = 0,096 \text{ m}^3$ si è distaccato da una zona di roccia altamente fratturata a monte della Chiesa di Santa Croce (località Centro), in prossimità della particella catastale 329, e si è mosso verso valle arrestandosi nel cortile situato sul retro della Chiesa stessa (Figura 5.1-1).

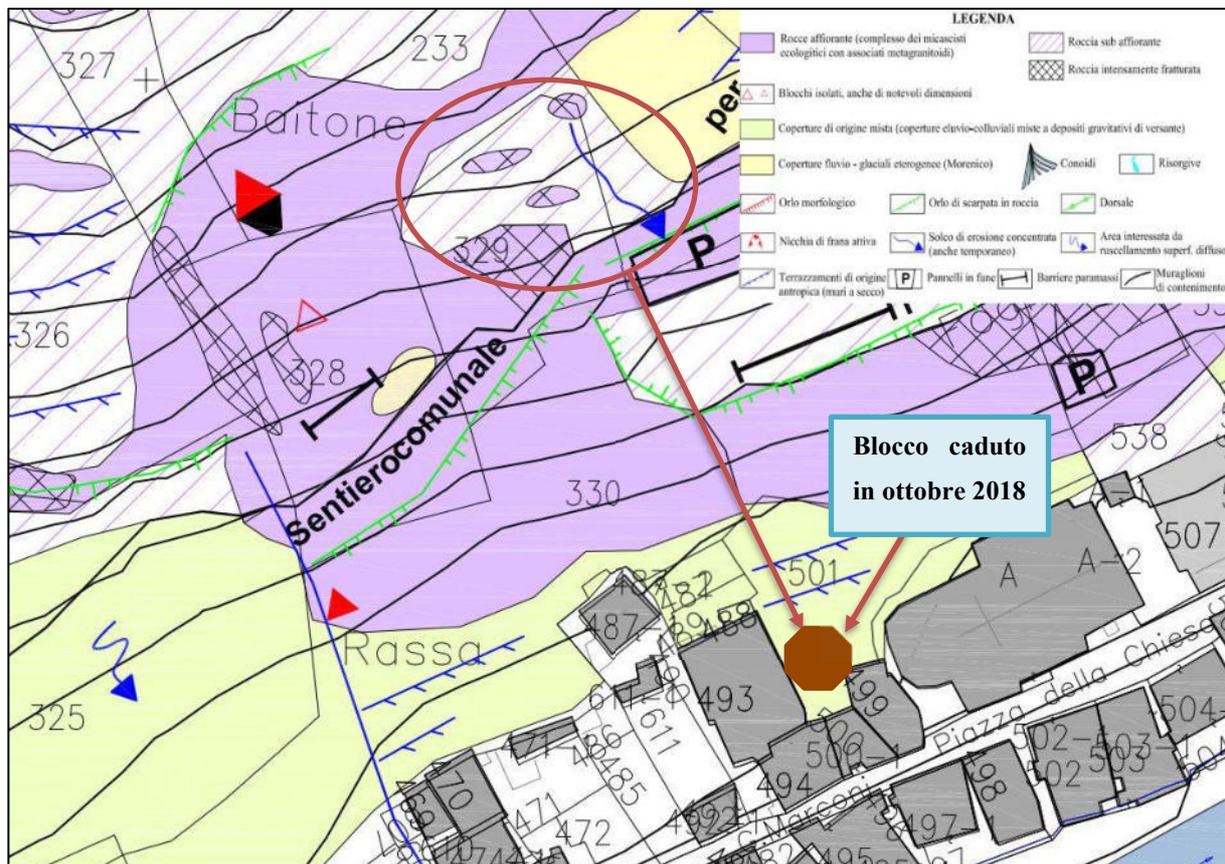


Figura 5.1-1: in merito all'evento di ottobre 2018 (adattato da Tecnosesia, 2019)

Tale fenomeno è avvenuto in concomitanza con un evento di pioggia intenso, avvenuto tra il 27 e il 30 ottobre 2018, del quale si riportano i dati misurati dalle stazioni Arpa Piemonte di Borgosesia (Figura 5.1-2) e di Fobello (Figura 5.1-3).

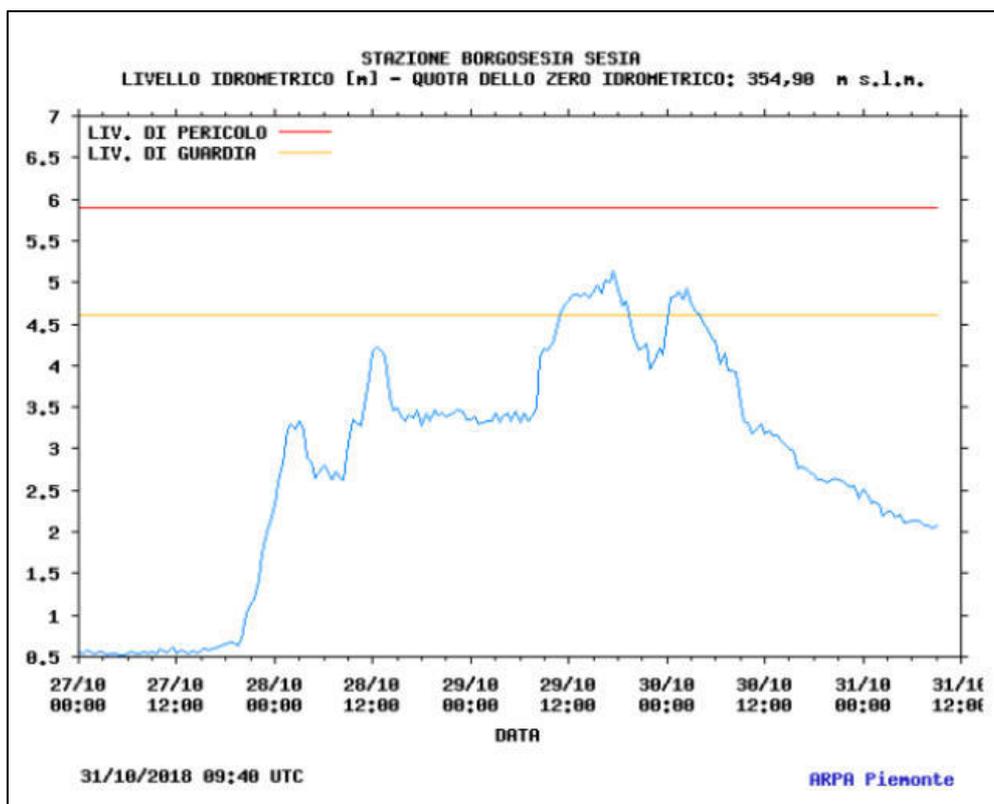


Figura 5.1-2: Dati idrometrici nella stazione del fiume Sesia nella stazione di Borgosesia (Arpa Piemonte, 2018)

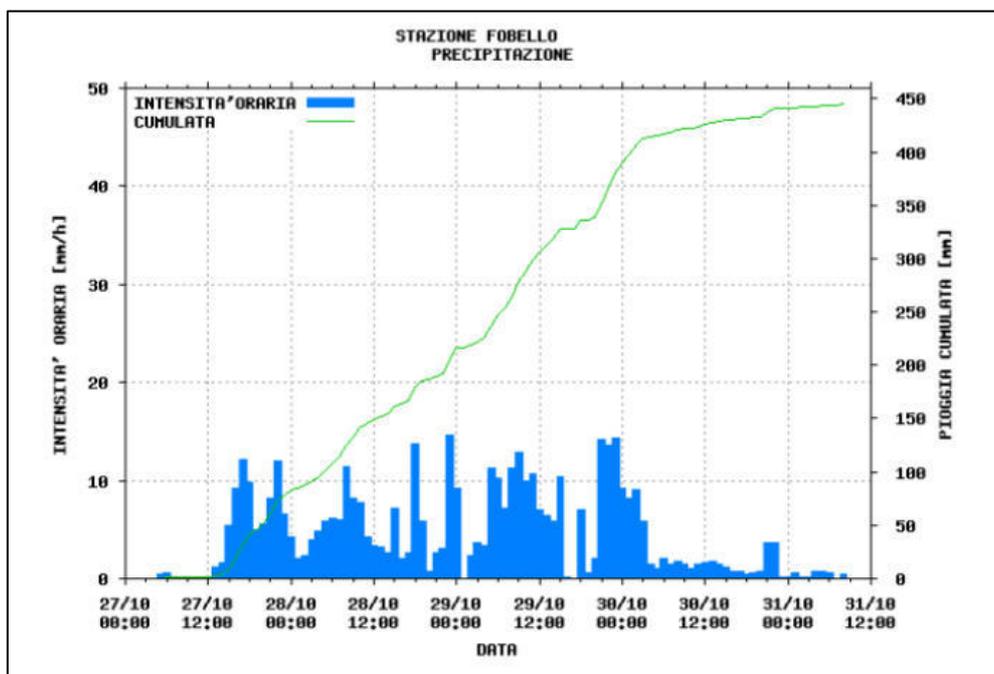


Figura 5.1-3: Dati pluviometrici della stazione Arpa Piemonte di Fobello (Arpa Piemonte, 2018)

Come si può notare in Figura 5.1-2 l'evento di pioggia ha abbondantemente superato il livello di guardia e si è avvicinato in modo significativo al livello di pericolo (Arpa Piemonte, 2018). In Figura 5.1-3 si può invece osservare che lo stesso evento ha portato ad una cumulata di pioggia di circa 450 mm, causando l'innalzamento di diversi torrenti a favorendo il dilavamento dello strato superficiale di terreno del versante, mettendo a nudo potenziali blocchi instabili (Tecnosesia, 2019).

In concomitanza all'intenso evento di pioggia, di carattere alluvionale, a monte dell'abitato è avvenuto il ribaltamento di una ceppaia con conseguente estrazione dell'apparato radicale (Figura 5.1-4). Oltre all'ulteriore esposizione di blocchi instabili, la rimozione dell'apparato radicale ha come conseguenza il mancato effetto stabilizzante sul versante oggetto di studio e la creazione di vie preferenziali per l'infiltrazione dell'acqua, aggravando ulteriormente le condizioni di stabilità.



Figura 5.1-4: Ceppaia ribaltata durante l'evento meteorico tra 27 e 30/10/2018 (Tecnosesia, 2019)



Figura 5.1-5: Panoramica del versante a monte della Chiesa di Santa Croce in località Centro (Tecnosesia, 2019)



Figura 5.1-6: Zona di arresto del blocco (Tecnosesia, 2019)

Come sopra introdotto, nella notte tra il 29 ed il 30/10/2018 un blocco di circa 0,10 m³ si è distaccato dal versante e si è mosso verso valle, arrestandosi poi in prossimità degli edifici adiacenti alla Chiesa di Santa Croce, la cui vista dall'abitato è riportata in Figura 5.1-5.

Il blocco si è arrestato senza creare danni a persone o cose nella posizione indicata in Figura 5.1-6, nella quale è stato rinvenuto al mattino seguente.

Riferendosi nuovamente alla Figura 5.1-1, dove è riportato uno stralcio della carta geomorfologica in scala 1:1000 e redatta dallo studio Tecnosesia nell'aprile 2019, è possibile osservare le caratteristiche della superficie del versante (legenda in alto a destra nella figura), la zona di distacco e di arresto del blocco, nonché la ricostruzione percorso seguito. Il distacco è avvenuto in prossimità delle zone di roccia altamente fratturata localizzate nella particella catastale 329 (ellisse rosso) e si è arrestato in corrispondenza dell'ottagono marrone, tra le particelle catastali 493 e 499, dopo un percorso sostanzialmente rettilineo, guidato da un canale naturale presente nel versante stesso.

I dati finora esposti verranno utilizzati come parametri di riferimento per la taratura della back analysis sul software Rockyfor3D per la calibrazione dei parametri di scabrezza, compatibilmente con quanto osservato in situ.

5.2. Back Analysis dell'evento del 30/10/2018

Nella procedura di taratura dei parametri di scabrezza verranno seguite diverse fasi che partono dalla creazione dei file di input, passando attraverso l'esecuzione delle simulazioni con Rockyfor3D ed arrivando all'analisi degli output e loro comparazione con le caratteristiche reali dell'evento. Le analisi verranno condotte in maniera iterativa, variando ad ogni simulazione i parametri di scabrezza del versante fino alla completa simulazione di quanto osservato in situ.

5.2.1. Caricamento delle mappe di base

Per l'analisi in oggetto è necessario caricare sul software l'ortofoto del sito (Ortofoto Google 2016) e il DTM di risoluzione 5x5 m (Regione Piemonte).

Per quanto riguarda l'ortofoto essa è stata inserita sul software QGIS tramite il plugin *QMS* (*Quick Map Service*) attraverso il comando *Web* → *QuickMapServices* → *Search QMS* (Figura 5.2-1).

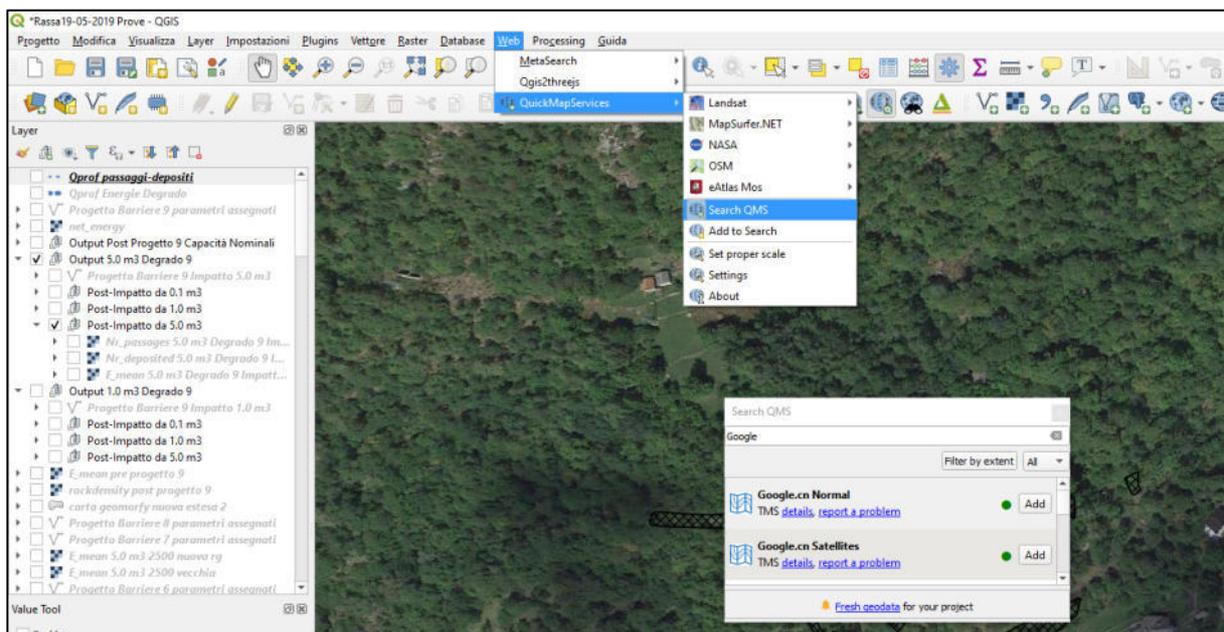


Figura 5.2-1: Caricamento dell'ortofoto Google 2016

In seguito attraverso il pannello di ricerca del plugin *QMS* è stato possibile aggiungere, grazie al comando *add*, l'Ortofoto Google 2016 come mappa raster (Figura 5.2-2). Il sistema di riferimento adottato è l'EPSG:32632, WGS 84 / UTM 32 N in modo da fornire una corretta georeferenziazione all'ortofoto.

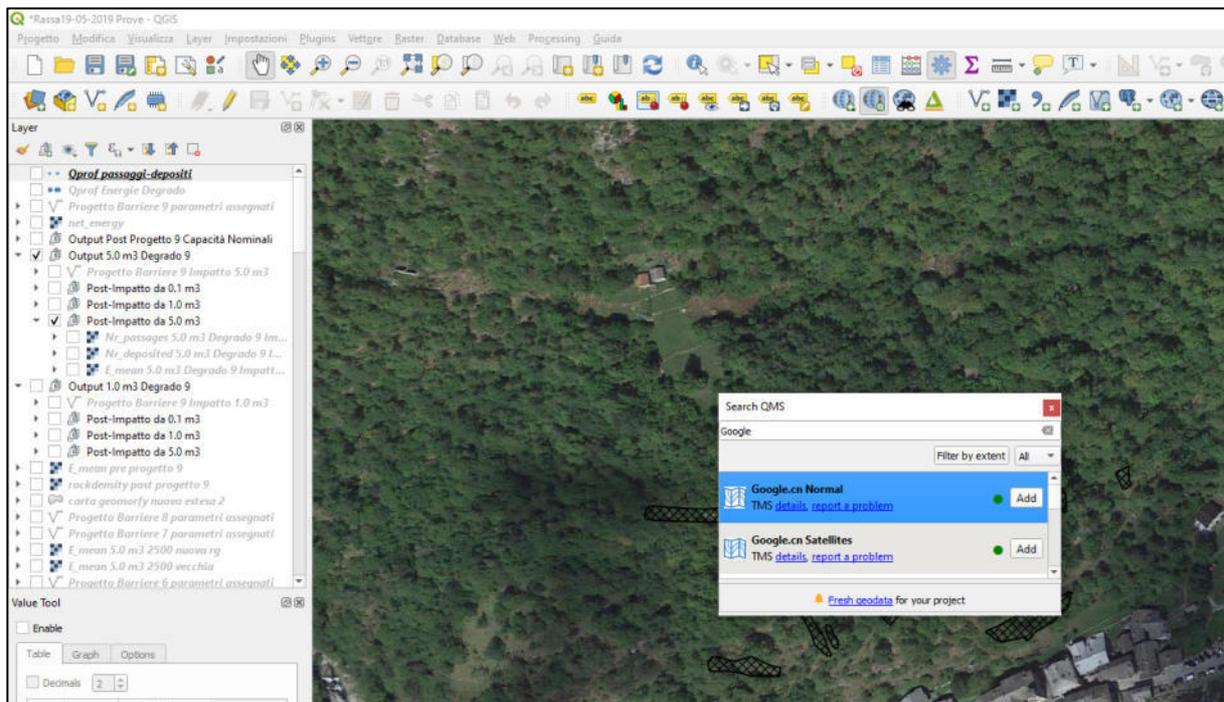


Figura 5.2-2: Caricamento dell'Ortofoto Google 2016

5.2.2. Creazione dei raster di input

Per l'esecuzione delle simulazioni è necessario procedere, come descritto nel Capitolo 3, alla creazione delle mappe raster richieste in input da Rockyfor3D e rappresentanti le principali caratteristiche del versante. Di seguito è riportato un riepilogo dei file appena menzionati (Figura 5.2-3).

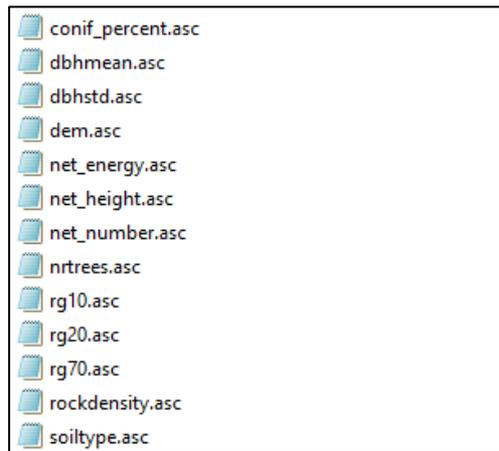


Figura 5.2-3: File raster di input

Per la creazione di tali file è stato utilizzato software libero QGIS (Versione 3.4.7) nel quale, attraverso file vettoriali (Figura 5.2-4) è possibile delimitare le diverse zone del versante, aventi ciascuno uno specifico soiltype come descritto dal manuale di Rockyfor3D v5.1, ed assegnare le caratteristiche desiderate attraverso una tabella attributi (Figura 5.2-5), così come dedotte dai documenti redatti dallo studio Tecnoesia (2019) e dalle simulazioni iterative di back analysis.

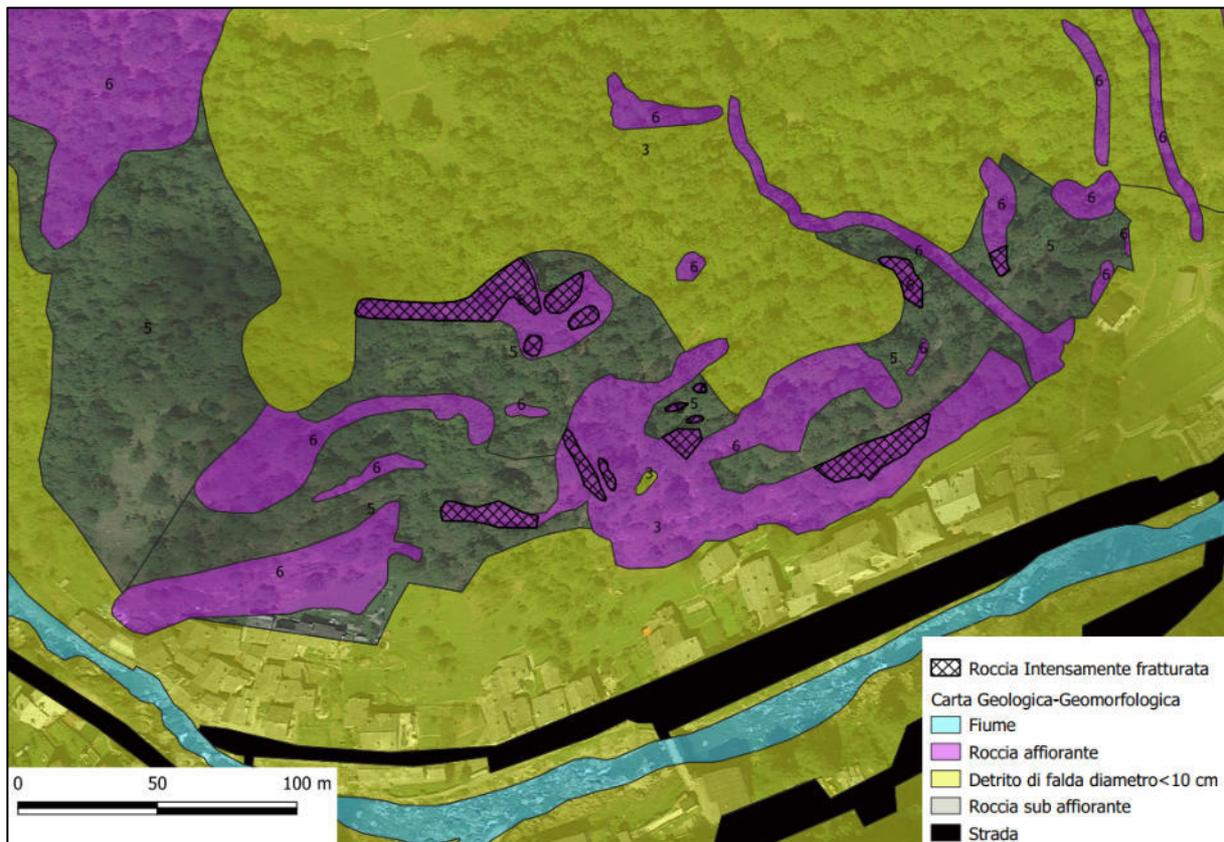


Figura 5.2-4: Discretizzazione del versante

carta geomorfy nuova estesa 2 :: Totale degli elementi: 59, Filtrati: 59, Selezionati: 0

	id	rg10	rg20	rg70	Area	Soiltype
1	9	0,18	0,15	0,12	6697,17	6
2	8	0,18	0,15	0,12	351,68	6
3	7	0,18	0,15	0,12	283,51	6
4	6	0,18	0,15	0,12	184,49	6
5	59	0,00	0,00	0,00	896,69	7
6	58	0,00	0,00	0,00	1702,76	7
7	57	0,21	0,13	0,12	72371,07	3
8	56	0,21	0,13	0,12	3571,80	3
9	55	0,21	0,13	0,12	634,95	3
10	54	100,00	100,00	100,00	8632,58	0
11	52	0,21	0,13	0,12	32117,62	3

Figura 5.2-5: Tabella attributi della tipologia di terreno

Oltre alle tipologie di terreno (soiltype) è stato necessario collocare la nicchia di distacco e le barriere paramassi esistenti (Figura 5.2-4) attraverso il comando *Georeferencer* (Georeferenziatore), che attraverso la corrispondenza tra punti di coordinate note sull'ortofoto e i medesimi riportati sulla carta geomorfologica redatta dallo studio Tecnosesia, ha permesso di caricare sul software tali geometrie e di inglobarle nel modello (freccie rosse in Figura 5.2-7). Le barriere utilizzate sono già indicate in Figura 4.3-4

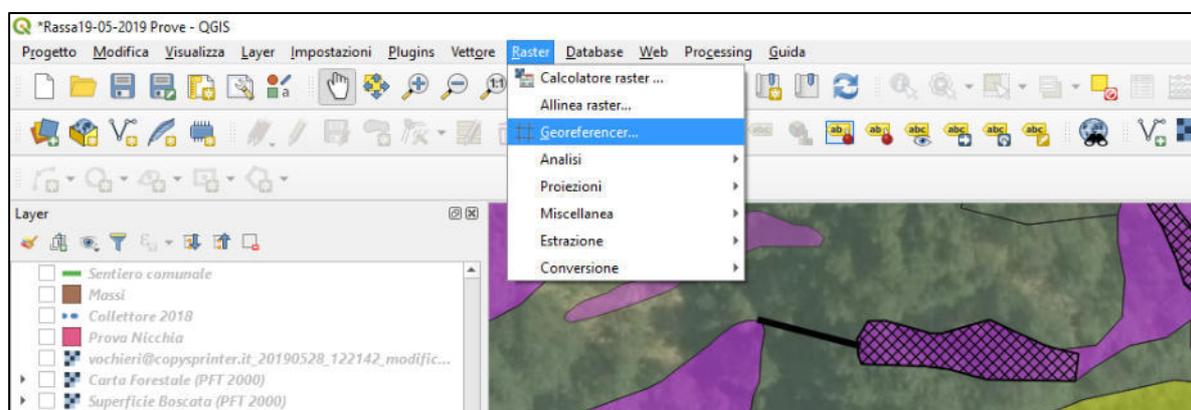


Figura 5.2-6: Comando Georeferencer

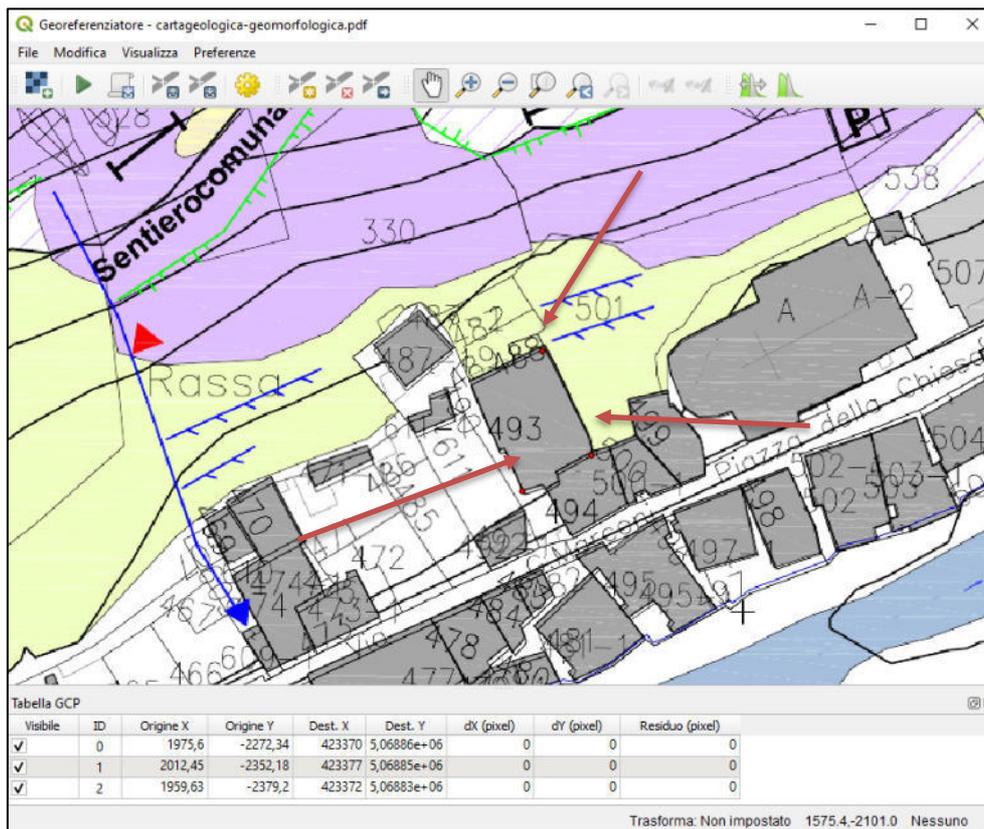


Figura 5.2-7: Corrispondenza dei punti tra carta geomorfologica e ortofoto



Figura 5.2-8: Copertura forestale sul versante

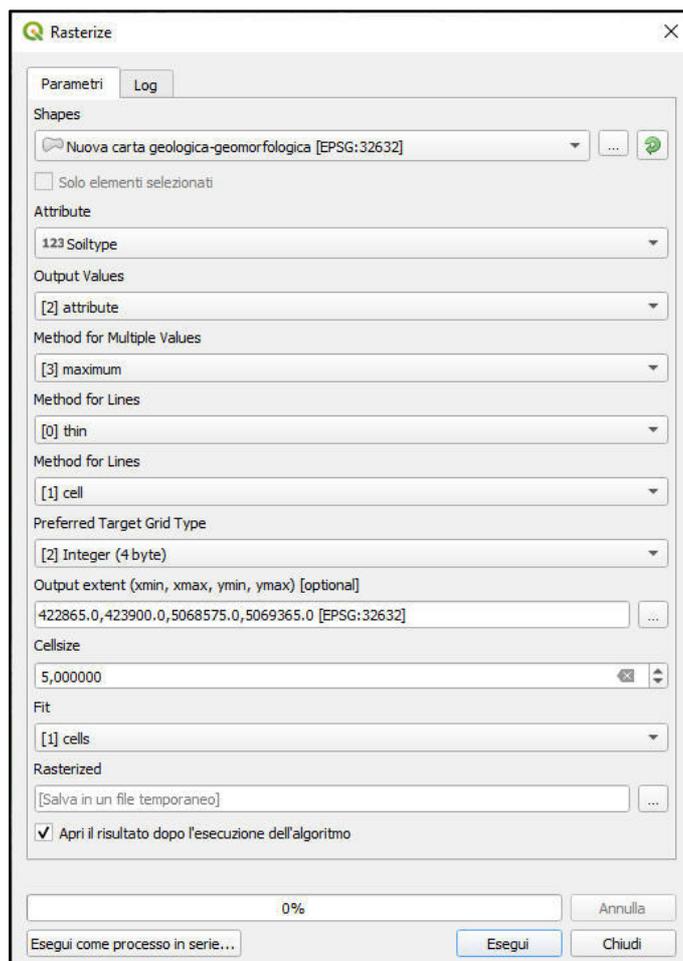


Figura 5.2-9: Esecuzione del comando Rasterize

Ulteriore informazione necessaria è la presenza della vegetazione, discretizzata allo stesso modo del soiltype, ovvero attraverso un file vettoriale, ed il cui risultato è riportato in Figura 5.2-8. Gli attributi assegnati alla copertura forestale sono i medesimi descritti nel Capitolo 3.

Al termine della caratterizzazione vettoriale del versante è possibile generare le mappe raster attraverso il comando *Rasterize*, dal quale è possibile settare l'attributo da assegnare alla mappa, la sua risoluzione e il sistema di riferimento in modo che tali file siano geometricamente e spazialmente compatibili con i file vettoriali dai quali discendono (Figura 5.2-9).

L'ulteriore step da seguire per rendere i file raster compatibili con Rockyfor3D è quello di convertirli in formato ASCII GRID attraverso il comando *Raster* → *Conversione* → *Translate* (Figura 5.2-10), ottenendo in output un file in formato .ASC (vedi Figura 5.2-3). Il risultato visualizzato su QGIS è riportato in Figura 5.2-11

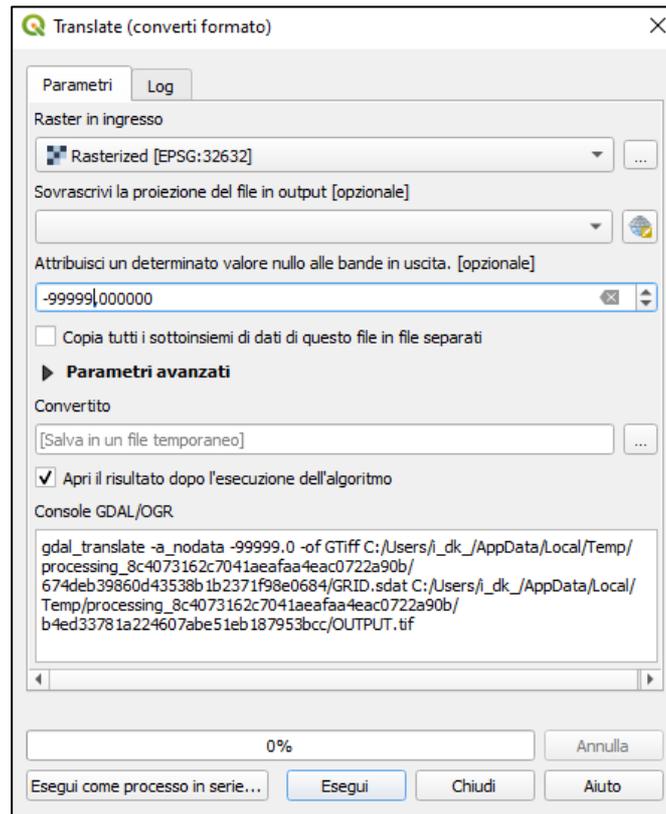


Figura 5.2-10: Conversione dei raster in formato ASCII GRID



Figura 5.2-11: Raster del soiltype in formato ASCII GRID utilizzato in Rockyfor3D

5.2.3. Parametri di scabrezza e tipologia di suolo

In primo luogo per lo svolgimento delle simulazioni sono stati assegnati dei parametri di primo tentativo desunti dalla guida al software di Rockyfor3D (Versione 5.1) che sono stati poi variati in maniera iterativa in funzione della compatibilità con quanto osservato nell'evento reale del 30/10/2018. Di seguito vengono riportate le mappe raster relative alle tre tipologie de scabrezza del versante Rg70, Rg20 ed Rg10 (Figura 5.2-12, Figura 5.2-13 e Figura 5.2-14).

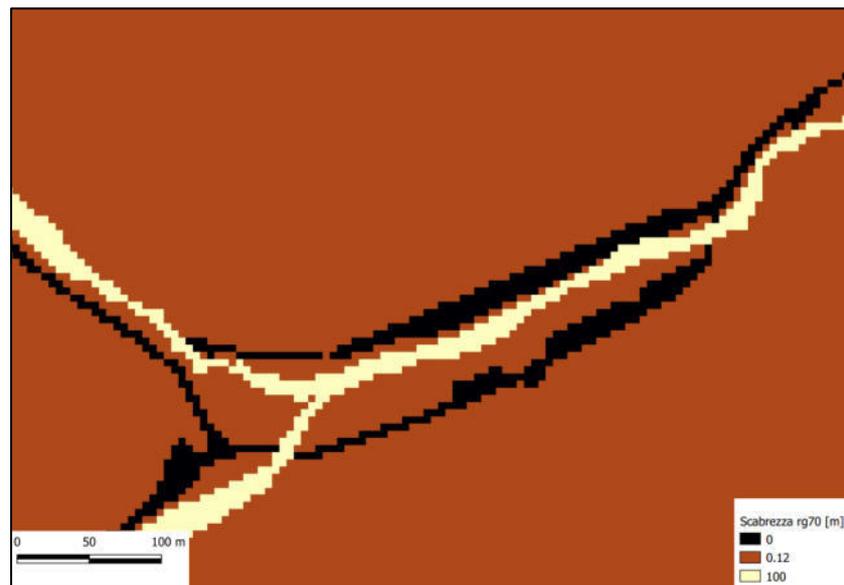


Figura 5.2-12: Mappa raster Rg70



Figura 5.2-13: Mappa raster Rg20

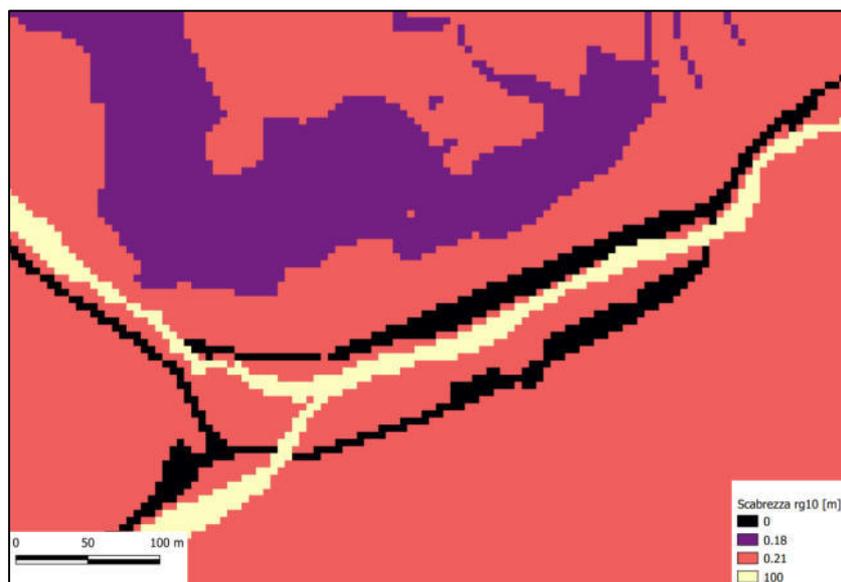


Figura 5.2-14: Mapa raster Rg10

I valori riportati si riferiscono all'ultima analisi, ovvero quella che dopo numerose iterazioni ha portato ai parametri di scabrezza che meglio riproducono il fenomeno.

La scabrezza del versante è stata principalmente differenziata in termini di soiltype 3, 5 e 6 (Figura 5.2-4, Figura 5.2-11) in quanto queste tipologie di terreno sono quelle coinvolte nel fenomeno di caduta massi del 30/10/2018. In Tabella 5.2-1 è riportata la classificazione del soiltype secondo il manuale del software Rockyfor3D (versione 5.1).

Per quanto riguarda la scabrezza del soiltype 3 è stato assegnato un set di parametri rg10, rg20 e rg70 compatibile con quanto osservato in sito e quanto riportato con dettagli fotografici nella relazione tecnica dello studio Tecnoesia (2019) di cui uno stralcio è riportato in Figura 5.2-15.

Per quanto riguarda le tipologie di soiltype 5 e 6, entrambe riguardanti roccia (Tabella 5.2-1) è stato scelto di assegnare i medesimi coefficienti di scabrezza in quanto le due tipologie si distinguono esclusivamente per una copertura di materiale fine di degradazione meteorica nel soiltype 5, mantenendo le proprie scabrezze (Figura 5.2-16 e Figura 5.2-17). La distinzione tra i due tipi di suolo è effettuata dall'assegnazione del soiltype nella mappa raster, che ne definisce il coefficiente di restituzione normale (Tabella 5.2-1).

Tipo suolo	Descrizione suolo	R _n medi	R _n
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 5.2-1: Soiltype adottati dal software Rockyfor3D (Versione 5.1)



Figura 5.2-15: Dettaglio di scabrezza del soiltype 3 (Tecnosesia, 2019)



Figura 5.2-16: Esempio di scabrezza del soiltype 5 e 6 - 1 (Tecnosesia, 2019)



Figura 5.2-17: Esempio di scabrezza del soiltype 5 e 6 - 2 (Tecnosesia, 2019)

I risultati della back analysis, in termini di scabrezze, sono riportati nella Tabella 5.2-2:

Soiltype	rg10 [m]	rg20 [m]	rg70 [m]
3	0.21	0.13	0.12
5-6	0.18	0.15	0.12

Tabella 5.2-2: Parametri di scabrezza ottenuti dalla back analysis

5.2.4. Copertura forestale

Per quanto riguarda la copertura forestale il versante è completamente ricoperto da alberi ed è interessato da una tipologia di piante ad alto fusto e piccolo diametro con alcuni esemplari di grandi dimensioni (bosco misto a latifoglie decidue tra cui castagno, nocciolo, rovere, betulla e ontano bianco, Tecnosesia, 2019).

Per la determinazione della densità della vegetazione è stata delimitata un'area di 40 m² ritenuta rappresentativa del versante e nel quale è stato misurato il diametro di tutti gli alberi inclusi. È stato misurato un numero di alberi pari a 10 le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 5.2-3.

Alberi	Diametro [cm]
1	39
2	100
3	15
4	15
5	15
6	15
7	15
8	15
9	50
10	50
dbhmean [cm]	33
devstd [cm]	27
%conifere [-]	10

Tabella 5.2-3: Riepilogo del rilievo in situ della vegetazione

Il diametro medio è stato calcolato con la funzione *media* del software Excel, mentre per la deviazione standard è stato utilizzata la funzione *dev.st.c* del medesimo software. Data la prevalente presenza di latifoglie e bosco misto sul versante, è stata assunta una percentuale di conifere pari al 10%. In Figura 5.2-18 e Figura 5.2-19 è riportato un esempio fotografico della vegetazione che ricopre il versante.



Figura 5.2-18: Esempio della tipologia di vegetazione che ricopre il versante – 1



Figura 5.2-19: Esempio della tipologia di vegetazione che ricopre il versante - 2

Il software Rockyfor3D richiede in input una mappa raster nella quale sia riportato il numero di alberi per ettaro [alberi/ha] che è stato ricavato tramite proporzione rispetto all'area rappresentativa sopra citata. Si è ottenuto quanto segue:

$$\frac{n^{\circ} \text{alberi}}{\text{area di riferimento}} = \frac{\text{alberi in un ettaro} = \text{densità alberi}}{1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2} \quad (5.0)$$

E quindi si ha che la densità degli alberi vale:

$$\text{Densità alberi} = \frac{n^{\circ} \text{alberi} \cdot 10000 \text{ m}^2}{\text{area di riferimento}} = \frac{10 \cdot 10000}{40} = 2500 \left[\frac{\text{alberi}}{\text{ha}} \right] \quad (5.1)$$

5.2.5. Definizione della nicchia di distacco

Per la definizione della nicchia di distacco sono state incrociate le informazioni ottenute in situ dallo studio Tecnosesia e le evidenze strutturali dell'ammasso roccioso, in particolare le zone di roccia altamente fratturata (Figura 5.1-1). Il rilievo in situ ha confermato tali informazioni consentendo di posizionare la nicchia di distacco appena al disopra del sentiero comunale per Piana Giacchè in corrispondenza delle zone superiori di roccia altamente fratturata nella particella catastale 329 (Figura 5.2-20).

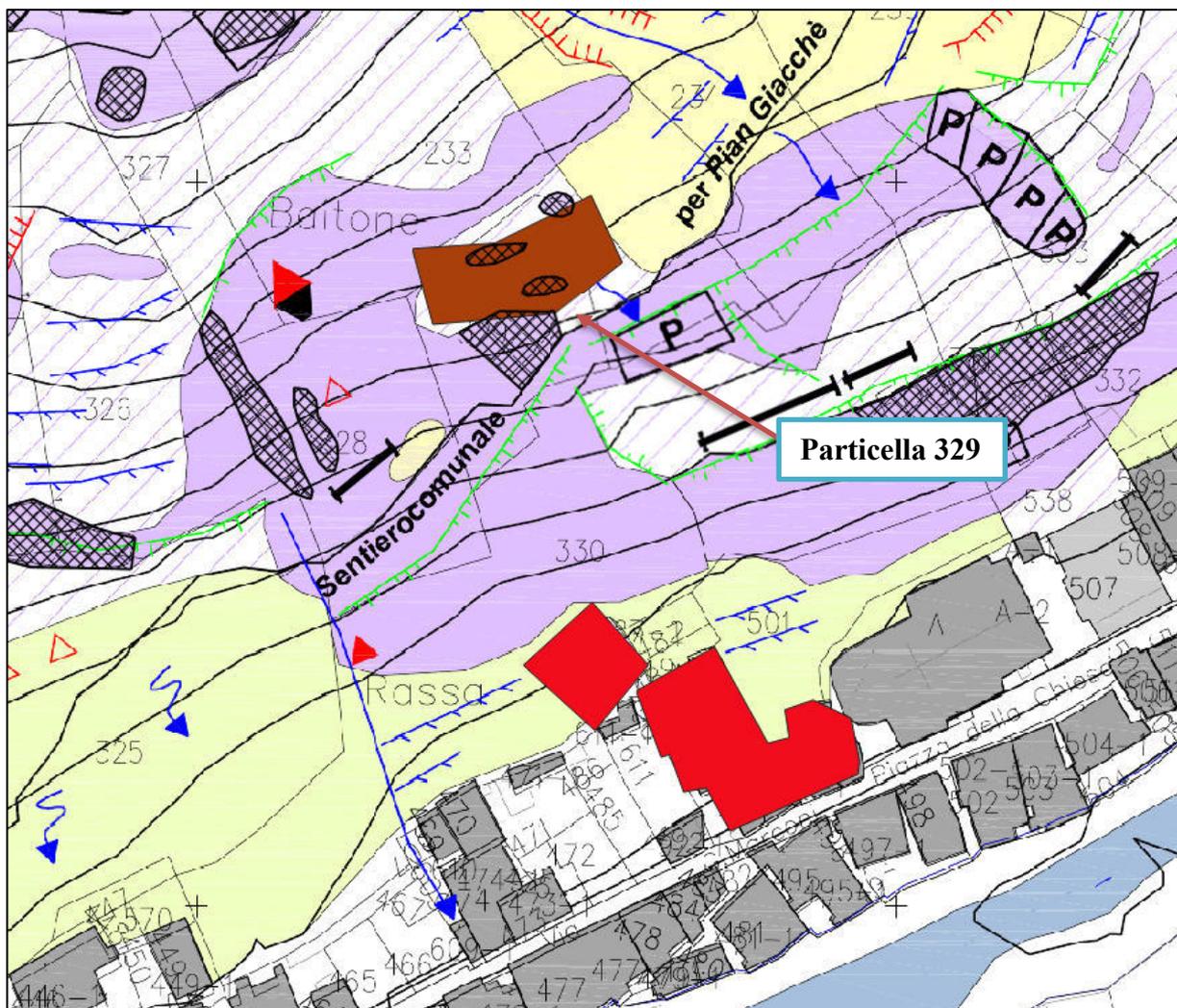


Figura 5.2-20: Posizionamento della nicchia di distacco (Tecnosesia, 2019)

In Figura 5.2-21 è riportata un'immagine relativa all'ammasso di roccia altamente fratturato collocato nella particella catastale 329, osservato durante i rilievi in situ.



Figura 5.2-21: Ammasso roccioso altamente fratturato, nicchia di distacco dell'evento

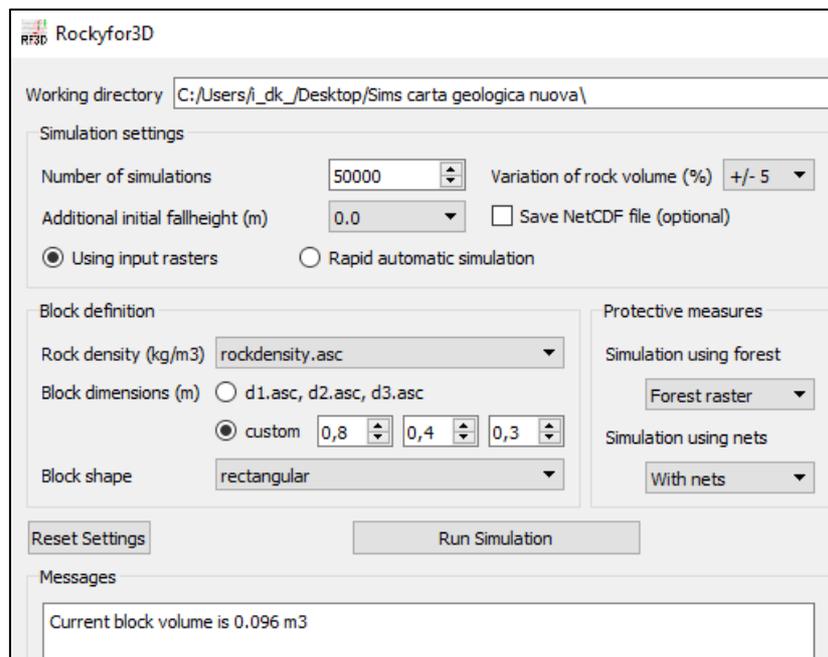


Figura 5.2-22: Interfaccia di Rockyfor3D configurata per le simulazioni di back analysis

La densità della roccia in situ è stata posta pari a 2500 kg/m^3 ed il volume calcolato è di $0,10 \text{ m}^3$, ovvero pari a quello misurato a seguito dell'evento (Figura 5.1-6) di dimensioni pari a $0,80 \cdot 0,40 \cdot 0,30$. Le simulazioni sono state condotte fissandone il numero a 50000 e imponendo una variazione del volume pari al $\pm 5\%$ (Figura 5.2-22).

Nella tabella Tabella 5.2-4 sono riportati i parametri iniziali per le simulazioni già indicati in Figura 5.2-22:

d1 [m]	d2 [m]	d3 [m]	Volume [m^3]	Variazione [%]	Forma	Densità [kg/m^3]	n° simulazioni
0.8	0.4	0.3	0.1	± 5	Rectangular	2500	50000

Tabella 5.2-4: Parametri input per le simulazioni

5.3. Analisi dei risultati delle simulazioni

In questo paragrafo verranno messi in evidenza i caratteri salienti delle mappe raster ottenute in output dalle simulazioni condotte con Rockyfor3D. Particolare attenzione verrà posta nei confronti dei seguenti file:

- *E_mean*: media dei massimi di energia registrati in ogni cella
- *E_95CI*: massimi di energia cinetica registrati in ogni cella
- *V_max*: massimi di velocità registrati in ogni cella
- *Ph_mean*: media delle altezze di volo registrate in ogni cella
- *Ph_95CI*: massimi delle altezze di passaggio registrate in ogni cella
- *Nr_deposited*: numero di blocchi depositati registrato in ogni cella.

Per la descrizione dettagliata delle mappe raster appena elencate si rimanda al Capitolo 3, relativo alla descrizione del software Rockyfor3D. È bene ricordare, che ai fini delle simulazioni, non sono stati considerati gli edifici.

5.3.1. Area di invasione

Per area di invasione si intende la zona interessata dalla propagazione del fenomeno di caduta massi e quindi le massime distanze raggiunte dai blocchi. In merito al fenomeno in esame del 30/10/2018 è stato osservato che il blocco si è arrestato nei pressi degli edifici limitrofi alla Chiesa di Santa Croce (Tecnosesia, 2019) alla quota di circa 922 m.s.l.m. partendo da una nicchia di distacco posta a circa 990 m.s.l.m. con quindi un dislivello pari a circa 67 m. La distanza totale in direzione orizzontale verso valle è pari a circa 68 m (tali misure sono state eseguite sul software QGIS sul DTM con il plugin *Value Tool* e sull'ortofoto con il comando *misura linea*). Ne deriva una pendenza media di circa 45° (il profilo del versante in corrispondenza del percorso seguito è riportato in Figura 5.3-2).



Figura 5.3-1: Area di invasione del fenomeno di propagazione

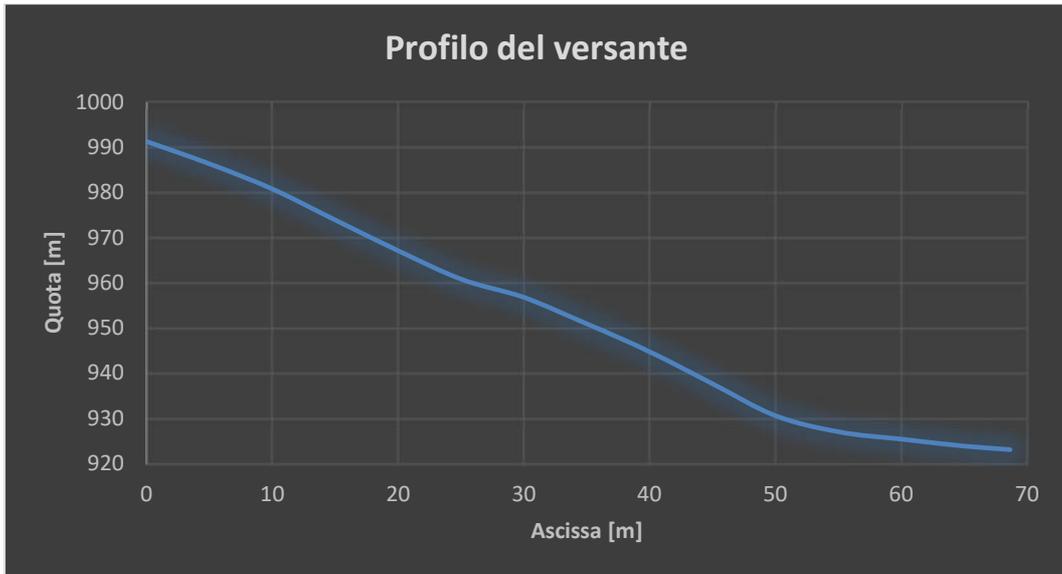


Figura 5.3-2: Profilo del versante lungo il canale dell'evento del 30/10/2018

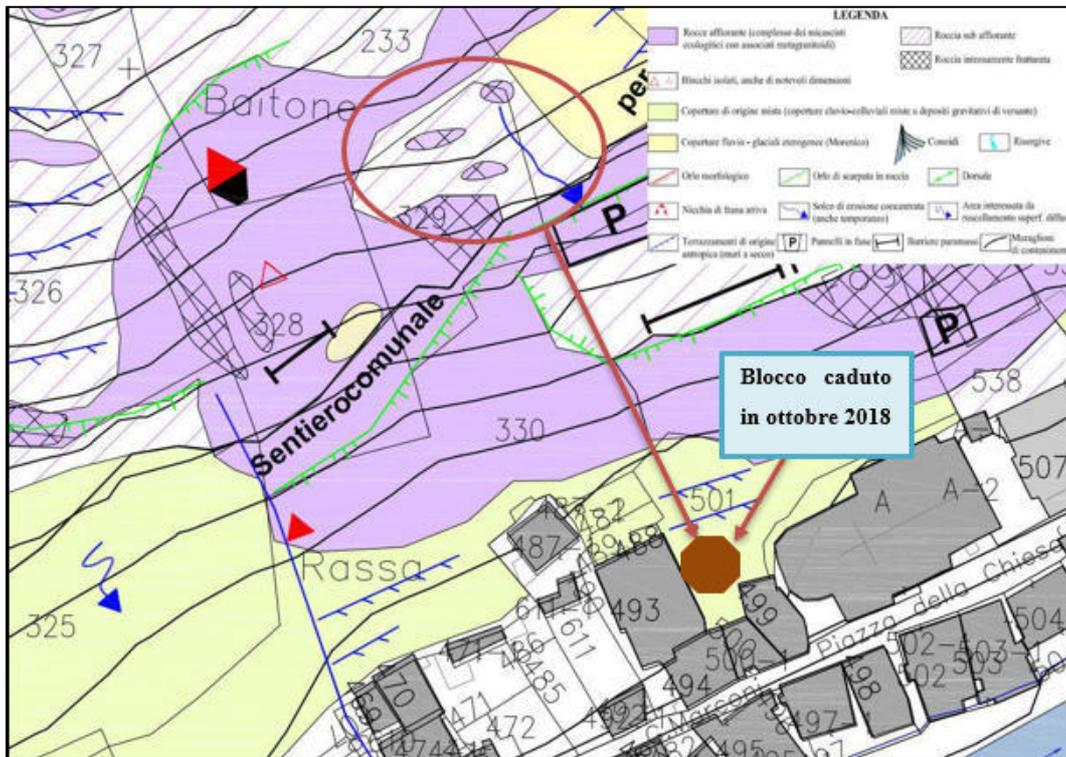


Figura 5.3-3: Configurazione dell'evento del 30/10/2018 (Tecnosesia, 2019)

Nel condurre le simulazioni è stato verificato che l'energia e l'area di invasione fossero compatibili con la mancanza di danno registrata. A titolo semplificativo viene riportata la già esposta configurazione geometrica dell'evento che ha interessato il versante di Rassa in località Centro (Figura 5.3-3 e già precedentemente Figura 5.1-1).

Come si può notare dalla Figura 5.3-1 le zone di arresto si concludono tutte nella zona di effettivo arresto del blocco, a conferma della buona rappresentazione del fenomeno. Si può inoltre osservare che tale evento non è stato influenzato dalla presenza delle opere di difesa, che si trovano ai lati dell'area di invasione propria del fenomeno, evidenziando un canale di passaggio per i blocchi e quindi fonte di rischio per l'abitato. I dati ottenuti confermano le osservazioni di campo effettuate.

5.3.2. Energia cinetica

Trattandosi di un volume ridotto ($0,10 \text{ m}^3$) le energie in gioco sono risultate particolarmente contenute. L'energia è bassa in prossimità della zona di distacco, dove si attesta intorno ai 10 kJ per poi crescere nella zona centrale raggiungendo un picco di circa 25 kJ e diminuisce nuovamente in prossimità della zona di arresto, dove l'ordine di grandezza è nuovamente di circa 10 kJ.

Il picco della media dei massimi (E_{mean} , Figura 5.3-4) si verifica, come già esposto, nella zona centrale della zona di propagazione, dove l'acclività è particolarmente elevata (circa 52°). A tale scopo è stata creata una mappa delle pendenze in formato raster a partire dal DTM della zona (Figura 5.3-5), che conferma presenza di tali zone fortemente pendenti a ridosso dell'abitato.

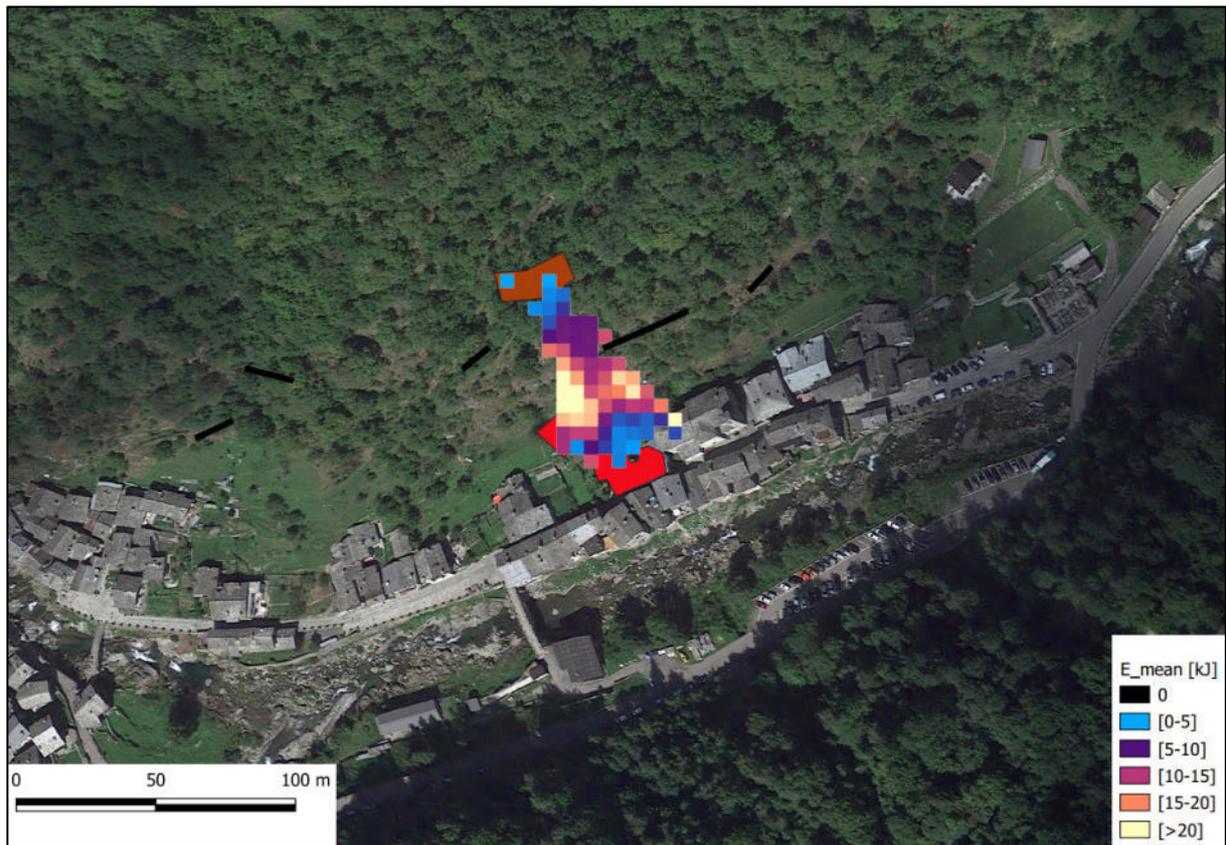


Figura 5.3-4: Andamento della media dei massimi di energia E_{mean} [kJ]

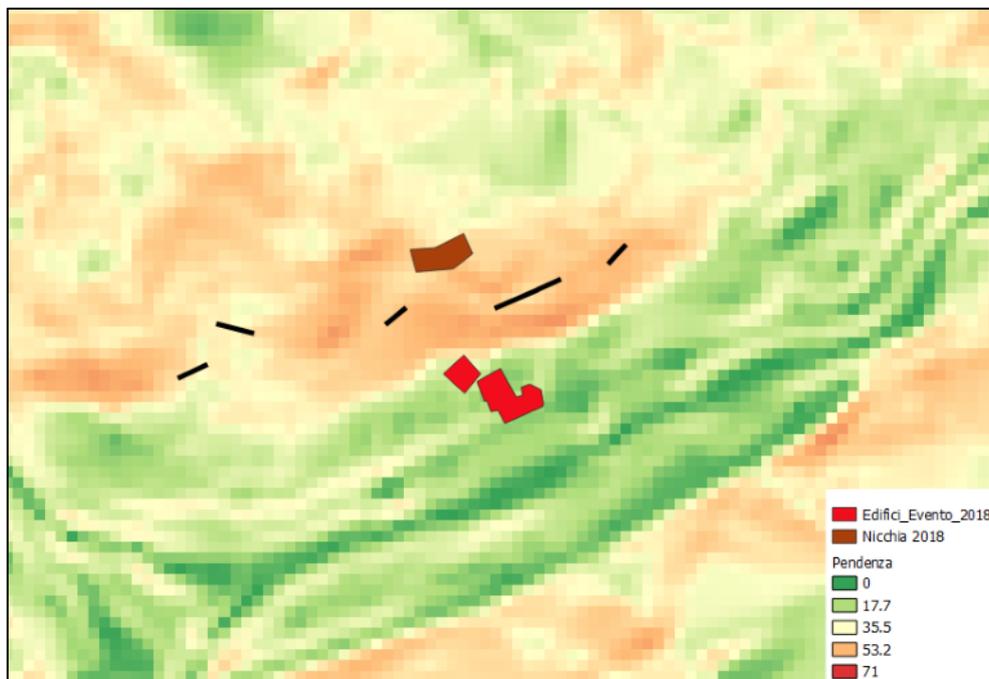


Figura 5.3-5: Mappa raster delle pendenze [°]

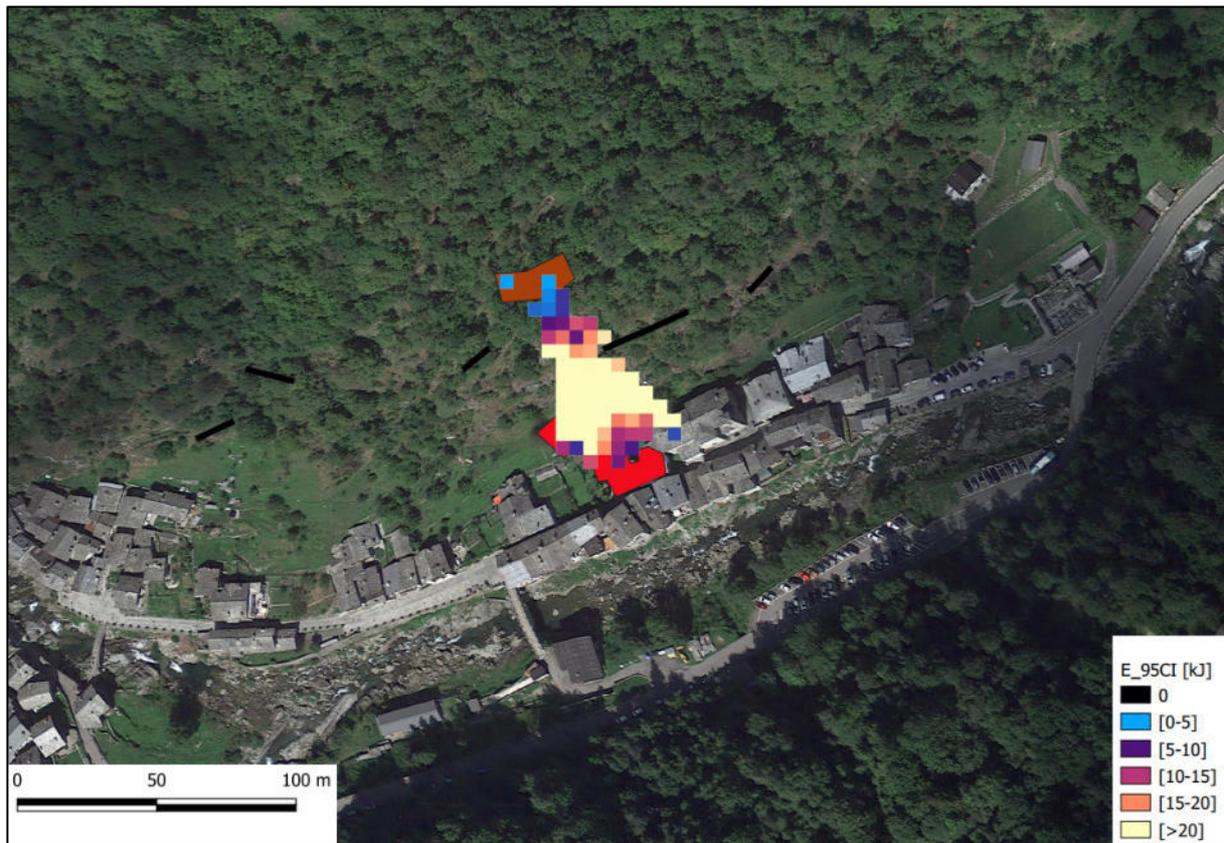


Figura 5.3-6: Andamento dei massimi di energia E_{95CI} [kJ]

Per quanto riguarda invece la mappa raster E_{95CI} che rappresenta i massimi di energia registrati in ogni cella, si può notare un significativo aumento delle energie, fino ad un picco di 41 kJ sempre nella zona intermedia della zona di propagazione, mentre i valori minimi, in prossimità della nicchia di distacco e della zona di arresto si attestano intorno ai 10 kJ. Si può comunque notare che per la mappa E_{95CI} la zona ad energie più elevate è maggiore rispetto alla mappa E_{mean} e si concentra nella zona intermedia di propagazione dove l'acclività è molto elevata (zona gialla a monte degli edifici in Figura 5.3-6) e nella quale i blocchi sono in grado di accumulare energia nonostante l'azione dissipativa perpetrata dalla scabrezza ed inoltre in tale zona viene a mancare il contributo dissipativo degli alberi con minor dissipazione dell'energia.

5.3.3. Velocità

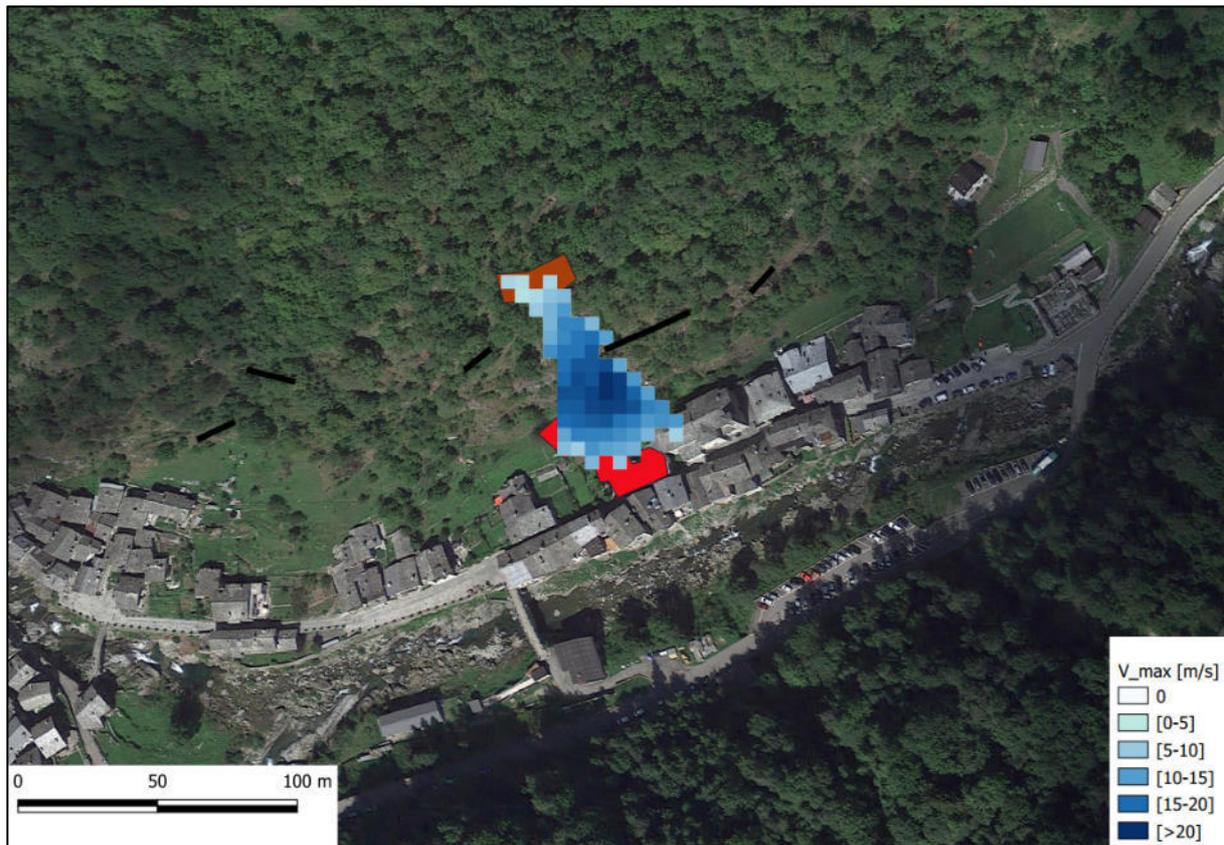


Figura 5.3-7: Andamento dei massimi di velocità V_{max} [m/s]

In merito alle velocità assunte dai blocchi si fa riferimento alla mappa raster V_{max} , che rappresenta i massimi di velocità, in m/s, registrati in ogni cella (Figura 5.3-7).

Si può osservare che, coerentemente con quanto osservato per le energie, i massimi di velocità si osservano nella zona intermedia dell'area di propagazione, con un massimo di circa 27 m/s. La velocità assume valori intermedi, dell'ordine dei 10-13 m/s nelle zone esterne dell'area di propagazione e raggiunge i minimi in prossimità della zona di distacco (non si ha una velocità iniziale impressa) e in prossimità della zona d'arresto, con valori tra i 3 e i 5 m/s. Ancora una volta un ruolo fondamentale è svolto dall'acclività del versante, che consente ai blocchi di raggiungere velocità maggiori.

5.3.4. Altezze di volo

Per quanto riguarda le altezze di volo o di passaggio, si fa riferimento a due mapper raster, analogamente all'energia, Ph_{mean} (Figura 5.3-8) e Ph_{95CI} (Figura 5.3-9) che rappresentano rispettivamente l'altezza di passaggio media e l'altezza di passaggio massima registrate in ogni cella.

Per quanto riguarda l'altezza di passaggio media, Ph_{mean} , si può osservare che le altezze medie di rimbalzo assumono praticamente ovunque valori pari a circa 0,30 m con un picco nella zona intermedia di 0,51 m. Tali valori ridotti si legano principalmente al fatto che i blocchi di volumetrie contenute rotolano e traslano lungo il versante. Situazione analoga si riscontra per i massimi delle altezze di rimbalzo Ph_{95CI} , dove tutta la zona interessata dal fenomeno presenta altezze di rimbalzo di circa 0.90 m con un picco di 1,12 m nella medesima zona dove si raggiunge il picco dell'altezza media di rimbalzo.

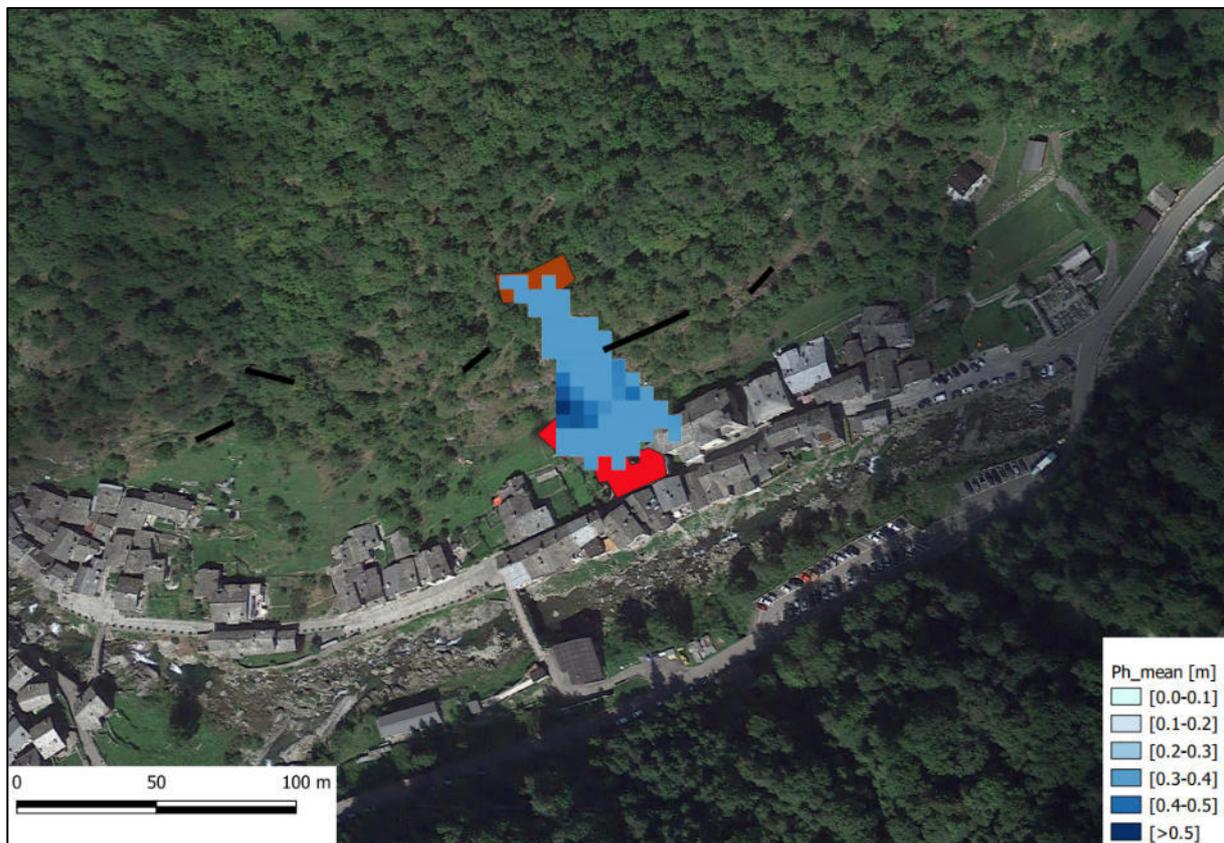


Figura 5.3-8: Andamento delle altezze medie di rimbalzo Ph_{mean} [m]

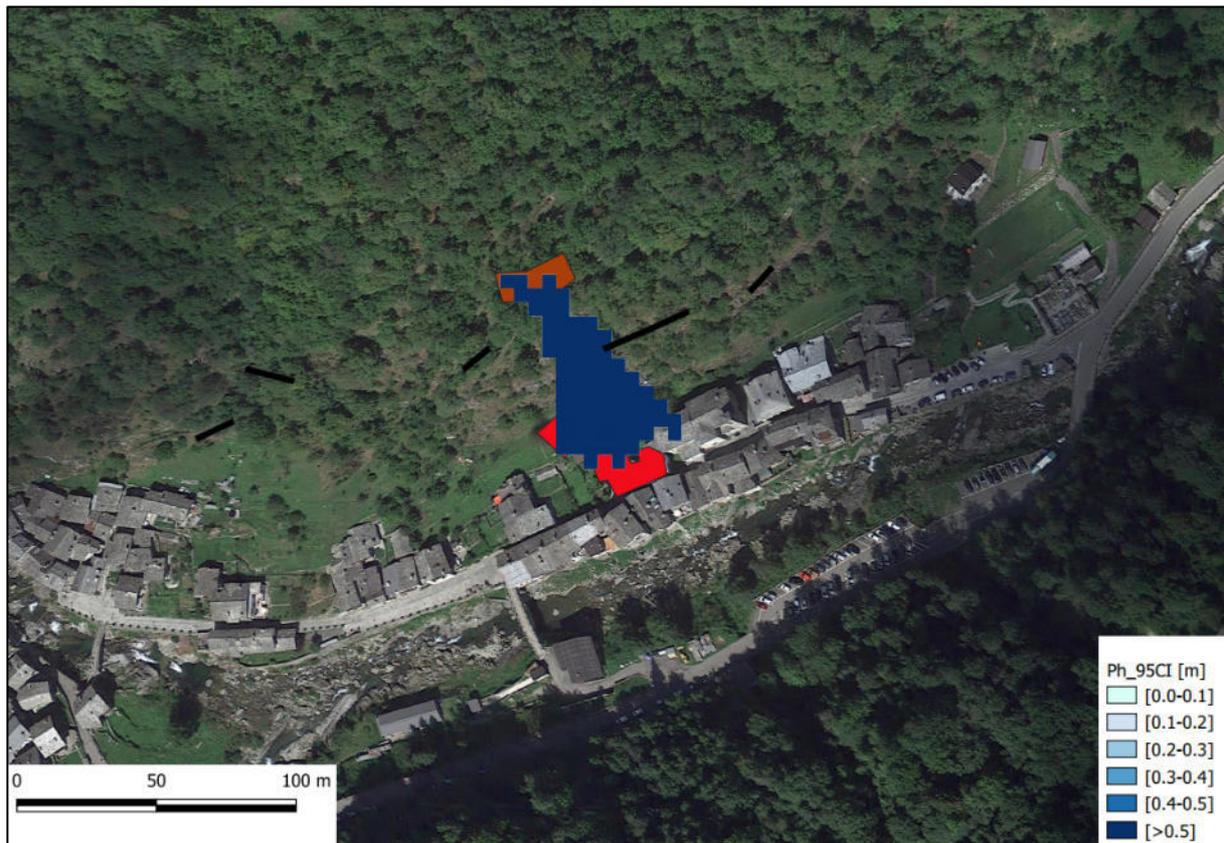


Figura 5.3-9: Andamento delle altezze massime di rimbalzo Ph_{95CI} [m]

5.3.5. Zone di arresto

Le zone di arresto individuano la distribuzione dei depositi, ovvero il numero di blocchi che si sono fermati in una data cella, memorizzati nella mappa raster $Nr_deposited$ (Figura 5.3-10). Grazie a questa mappa raster è quindi possibile individuare tutte le potenziali zone di accumulo dei blocchi caduti durante un evento franoso.

Analizzando la Figura 5.3-10 è possibile notare, in accordo con le mappe raster sopra descritte, che i depositi sono concentrati particolarmente nella zona di distacco, a causa della scabrezza e dell'elevata dissipazione energetica effettuata dagli alberi che ostacolano le piccole volumetrie (come il volume simulato). È stato fissato un limite inferiore di 2000 per il massimo della scala cromatica di Figura 5.3-10 al fine di evidenziare in maniera più efficace le zone dove si concentrano i depositi. In particolare nella zona limitrofa alla zona di distacco si deposita in media l'8% circa dei blocchi (calcolato come rapporto tra il numero di depositi e il numero di blocchi totali simulati, ovvero 50000 simulazioni per 13 celle della nicchia di distacco), mentre

nella zona di arresto si raggiunge un picco di circa 2%, con valori decrescenti allontanandosi da tale punto. Questo dimostra come il blocco distaccatosi il 30/10/2018 si sia arrestato in una delle zone effettivamente più probabili, fatto che avvalorava nuovamente la bontà delle simulazioni.

Allo stesso modo, dove le energie e le velocità raggiungono i picchi, ovvero nella zona intermedia dell'area di propagazione, non vi sono depositi di blocchi, mentre aumentano nuovamente in prossimità degli edifici limitrofi alla Chiesa di Santa Croce.

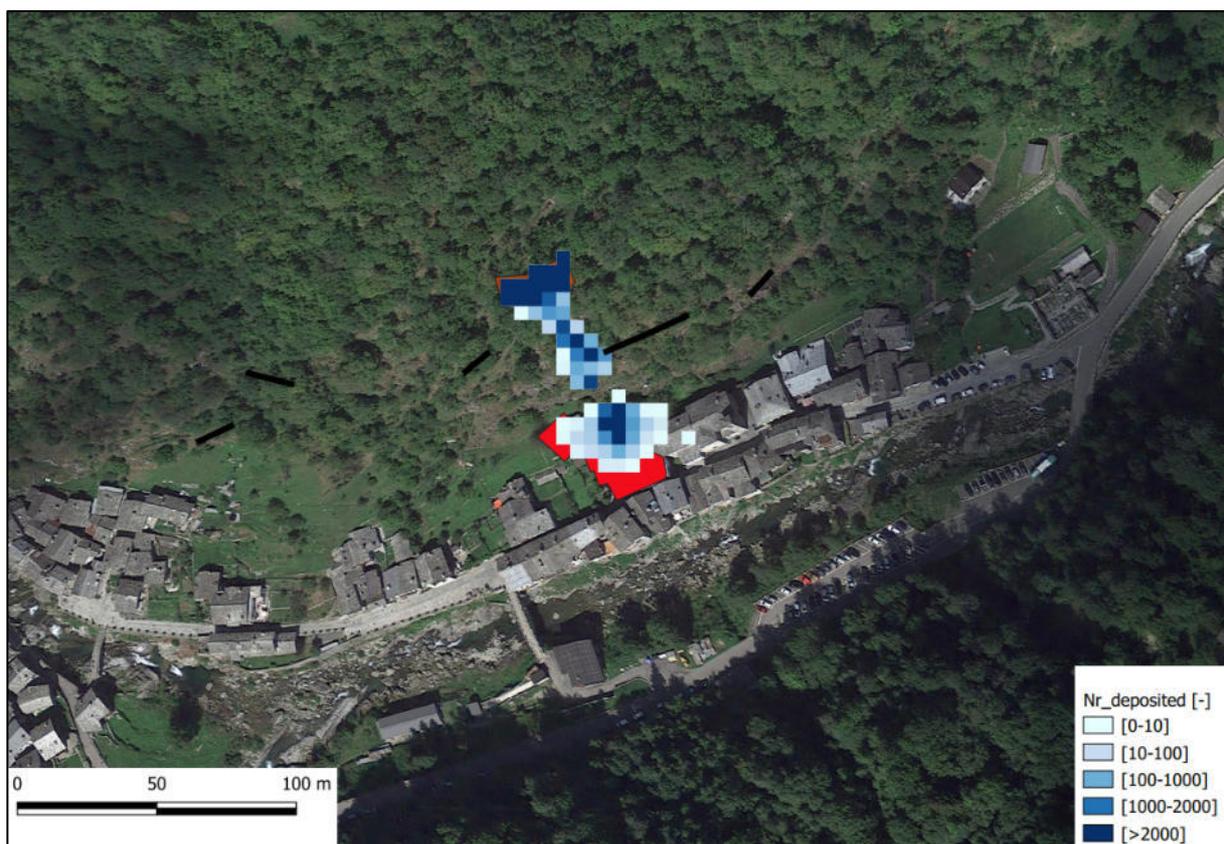


Figura 5.3-10: Distribuzione dei depositi $Nr_deposited [-]$

5.3.6. Collettore sugli edifici

Al fine di analizzare più nel dettaglio il fenomeno in prossimità degli edifici, è stato inserito un collettore, cioè una barriera virtuale di altezza e capacità di assorbimento nulle che funge solo da raccoglitore dei dati cinematici nel punto in cui è posizionato. Dal file di testo che Rockyfor3D fornisce per le simulazioni con barriere è stato possibile ricavare i grafici di frequenza assoluta, relativa e cumulata in termini di energia e velocità dei blocchi. In Figura 5.3-11 è mostrata la posizione del collettore utilizzato per la raccolta dei dati, rappresentato da una linea tratteggiata blu e l'indice 10, mentre le linee nere indicano la posizione delle barriere esistenti nel sito.



Figura 5.3-11: Collettore in prossimità degli edifici limitrofi all'evento del 30/10/2018 (Linea tratteggiata blu)

Delle barriere presenti nel sito, per quanto riguarda l'area di invasione simulata del fenomeno del 30/10/2018, solo quella identificata dall'indice 1 viene coinvolta, ma solo marginalmente, infatti il numero di blocchi su di essa registrati è pari a 298 (0,5%), mentre al collettore 10 vengono registrati 10878 blocchi (2%) (Tabella 5.3-1).

Collettore	Vmax [m/s]	Emax [kJ]	N° Blocchi
1	13.3	26.9	298
10	16.1	46	10878

Tabella 5.3-1: Principali dati raccolti ai collettori coinvolti nell'evento del 30/10/2018

Si può osservare come la velocità massima al collettore 1 sia pari a 13,3 m/s contro i 16,1 m/s registrati al collettore 10, poco prima della zona di arresto, in quanto il blocco ha avuto modo di accumulare ulteriore energia a causa delle elevate pendenze. Queste velocità mostrano valori elevati, ma se associati ai valori di energia, relativamente bassi, sono perfettamente compatibili con la zona di arresto dei blocchi che si trova poco più a valle del collettore, tenendo sempre conto che questi sono i massimi e non le energie assunte da tutti i blocchi (per meglio osservare la distribuzione delle energie e delle velocità si farà riferimento alle frequenze di velocità ed energia). Infatti al collettore 1 si registra un massimo di 26,9 kJ ed un massimo di 46 kJ al collettore 10. Di seguito vengono mostrati i grafici di frequenza relativi ai collettori appena menzionati (Figure da Figura 5.3-12 a Figura 5.3-19).

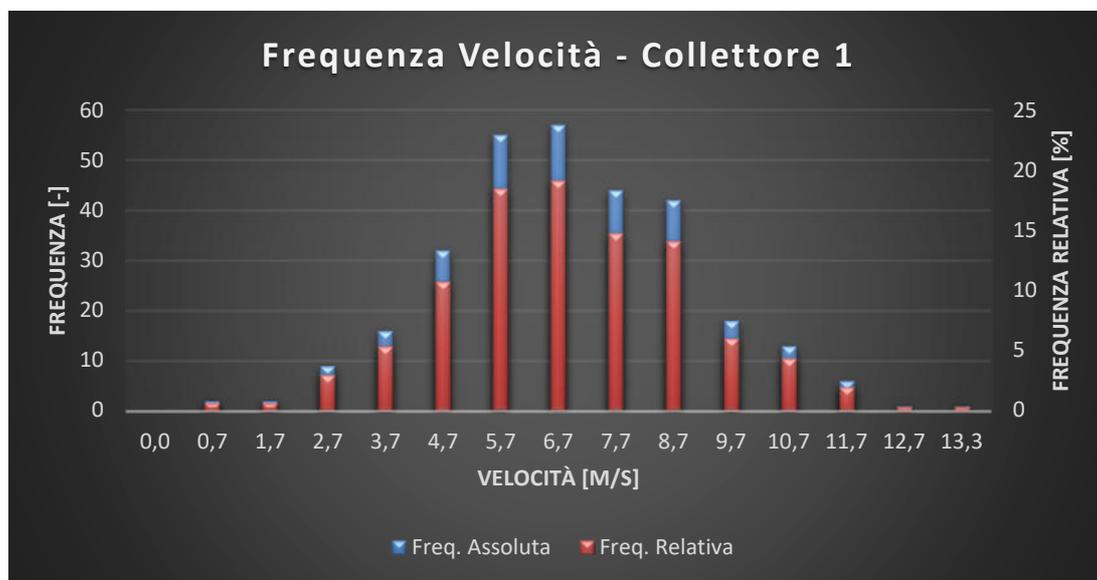


Figura 5.3-12: Frequenza della velocità - Collettore 1

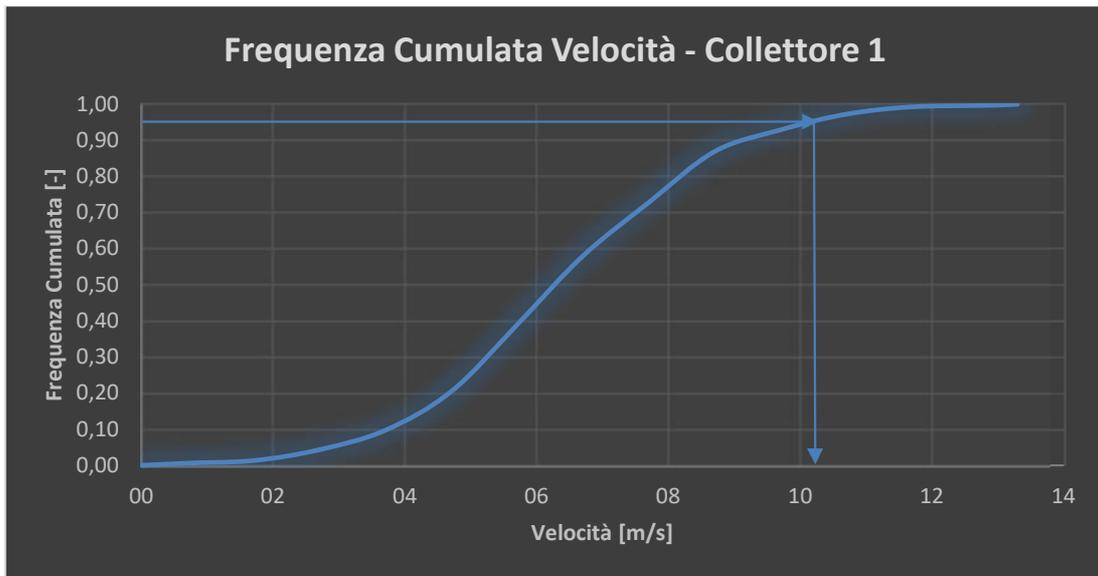


Figura 5.3-13: Frequenza cumulata della velocità - Collettore 1

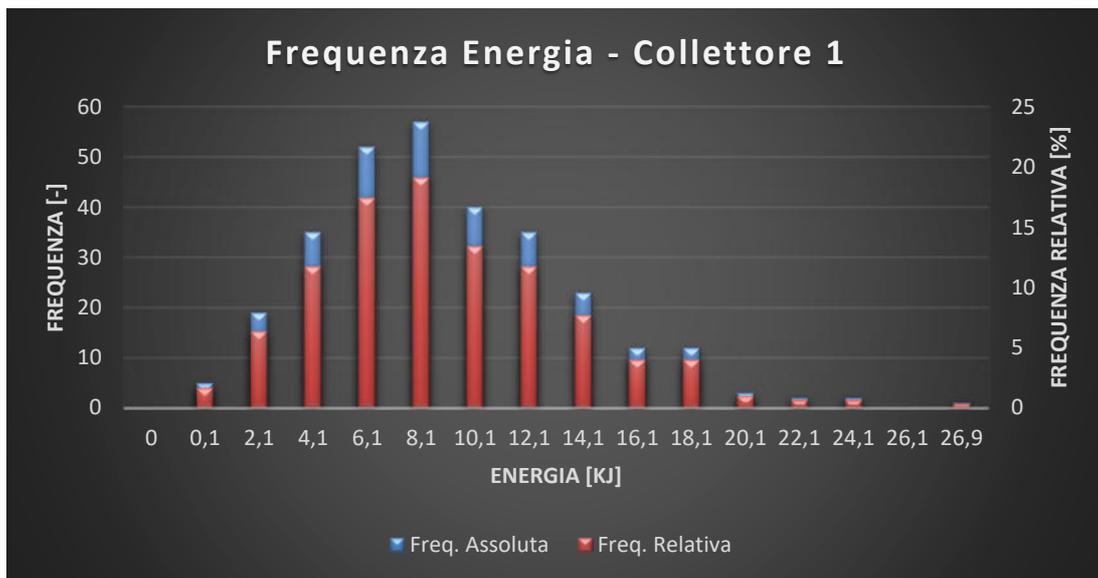


Figura 5.3-14: Frequenza dell'energia - Collettore 1

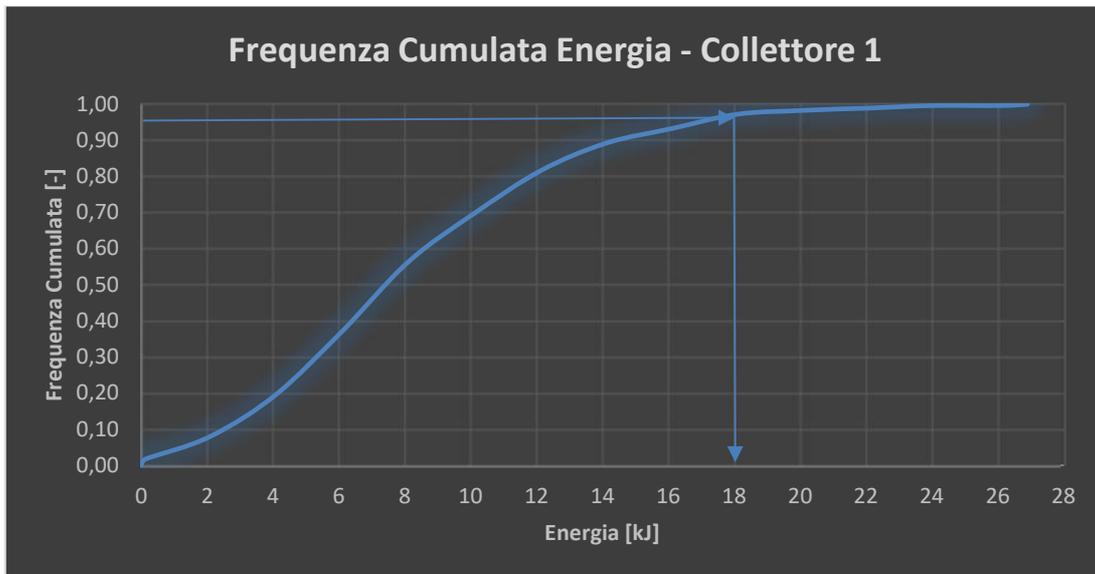


Figura 5.3-15: Frequenza cumulata dell'energia - Collettore 1

In primo luogo, descrivendo il collettore 1, ovvero l'unica barriera marginalmente coinvolta dall'area di invasione, si può osservare che la velocità che si manifesta maggiormente è pari 6,7 m/s con una frequenza di 57, ovvero del 19% circa (Figura 5.3-12). La distribuzione è sostanzialmente simmetrica attorno al valore più frequente, con frequenze inferiori e decrescenti verso gli estremi della distribuzione. Per quanto riguarda la frequenza cumulata si può osservare che al 95% corrisponde una velocità di circa 10,6 m/s (Figura 5.3-13).

In termini di energie si può constatare che l'energia maggiormente manifestata dal fenomeno è pari a 8,1 kJ, con una frequenza di 57, ovvero del 19% circa (Figura 5.3-14). La distribuzione è sostanzialmente simmetrica rispetto al valore più frequente, con frequenze minori e decrescenti verso gli estremi della distribuzione. Per quanto riguarda la frequenza cumulata si può osservare che al 95% corrisponde un'energia di circa 18,1 kJ (Figura 5.3-15).

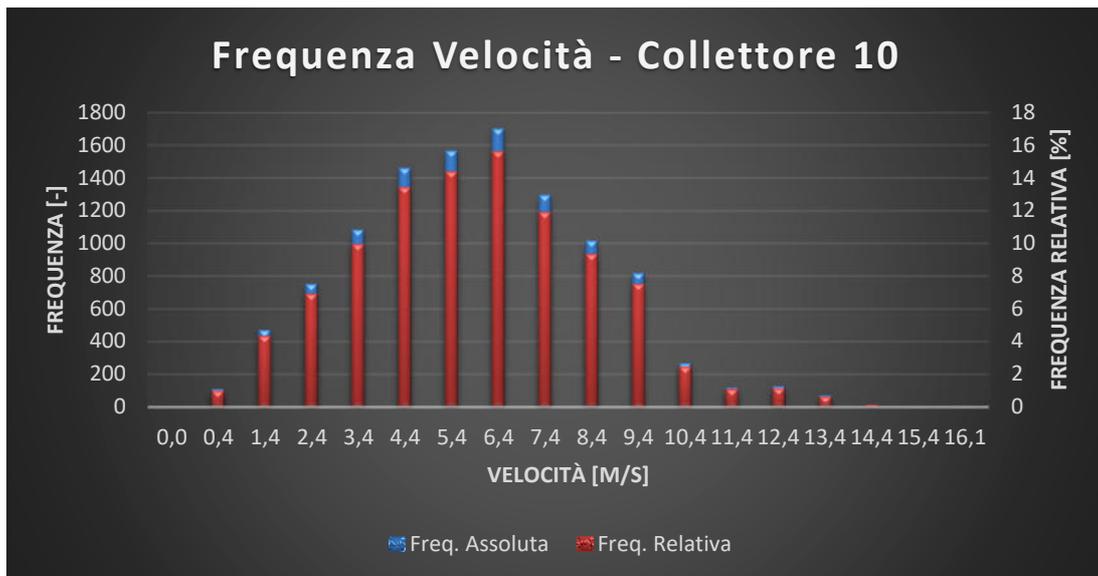


Figura 5.3-16: Frequenza della velocità - Collettore 10

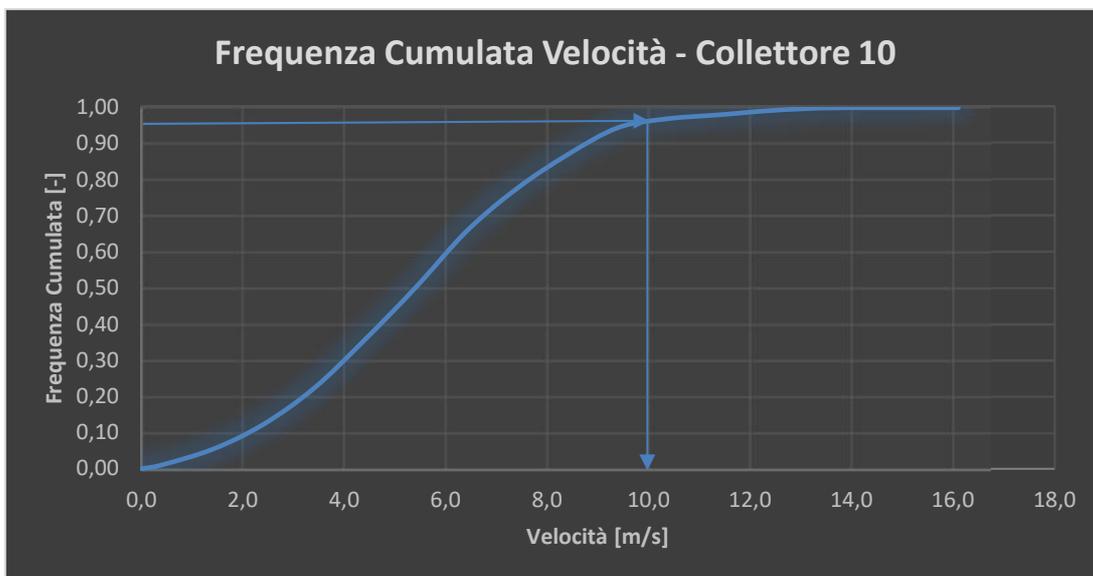


Figura 5.3-17: Frequenza cumulata della velocità - Collettore 10

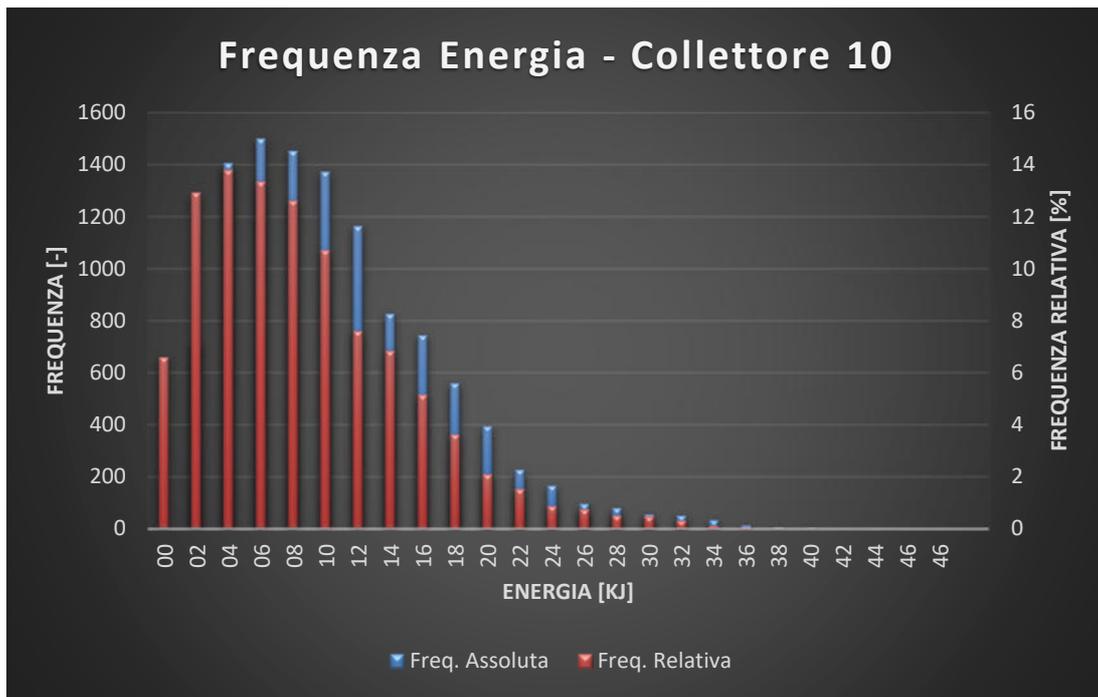


Figura 5.3-18: Frequenza dell'energia - Collettore 10

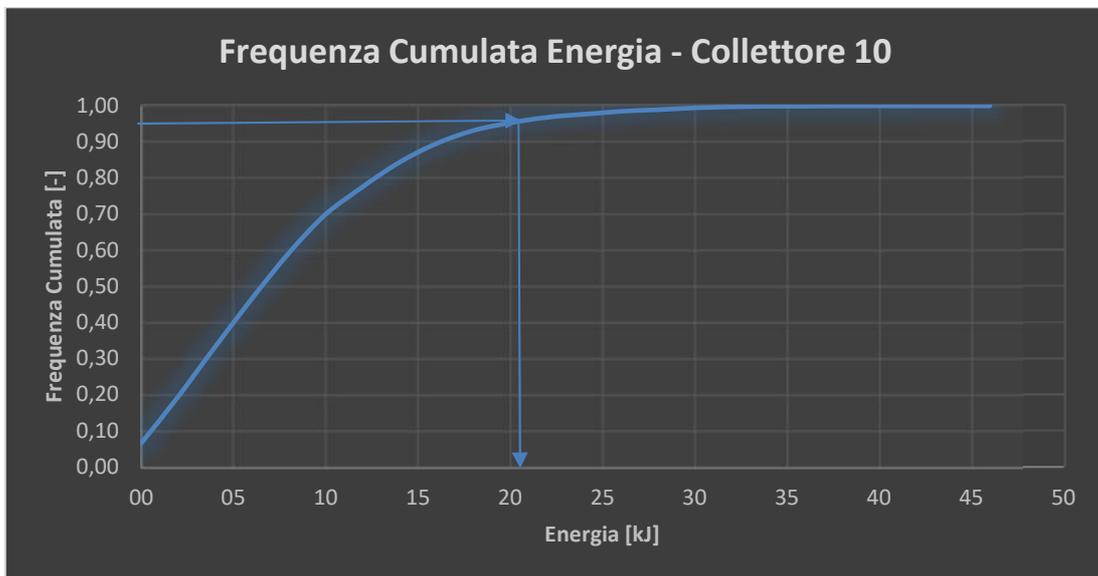


Figura 5.3-19: Frequenza cumulata dell'energia - Collettore 10

Per quanto riguarda il collettore 10, collocato in prossimità degli edifici attorno alla zona di arresto, si può notare come il maggiore valore di frequenza è associato alla velocità 6,4 m/s, con una frequenza di 1701, ovvero del 16% circa (Figura 5.3-16). La distribuzione risulta sostanzialmente simmetrica rispetto al valore più frequente, con frequenze minori decrescenti verso gli estremi della distribuzione. In termini di frequenza cumulata si può osservare che al 95% si ha una velocità di circa 10 m/s (Figura 5.3-17).

Per quanto riguarda le energie si può osservare che i blocchi possiedono con maggiore frequenza energie di 6 kJ, con una frequenza di 1500, ovvero del 13% circa (Figura 5.3-18). In termini di frequenza cumulata si può osservare che al 95% corrisponde un'energia di circa 21 kJ (Figura 5.3-19).

Un dettaglio importante può essere dedotto dalle frequenze assolute e relative e dalla frequenza cumulata delle energie (Figura 5.3-18 e Figura 5.3-19): sono presenti dei blocchi, pari a circa il 7%, che possiedono energie praticamente nulle e questo indica come la zona di posizionamento del collettore 10 appartenga alle zone di arresto dei blocchi. Le energie, ai fini dei calcoli possono essere considerate nulle in quanto il blocco, in media di 0,1 m³, possiede una massa di circa 250 kg, per cui anche con una velocità dell'ordine di 1,0 m/s non raggiunge 1/5 di kJ ed è considerabile come fermo. Per tale motivo la curva di frequenza cumulata di energia al collettore 10 non parte dal valore zero. In Tabella 5.3-2 sono riassunti i dati appena descritti ed in aggiunta i percentili 50, 90 e 98 per le energie e 50 per le velocità.

scr_nr	n	E_50 [kJ]	E_90 [kJ]	E_95 [kJ]	E_98 [kJ]	V_50 [m/s]	V_95 [m/s]
1	298	8.1	15.1	18.1	20.1	6.7	10.6
10	10878	8.0	17.0	21.0	26.0	5.9	10.0

Tabella 5.3-2: Riepilogo dati raccolti ai collettori 1 e 10

I risultati ottenuti, in termini di distribuzione spaziale e di frequenza mostrano che i parametri di scabrezza risultanti dalla calibrazione del fenomeno permettono una buona rappresentazione del fenomeno di caduta massi avvenuto il 30/10/2018. Questi dati verranno mantenuti tali nel seguito per l'esecuzione delle simulazioni dell'analisi previsionale.

Di seguito vengono riepilogati i valori delle scabrezze, come da calibrazione, per le tre mappe raster richieste in input da Rockyfor3D e già riportate in precedenza nella Tabella 5.2-2 (Tabella 5.3-3):

Soiltype	rg10 [m]	rg20 [m]	rg70 [m]
3	0.21	0.13	0.12
5-6	0.18	0.15	0.12

Tabella 5.3-3: Parametri di scabrezza ottenuti dalla back analysis

5.4. Simulazione del fenomeno con QPROTO

5.4.1. Introduzione al plugin

Il plugin QPROTO (Q-GIS Predictive ROckfall Tool) è un'estensione interamente programmata in linguaggio Python eseguibile dal software QGIS e sviluppata da una collaborazione tra DISEG del Politecnico di Torino, Arpa Piemonte e Regione Piemonte (Castelli et al., 2019).

Il plugin si pone l'obiettivo di implementare il metodo dei coni (Onofri & Candian, 1979, Jaboyedoff et al., 2011) per simulare il fenomeno della caduta massi. Il modello descrive l'intera propagazione del fenomeno attraverso uno scivolamento equivalente del blocco lungo una linea di energia inclinata di un angolo φ_p sull'orizzontale. Tale angolo, detto energy line angle, assume il ruolo di un angolo di attrito equivalente blocco/pendio e riassume quindi il contributo di tutti i parametri del blocco (forma, massa, volume) e del versante (scabrezza, vegetazione, opere di difesa, pendenza) che intervengono nel fenomeno di propagazione. I parametri chiave sono riportati schematicamente in Figura 5.4-1 e in Figura 5.4-2:

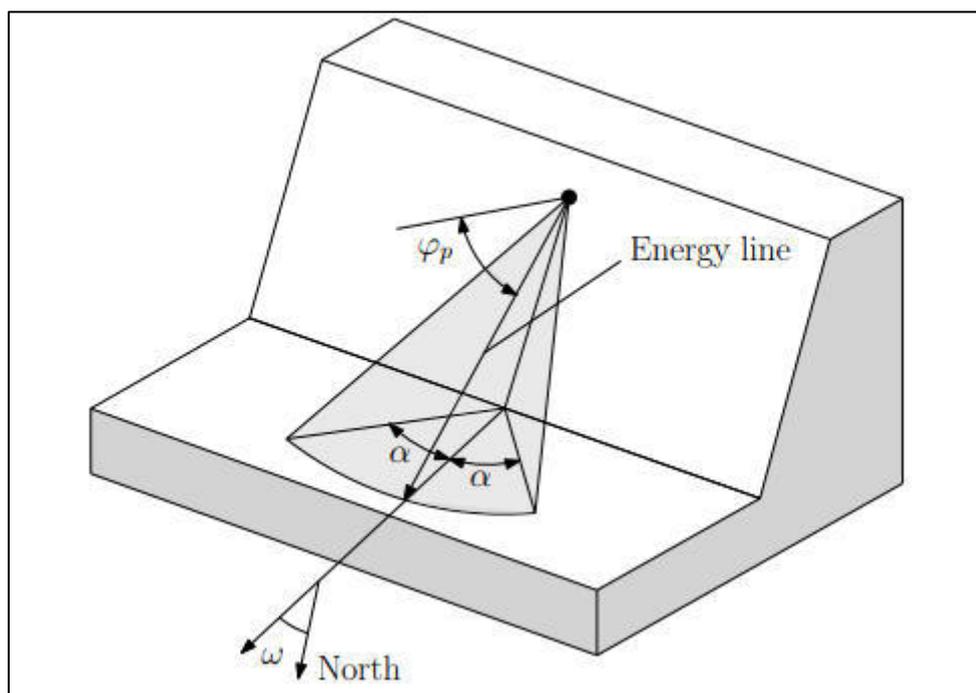


Figura 5.4-1: Rappresentazione tridimensionale del Cone Method (Castelli et al., 2019)

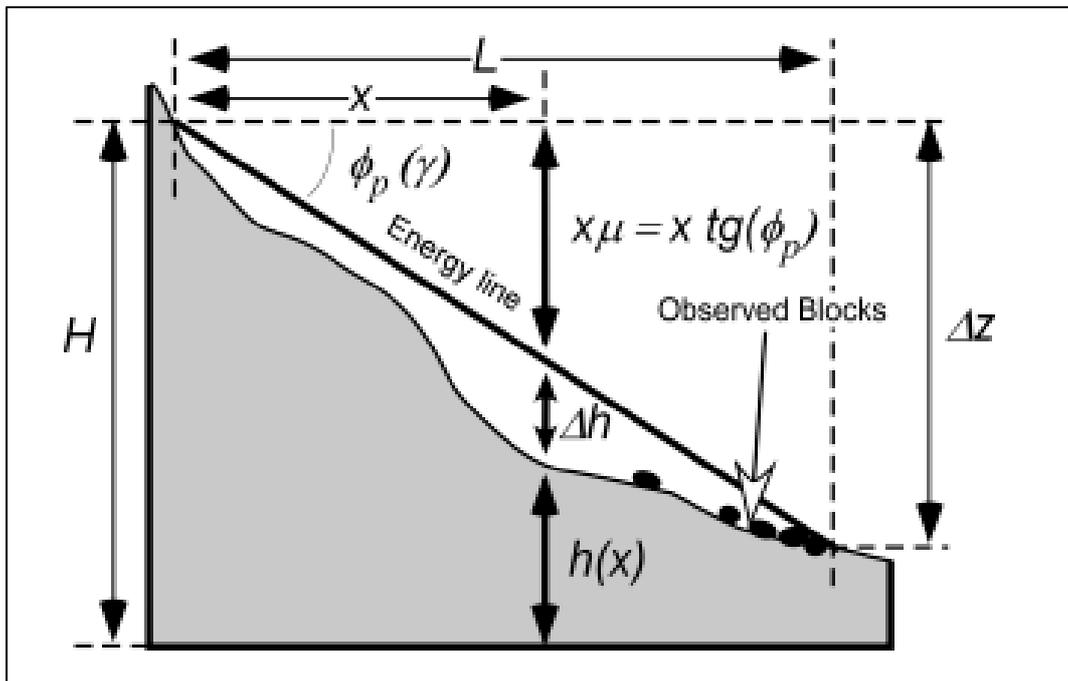


Figura 5.4-2: Sezione 2D del modello del Cone Method (Jaboyedoff & Labiouse, 2011)

In Figura 5.4-2 sono elencati i parametri utilizzati per il calcolo delle caratteristiche del fenomeno nel Cone Method:

- H : quota del punto di distacco;
- L : distanza orizzontale percorsa dal blocco arrestatosi più lontano;
- μ : coefficiente d'attrito del terreno;
- ϕ_p : Energy Line Angle;
- x : generica ascissa lungo il versante,
- Δz : dislivello tra il punto di distacco ed il punto di arresto
- γ : pendenza della energy line, data dal rapporto $\Delta z/L$ e dalla quale si ricava l'angolo $\phi_p = \arctan \Delta z/L$.

Il modello è molto semplice ma permette di ottenere indicazioni preliminari, ma importantissime, per la costruzione di mappe di pericolosità riguardanti il fenomeno di caduta massi a scala medio-larga.

5.4.2. Dati input per QPROTO

Per l'avvio delle simulazioni con QPROTO è necessario fornire in input un layer vettoriale di punti (a differenza di Rockyfor3D che si basa interamente su mappe raster) rappresentanti le posizioni delle nicchie di distacco. In particolare ad ogni punto della nicchia di distacco devono essere associati i seguenti parametri, che corrispondono anche ai file input richiesti:

- *ID*: numero identificativo del punto di distacco [-];
- *Elevation*: Altezza sul livello del mare del punto di distacco in metri [m];
- *Aspect*: angolo che la direzione di massima pendenza nel punto considerato forma con il Nord, in gradi [°];
- *Boulder Mass*: massa del blocco del quale si simula la caduta, ottenuta come prodotto della densità per il volume, in [kg];
- *Energy Line Angle φ_p* : angolo che rappresenta globalmente il fenomeno in termini di dissipazione energetica. In prima approssimazione è ottenuto dall'unione del punto di distacco con il punto di arresto più lontano, misurato verso il basso a partire dal piano orizzontale passante per il punto di distacco, in gradi [°].
- *Lateral Spreading Angle α* : Angolo di dispersione laterale, che indica quanto l'area di propagazione si discosta dalla congiungente il punto di distacco e quello di arresto, misurato in gradi [°];
- *Detachment Propensity I_D* : indica, tramite un coefficiente compreso tra 0 e 1, la probabilità di distacco del blocco nel punto sorgente considerato [-]. Tiene conto solamente della probabilità spaziale di accadimento e può essere assegnata tramite un numero o una funzione. Questo si lega alle difficoltà nella definizione di una legge temporale di accadimento del fenomeno di caduta massi. Qualora sia disponibile un legame spazio-temporale, tali informazioni possono essere aggiunte all'indice I_D , permettendo la creazione di mappe di pericolosità in termini temporali (Castelli et al., 2019).

5.4.3. Dati in output di QPROTO

L'elaborazione condotta da QPROTO fornisce in output 10 mappe raster direttamente visualizzate nell'interfaccia di QGIS e con una scala cromatica pre-impostata che ne facilita la visualizzazione. Vengono inoltre creati il file log.txt con il report delle elaborazioni eseguite e un layer vettoriale di punti rappresentante l'area di invasione. Di seguito l'elenco completo degli output (Castelli et al., 2019):

1. *count.tif*: mappa raster che rappresenta la frequenza di passaggio non pesata, ovvero il numero di nicchie di distacco dalle quali una data cella viene vista. È un valore adimensionale.
2. *suceptibility.tif*: mappa raster che rappresenta la frequenza di passaggio pesata per una data cella, ottenuta come somma dei valori dell'indice di distacco I_D di ogni cella sorgente che vede la cella considerata. Descrive quindi come il fenomeno di caduta massi è distribuito all'interno dell'area di invasione, cioè la probabilità spaziale di accadimento, evidenziando le zone maggiormente interessate. È un valore adimensionale.
3. *v_min.tif*: mappa raster che rappresenta la velocità minima calcolata in ogni cella dell'area di invasione in m/s.
4. *v_mean.tif*: mappa raster che rappresenta la velocità media calcolata in ogni cella dell'area di invasione in m/s.
5. *v_max.tif*: mappa raster che rappresenta la velocità massima calcolata in ogni cella dell'area di invasione in m/s.

Per il calcolo della velocità si fa riferimento all'equazione (5.2), i cui elementi sono riportati in Figura 5.4-3:

$$v(x, y) = \sqrt{2g \left[H(x_0, y_0) - h(x, y) - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tan \phi_p \right]} \quad (5.2)$$

6. *e_min.tif*: mappa raster che rappresenta l'energia cinetica minima calcolata in ogni cella dell'area di invasione in J.
7. *e_mean.tif*: mappa raster che rappresenta l'energia cinetica media calcolata in ogni cella dell'area di invasione in J.
8. *e_max.tif*: mappa raster che rappresenta l'energia cinetica massima calcolata in ogni cella dell'area di invasione in J.

9. *w_en.tif*: mappa raster che rappresenta la massima energia cinetica pesata, ottenuta dal massimo valore assunto dal prodotto tra l'indice di distacco I_D dell'*i*-esimo punto sorgente dalla quale la cella in esame è vista e l'energia cinetica registrata nella medesima cella per ogni cono di visibilità alla quale appartiene. L'espressione utilizzata è la seguente (Espressione (5.3)):

$$w_{en} = \max[I_{D,i} \cdot E_{k,i}(x, y)] \quad (5.3)$$

Questa mappa raster rappresenta una prima mappa di rischio indipendente dal tempo, ovvero fornisce la probabilità spaziale di accadimento (informazione data da I_D) di un evento di data magnitudo (informazione data dall'energia cinetica E_k).

10. *w_en_tot.tif*: mappa raster che fornisce la somma, per ogni cono alla quale una data cella dell'area di invasione appartiene, del prodotto tra l'*i*-esimo indice di distacco I_D e l'*i*-esima energia cinetica E_k . L'espressione utilizzata è la seguente (Espressione (5.4), con *n* numero totale di punti sorgente che vedono la cella considerata):

$$w_{en,tot} = \sum_{i=1}^n [I_{D,i} \cdot E_{k,i}(x, y)] \quad (5.4)$$

Questa mappa raster rappresenta una seconda mappa di rischio indipendente dal tempo, ovvero permette di evidenziare quali siano le zone dell'area di invasione maggiormente soggette al fenomeno di caduta massi dai punti sorgente precedentemente definiti.

11. *finalpoints.shp*: layer vettoriale rappresentante i punti dell'area di invasione sui quali è stata condotta l'elaborazione. I punti sono creati con la stessa risoluzione del DTM, ovvero un punto per cella.
12. *log.txt*: file di testo riportante il report sulle analisi appena condotte.

5.4.4. Principi di funzionamento dell'algoritmo

Il principio di funzionamento si basa su un'analisi di visibilità delle celle del versante a partire dalle celle sorgenti nel DTM. Per fare ciò QPROTO si avvale della funzione implementata in GRASS 7 di QGIS *r.viewshed*. Successivamente l'algoritmo elimina le celle visibili che stanno al di fuori del cono individuato dall'angolo φ_p e dall'angolo α . In seguito calcola le caratteristiche del moto (frequenze, energie, velocità, energie pesate) sulla base degli elementi riportati in Figura 5.4-3. Gli output vengono caricati in automatico nell'interfaccia di QGIS con opportuna nomenclatura e scala cromatica.

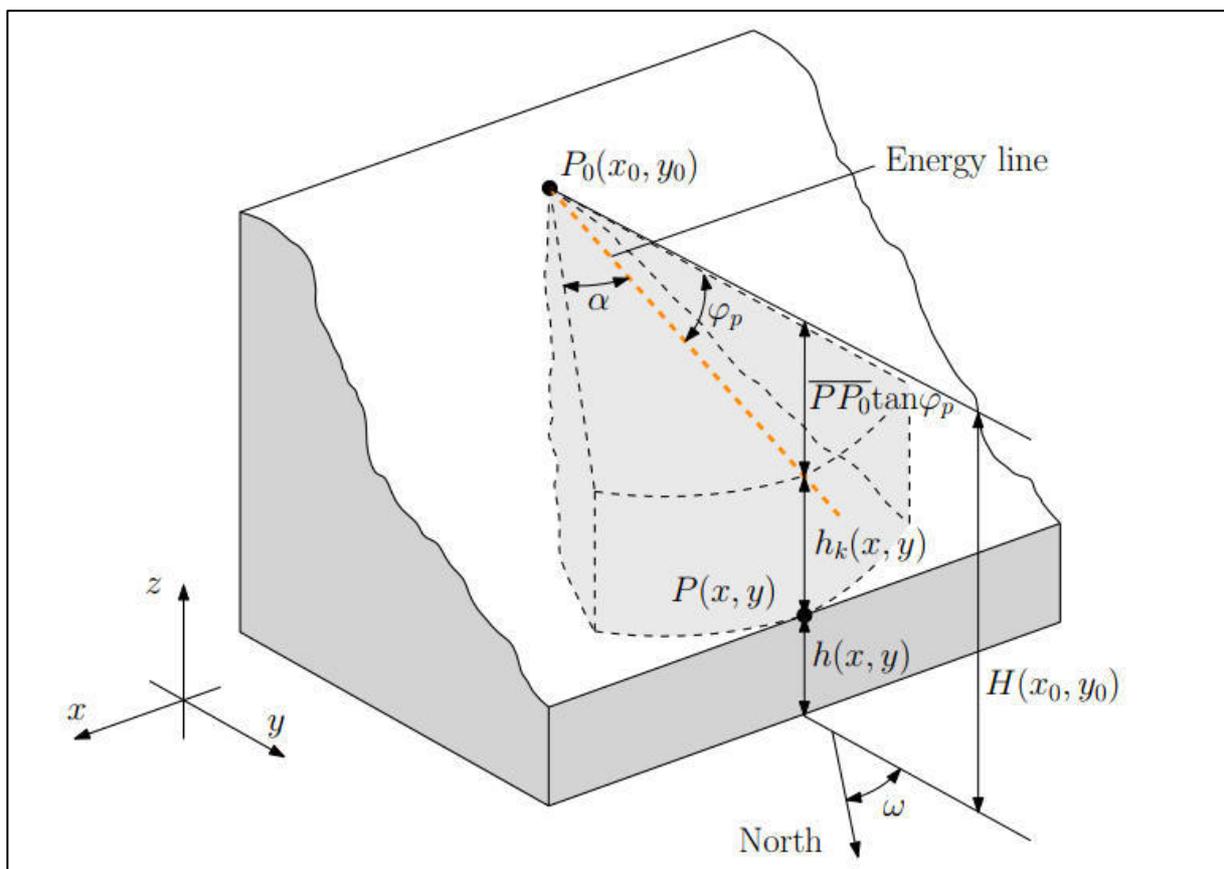


Figura 5.4-3: Generica sezione di calcolo dell'algoritmo di QPROTO (Castelli et al. 2019)

Nel seguito viene descritta più nel dettaglio la procedura seguita dall'algoritmo di QPROTO (Castelli et al., 2019):

1. Viene creato il layer vettoriale dei punti sorgente.
2. Viene eseguito il modulo *r.viewshed* implementato in GRASS 7 a partire da ogni punto definito come nicchia di distacco. Quest'analisi consente di creare una mappa raster, all'interno delle cui celle viene memorizzato l'angolo sul piano verticale secondo il quale queste ultime sono visibili dal punto sorgente.
3. Dei punti individuati dal modulo *r.viewshed* vengono eliminati quelli che si trovano al di sopra del cono individuato da ϕ_p .
4. In versanti irregolari potrebbero presentarsi zone non identificabili dal modulo (zone nascoste, vedi Figura 5.4-4) e in ragione di ciò l'algoritmo crea una superficie convessa sul DTM, con i punti identificati al passo precedente.
5. La superficie convessa, rappresentante la porzione di DTM che si trova al di sotto del cono individuato da ϕ_p , viene opportunamente modificata per tenere conto della dispersione laterale definita dall'angolo α . Tale angolo viene aggiunto e sottratto all'aspect (dip direction, ω , ovvero direzione rispetto al Nord, della linra di massima pendenza calcolata nel punto considerato) creando così in triangolo di apertura 2α .
6. Il triangolo di apertura 2α interseca la superficie convessa, generando l'area di invasione.
7. Viene creato un layer vettoriale di punti (*finalpoints.shp*), con la stessa risoluzione del DTM, in ogni punto appartenente all'area di invasione.
8. In modo da garantire che tale punto si trovi al di sotto dell'energy line, per ognuno dei punti in esame viene verificata la seguente condizione:

$$2g \left[H(x_0, y_0) - h(x, y) - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \tan \phi_p \right] \geq 0 \quad (5.5)$$

Vedi Figura 5.4-3 per il significato geometrico dei termini nell'espressione (5.5).

9. Per ognuno dei punti generati nello step precedente viene eseguito l'algoritmo di QPROTO e vengono calcolati velocità, energia, energia pesata e l'energia pesata totale (*w_en.tif* e *w_en_tot.tif*), la frequenza di passaggio non pesata (*count.tif*) e la frequenza di passaggio pesata (*suceptibility.tif*) come descritti nel paragrafo precedente.

10. Al termine dell'elaborazione le mappe raster vengono caricate in automatico sull'interfaccia di QGIS con opportuna nomenclatura e scala cromatica.

Nella Figura 5.4-5 vengono rappresentati i precedenti punti, in merito alle sole elaborazioni graficamente visibili su QGIS, fino alla creazione delle aree di invasione delle singole nicchie di distacco e alla loro sovrapposizione.

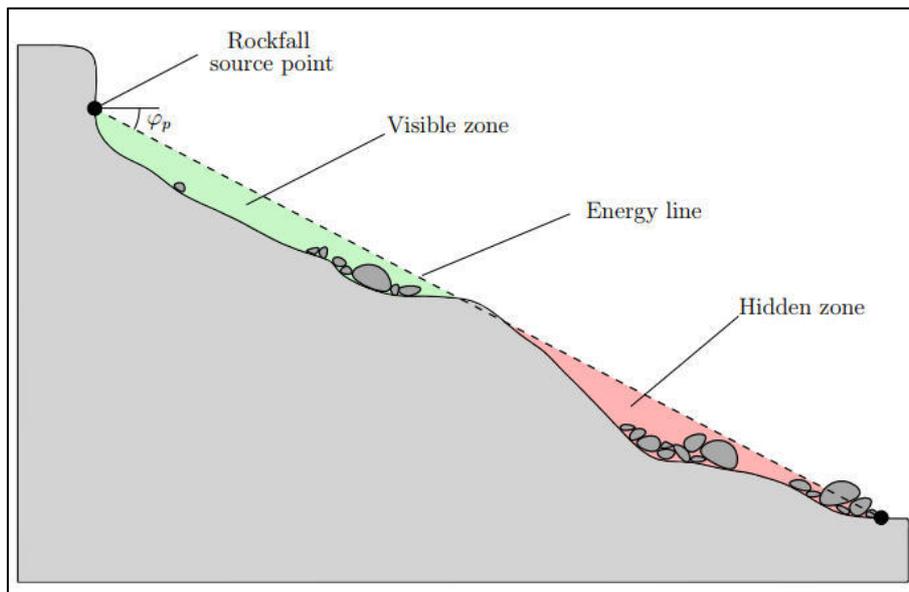


Figura 5.4-4: Zone nascoste durante un'analisi di visibilità (Castelli et al., 2019)

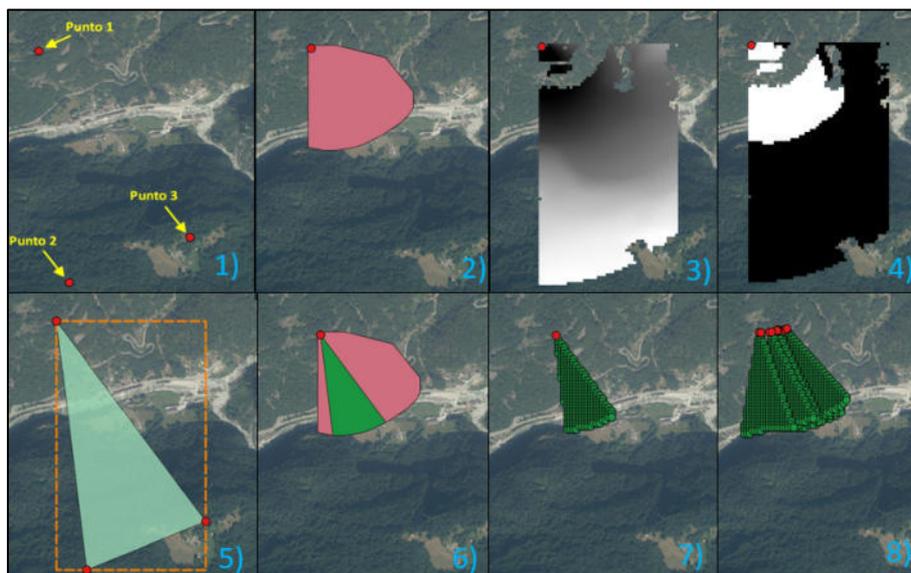


Figura 5.4-5: Rappresentazione schematica delle elaborazioni grafiche condotte da QPROTO (Manuale di QPROTO ver. 1.4)

5.4.5. Costruzione del modello

Prima dell'applicazione del modello ad altri scenari, verranno calibrati i suoi parametri (Energy Line Angle φ_p e Dispersione Laterale α), sulla base delle simulazioni di back analysis condotte sul fenomeno del 30/10/2018 con il software Rockyfor3D e precedentemente esposte.

Per quanto riguarda l'Energy Line Angle φ_p esso è stato ricavato in due modi:

1. dalla mappa raster *EL_angles.asc* fornita come output di Rockyfor3D.
2. misurando la pendenza della retta congiungente la nicchia di distacco con la zona di arresto del blocco (come precedentemente definita nella descrizione dell'evento del 30/10/2018).

Nel primo caso (Figura 5.4-6) è stato visualizzato in QGIS il raster *EL_angles.asc*, che riporta i valori degli energy line angles nelle diverse celle dell'area di invasione. Nel punto terminale della lunghezza, misurata con il comando di QGIS *Misura linea*, il raster mostra valori di φ_p nell'intorno di 45° . È stata eseguita la media di tali valori (Tabella 5.4-1) che ha fornito in output un angolo di circa 45° .

Cella	EL_angles
1	46.80
2	45.38
3	44.45
4	43.59
Media	45.06

Tabella 5.4-1: Valori di *EL_angles.asc* nelle celle prossime alla zona di arresto

Nel secondo caso (Figura 5.4-6) è stata misurata la distanza di arresto lungo l'area di invasione, pari a $L = 68,10$ m e un dislivello (ottenuto dalla differenza delle quote del DTM nei punti di distacco e di arresto) pari a $\Delta h = 990,40 - 922,81 = 67,59$ m. La pendenza γ della congiungente il punto di distacco e quello di arresto risulta dunque:

$$\tan(\varphi_p) = \gamma = \frac{\Delta h}{L} = \frac{67,59}{68,10} = 0,993 \quad (5.6)$$

$$\varphi_p = \arctan(\gamma) = \arctan(0,993) = 44,80^\circ \cong 45^\circ \quad (5.5)$$

Entrambi i casi portano quindi ad un valore di $\varphi_p = 45^\circ$ che verrà utilizzato per riprodurre, con QPROTO, i risultati ottenuti con Rockyfor3D sull'evento del 30/10/2018.

Per quanto riguarda l'angolo di dispersione laterale α si è ricavata l'apertura dell'area di invasione con il comando *Misura angolo* di QGIS, ottenendo $2\alpha=32,949^\circ$, posto quindi pari a 33° . Tale procedura è riportata in Figura 5.4-7, nel quale il file raster in scale di blu rappresenta l'area di invasione, già riportata in Figura 5.3-1. Si ha quindi che $\alpha=16,5^\circ$.

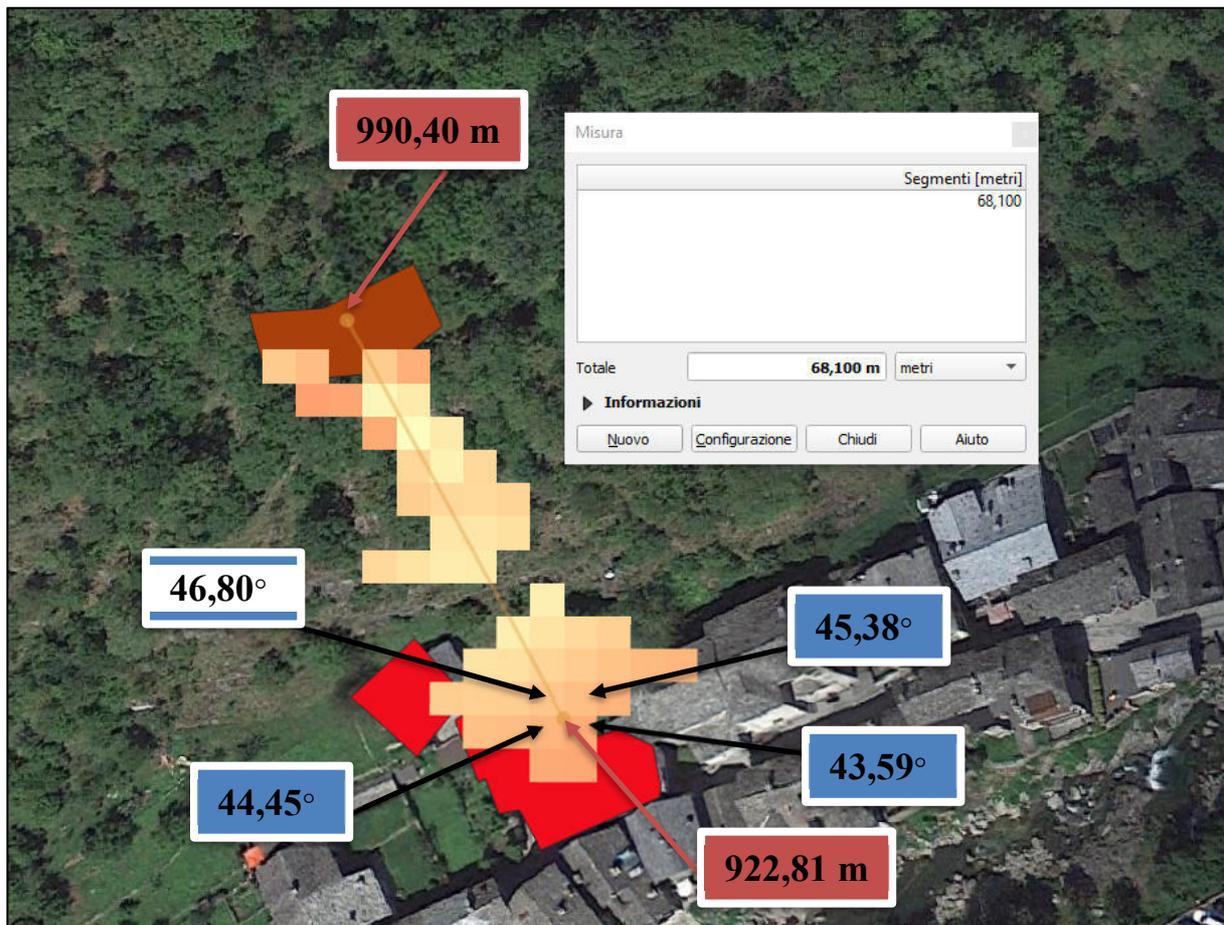


Figura 5.4-6: Mappa raster *EL_angles* (scale di arancione) e misura della lunghezza dell'area di invasione



Figura 5.4-7: Misura dell'angolo di dispersione laterale 2 α

Per la costruzione dei file di input si fa riferimento al software QGIS avviato con i dati del Comune di Rassa precedentemente utilizzati (DTM, nicchia di distacco, ortofoto). La base di partenza è costituita dal DTM con risoluzione delle celle di 5 m fornito dalla Regione Piemonte e dal vettore rappresentante la nicchia di distacco (poligono marrone in Figura 5.4-7). Per comodità di visualizzazione si lavora con l'ortofoto interposta tra il raster del DTM ed il vettore rappresentante la nicchia di distacco (quindi il DTM non risulta visibile, ma per completezza viene riportato in Figura 5.4-8).

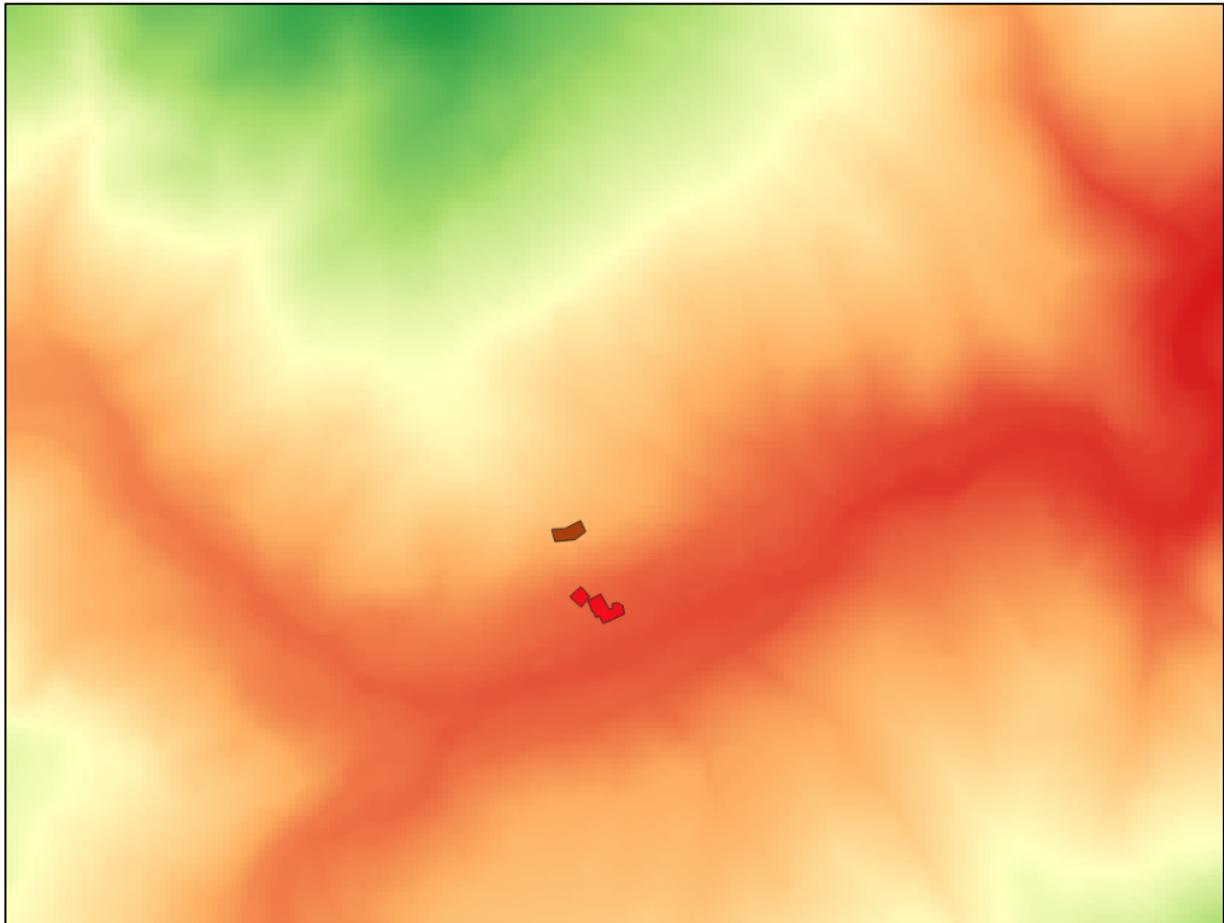


Figura 5.4-8: DTM in risoluzione 5x5 m della Regione Piemonte

In primo luogo è necessario ricavare il parametro aspect, ottenibile attraverso il comando *Raster*→*Analisi*→*Esposizione (aspect)*. Questo genera una mappa raster stessa con la risoluzione del DTM con i valori dell'aspect in ogni cella (Figura 5.4-10).

Successivamente sia per il raster del DTM che per quello dell'aspect viene eseguita la conversione a layer vettoriale attraverso il comando *Strumenti di processing*→*Crea vettore*→*Raster pixels to points* (Figura 5.4-11). Attraverso questo comando è possibile ottenere due layer vettoriali contenenti le quote delle celle del DTM e l'aspect nelle medesime celle (Figura 5.4-11). Per una maggiore maneggevolezza dei dati i due vettori appena creati vengono uniti (Figura 5.4-12) attraverso il comando *Strumenti di processing*→*Sovrapposizione vettore*→*Unione*, creando un unico layer di punti ai quali corrispondono sia l'attributo quota che l'attributo aspect (Figura 5.4-13).

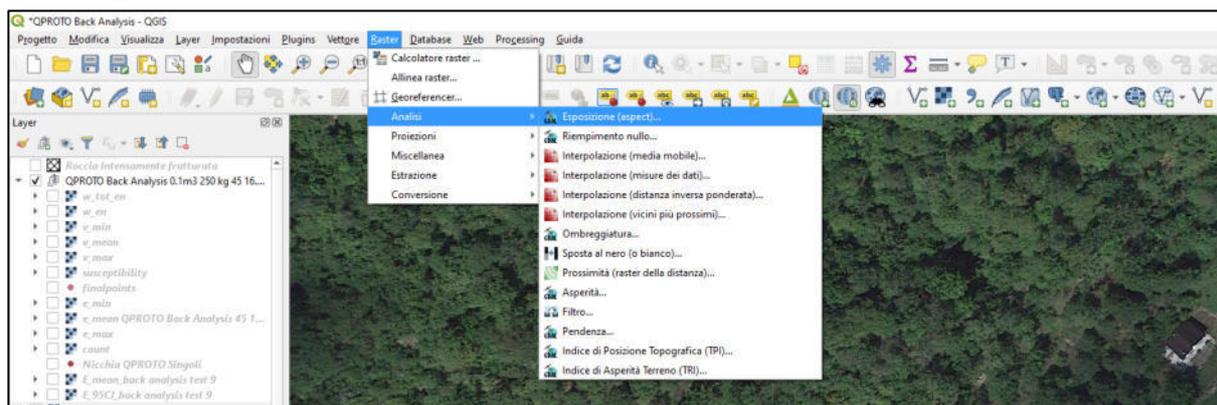


Figura 5.4-9: Calcolo dell'Aspect (Esposizione)

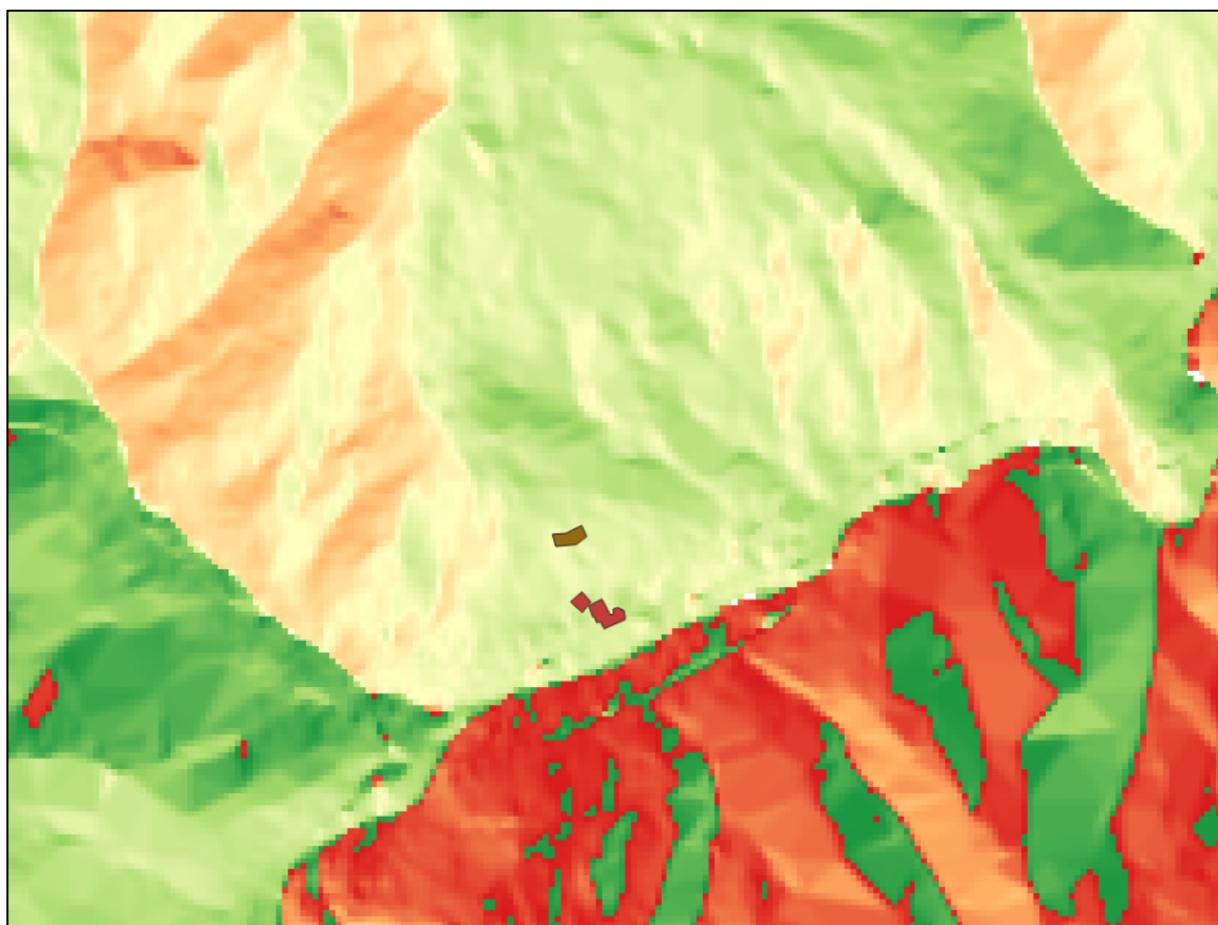


Figura 5.4-10: Mappa raster dell'aspect

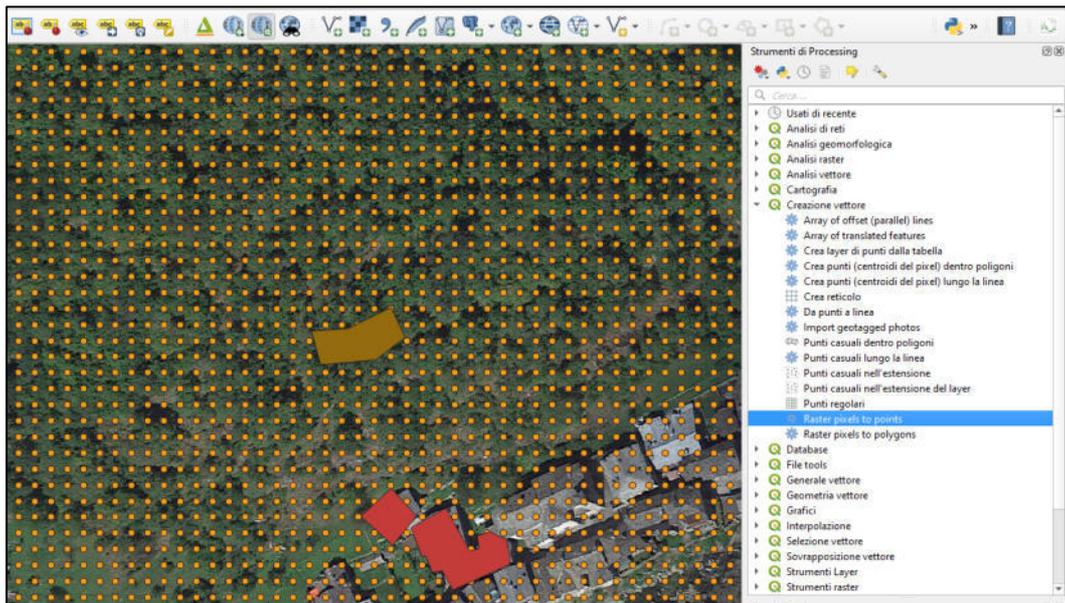


Figura 5.4-11: Conversione dei raster DTM e Aspect a layer vettoriale di punti

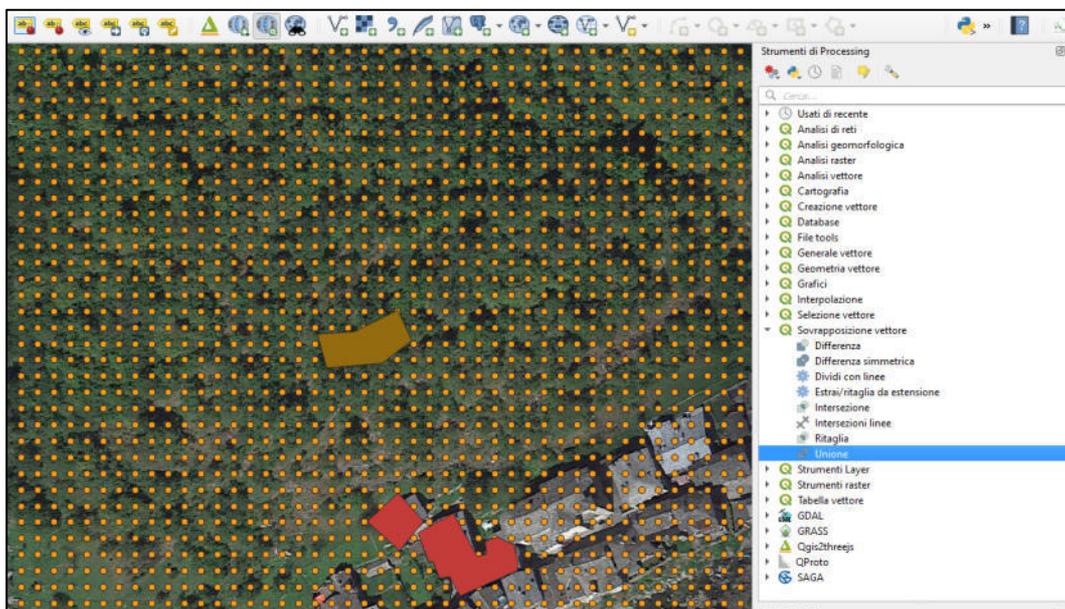


Figura 5.4-12: Unione dei layer vettoriali di punti delle quote e dell'aspect

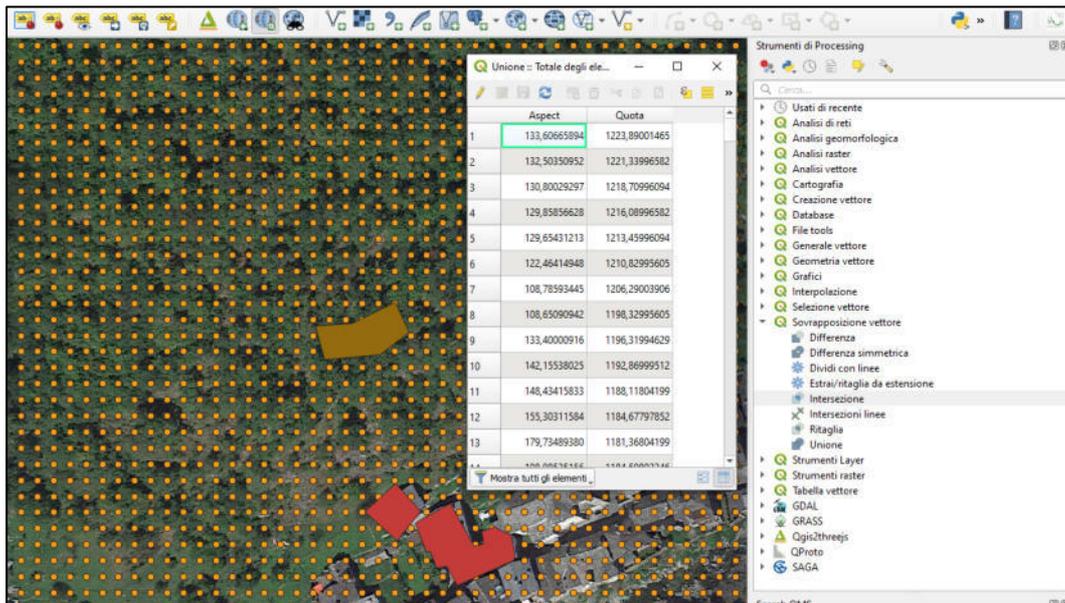


Figura 5.4-13: Tabella attributi del vettore unione

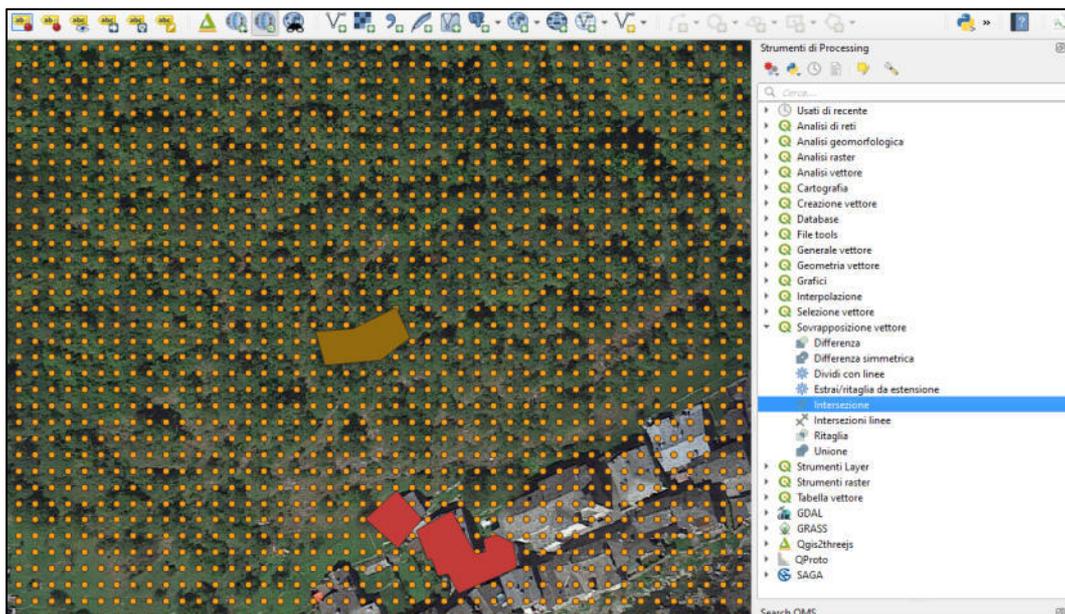


Figura 5.4-14: Intersezione dal layer di punti con la nicchia di distacco

Queste sono le informazioni di base per poter proseguire con la creazione dei file necessari alla simulazione del fenomeno. Si può quindi procedere all'identificazione dei punti sorgente della nicchia di distacco attraverso il comando *Strumenti di processing*→*Sovrapposizione vettore*→*Intersezione*, ottenendo un layer di punti rappresentanti solo la nicchia di distacco (Figura 5.4-14).

Come ultimo step viene esportato il layer appena creato in formato di testo delimitato (estensione .csv) in modo da poter essere elaborato attraverso un foglio di calcolo elettronico inserendo i parametri mancanti, quali l'Energy Line Angle ϕ_p , l'angolo di Dispersione Laterale α , la massa del blocco (si è assunta una densità di 2500 kg/m^3) e l'indice di propensione al distacco I_D . Per fare ciò si usa il comando *Tasto DX sul layer dell'unione*→*Esporta*→*Salva Elementi Come*→*Formato di testo delimitato (.csv)*. In questo modo, dovendo eseguire più simulazioni con parametri diversi è possibile modificarli in maniera più semplice. Successivamente il file .csv appena modificato deve essere importato nuovamente su QGIS come layer vettoriale di testo delimitato attraverso il comando *Layer*→*Aggiungi vettore*→*Aggiungi layer testo delimitato* (Figura 5.4-15), con i parametri appena assegnati. Tali parametri possono essere riassegnati al layer dei punti sorgente attraverso il comando *Tasto DX sul layer dell'unione*→*Proprietà*→*Join*, avendo cura di usare come colonna attributi di corrispondenza quella dell'id dell'elemento (Figura 5.4-16).

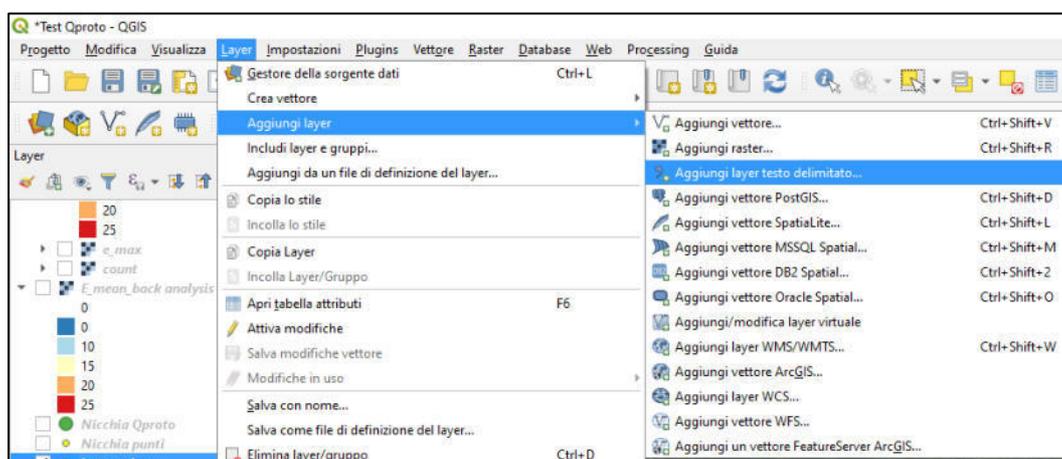


Figura 5.4-15: Caricamento del file di testo delimitato

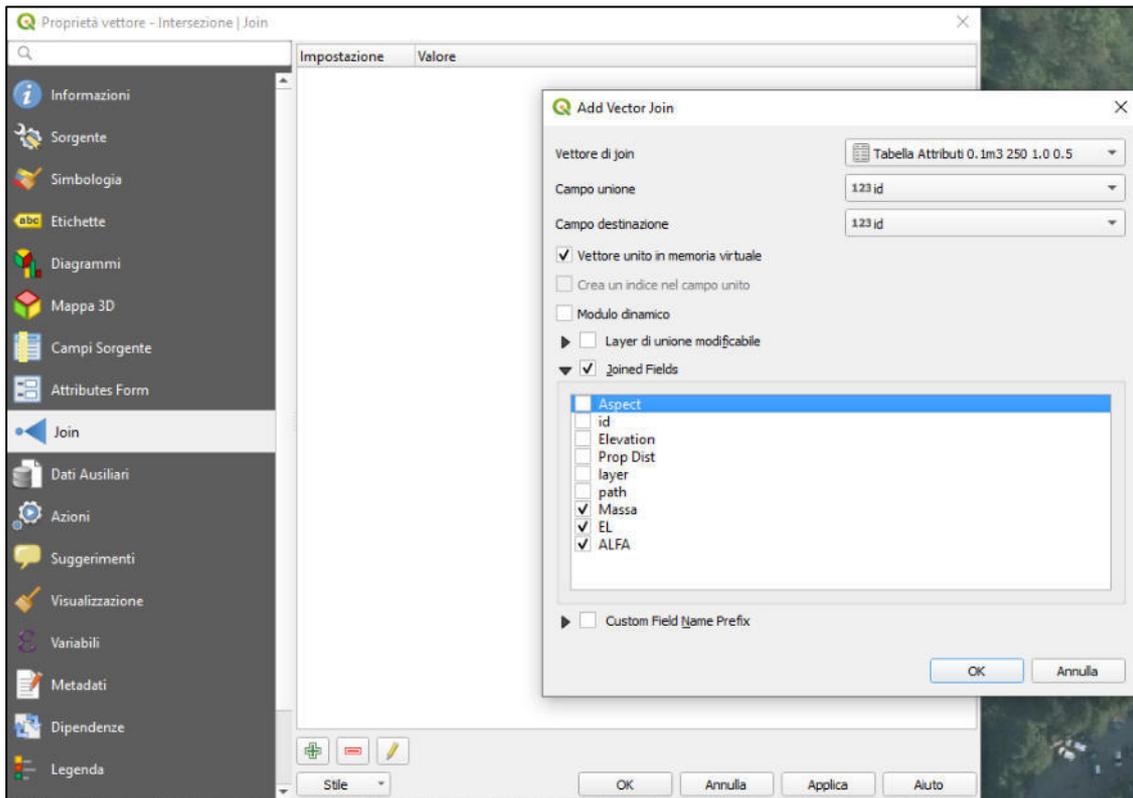


Figura 5.4-16: Comando Join nelle proprietà del layer vettoriale

Questo è l'ultimo step di creazione dei dati input per QPROTO, dopo il quale è possibile avviare il plugin e configurarlo assegnando i parametri corretti nelle relative tendine (Figura 5.4-17). Con il comando *esegui* è possibile avviare l'elaborazione, terminata la quale i file di output, già descritti precedentemente, verranno caricati nell'interfaccia di QGIS.

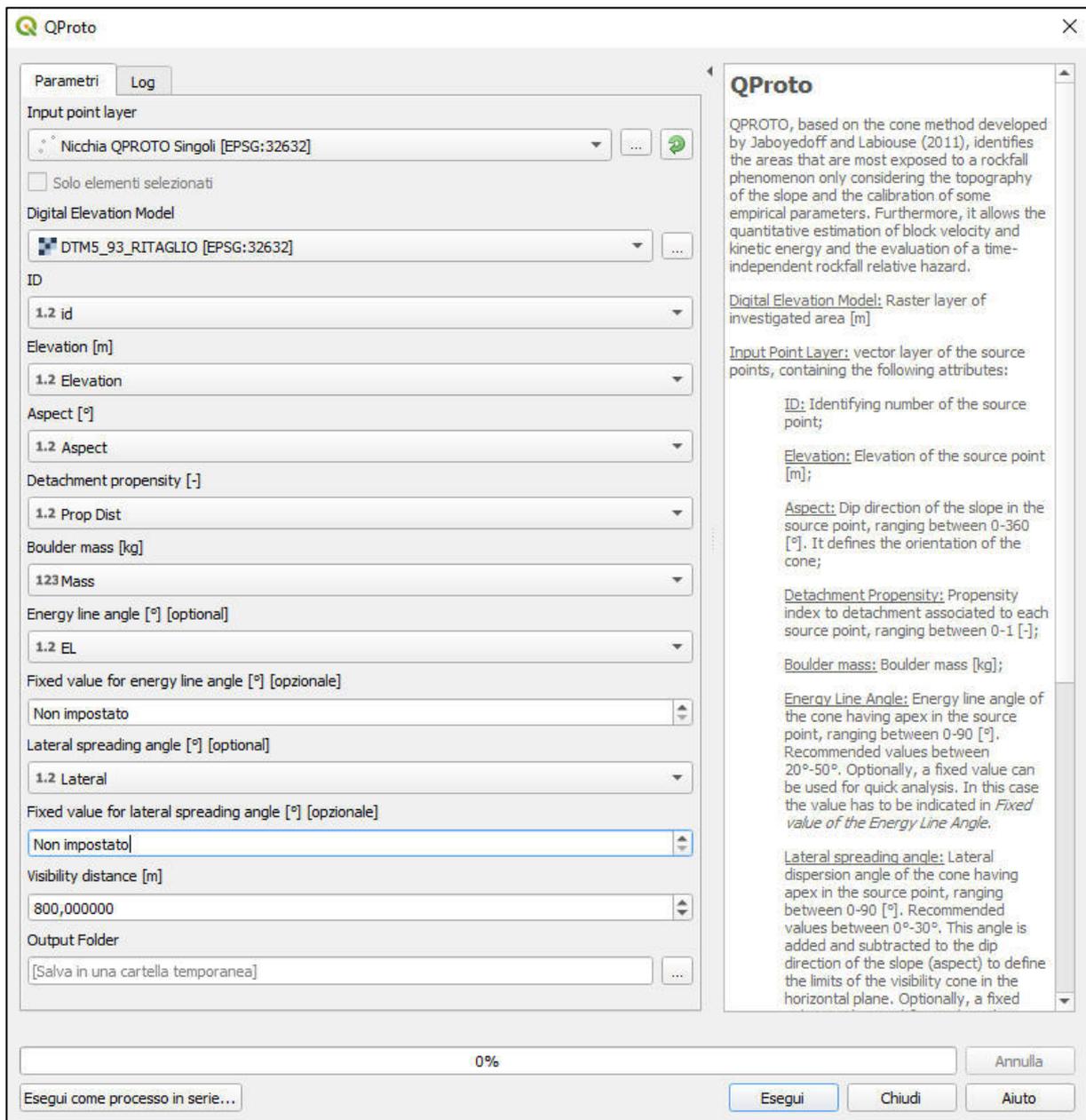


Figura 5.4-17: Interfaccia principale di QPROTO

5.4.6. Analisi e confronto dei risultati

In termini di output, dovendo fare un confronto con le analisi condotte su Rockyfor3D, è interessante confrontare le mappe raster delle energie medie, in modo da avere contemporaneamente sia un confronto dei valori ottenuti nelle due simulazioni, sia una visione globale dell'area di invasione e poterne apprezzare similitudini/differenze.



Figura 5.4-18: Confronto aree invasione/energie QPROTO (sx) e Rockyfor3D (dx)

In Figura 5.4-18 è possibile osservare le due aree di invasione e le energie coinvolte. Si può subito notare la diversa apertura dell'area di invasione, più piccola nella simulazione condotta in QPROTO. Tale differenza può essere dovuta al fatto che l'area esaminata in QPROTO è determinata a priori dal modulo *r.viewshed* che effettua l'analisi di visibilità e dall'esclusione dei punti che non rispettano la condizione (5.5), mentre Rockyfor3D non risulta vincolato ad una ben definita area di invasione, anzi l'area di invasione è il risultato finale delle simulazioni, con l'annullamento dell'energia dei blocchi, che seguono un percorso simulato di volta in volta in base all'energia posseduta dal blocco, dalle condizioni di pendenza locale, dalla natura e scabrezza del suolo e dalla presenza di vegetazione. Inoltre QPROTO non genera il cono di invasione qualora la cella della nicchia di distacco abbia pendenza minore di 45° . Nonostante ciò la corrispondenza è molto buona in termini di distanza d'arresto e di posizione dei massimi delle energie, con QPROTO che effettua delle valutazioni cautelative rispetto a quelle di Rockyfor3D. In particolare è possibile osservare che le energie in Rockyfor3D hanno un massimo nella zona contrale pari a circa 27 kJ e un minimo di circa 1 kJ nelle zone di distacco

e di arresto, mentre nelle medesime zone QPROTO presenta un massimo di circa 27 kJ e un minimo di circa 3 kJ, con un'area dei picchi di energia più estesa nella simulazione condotta con QPROTO. Vengono di seguito esposti i principali output di QPROTO, descrivendone le caratteristiche principali e, qualora possibile, mettendoli a confronto con quelli ottenuti da Rockyfor3D.

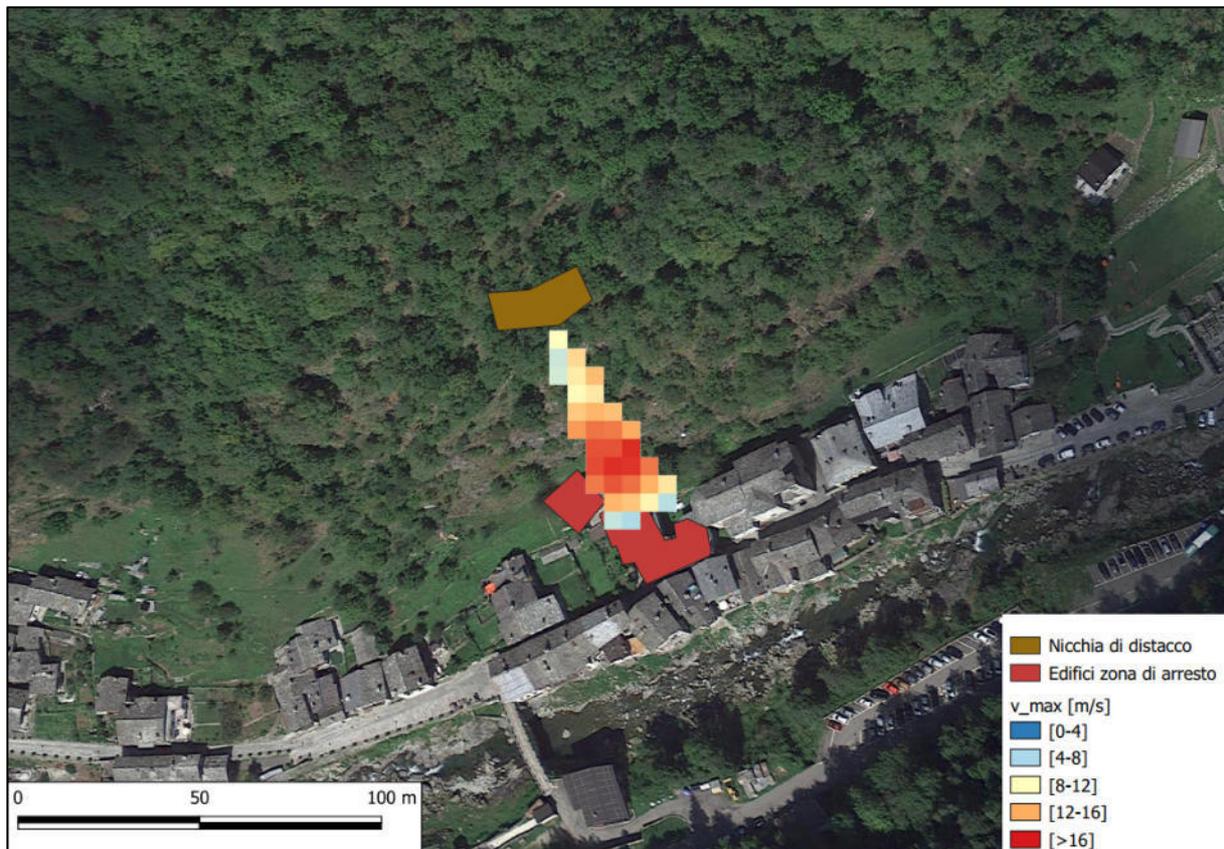


Figura 5.4-19: v_max ottenuta da QPROTO

Per quanto riguarda la velocità in Figura 5.4-19 si può osservare che, al di là delle dimensioni dell'area di invasione, comunque compatibile con quella di Rockyfor3D, le velocità assumono valori minori rispetto a quelle ottenute con Rockyfor3D. La differenza può essere ricercata ancora una volta nel metodo di calcolo delle velocità, puramente geometrico nel caso di QPROTO e tramite un modello fisico calibrato sperimentalmente in Rockyfor3D. Nel primo l'elemento chiave è la distanza tra energy line e pendio, nel secondo intervengono le componenti di deformabilità del terreno, la scabrezza del versante, la vegetazione e la pendenza. Questo giustifica le differenze riscontrate e infatti, nonostante le velocità ottenute in QPROTO

siano minori, le energie risultano maggiori perché, nota la velocità, attraverso l'espressione dell'energia cinetica $E_k=1/2mv^2$ si passa, in maniera proporzionale alla massa, all'energia senza tenere in conto ulteriori fenomeni dissipativi (alberi, scabrezza, pendenza ecc.), come avviene invece in Rockyfor3D, che porta comunque ad energie minori di quelle ottenute con QPROTO. I massimi di velocità in QPROTO si attestano intorno ai 15 m/s, mentre per Rockyfor3D, nelle medesime zone, si raggiungono i 20 m/s. Le zone dove si presentano i massimi sono comunque compatibili, verificandosi nel tratto di versante a maggiore pendenza.

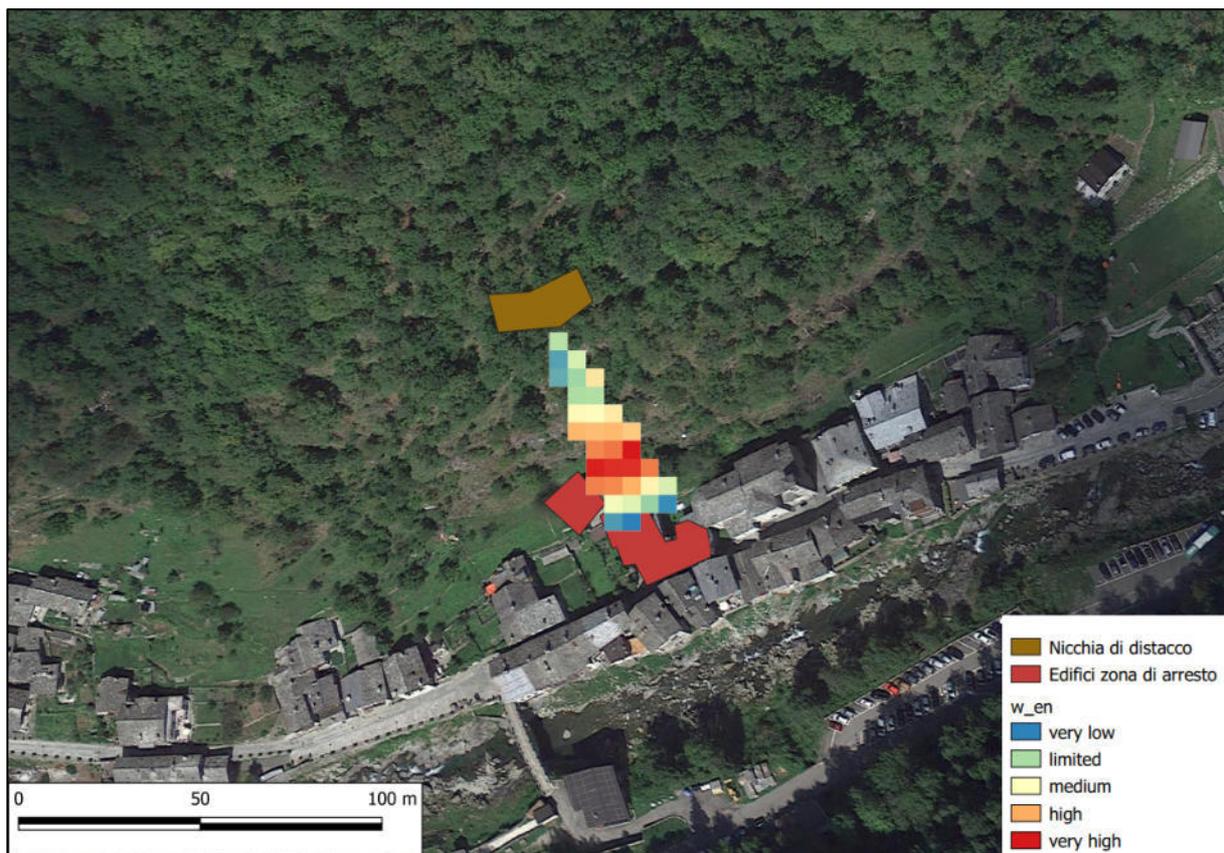


Figura 5.4-20: Output w_{en} di QPROTO

In merito all'output $w_{en}.tif$, ovvero la mappa raster che mostra il massimo prodotto tra l'indice di distacco e l'energia che si registra in una cella, è possibile osservare in Figura 5.4-20 che i valori massimi si verificano nella zona ad elevata pendenza del versante, dove il discostamento dall'energy line è maggiore, assumendo un valore della classificazione very high.

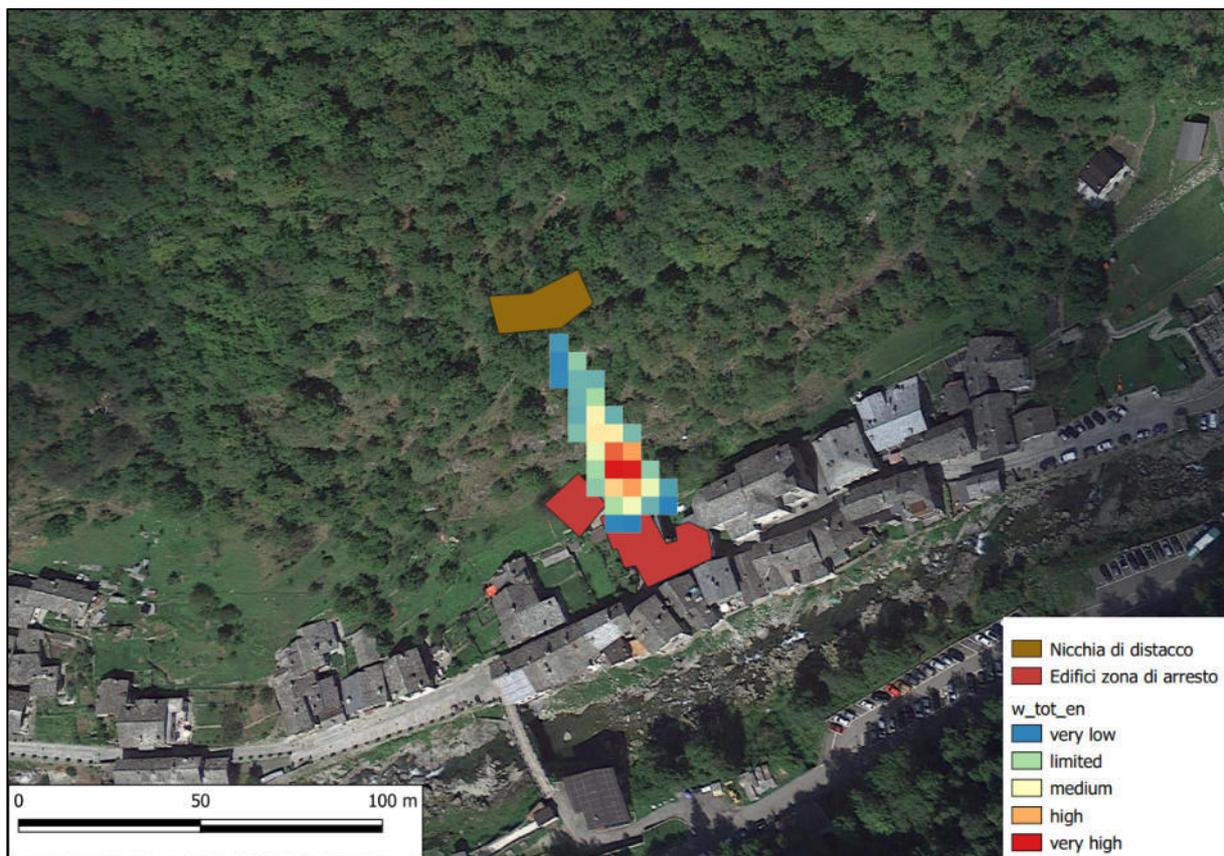


Figura 5.4-21: Output w_{tot_en} di QPROTO

In Figura 5.4-21 è possibile osservare l'output $w_{tot_en.tif}$ ottenuto dalle simulazioni condotte con QPROTO. Esso è ottenuto dalla somma, per ogni cella, del prodotto tra l'indice di distacco e l'energia calcolata per l' i -esimo cono di visibilità al quale la cella appartiene. Il significato è simile a quello precedentemente esposto per w_{en} , ma in questo caso si tiene in conto in maniera più efficace il contributo di tutti i cono di visibilità che interessano una data cella, mostrando infatti una zona più limitata, sempre nella zona a massima pendenza, interessata da un valore della classifica very high e quindi maggiormente soggetta al fenomeno di caduta massi.

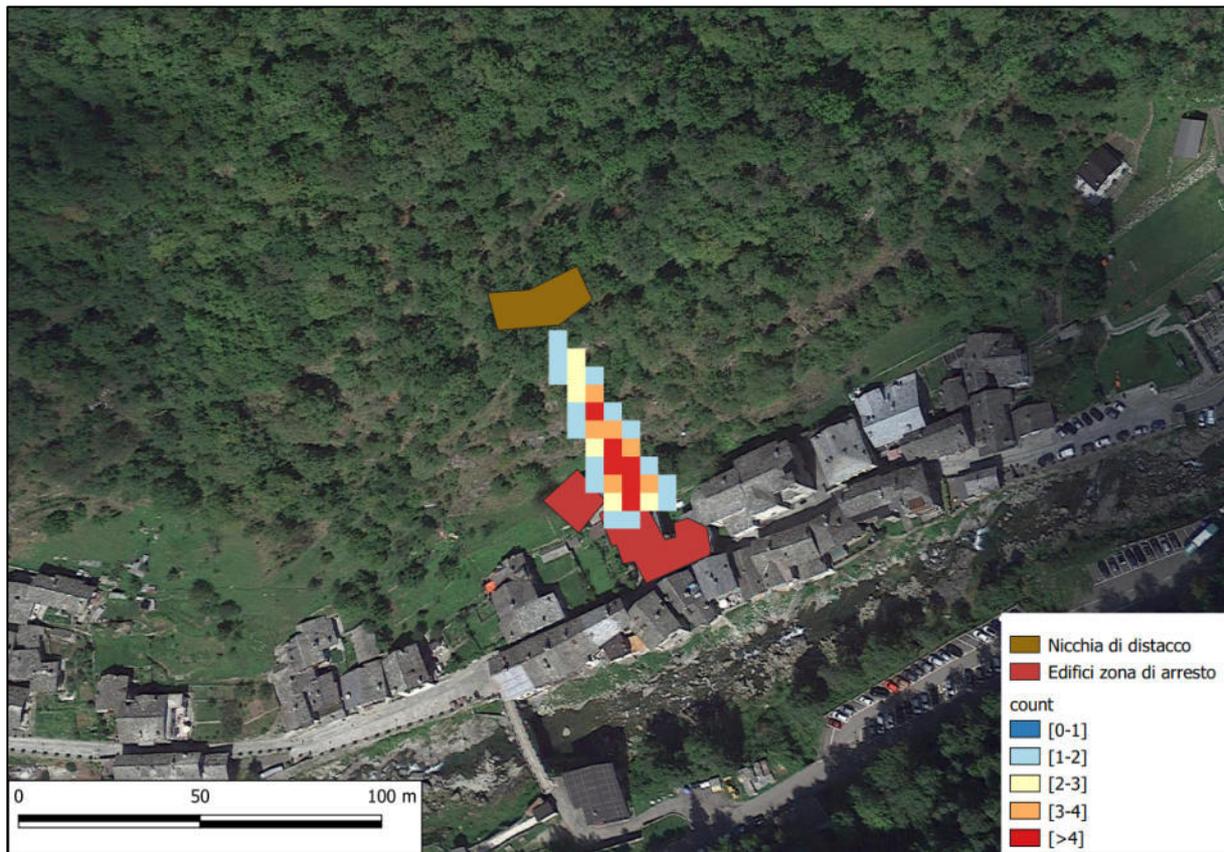


Figura 5.4-22: Output count di QPROTO

In Figura 5.4-22 è possibile osservare l'output *count.tif* ottenuto dalle simulazioni condotte con QPROTO. Come già esposto, esso è ottenuto dalla somma delle nicchie di distacco dalle quali la cella considerata è visibile mostrando anche in questo caso, anche se in maniera differente, le zone maggiormente soggette al fenomeno di caduta massi. Tali zone si posizionano, in maniera totalmente compatibile con gli output precedentemente esposti, nella zona ad elevata pendenza a ridosso degli edifici, con dei massimi pari a 4.

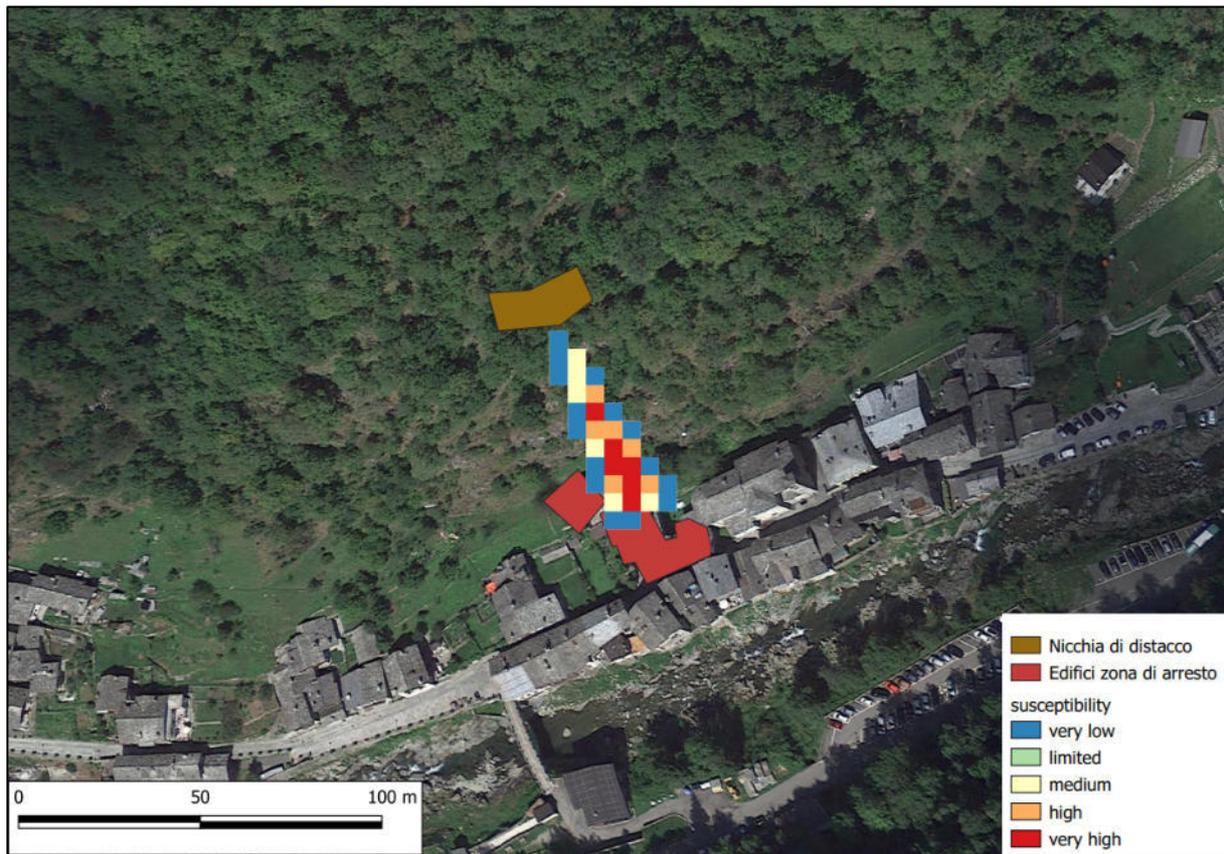


Figura 5.4-23: Output *susceptibility.tif* di QPROTO

In Figura 5.4-23 è possibile osservare l'output *susceptibility.tif* ottenuto dalle simulazioni condotte con QPROTO. Esso è ottenuto dalla somma degli indici di distacco delle celle sorgente che vedono la cella considerata. In maniera quindi molto simile all'output *count.tif* mostra le aree maggiormente affette dal fenomeno di caduta massi, evidenziando le medesime zone a cui corrisponde la classificazione *very high*.

5.5. Analisi con barriera estesa

Come precedentemente dimostrato le barriere presenti sul versante non sono state sufficienti ad impedire il fenomeno del 30/10/2018, anzi non sono addirittura presenti in quella che si è rivelata essere una zona preferenziale di incanalamento dei blocchi. In ragione di ciò si è condotta un'ulteriore analisi su Rockyfor3D con l'inserimento di una barriera alta 4 m e di capacità assorbente di 1000 kJ (come quelle già presenti) al fine di dimostrare che se tale barriera fosse esistita avrebbe potuto arrestare il blocco. In Figura 5.5-1 è riportato il risultato dell'analisi, che conferma quanto appena esposto, dove in rosso è rappresentata la barriera fittizia mentre in nero le opere esistenti. La barriera avrebbe effettivamente impedito al blocco di raggiungere i pressi della Chiesa Parrocchiale di Santa Croce, come mostra infatti il raster dell'energia media E_{mean} , che termina sulla barriera.



Figura 5.5-1: Inserimento della barriera continua fittizia trasversalmente al versante

6. Analisi previsionale

In questo capitolo, sulla base dei parametri calibrati nella back analysis condotta nel Capitolo 5, vengono proposti e simulati diversi scenari previsionali di caduta massi. Le simulazioni verranno condotte parallelamente sia su Rockyfor3D che su QPROTO, analizzandone e confrontandone i risultati. Come già accennato nel Paragrafo 4.4, i volumi utilizzati negli scenari previsionali derivano dalle indagini strutturali dell'ammasso roccioso costituente il versante condotte dallo studio Tecnosesia (ottobre 2018-aprile 2019) e riportati sinteticamente nelle Tabella 4.4-1, Tabella 4.4-2 e Tabella 4.4-3. Nell'ottica di condurre delle analisi di confronto tra gli output ottenuti dai due software, si fa riferimento ai volumi precedentemente riportati (Paragrafo 4.4):

1. Distacco da sola roccia intensamente fratturata (Figura 6.1-1)
 - 1.1. $0,10 \text{ m}^3$ (volume utilizzato nella back analysis)
 - 1.2. $1,0 \text{ m}^3$
 - 1.3. 5 m^3

2. Distacco contemporaneo da roccia esposta e roccia intensamente fratturata (Figura 6.3-1)

2.1. 0,10 m³ (volume utilizzato nella back analysis)

2.2. 1,0 m³

2.3. 5,0 m³.

Poiché il valore φ_p di 45° è stato ricavato dall'osservazione dell'evento del 30/10/2018, è opportuno riferirsi ad un valore diverso per ognuno degli scenari individuati. In particolare, sfruttando una serie di risultati ottenuti da Torsello (2019), si è scelto di utilizzare i seguenti valori:

- $\varphi_p = 40^\circ$ per il volume da 1,0 m³
- $\varphi_p = 33^\circ$ per il volume da 5,0 m³

I valori appena elencati sono funzione dei seguenti parametri:

- Livello energetico MEL (Maximum Energy Level) 0 per le barriere esistenti, poiché non influiscono in maniera tangibile sul fenomeno e vengono quindi trascurate;
- Copertura forestale del 100%;
- Risoluzione del DTM 5x5.

Come già accennato per il volume da 0,10 m³ verrà invece utilizzato il valore di 45°, come da calibrazione nella back analysis. Si può immediatamente constatare che i valori dell'angolo φ_p decrescono al crescere del volume, indicando quindi la capacità posseduta da volumi maggiori di accumulare maggiori energie e di percorrere maggiori distanze, in quanto nel metodo dei coni l'energia dei blocchi, come già accennato, è rappresentata dalla distanza tra il pendio e la retta di inclinazione φ_p .

Come ultima considerazione è necessario riferirsi allo stato di ammorsamento precario dei pannelli in fune e della presenza di vegetazione all'interno che ne pregiudica la stabilità (lettere P in Figura 5.3-3) e delle quali viene riportato un esempio Figura 6.0. Sono infatti state considerate come nicchie di distacco anche le zone al di sotto di esse.



Figura 6.0: Esempi di immorsamento non stabilizzante (sinistra) e fitta vegetazione invasiva nei pannelli (destra) (Tecnosesia, 2019)

6.1. Distacco da roccia intensamente fratturata - Rockyfor3D

La posizione della roccia intensamente fratturata è stata ricavata dalla carta geomorfologica redatta dallo studio Tecnoesia (2019) della quale uno stralcio è già riportato in Figura 5.1-1. In Figura 6.1-1 sono riportati gli shapefile utilizzati in QGIS per rappresentare le nicchie di distacco dalla roccia intensamente fratturata (motivo reticolare nero) e i collettori in prossimità delle località Centro e San Giovanni usati per il confronto in termini energetici tra gli output di Rockyfor3D e QPROTO (linee tratteggiate blu).

In primo luogo verranno descritti i dati memorizzati nelle mappe raster ottenute in output dalle simulazioni condotte su Rockyfor3D, per i volumi sopra citati, in termini energetici e di area di invasione, nonché delle ragioni topografiche e morfologiche per le quali tali valori si presentano in specifiche zone nella situazione reale, ovvero con la presenza delle barriere esistenti nel sito.

Verranno inoltre esposte le cumulate di frequenza delle energie registrate attraverso Rockyfor3D in corrispondenza dei collettori Centro e San Giovanni. In secondo luogo le analisi verranno condotte in assenza di barriere, in modo da avere compatibilità con le simulazioni condotte da QPROTO, nel quale non è possibile tenere conto in maniera esplicita delle opere



Figura 6.1-1: Nicchie di distacco da roccia intensamente fratturata

di difesa in situazioni geomorfologicamente complesse. In questo caso verranno confrontati gli andamenti in termini di energia media lungo i collettori Centro e San Giovanni attraverso il plugin di QGIS qprof, il quale permette di effettuare una sezione all'interno di una mappa raster e di mostrarne l'andamento dei valori lungo l'ascissa della sezione considerata.

La descrizione degli scenari verrà effettuata in termini energetici in quanto, ai fini delle analisi e dei confronti che si vogliono condurre, rappresenta il parametro chiave e più generale relativamente al fenomeno. In particolare ci si riferirà alla mappa raster *E_mean.asc* fornita in output da Rockyfor3D. Le scale cromatiche sono state riadattate in modo da mostrare dove si collocano i nuclei e le zone a maggior energia.

6.1.1. Scenario di 0,1 m³

Per quanto riguarda il volume da 0,1 m³, il volume utilizzato per tarare i parametri nella back analysis dell'evento del 30/10/2018, si può subito osservare che le aree di invasione sono molto contenute (Figura 6.1-2), in quanto la densa vegetazione e la scabrezza del versante offrono grande resistenza al moto verso valle. A questo si aggiunge il fatto che da diverse nicchie di distacco i blocchi non riescono a mobilitarsi, complici anche le pendenze basse, inferiori ai 45°. Il fenomeno di distacco con il volume di 0,1 m³ interessa esclusivamente la località Centro, infatti nessun blocco riesce a raggiungere la località di San Giovanni. Si hanno dei picchi di energia superiori ai 16 kJ a ridosso della Chiesa di Santa Croce, nella zona ad elevata acclività, con un massimo di circa 46 kJ.

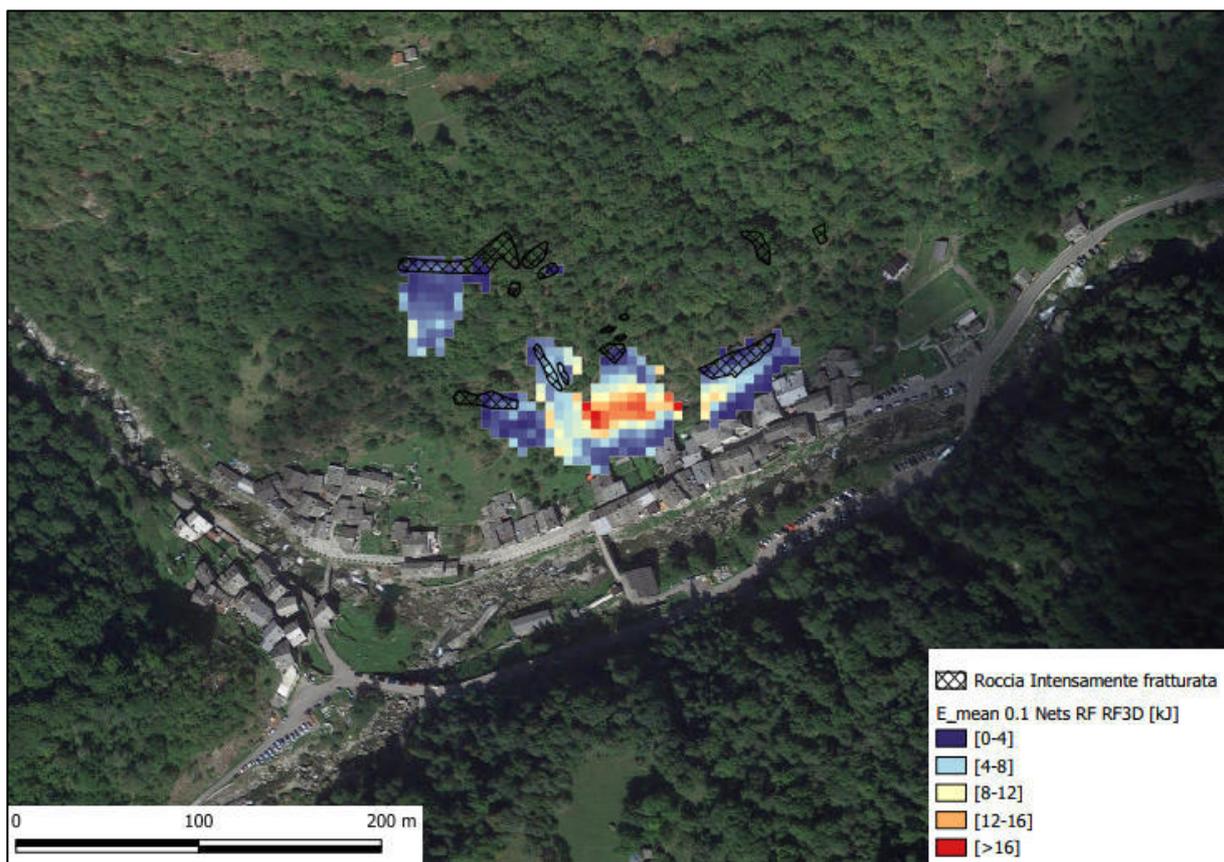


Figura 6.1-2: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 0,1 m³

Viene di seguito riportata una tabella riepilogativa dei valori post processati (Tabella 6.1-1).

Collettore	n° Blocchi	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	1199709	2.0	6.0	9.0	14.0	0.3	0.3	0.3	0.3	3.5	7.3

Tabella 6.1-1: Valori post processati al collettore per il volume 0,1 m³

Viene riportata di seguito la curva di frequenza cumulata dell'energia nel collettore in località Centro, in quanto, come appena esposto, in questo scenario i blocchi non riescono a raggiungere la località di San Giovanni. È possibile osservare in Figura 6.1-3 che l'energia al 95% della frequenza cumulata è pari a 9,0 kJ, di molto inferiore al picco di energia registrato di 46 kJ registrato al collettore stesso, ad indicare che le energie in gioco sono globalmente molto basse.

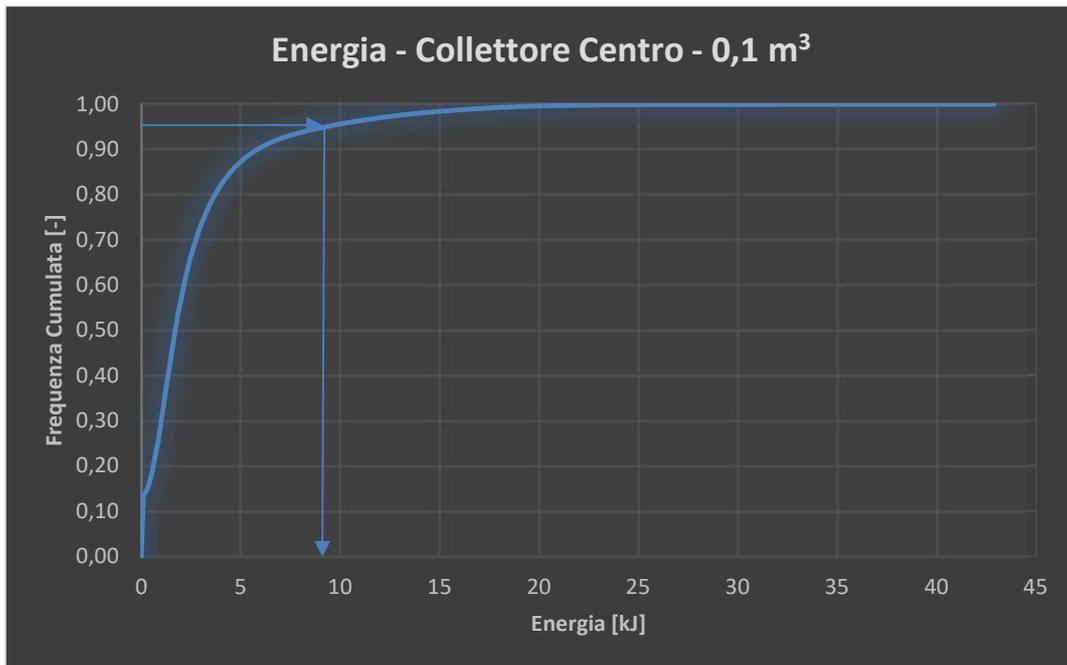


Figura 6.1-3: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m³ - Centro

6.1.2. Scenario di 1,0 m³

Per quanto riguarda il volume da 1,0 m³, di forma cubica (1,0x1,0x1,0 m³), le aree di invasione sono ben maggiori di quelle riscontrate per il volume da 0,1 m³, in quanto, nonostante la scabrezza del terreno e la fitta vegetazione, il volume maggiore consente l'accumulo di energie maggiori, consentendo ai blocchi di seguire percorsi più lunghi (Figura 6.1-4). È possibile inoltre osservare che in questo scenario i blocchi riescono a mobilitarsi dalla quasi totalità delle nicchie, nonostante in alcune di esse le pendenze siano inferiori ai 45°. Questo fatto è legato principalmente alla modalità con cui Rockyfor3D simula il distacco, il quale attribuisce al blocco in uscita una velocità iniziale di default pari a 0,5 m/s in verticale verso il basso ed in orizzontale in uscita dal versante. Mentre nel caso del volume di 0,1 m³ tale input di velocità non è sufficiente a permettere l'uscita del blocco dalla cella indicata come nicchia di distacco, nel caso del volume da 1,0 m³ risulta sufficiente al superamento delle resistenze offerte dal versante, quali scabrezza e vegetazione.

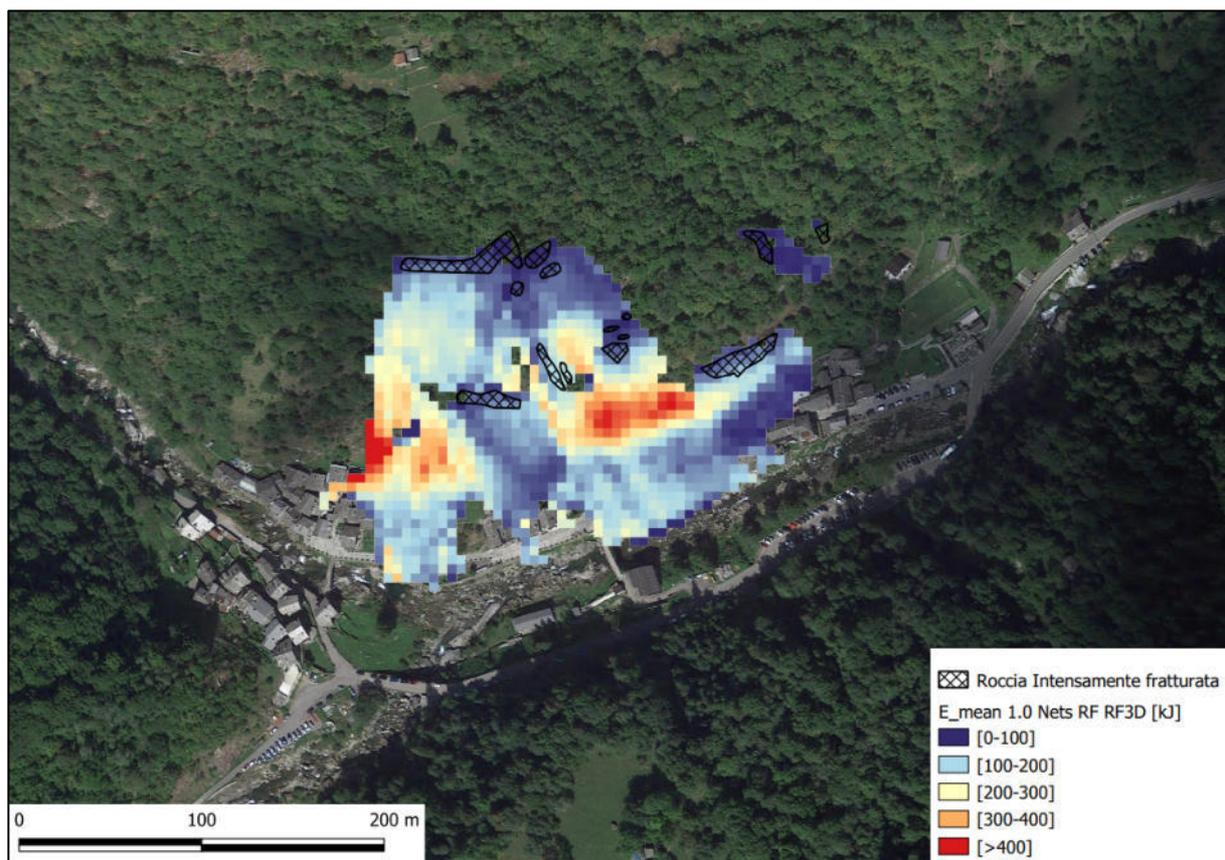


Figura 6.1-4: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 1,0 m³

In Figura 6.1-4 è possibile osservare che in questo caso anche la località San Giovanni è interessata dal fenomeno e l'area di invasione si conclude in corrispondenza del torrente Sorba. Le energie massime sono principalmente concentrate in corrispondenza della zona ad elevata acclività, immediatamente a ridosso dell'abitato, con picchi superiori ai 400 kJ. In corrispondenza del collettore in località Centro viene registrato un picco di circa 1255 kJ, mentre in località San Giovanni si ha un massimo di circa 804 kJ. In Tabella 6.1-2 sono riportati i dati post-processati delle variabili cinematiche registrati ai collettori. Per meglio comprendere la distribuzione delle energie a ridosso dell'abitato, vengono riportate di seguito, Figura 6.1-5 e Figura 6.1-6, le curve di frequenza cumulata.

Collettore	n° Blocchi	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	2317846	94.2	364.2	419.2	481.2	0.5	0.5	0.6	0.8	8	15.9
San Giovanni	3167	189.4	390.4	447.4	513.4	0.5	0.5	0.5	0.6	9.8	15.6

Tabella 6.1-2: Valori post-processati ai collettori per il volume 1,0 m³

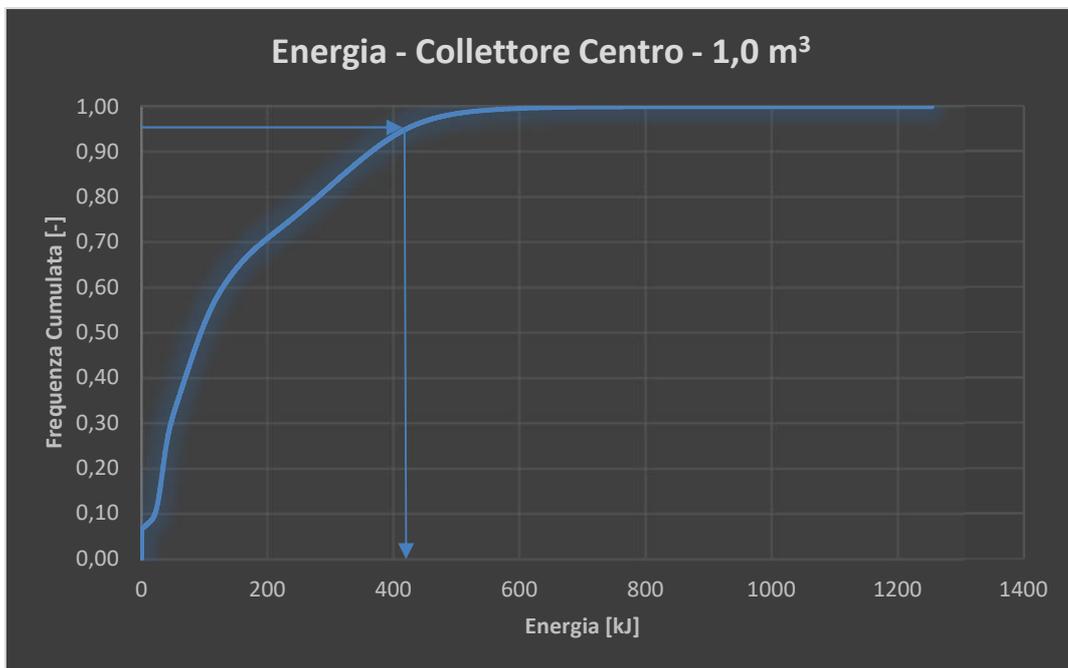


Figura 6.1-5: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m³ – Centro

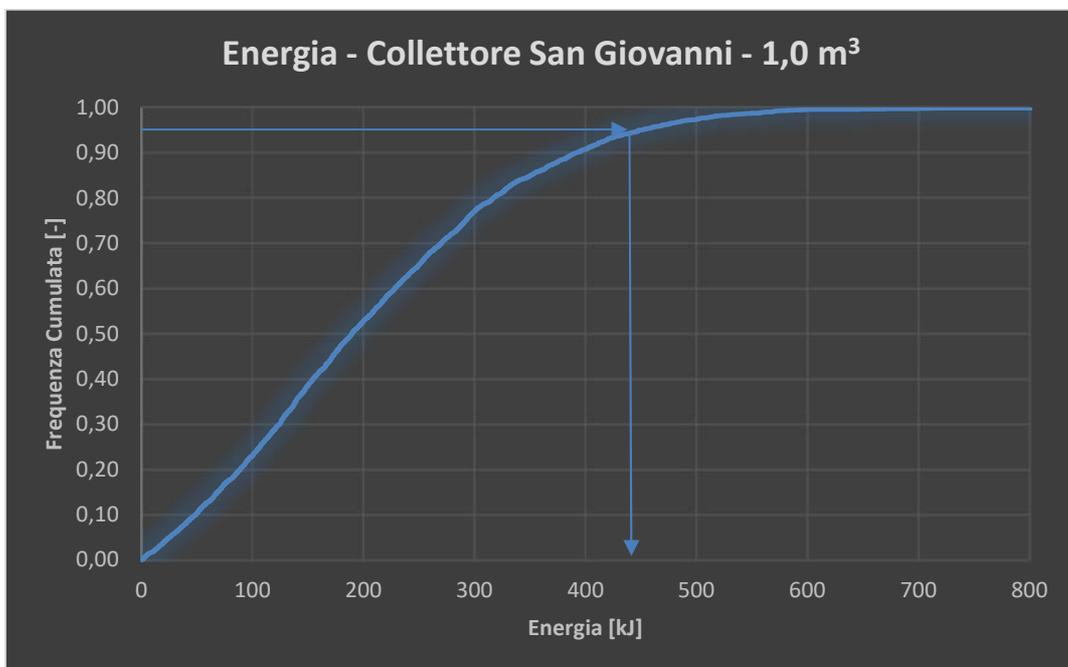


Figura 6.1-6: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m³ – San Giovanni

Nonostante i due massimi registrati siano abbastanza differenti, in località San Giovanni il picco registrato è circa il 60 % di quello registrato in località Centro, le curve di frequenza cumulata mostrano un valore praticamente identico al 95%, pari a 419,2 kJ in località Centro e 447,4 kJ in località San Giovanni. La differenza sostanziale tra le due località è il numero di blocchi da cui vengono raggiunte: in località San Giovanni i blocchi che arrivano a ridosso dell'abitato sono circa lo 0,14% di quelli che arrivano in località Centro, mostrando come quest'ultima sia maggiormente soggetta al fenomeno di caduta massi (Tabella 6.1-2).

6.1.3. Scenario di 5,0 m³

Il blocco di circa 5,0 m³ (1,7x1,8x1,7 m³) presenta, come ci si aspetta, le aree di invasione maggiori (Figura 6.1-7), che si arrestano in corrispondenza del torrente Sorba.

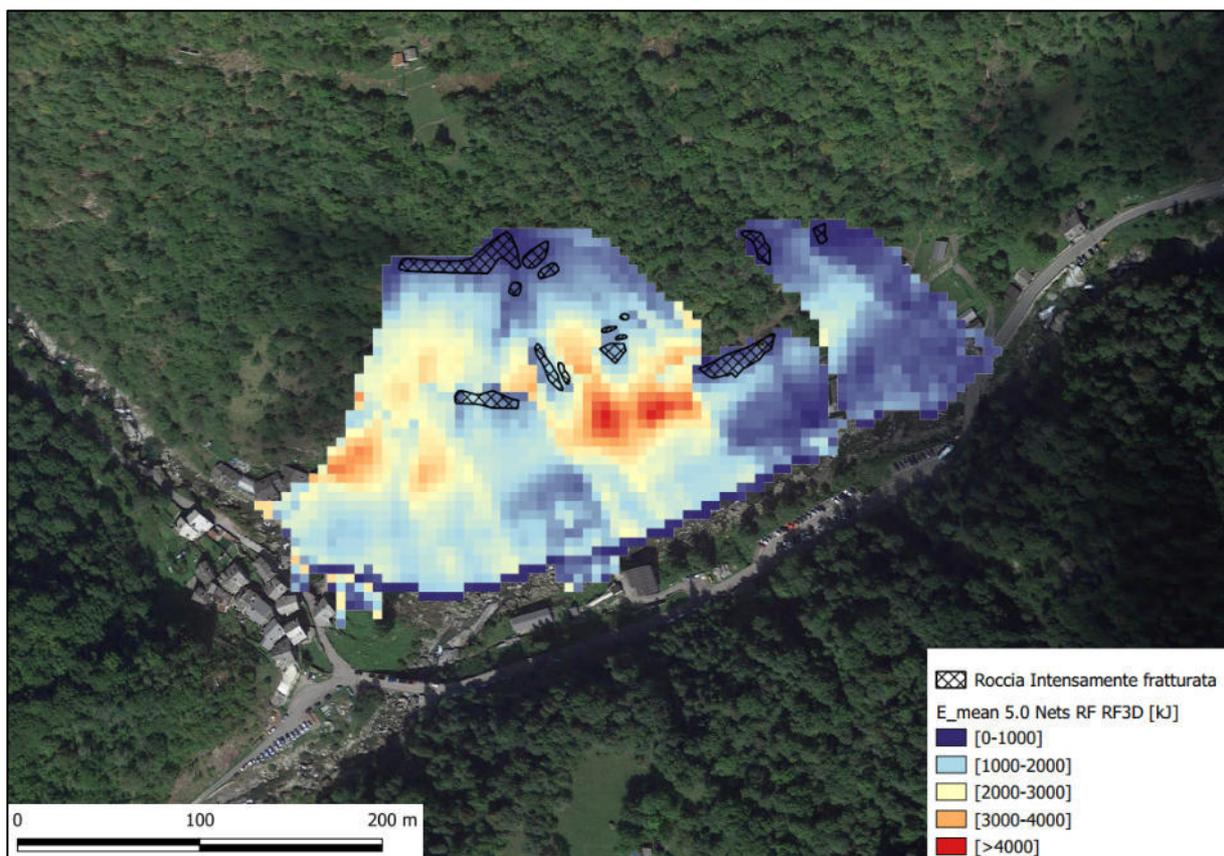


Figura 6.1-7: Energia media per distacco da roccia intensamente fratturata – 5,0 m³

La collocazione dei picchi di energia rimane la stessa degli altri scenari, in corrispondenza del brusco cambiamento di pendenza a ridosso degli edifici, dove l'acclività è elevata. Con tale volume tutte le nicchie di distacco alimentano il fenomeno di propagazione a causa delle elevate energie in gioco. Si manifestano picchi di energia superiori ai 4000 kJ a ridosso di entrambe le località, con un'estensione maggiore in località Centro (Figura 6.1-7), con un massimo di circa 12800 kJ in località Centro e un massimo di circa 7200 kJ in località San Giovanni.

Collettore	n	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	4638555	1484.4	4120.4	4798.4	5490.4	0.9	1.1	1.5	2.4	13	23.7
San Giovanni	417632	1707.3	3036.3	3453.3	3961.3	0.9	1.00	1.1	1.4	13.2	19.3

Tabella 6.1-3: Valori post-processati ai collettori per il volume 5,0 m³

Come si può osservare in Tabella 6.1-3 e in Figura 6.1-8 e Figura 6.1-9 (dove sono riepilogati i dati post processati anche per le altre variabili cinematiche e le curve di frequenza cumulata dell'energia) in corrispondenza della località Centro al 95% della curva di frequenza cumulata si raggiungono 4798,4 kJ, contro i 3453,3 kJ al 95% in località San Giovanni. Le cumulate di energia al 95% differiscono di circa 1300 kJ, una differenza più marcata rispetto a quanto osservato per il volume di 1,0 m³, legata anche al maggior numero di nicchie di distacco che alimentano il fenomeno. La differenza sostanziale è ancora una volta individuata al numero di blocchi che raggiungono le due località, con i blocchi registrati al collettore sito in San Giovanni pari a circa il 10% di quelli registrati al collettore sito in Centro. Questo conferma quanto già osservato in precedenza, ovvero che la località più soggetta al fenomeno di caduta massi è Centro. Questo si lega principalmente alla disposizione delle nicchie di distacco, prevalentemente posizionate al di sopra della località Centro, come è possibile osservare in Figura 6.1-1.

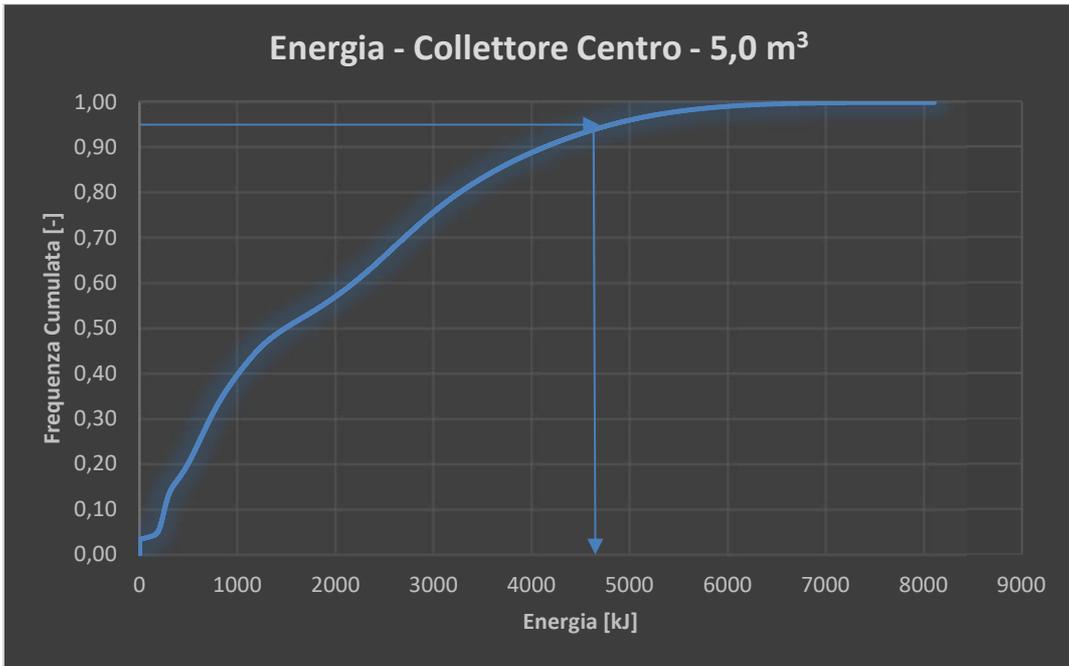


Figura 6.1-8: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m³ – Centro

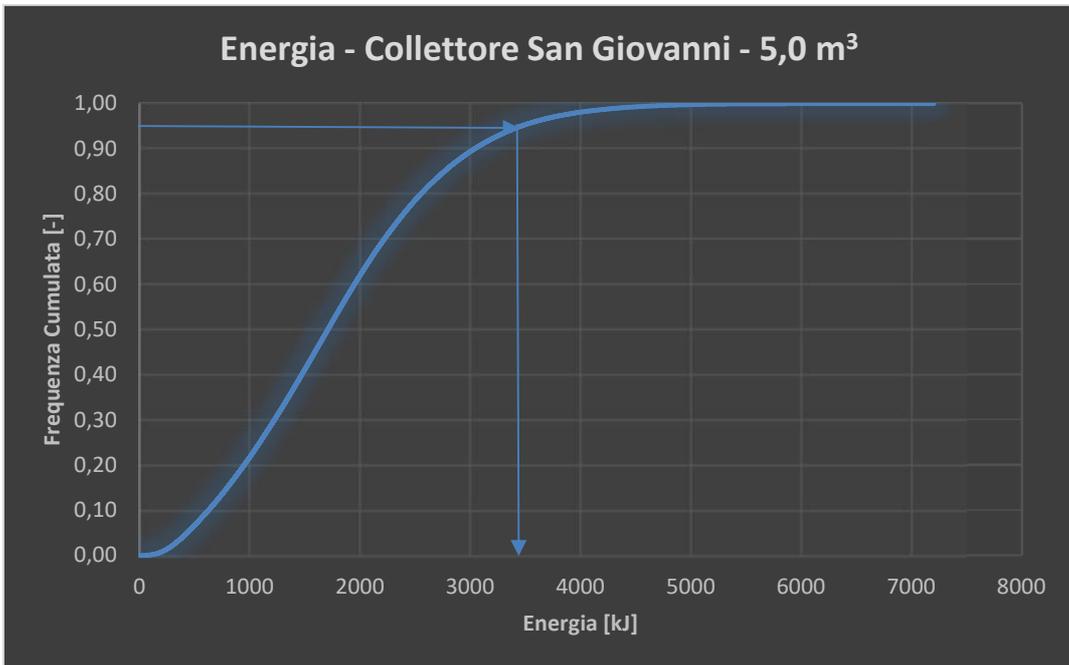


Figura 6.1-9: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m³ – San Giovanni

6.2. Confronto analisi Rockyfor3D-QPROTO – Scenario di roccia intensamente fratturata

Vengono di seguito esposti i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte con il plugin QPROTO (si veda il Capitolo 5.4 per la sua descrizione) e al contempo raffrontati con gli output forniti da Rockyfor3D per gli stessi volumi utilizzati negli scenari previsionali di distacco da roccia intensamente fratturata. Nell'ambito di QPROTO alle nicchie di roccia intensamente fratturata è stato assegnato un indice di distacco I_D pari a 1,0 ovvero il 100% di probabilità di distacco (intesa come probabilità spaziale in quanto non si hanno informazioni sulla distribuzione temporale dei crolli). Si ricorda che i confronti, come già esposto, verranno effettuati in termini di energia media in assenza di barriere, andando ad analizzare le aree di invasione relative, i trend e la posizione dei picchi lungo i collettori posti in località Centro e in località San Giovanni.

6.2.1. Scenario di 0,1 m³

In termini di area di invasione l'output di QPROTO fornisce un'area leggermente inferiore di quella fornita da Rockyfor3D. Le due zone sono comunque molto compatibili e le differenze possono essere attribuite al modello di calcolo alla base dei due software. Infatti si ricorda che QPROTO si basa su un modello deterministico che individua le zone aree di invasione in maniera puramente geometrica, attraverso la costruzione di un cono di assegnati parametri e le energie sono calcolate anch'esse in maniera geometrica in funzione della distanza energy line-pendio, mentre Rockyfor3D si basa su un modello fisicamente basato e probabilistico non vincolato ad un'area prestabilita. Questo consente a Rockyfor3D di simulare il moto in funzione delle condizioni locali per ogni cella. Un'altra motivazione legata a queste differenze può essere ricercata nel fatto che se la pendenza locale nella cella di distacco è inferiore a 45°, QPROTO non simula il distacco, non generando quindi il cono di invasione. Altro parametro geometrico che influenza l'output di QPROTO, se non il principale, è l'angolo dell'energy line ϕ_p che determina quanto a valle si estende l'area di invasione. Anche se nella procedura di creazione del cono viene tenuta in conto la superficie convessa del DTM al di sotto del cono per evitare

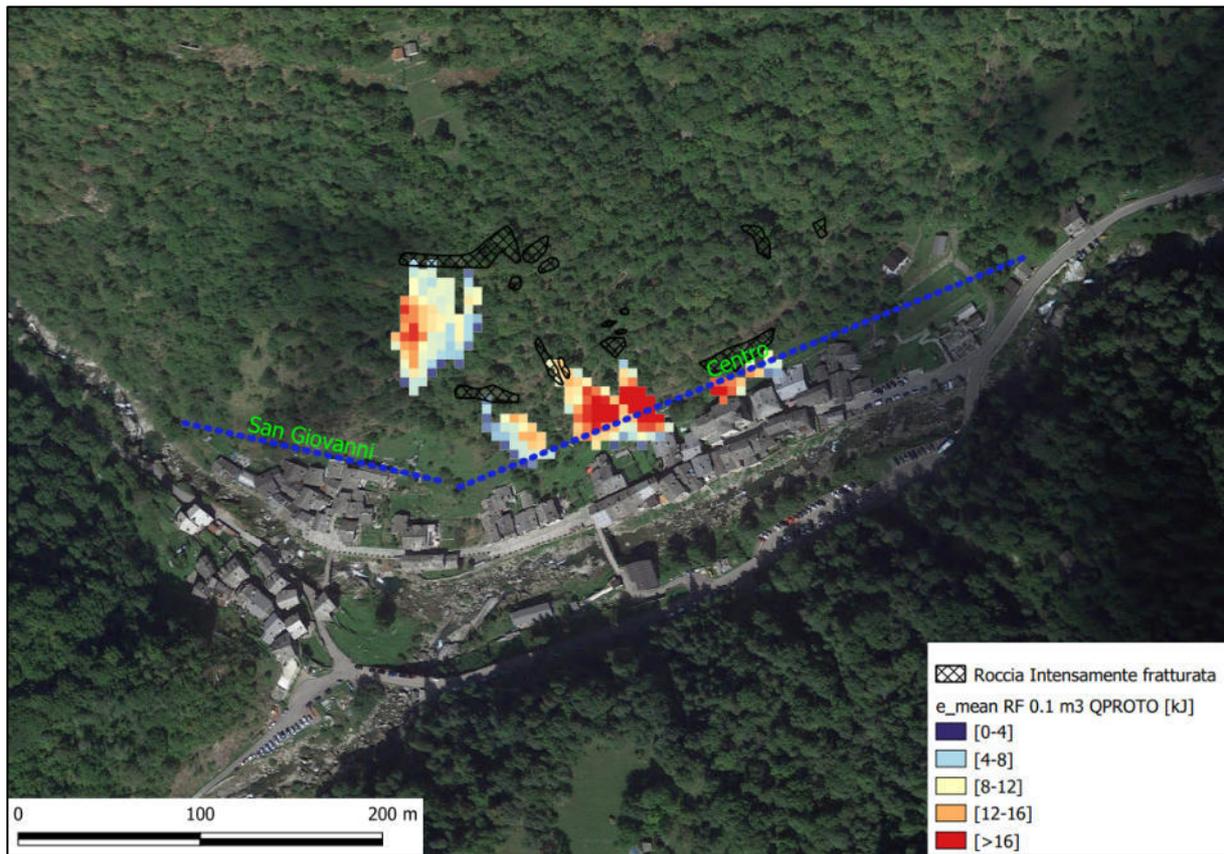


Figura 6.2-1: Energia media fornita da QPROTO per 0,1 m³

il fenomeno dei punti nascosti (Figura 5.4-4), una brusca variazione di pendenza che poi si mantiene costante per una grande distanza può arrestare la creazione del cono, mentre in Rockyfor3D se i blocchi sono dotati di sufficiente energia possono continuare a muoversi verso valle. È bene tenere presente è stato utilizzato un unico angolo φ_p per tutte le nicchie di distacco (tale angolo è stato tarato su un pendio virtuale di semplice forma), mentre nella realtà l'angolo è diverso per ogni nicchia di distacco. Infine, altro fattore che si lega alle differenze tra le due aree di invasione può essere ricercato nel valore assunto da φ_p , che al suo crescere (quindi con inclinazioni verso il basso maggiori) risente maggiormente delle imperfezioni del versante reale e combinato all'apertura laterale α del cono porta alla creazione di differenti aree di invasione. Il risultato infatti, come si vedrà più avanti per gli altri scenari, migliora sensibilmente in termini di aree di invasione, al crescere del volume e quindi al decrescere dell'angolo φ_p . L'angolo α è stato mantenuto pari a 16,5°, così come definito in sede di calibrazione nella back analysis. Nonostante queste differenze (in media una o due celle di DTM) riscontrate e giustificabili da quanto esposto, la sovrapposizione risulta comunque buona e mette in evidenza le zone maggiormente soggette al fenomeno.

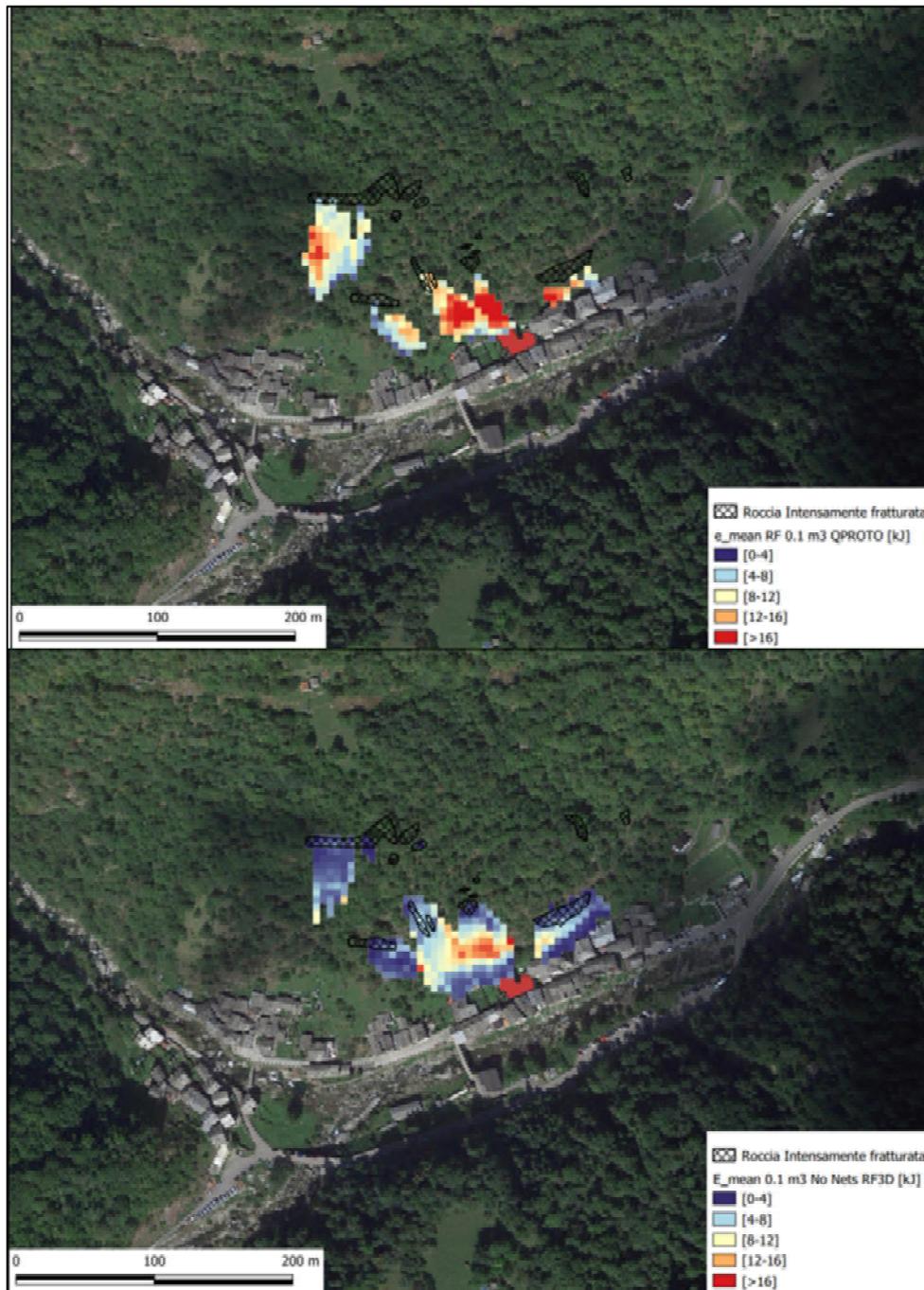


Figura 6.2-2: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per $0,1 \text{ m}^3$

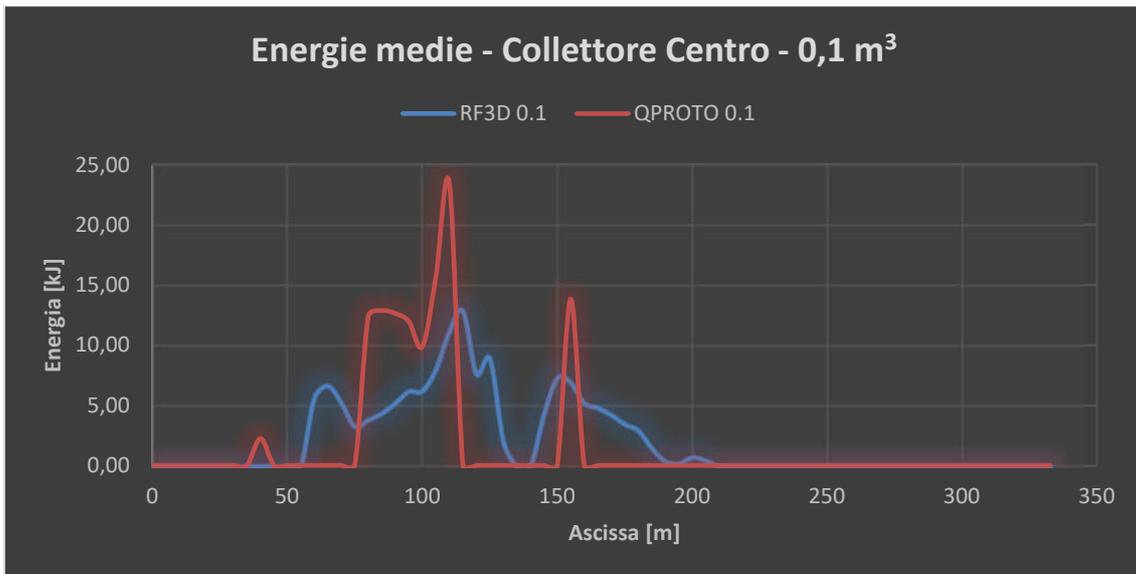


Figura 6.2-3: Confronto energie medie 0,1 m³ – Centro

Descrivendo i due output in termini di energie, si può fare riferimento al loro andamento lungo il collettore in località Centro (il collettore in località San Giovanni non viene interessato) mostrato in Figura 6.2-3.

Globalmente si può osservare come le energie fornite da QPROTO siano cautelative rispetto a quelle fornite da Rockyfor3D (in questo scenario pari a circa il doppio), a parte in alcuni punti dove il cono di invasione di QPROTO non è presente e in tale zona l'energia è nulla (Figura 6.2-2). Le differenze in termini di posizione dei picchi sono imputabili, oltre a quanto esposto, anche alle differenti zone di arrivo delle aree di invasione ai collettori.

6.2.2. Scenario di 1,0 m³

In merito allo scenario di distacco del volume di 1,0 m³ in Figura 6.2-4 è riportata l'area di invasione fornita da QPROTO in termini di energia media, mentre in Figura 6.2-5 è riportato il confronto con il medesimo output di Rockyfor3D.

In Figura 6.2-4 è rappresentato l'output di QPROTO in termini di energia media per il distacco del volume di 1,0 m³ dalle nicchie di roccia intensamente fratturata. Per quanto riguarda le aree di invasione, dalla Figura 6.2-5, è possibile osservare il confronto con l'output fornito da

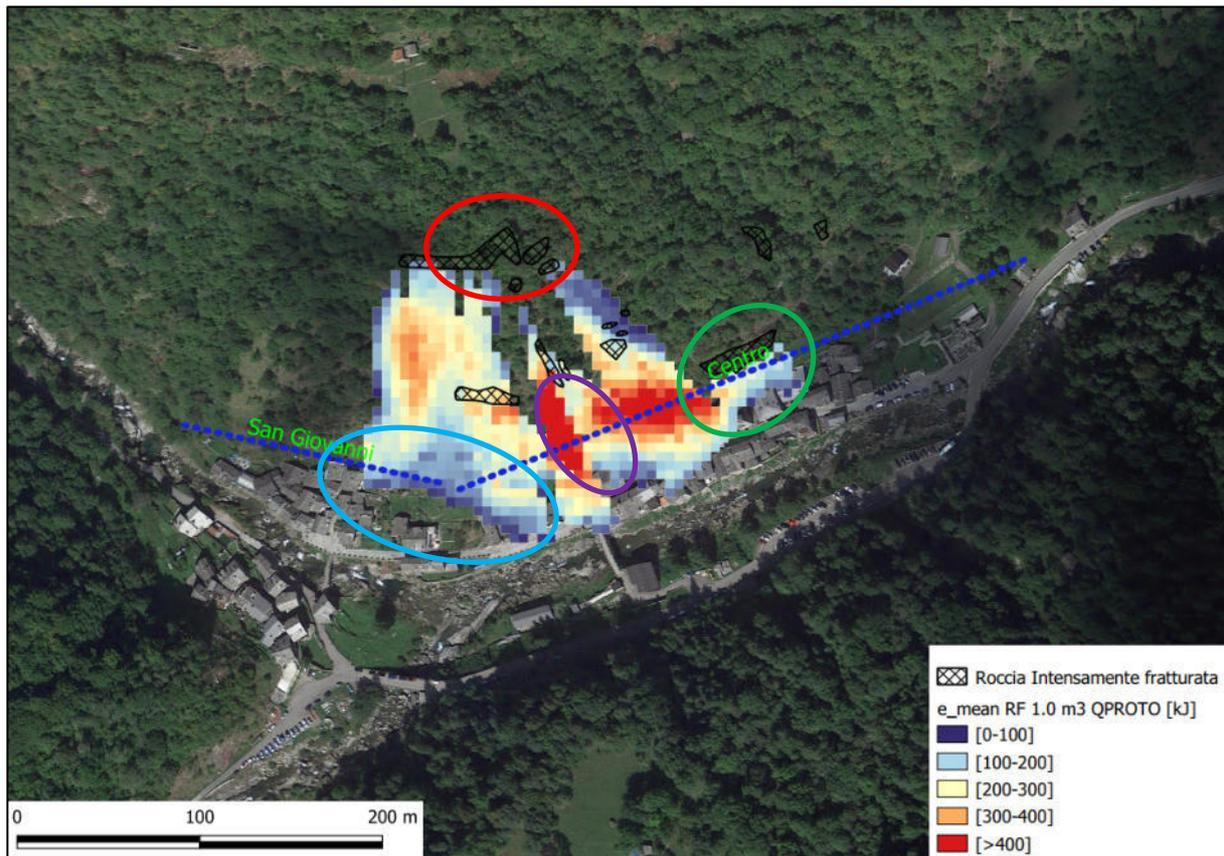


Figura 6.2-4: Energia media fornita da QPROTO per $1,0 \text{ m}^3$

Rockyfor3D, mostrando una buona corrispondenza nella zona a ridosso dell'abitato in località Centro. Le zone di discontinuità riscontrate nell'analisi di QPROTO sono da imputare essenzialmente a due fattori di seguito descritti nel dettaglio.

La prima ragione della discrepanza è legata al fatto che le zone di distacco indicate dall'ellisse rosso in Figura 6.2-4 hanno una pendenza inferiore a 45° e da esse QPROTO non genera coni di invasione. La seconda motivazione risiede nell'adozione di un angolo costante φ_p pari a 40° per il volume da $1,0 \text{ m}^3$ che va in conflitto con quella che è la pendenza del versante. In particolare ci si riferisce alla zona di versante a ridosso della località San Giovanni (ellisse celeste in Figura 6.2-4), dove la pendenza media del versante, pari a circa 39° è sostanzialmente identica alla pendenza assunta per l'energy line. Tale misura è stata effettuata attraverso il tool qprof, eseguendo una sezione del DTM a partire dalla nicchia di distacco fino alla cella successiva al termine della zona di arresto (Figura 6.2-6). L'output di tale operazione è riportato in Figura 6.2-7, dove è possibile vedere l'andamento del profilo altimetrico e dell'energy line, inclinato di 40° . Come si può facilmente osservare l'energy line interseca il versante all'ascissa di circa 120 m dalla nicchia di distacco, concludendo di fatto l'estensione del cono di invasione.

Questo non succede con Rockyfor3D che tiene conto, come già ampiamente esposto, delle condizioni del blocco nella cella in esame per poter calcolare ciò che avviene nelle celle successive o se il blocco effettivamente si arresta. Per le altre discrepanze tra i due modelli valgono considerazioni analoghe a quelle appena fatte.

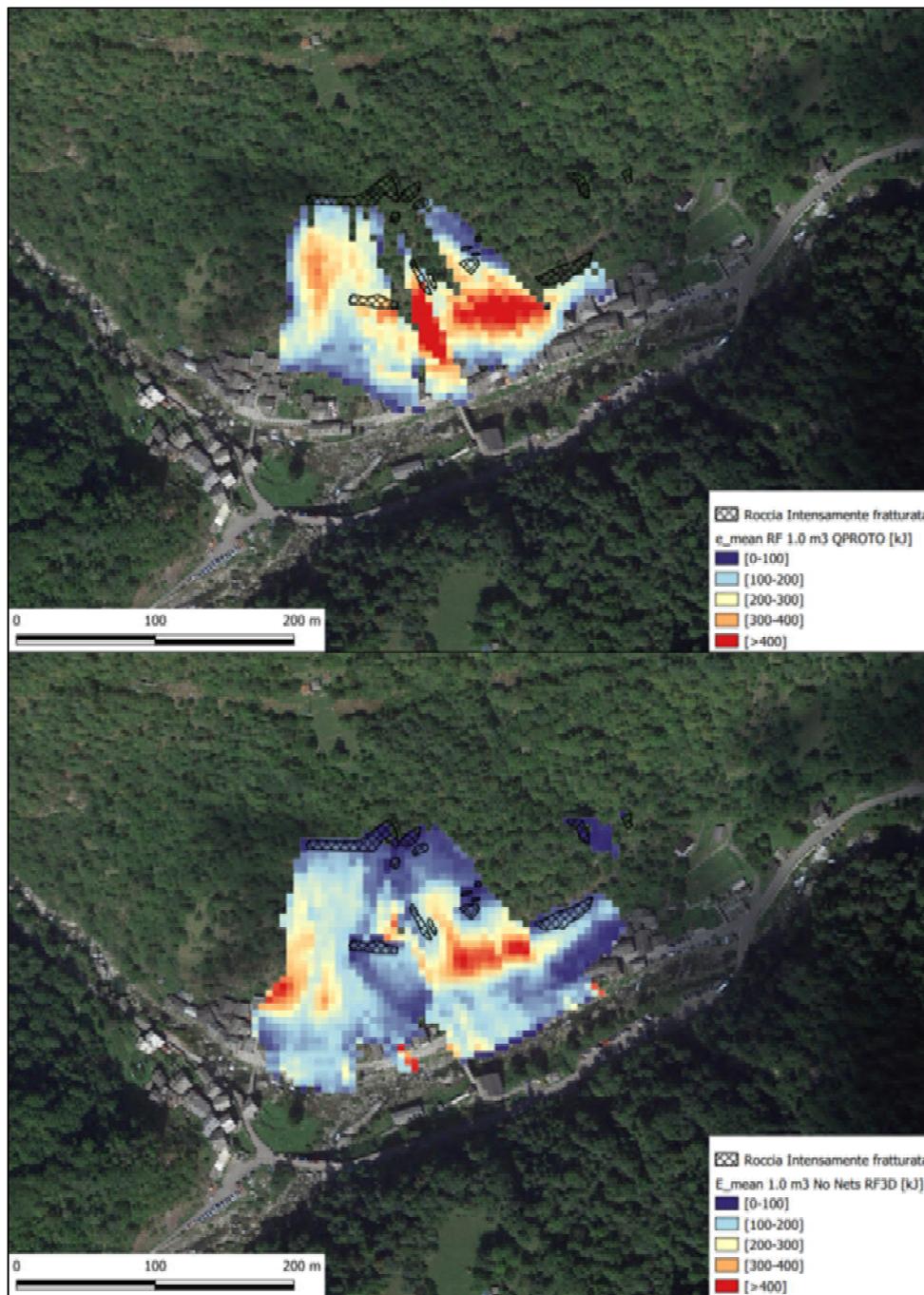


Figura 6.2-5: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 1,0 m³

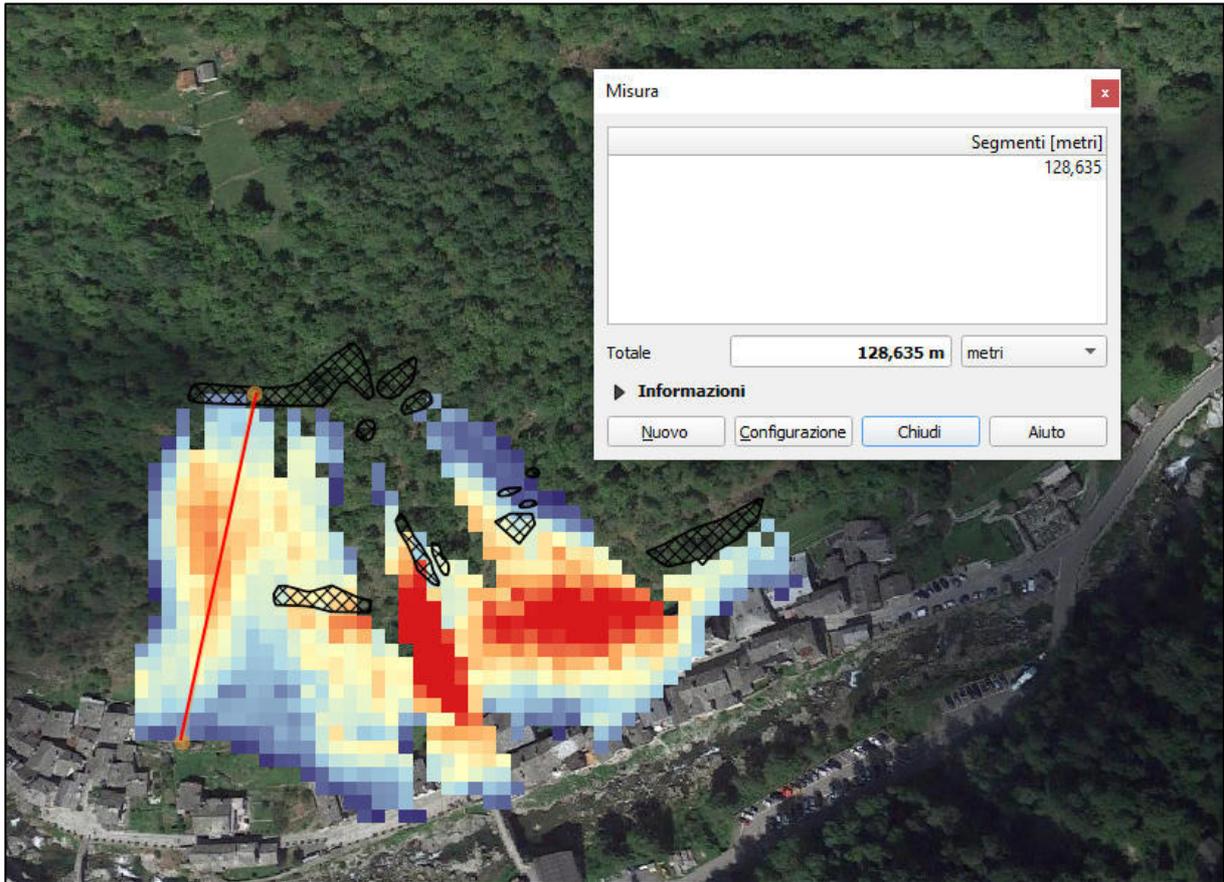


Figura 6.2-6: Profilo altimetrico in località San Giovanni



Figura 6.2-7: Profilo altimetrico di Figura 6.2-6

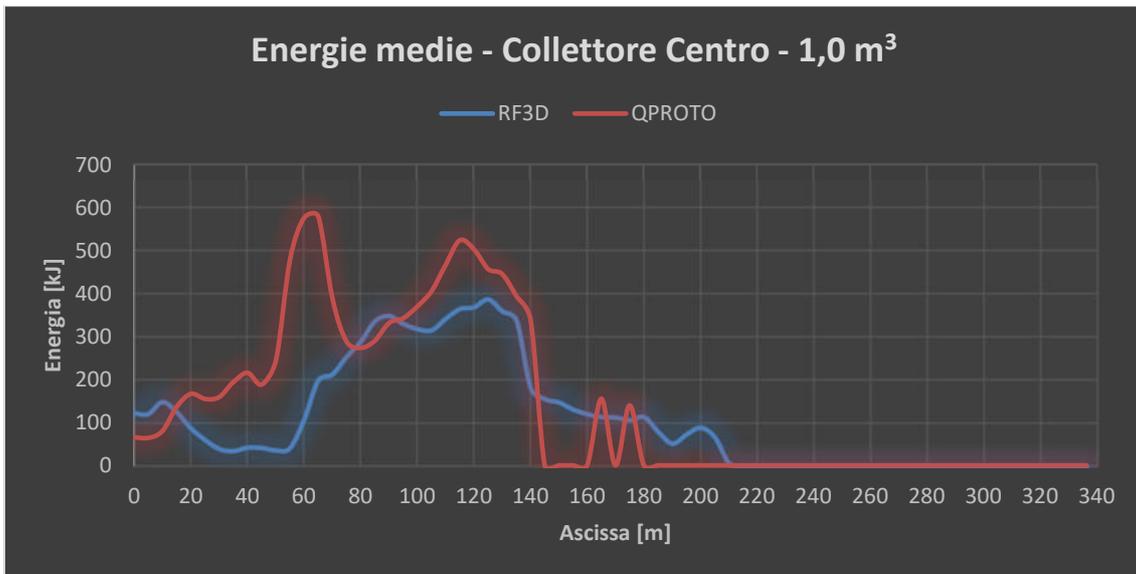


Figura 6.2-8: Confronto energie medie 1,0 m³ – Centro

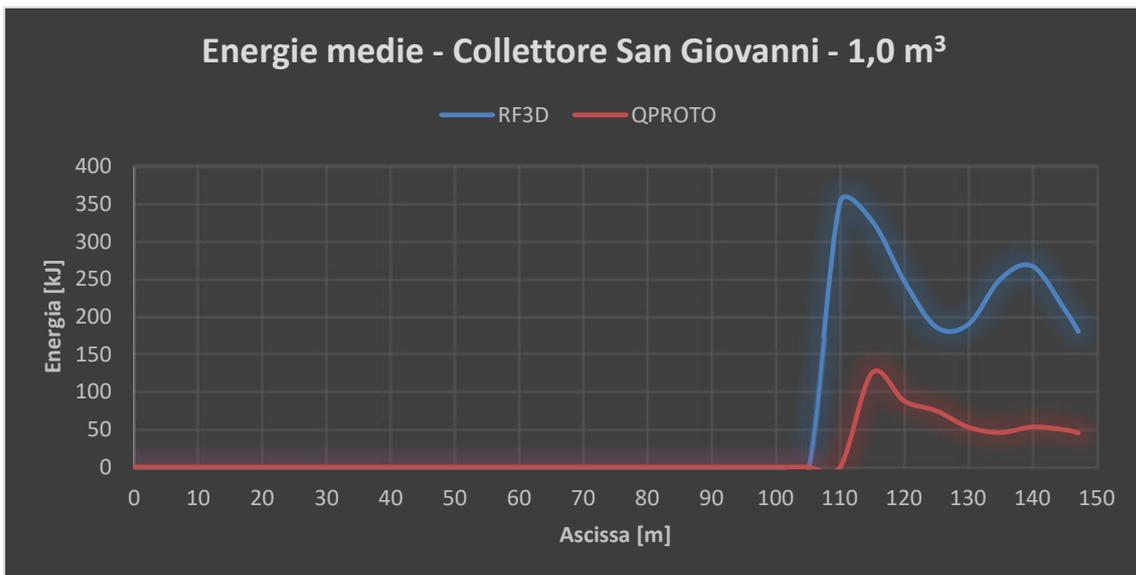


Figura 6.2-9: Confronto energie medie 1,0 m³ – San Giovanni

Per quanto riguarda l'andamento delle energie lungo i due collettori, riportati in Figura 6.2-8 e Figura 6.2-9, si può osservare che i due trend sono piuttosto differenti. In merito al collettore in località Centro, quello più interessato dal fenomeno, si può affermare che in generale QPROTO è cautelativo, ad esclusione delle zone dove effettivamente non vi è compatibilità di aree di invasione. Sempre per la differenza di metodologia di calcolo delle energie, in presenza di irregolarità del versante laddove l'energy line si trova molto vicina al terreno e dove quindi

QPROTO mostra basse energie, Rockyfor3D potrebbe aver simulato un blocco che arriva in tale zona con energia maggiore e si verifica quindi un'inversione del trend, dove QPROTO non è più conservativo. Questo è uno dei possibili motivi per dell'inversione all'ascissa 0 m per il collettore in località Centro. All'ascissa 170 m circa si presenta un'altra situazione simile, dove i coni di invasione di QPROTO sono molto limitati (ellisse verde in Figura 6.2-4) dove le celle di distacco si trovano in una zona ad elevata pendenza, in media di circa 50° e si concludono immediatamente poco più a valle, dove la pendenza passa bruscamente a 13° circa. Inoltre, per quanto esposto in merito all'assenza di alcuni coni di invasione, questo può riflettersi nelle zone dove l'andamento delle energie lungo i collettori assume valori nulli o mostra brusche variazioni, situazione tipica in zone dove si ha transizione tra due coni di invasione, nei quali in genere si hanno energie basse alle estremità dell'apertura laterale. Tale situazione si presenta appunto all'ascissa di 80 m circa in Figura 6.2-8, corrispondente all'ellisse viola in Figura 6.2-4.

Per quanto riguarda il collettore in località San Giovanni si può osservare un trend praticamente identico delle energie, ma con QPROTO non cautelativo rispetto a Rockyfor3D. Questo può essere spiegato ricollegandosi a quanto esposto precedentemente sull'arresto del cono di invasione di QPROTO per la quasi uguaglianza della pendenza media del versante con l'inclinazione dell'energy line. Infatti il cono di invasione si arresta appena a valle del collettore, con basse energie.

La simulazione risulta meno influenzata dalle irregolarità topografiche locali rispetto allo scenario con il volume da $0,1 \text{ m}^3$, mostrando una riduzione di tale influenza al diminuire dell'angolo φ_p , in quanto aumenta la distanza tra il pendio l'energy line. Infatti queste irregolarità, di entità costante poichè proprietà del pendio, risultano essere meno significative nei confronti dalla funzione di visibilità, che con un energy line angle minore permette una "visione" del versante al di sopra di tali irregolarità. In questo senso la creazione dei coni di invasione risente meno delle irregolarità del versante per energy line angle minori ovvero, per il medesimo versante, per volumetrie maggiori.

6.2.3. Scenario di 5,0 m³

In questo caso l'area di invasione mostra una buona compatibilità con l'output fornito da Rockyfor3D (Figura 6.2-12), con le energie fornite da QPROTO globalmente cautelative, a parte naturalmente le zone di discontinuità tra i due modelli, sempre presenti ma in misura ed entità minori.

Si può infatti osservare in Figura 6.2-12 come vi sia una zona identificata da QPROTO come area di invasione, mentre secondo il modello di Rockyfor3D tale area non viene interessata dal fenomeno (ellisse verde). La ragione di tale assenza nelle aree di invasione fornite da Rockyfor3D è mostrata in Figura 6.2-11 attraverso i profili altimetrici longitudinalmente e trasversalmente al versante (lungo le linee rosse nella medesima figura). Infatti la sezione longitudinale è posizionata in corrispondenza dell'ascissa 35 m circa della sezione trasversale, dove si può vedere come la pendenza sia decrescente in quel tratto, rendendo la pendenza longitudinale il percorso più favorevole.

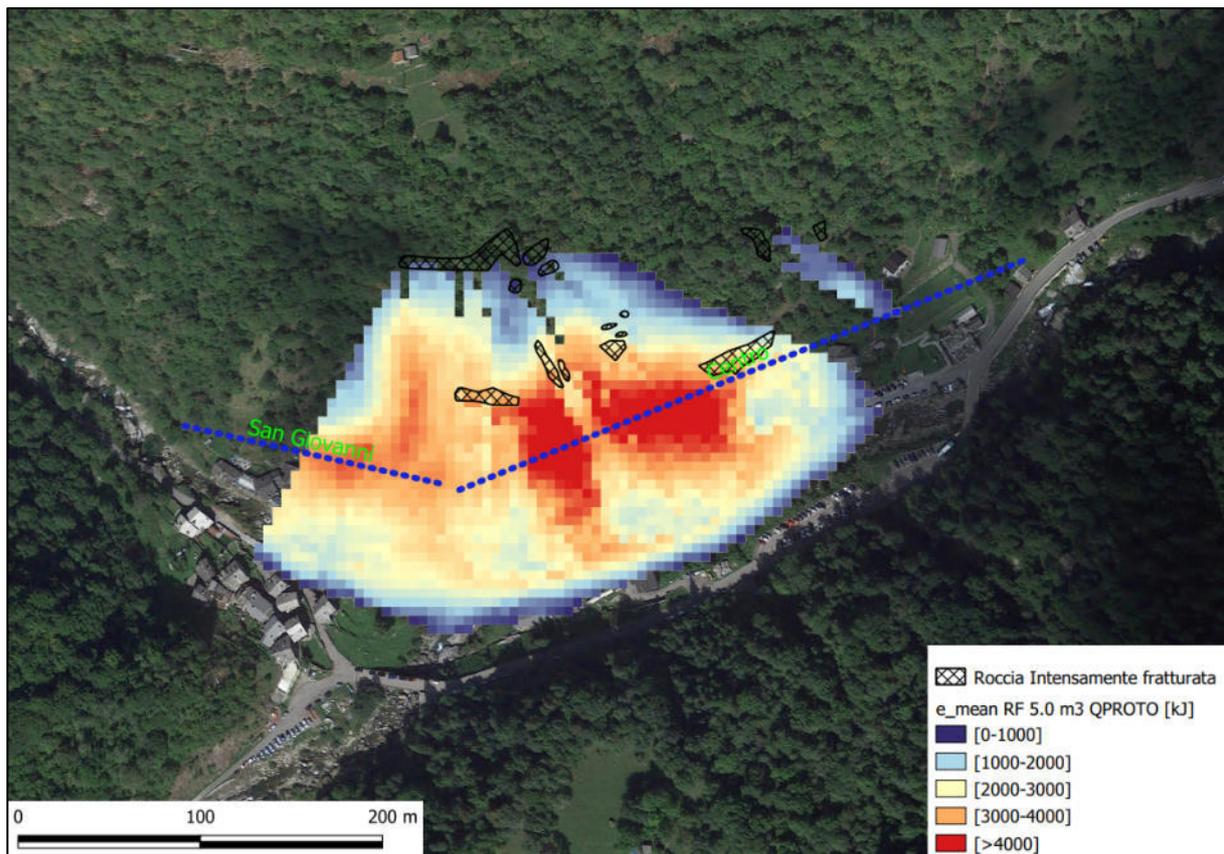


Figura 6.2-10: Energia media fornita da QPROTO per 5,0 m³

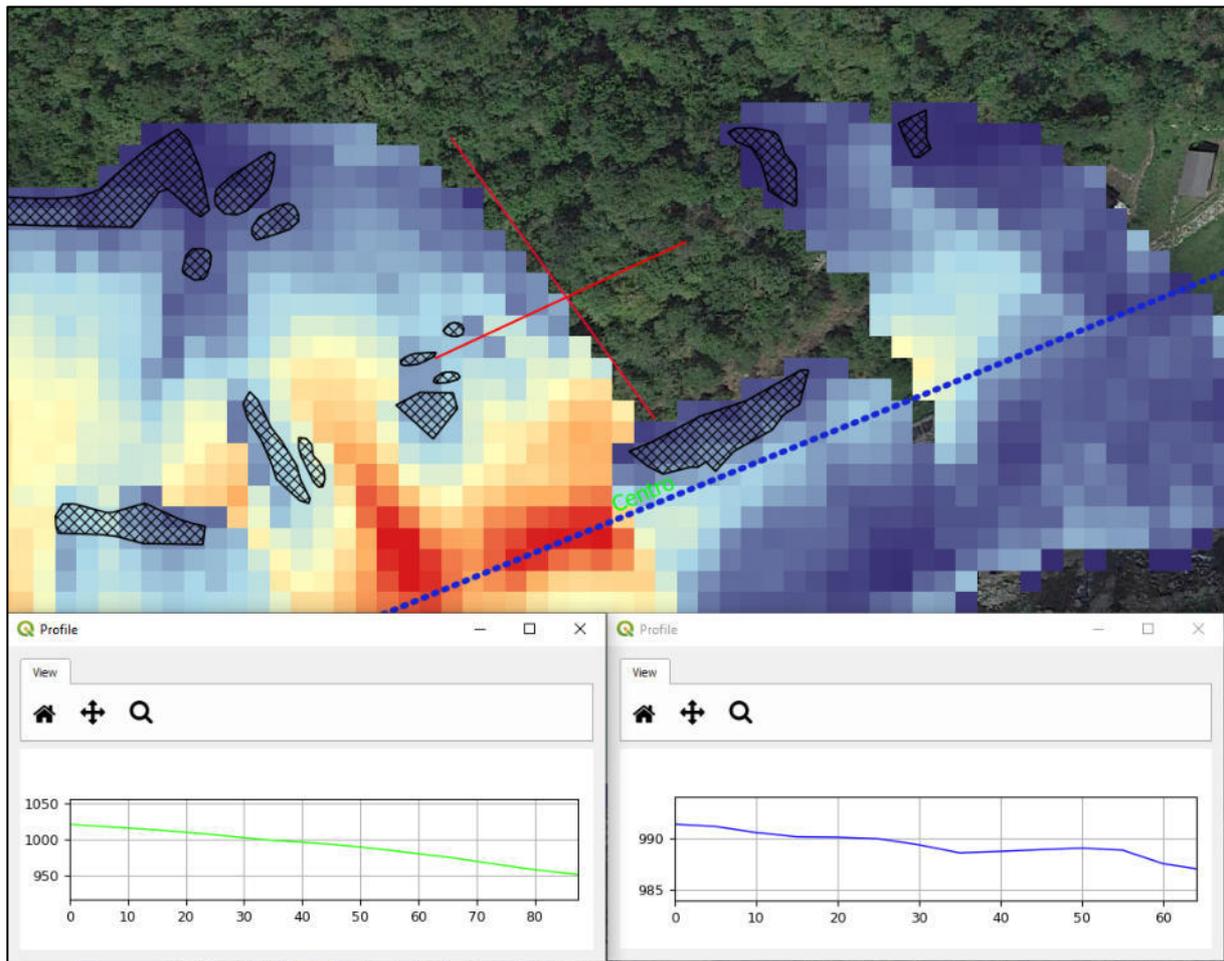


Figura 6.2-11: Profili longitudinale (linea verde) e trasversale (linea blu)

Inoltre in tale punto le energie dei blocchi sono piuttosto basse, compatibilmente con la distanza dalle nicchie di distacco e con le azioni dissipative indotte dalla scabrezza e dalla vegetazione.

Sempre in Figura 6.2-12 è possibile notare che l'area di invasione che nasce dalle nicchie di distacco indicate all'interno dell'ellisse giallo risulta più limitata in QPROTO che in Rockyfor3D. Questo perché solo alcuni punti in tale zona hanno pendenza locale superiore ai 45° , mentre le restanti nicchie possiedono una pendenza dell'ordine dei 35° e le simulazioni di QPROTO non vi fanno nascere i relativi i coni di invasione.

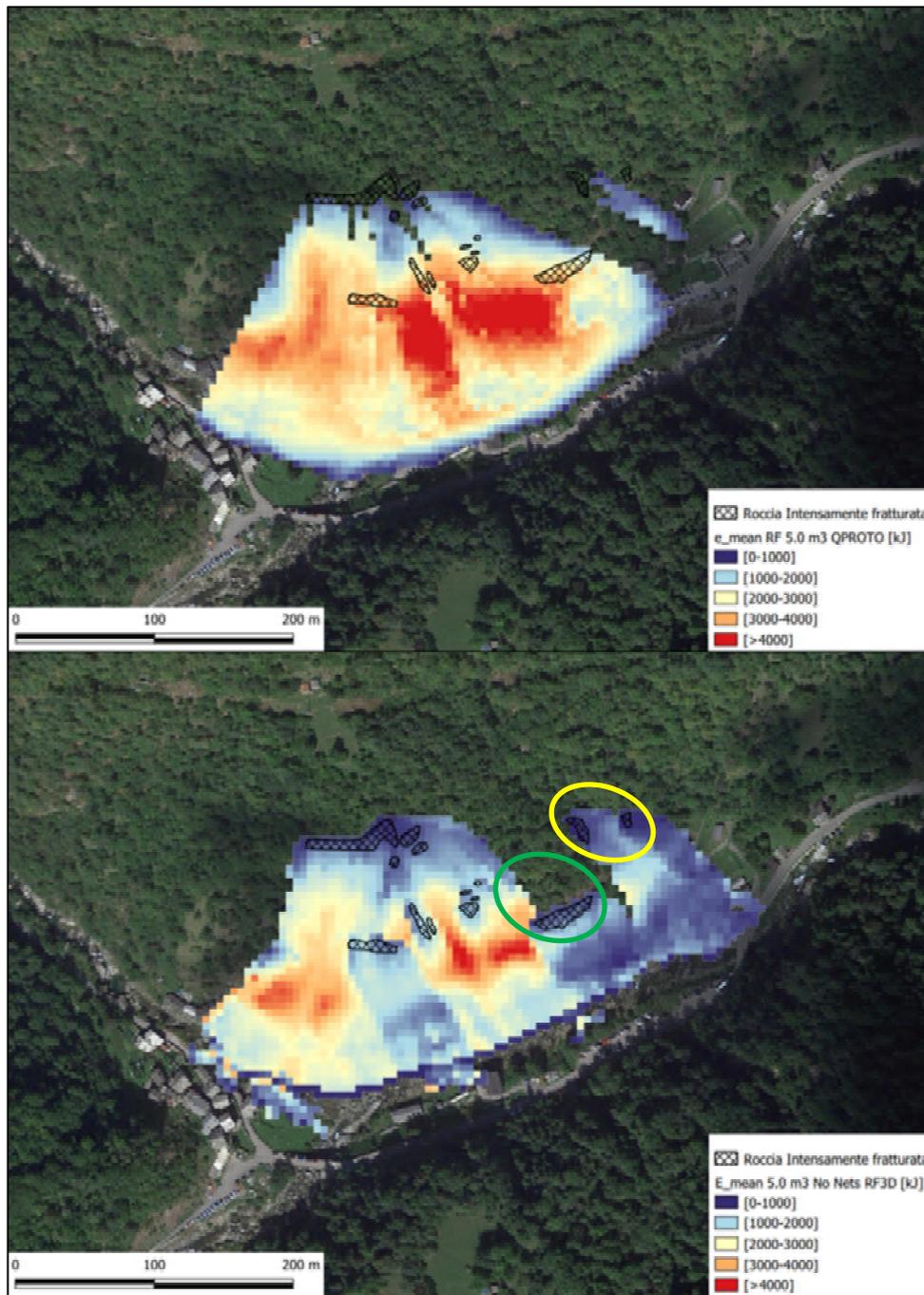


Figura 6.2-12: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per $5,0 \text{ m}^3$

Per quanto riguarda le energie è possibile osservare in Figura 6.2-12 che le zone identificate come massimi (aree in rosso) sono notevolmente più estese nelle analisi di QPROTO rispetto a quelle di Rockyfor3D. Ancora una volta la discrepanza di risultati è riconducibile al differente modello, infatti in questo scenario l'angolo φ_p è assunto pari a 33° , e di conseguenza l'energy line si discosta abbondantemente dal versante, simulando valori molto alti di energia.

In termini di aree di invasione invece l'angolo assunto favorisce una migliore rappresentazione del versante, in quanto il modello risente meno delle irregolarità topografiche e permette, tramite il modulo *r.viewshed* di esaminare una porzione maggiore di versante, portando però ad una distanza di arresto dei blocchi leggermente maggiore rispetto a quella di Rockyfor3D, pari a circa 25 m in media.

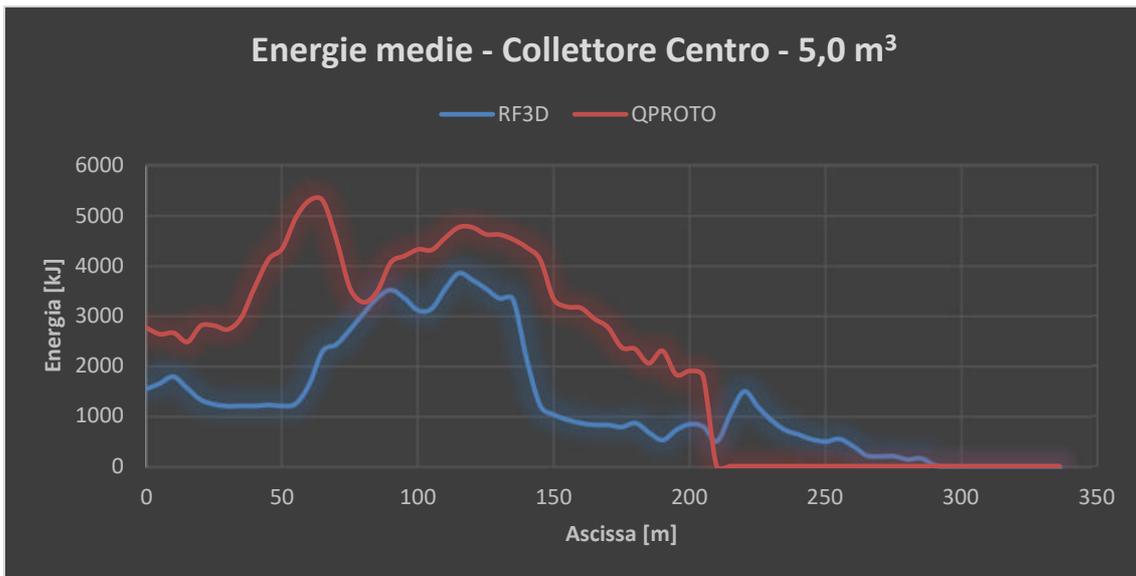


Figura 6.2-13: Confronto energie medie 5,0 m³ – Centro

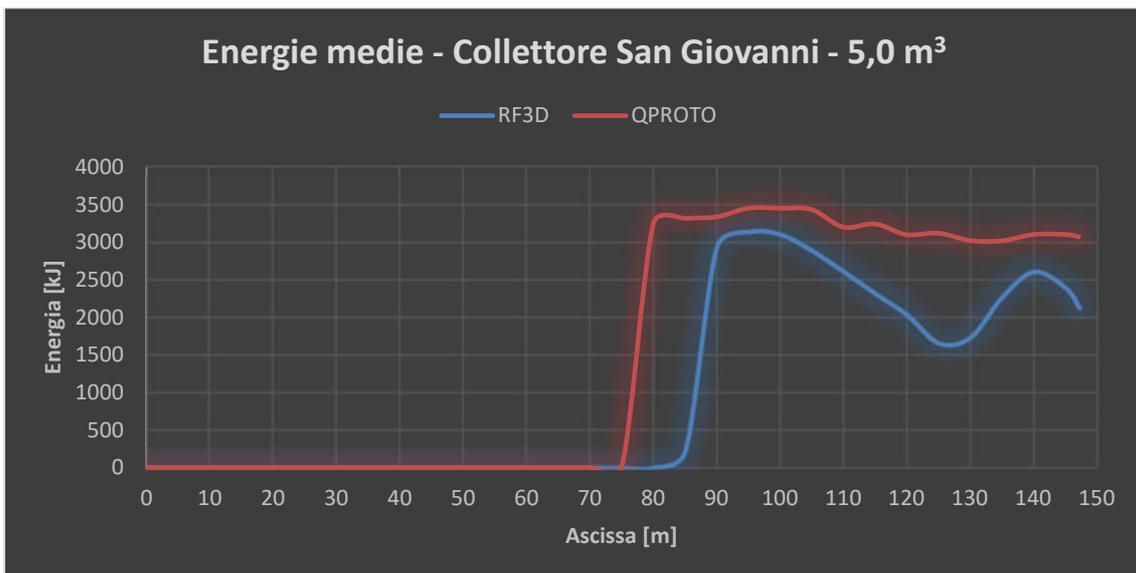


Figura 6.2-14: Confronto energie medie 5,0 m³ – San Giovanni

Monitorando l'andamento delle energie lungo i collettori in località Centro e San Giovanni (Figura 6.2-13 e Figura 6.2-14) è possibile osservare che nel primo caso il trend delle energie è molto simile, a parte due zone esterne, con QPROTO cautelativo. In merito alle due zone di discontinuità si può notare un'oscillazione delle energie di QPROTO tra le ascisse 50 m e 65 m, legata principalmente a variazioni di quota del DTM che riducono/aumentano la distanza energy line – DTM. La discrepanza tra i due modelli a partire dall'ascissa 215 m circa può essere essenzialmente ricondotta all'assenza dei coni di invasione di QPROTO, come è possibile osservare anche in Figura 6.2-10.

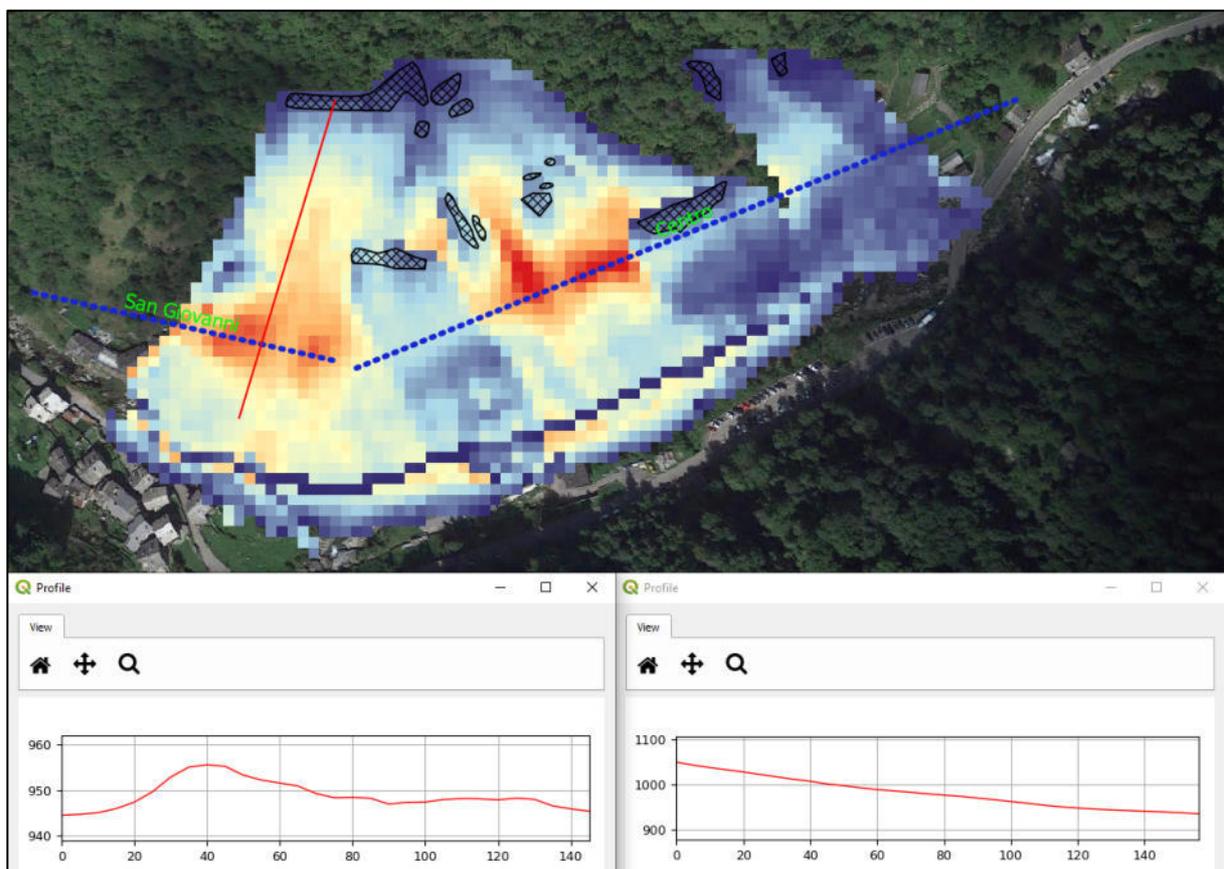


Figura 6.2-15: Profilo altimetrico lungo il collettore San Giovanni (sx) e altimetrico lungo la linea rossa (dx)

Per quanto riguarda invece il collettore in località San Giovanni (Figura 6.2-14) è possibile osservare un trend molto simile, con QPROTO cautelativo in ogni punto. L'unica eccezione è situata all'ascissa 125 m, dove Rockyfor3D mostra un abbattimento delle energie, riconducibile, all'ingresso dei blocchi in una zona sostanzialmente pianeggiante. In Figura

6.2-15 è infatti possibile osservare in contemporanea i profili altimetrici (le cui unità di misura sono in metri) lungo il collettore a sinistra e longitudinalmente alla direzione di massima pendenza del versante a destra, con il collettore posizionato all'ascissa 120 m circa del grafico a destra, dove per l'appunto si trova una zona sostanzialmente pianeggiante. Entrambe le aree di invasione iniziano tra le ascisse 75 m ed 85 m del grafico a sinistra, ovvero delle quote lungo il collettore, con le energie di QPROTO che ne seguono l'andamento.

Si può concludere che QPROTO è in genere conservativo rispetto a Rockyfor3D in quanto fornisce globalmente energie maggiori, a meno delle irregolarità topografiche menzionate e che necessitano di considerazioni legate alla particolarità del caso. Alla luce dei risultati ottenuti dai tre scenari si può affermare che le analisi di QPROTO sono in linea a quelle condotte su Rockyfor3D, con un risultato che migliora al diminuire dell'energy line. Considerando infatti lo scenario di $0,1 \text{ m}^3$ si può infatti affermare che gli output possiedono la minor compatibilità tra i 3 scenari, mentre per gli scenari da $1,0 \text{ m}^3$ e da $5,0 \text{ m}^3$ la compatibilità con gli output di Rockyfor3D migliora notevolmente.

6.3. Distacco da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata – Rockyfor3D

A seguito delle simulazioni di distacco dalle zone di roccia intensamente fratturata vengono simulati gli scenari di distacco, con gli stessi volumi utilizzati in precedenza, in contemporanea dalla roccia esposta (poligono viola) e dalla roccia intensamente fratturata (poligono a tema reticolare nero), la cui configurazione è ripotata in Figura 6.3-1. Si è scelto di simulare tale fenomeno, comunque poco probabile, per poter avere un altro termine di paragone con il plugin QPROTO, il quale, a differenza di Rockyfor3D, permette di assegnare una diversa probabilità di distacco alla roccia esposta e alla roccia intensamente fratturata. Data comunque la dimensione molto più importante delle nicchie di roccia esposta, il fenomeno è governato dalle variabili cinematiche generate dai distacchi ottenuti da quest'ultima. In ogni caso, data la bassa probabilità di distacco dalla roccia esposta rispetto a quello dalla roccia intensamente fratturata, alla prima è stata assegnata una probabilità di distacco, ovvero indice di distacco, I_D pari a 0,1 mentre alla seconda è stato assegnato un indice di distacco I_D pari a 1,0.



Figura 6.3-1: Zone di distacco da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata

In merito alle elaborazioni grafiche verrà seguita la stessa impostazione utilizzata nella descrizione del distacco dalla roccia intensamente fratturata, con i medesimi collettori riportati in Figura 6.1-1.

6.3.1. Scenario di 0,1 m³

In relazione all'area di invasione di questo scenario, con il medesimo volume del caso studio della back analysis, è possibile osservare un lieve incremento dell'area di invasione a ridosso dell'abitato, ma le energie in gioco sono ancora molto basse rispetto alle resistenze offerte dalla vegetazione e dalla scabrezza del versante (Figura 6.3-2). In questo caso le energie sono dell'ordine della decina di kJ, con dei picchi di 46 kJ circa a ridosso della località Centro e dei picchi di 23 kJ circa a ridosso della località San Giovanni. I massimi si concentrano sempre

nella zona di massima pendenza a monte dell'abitato. I dati post-processati delle velocità e delle altezze di passaggio sono riportati in Tabella 6.3-1.

Collettore	n° Blocchi	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	4348899	2.0	8.0	10.0	14.0	0.3	0.3	0.3	0.3	3.3	7.7
San Giovanni	1497761	1.0	6.0	8.0	10.0	0.3	0.3	0.3	0.3	2.3	6.7

Tabella 6.3-1: Valori post-processati ai collettori per il volume $0,1 \text{ m}^3$

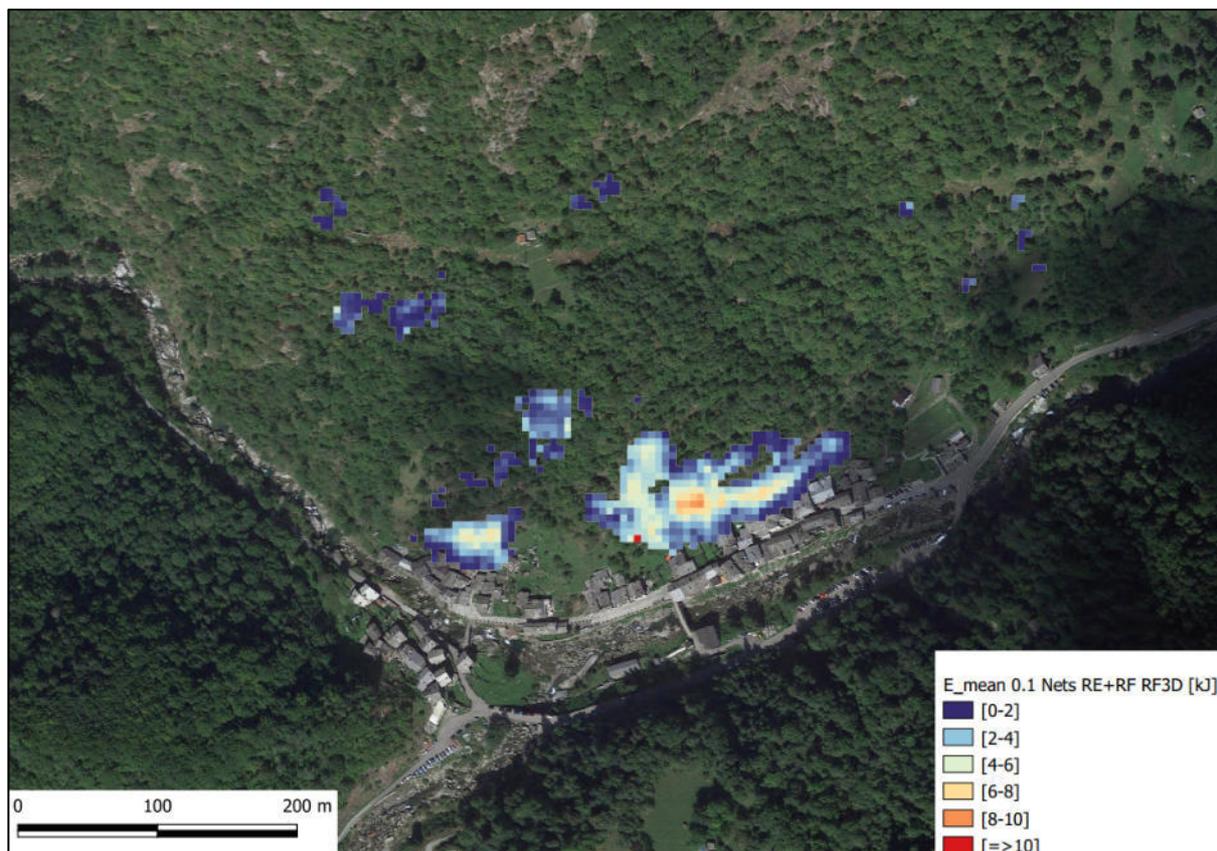


Figura 6.3-2: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – $0,1 \text{ m}^3$

Vengono di seguito riportate le curve di frequenza cumulata delle energie ai collettori in località Centro (Figura 6.3-3), dove al 95% si riscontra un'energia pari a 10 kJ, e in località San Giovanni (Figura 6.3-4), dove al 95% della frequenza cumulata dell'energia si raggiungono 8 kJ. Nonostante i massimi rilevati le energie dei blocchi sono comunque molto basse a ridosso dell'abitato. Dalla forma delle curve si può notare che una buona percentuale dei blocchi che arrivano al collettore hanno energie prossime allo zero, pari a circa 25% in località Centro e 38% in località San Giovanni.

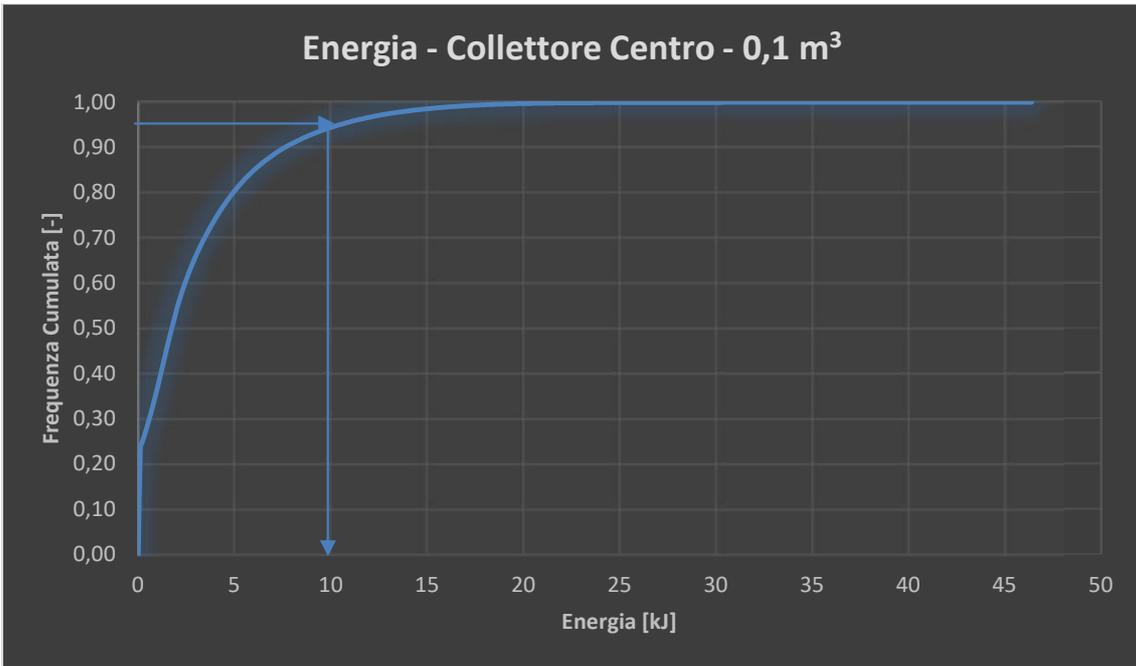


Figura 6.3-3: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m³ – Centro

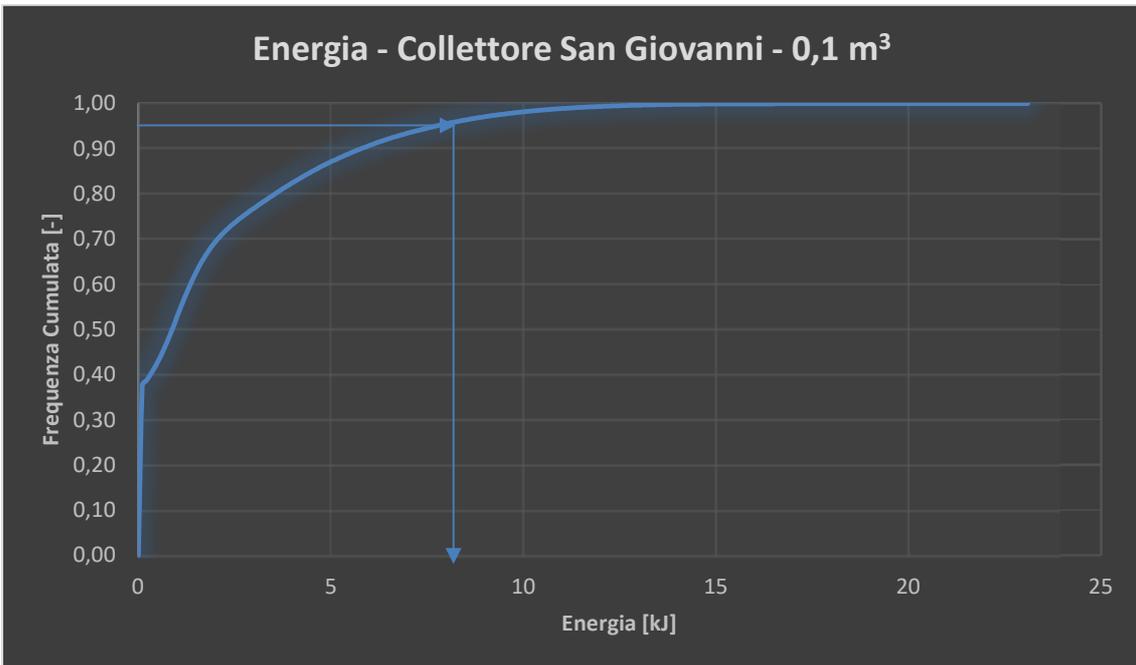


Figura 6.3-4: Cumulata dell'energia del volume 0,1 m³ – San Giovanni

6.3.2. Scenario di 1,0 m³

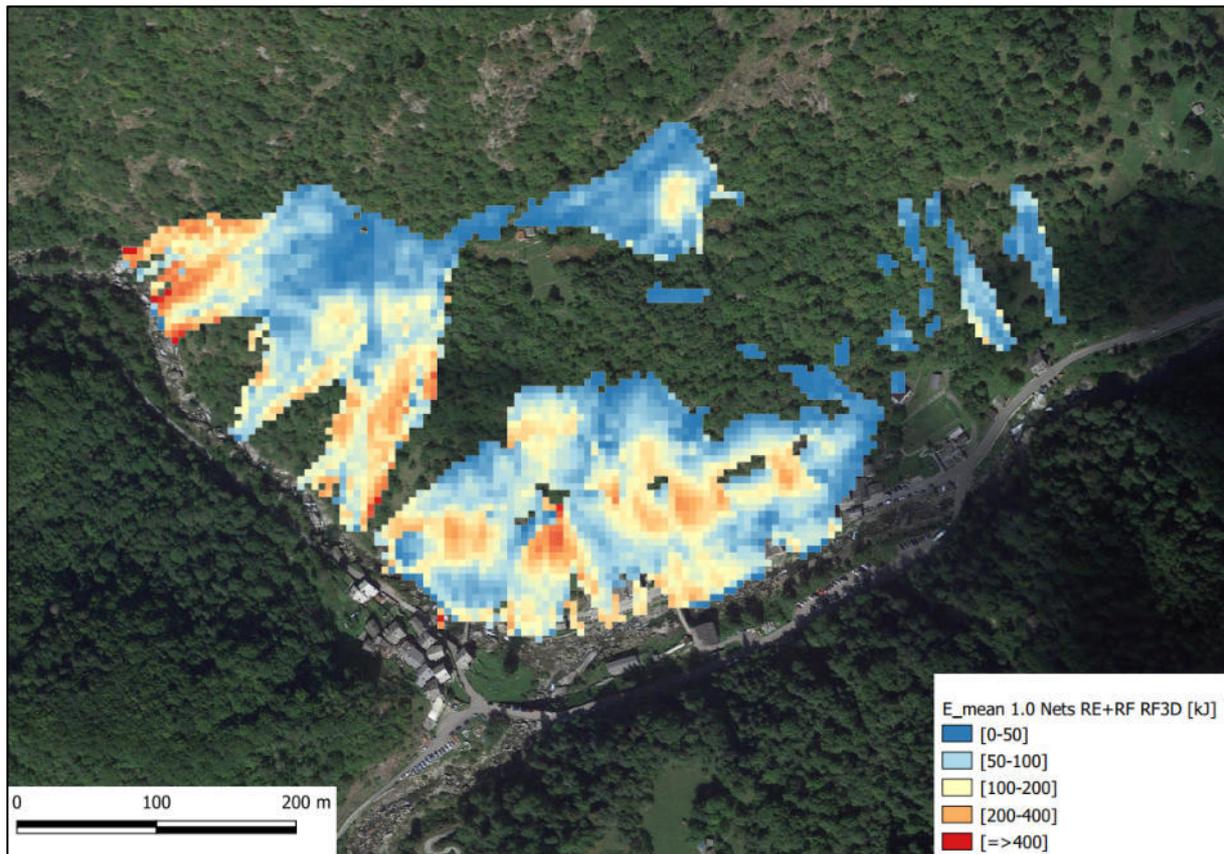


Figura 6.3-5: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – 1,0 m³

In merito all'area di invasione per lo scenario di 1,0 m³ si può subito notare che le nicchie più a monte non interessano l'abitato, ma riversano i blocchi sul lato ovest del versante con zona di arresto in corrispondenza del torrente Sorba. Compatibilmente con lo scenario di distacco da sola roccia intensamente fratturata le energie massime si manifestano in prossimità del brusco cambio di pendenza a ridosso dell'abitato, dove l'elevata acclività permette ai blocchi di acquisire maggiori energie. Le nicchie più a monte rimangono comunque quelle di roccia intensamente fratturata e quindi le energie massime sono sostanzialmente le stesse, con un massimo di circa 1170 kJ a ridosso della località Centro e di circa 800 kJ a ridosso della località San Giovanni. In Tabella 6.3-2 sono riportati i valori post-processati delle altre variabili cinematiche.

Collettore	n° Blocchi	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	7901069	79.2	285.2	347.2	415.2	0.5	0.5	0.5	0.7	6.9	14.7
San Giovanni	3142368	76.2	280.2	330.2	381.2	0.5	0.5	0.5	0.5	6.4	14.3

Tabella 6.3-2: Valori post-processati ai collettori per il volume 1,0 m³

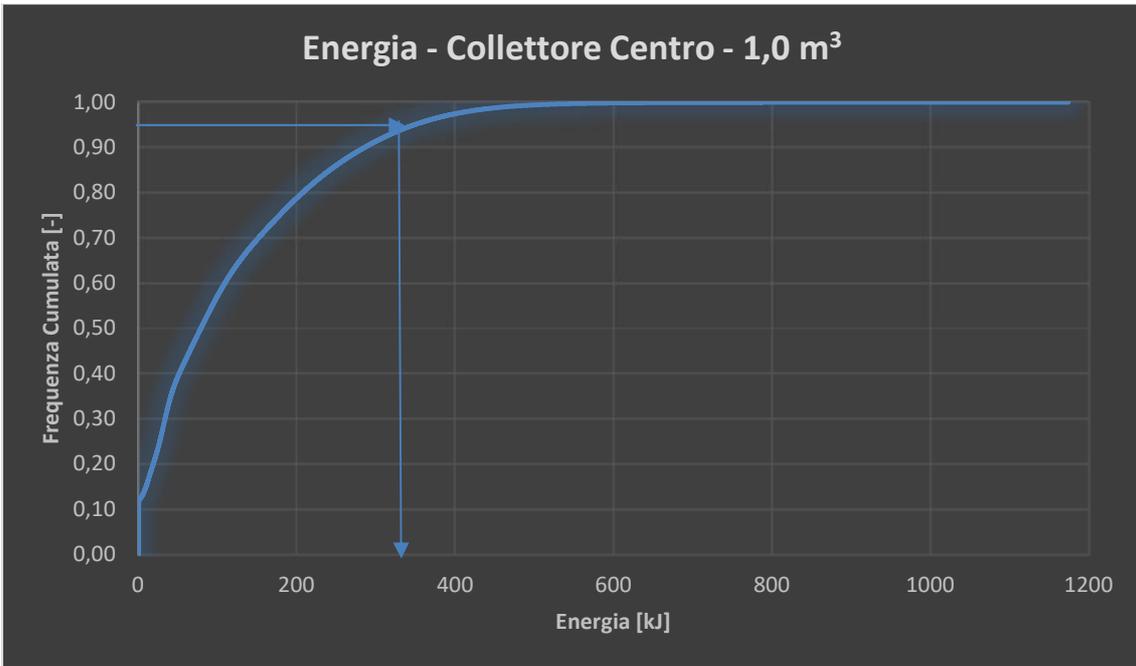


Figura 6.3-6: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m³ – Centro

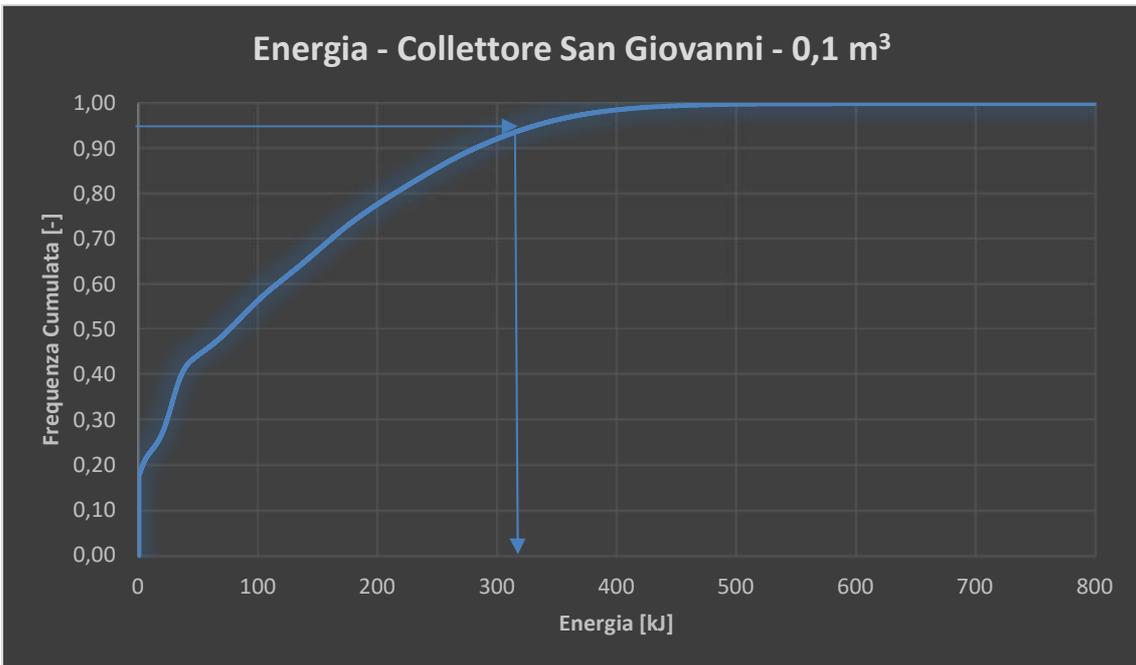


Figura 6.3-7: Cumulata dell'energia del volume 1,0 m³ – San Giovanni

In Figura 6.3-6 e Figura 6.3-7 sono riportate le curve di frequenza cumulata dell'energia ai collettori posti in località Centro e località San Giovanni. Come si può notare, nonostante si raggiungano picchi elevati, questi sono legati ai percorsi meno probabili, infatti la maggioranza dei blocchi possiede energie pari a circa un quarto dei massimi registrati a Centro e ad un terzo circa a San Giovanni e in termini di frequenza cumulata al 95% si hanno rispettivamente 347,2 kJ e 330,2 kJ. Nella parte iniziale della curva è visibile una zona che mostra blocchi a bassissime energie, 13% circa per la località Centro e 18% circa per la località San Giovanni.

6.3.3. Scenario di 5,0 m³

Per quanto riguarda l'area di invasione di questo scenario essa si verifica nella massima estensione rispetto a qualsiasi altro fenomeno precedentemente simulato. Si registrano dei picchi di energia superiori ai 4000 kJ a ridosso dell'abitato, nella zona ad elevata acclività e nel settore ovest del versante che però non interessa l'abitato.

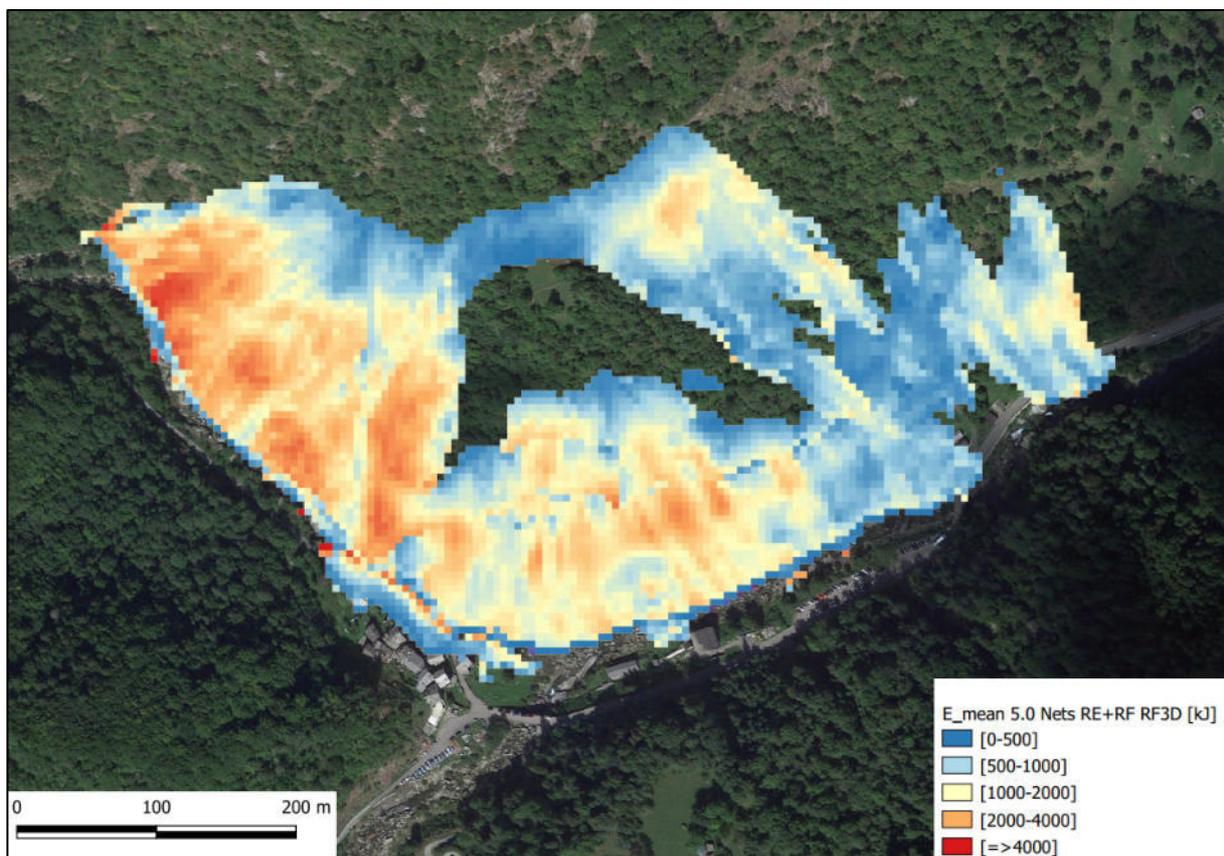


Figura 6.3-8: Energia media per distacco da roccia esposta e roccia intensamente fratturata – 5,0 m³

Escludendo quindi il lato ovest del versante e le nicchie più ad est, l'area di invasione che interessa l'abitato è sostanzialmente generata dalle nicchie di roccia fratturata più a monte. Il fenomeno è comunque alimentato da un numero maggiore di nicchie anche a valle di queste ultime, costituite dalla roccia esposta, aumentando lievemente l'area di invasione. Le energie massime registrate rimangono praticamente invariate, con un massimo di circa 11100 kJ in corrispondenza del collettore in località Centro e un massimo di circa 8500 kJ in corrispondenza del collettore situato in località San Giovanni. Il riepilogo delle variabili cinematiche post processate è riportato in Tabella 6.3-3.

Collettore	n° Blocchi	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90	Ph_95	Ph_98	V_50	V_95
Centro	11809562	1013.1	3135.1	3919.1	4761.1	0.9	1.0	1.3	1.8	10.7	20.9
San Giovanni	5384802	760.2	2675.2	3095.2	3543.2	0.9	0.9	1.0	1.3	9.0	18.9

Tabella 6.3-3: Valori post processati ai collettori per il volume 5,0 m³

In Figura 6.3-9 e in Figura 6.3-10 sono riportate le curve di frequenza cumulata delle energie registrate ai collettori. In località Centro al 95% della frequenza cumulata si hanno 3919,1 kJ contro i 3095,2 kJ in località San Giovanni. Quindi nonostante i massimi registrati, che possono essere associati ai percorsi meno probabili, la maggior parte dei blocchi presenta energie decisamente inferiori, pari a circa un terzo in località Centro e la metà circa in località San Giovanni. Rispetto agli altri scenari la percentuale di blocchi a bassissime energie registrate ai collettori diminuisce ancora, con il 10% circa ad entrambi i collettori.

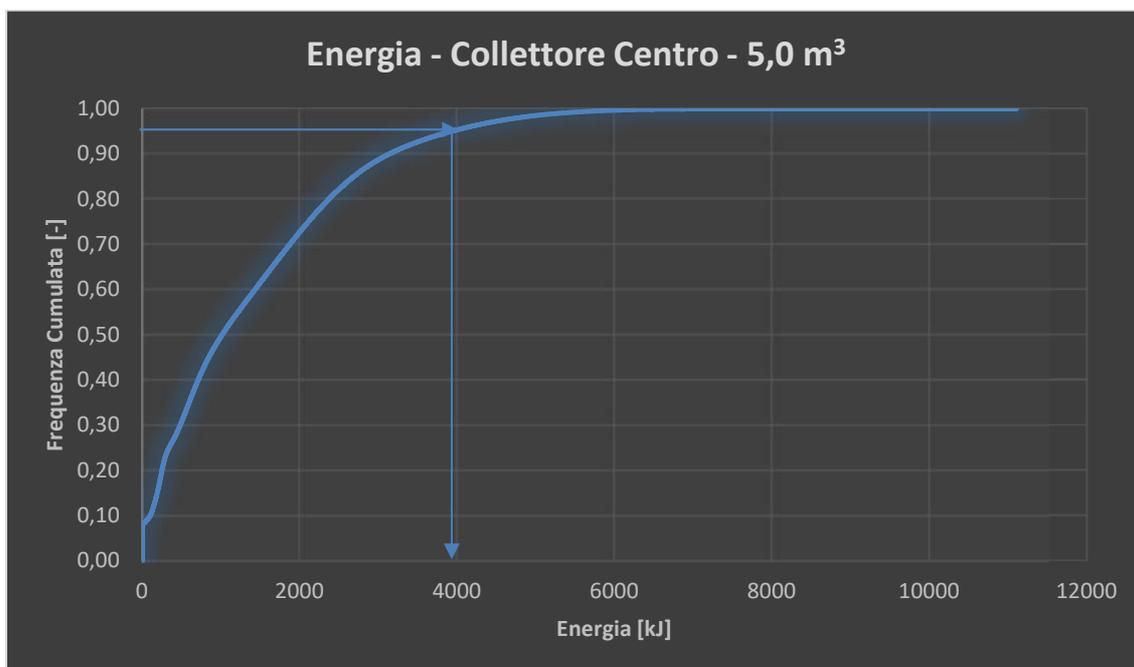


Figura 6.3-9: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m³ – Centro

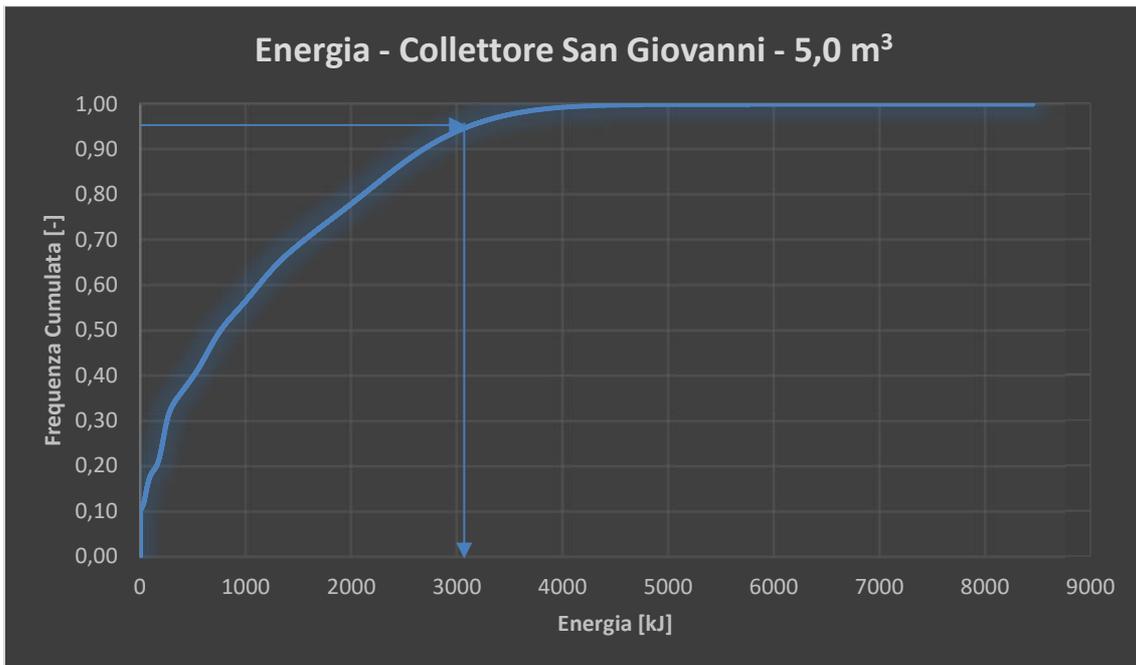


Figura 6.3-10: Cumulata dell'energia del volume 5,0 m³ – San Giovanni

6.4. Confronto analisi Rockyfor3D-QPROTO – Scenario di roccia esposta e di roccia intensamente fratturata

In questo paragrafo vengono seguite le medesime procedure e ragionamenti descritti nel Capitolo 6.2 per mettere a confronto gli output ottenuti attraverso le simulazioni condotte con QPROTO e quelle eseguite con Rockyfor3D. In questo scenario viene assegnata la probabilità di distacco I_D pari a 0,1 per la roccia esposta e pari a 1,0 per la roccia intensamente fratturata. Gli scenari volumetrici e i collettori utilizzati sono i medesimi dei capitoli precedenti.

6.4.1. Scenario di 0,1 m³

In merito all'area di invasione fornita da QPROTO, riportata in Figura 6.4-1, si può osservare una buona corrispondenza con quella fornita da Rockyfor3D. Questo si lega principalmente, rispetto al distacco da sola roccia intensamente fratturata, al maggior numero di punti di distacco e quindi di coni di invasione. La corrispondenza è quasi perfetta a ridosso dell'abitato in località Centro (ellisse verde di Figura 6.4-2).

Per quanto riguarda le energie QPROTO fornisce valori decisamente più elevati, ma la cui zona di concentrazione è la medesima di Rockyfor3D (ellisse verde in Figura 6.4-2). I picchi in QPROTO superano i 25 kJ, mentre in rockyfor3D superano di poco i 10 kJ.

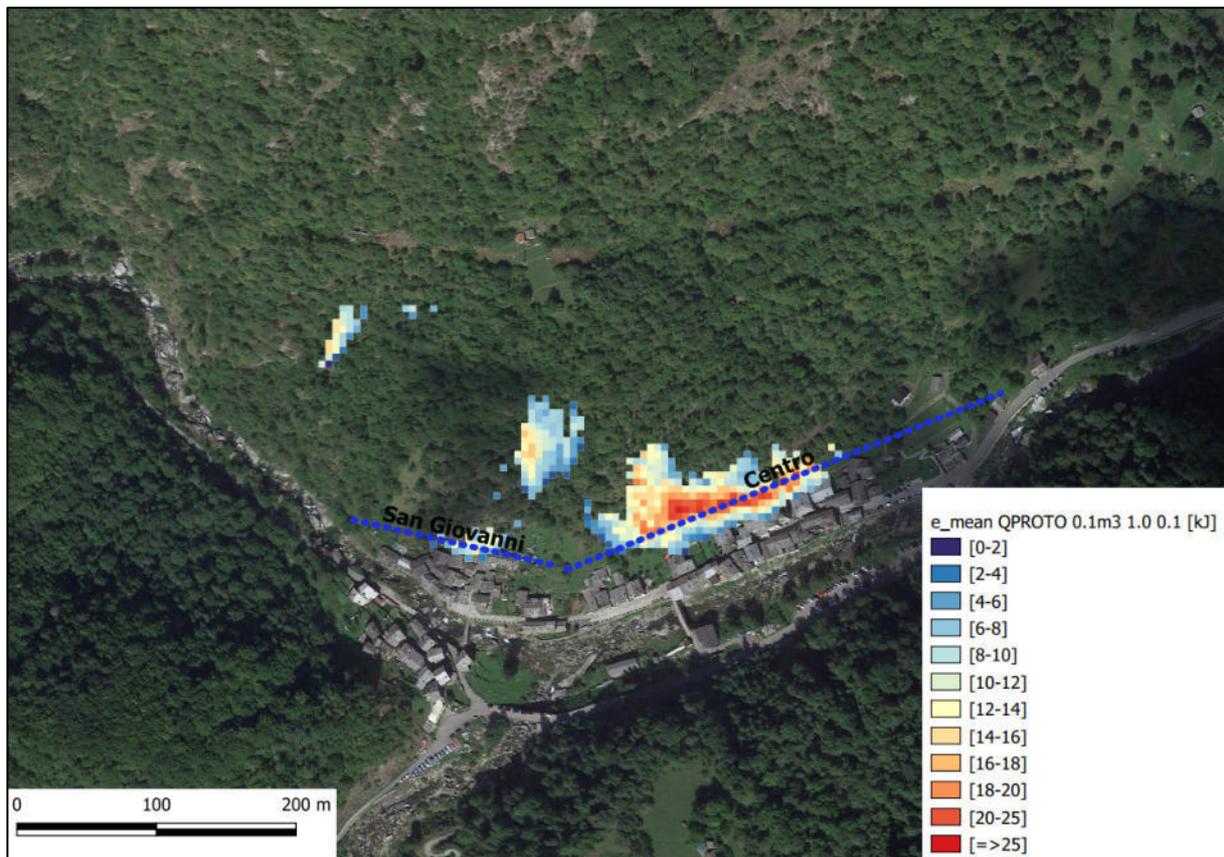


Figura 6.4-1: Energia media fornita da QPROTO per 0,1 m³

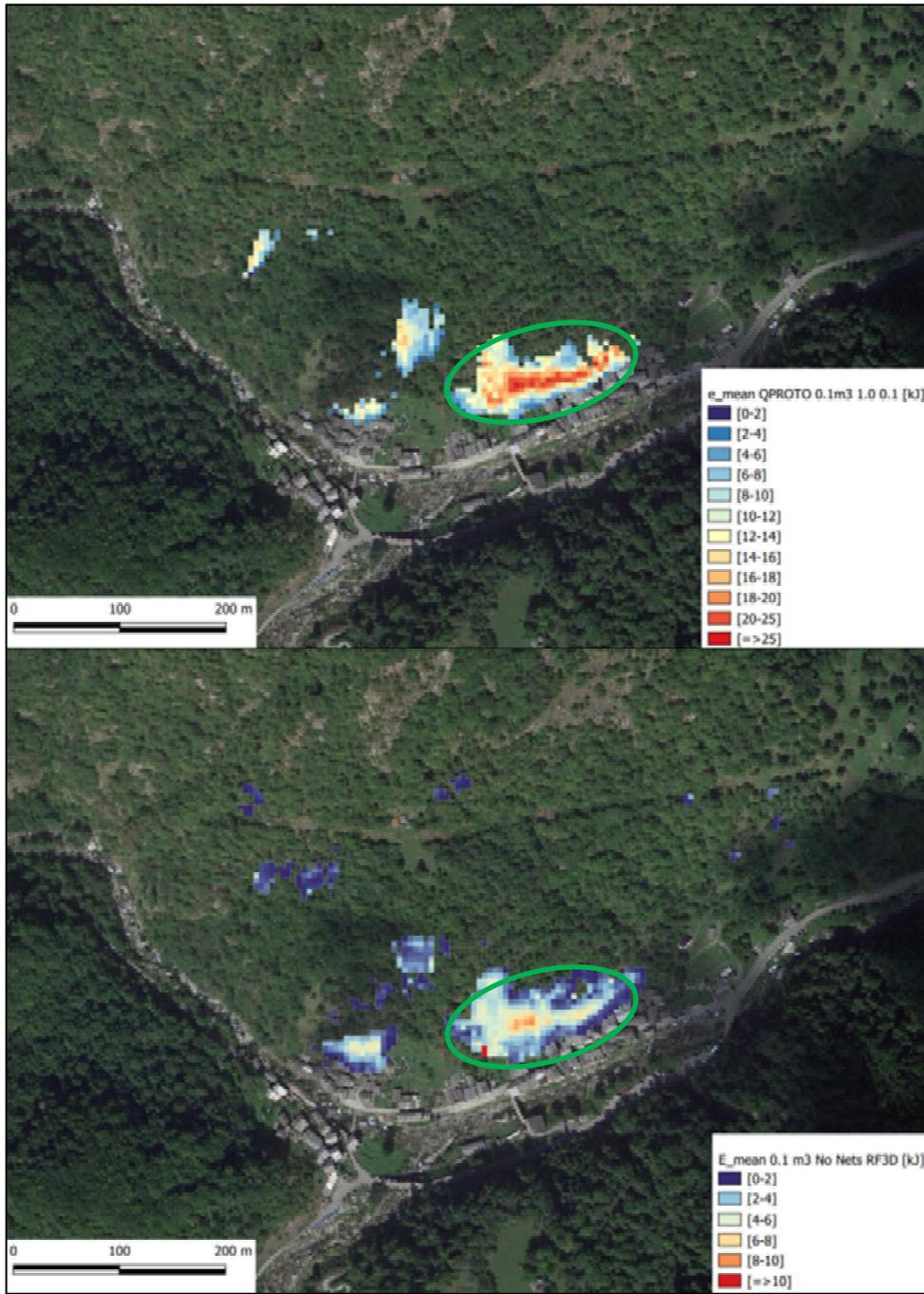


Figura 6.4-2: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per $0,1 \text{ m}^3$

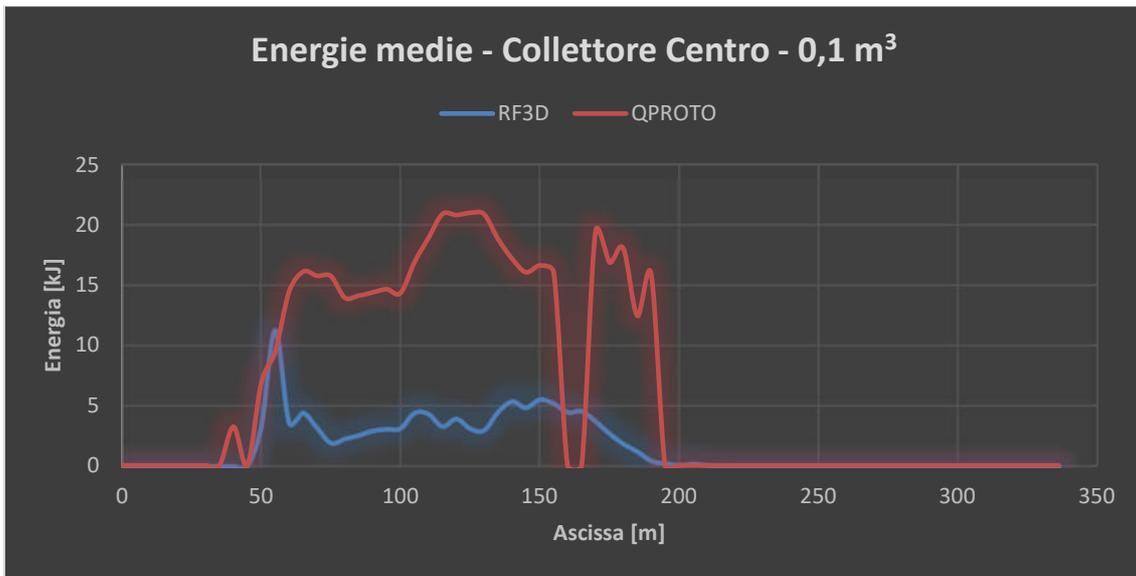


Figura 6.4-3: Confronto energie medie 0,1 m³ - Centro

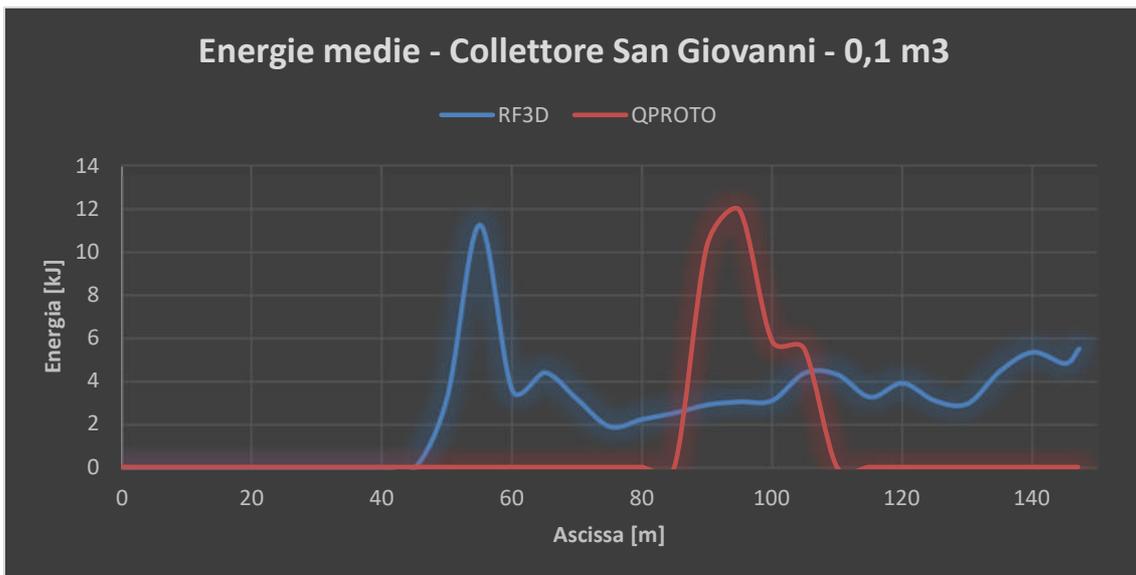


Figura 6.4-4: Confronto energie medie 0,1 m³ - San Giovanni

Per quanto riguarda il confronto sull'andamento delle energie lungo i collettori in località Centro e San Giovanni si può fare riferimento alle Figura 6.4-3 e Figura 6.4-4. Per il primo si può immediatamente osservare che QPROTO è prevalentemente cautelativo con valori quasi 4 volte maggiori in alcuni punti. Come nei casi precedenti le discontinuità sono principalmente legate alle irregolarità del terreno che fanno oscillare le energie in maniera diversa in QPROTO rispetto a Rockyfor3D, ma anche all'assenza, in alcuni punti, dei coni di invasione non generati

da QPROTO, che si ricorda vengono creati solo se la pendenza della nicchia di distacco è maggiore o uguale a 45° . Questo è il caso, come si può osservare in Figura 6.4-2 e in Figura 6.4-3 per il collettore Centro, dove all'ascissa 165 m circa viene a mancare il cono di invasione. Si riscontrano invece andamenti completamente sfalsati ma di forma simile al collettore San Giovanni, dove le aree di invasione incontrano il collettore in punti diversi. L'ordine di grandezza delle energie in questo caso è paragonabile. L'elevato angolo φ_p , pari a 45° , porta ad avere coni molto limitati, che si chiudono quasi immediatamente sul versante a causa della pendenza media molto più piccola, intorno ai 39° , lungo la porzione di versante che porta al collettore San Giovanni.

6.4.2. Scenario di $1,0 \text{ m}^3$

In merito allo scenario di distacco del volume di $1,0 \text{ m}^3$ in Figura 6.4-5 è possibile osservare come l'area di invasione fornita da QPROTO sia più grande di quella dello scenario di distacco dalla sola roccia intensamente fratturata, a ridosso dell'abitato, nonostante la forma sia molto simile. Questo si deve naturalmente al maggior numero di nicchie di distacco e in particolare al maggior numero di nicchie di distacco con pendenza non inferiore ai 45° . Per quanto riguarda la differenza di forma con l'area di invasione di Rockyfor3D a ridosso della località San Giovanni valgono le stesse considerazioni sulla pendenza locale del versante fatte nel medesimo scenario da $1,0 \text{ m}^3$ per il distacco da sola roccia intensamente fratturata. Globalmente, anche se a ridosso dell'abitato c'è una buona corrispondenza nella forma e nelle energie, anche in relazione alla posizione dei picchi, la differenza più marcata si riscontra nella parte ovest del versante, dove non vi è alcuna somiglianza nella forma dell'area di invasione. La ragione più plausibile, e confermata dalla mappa raster delle pendenze (già riportata in Figura 5.3-5), è che le nicchie di distacco in quella zona di versante hanno sostanzialmente tutte una pendenza inferiore ai 45° , non consentendo la generazione dei coni di invasione in QPROTO (ellisse verde in Figura 6.4-5).

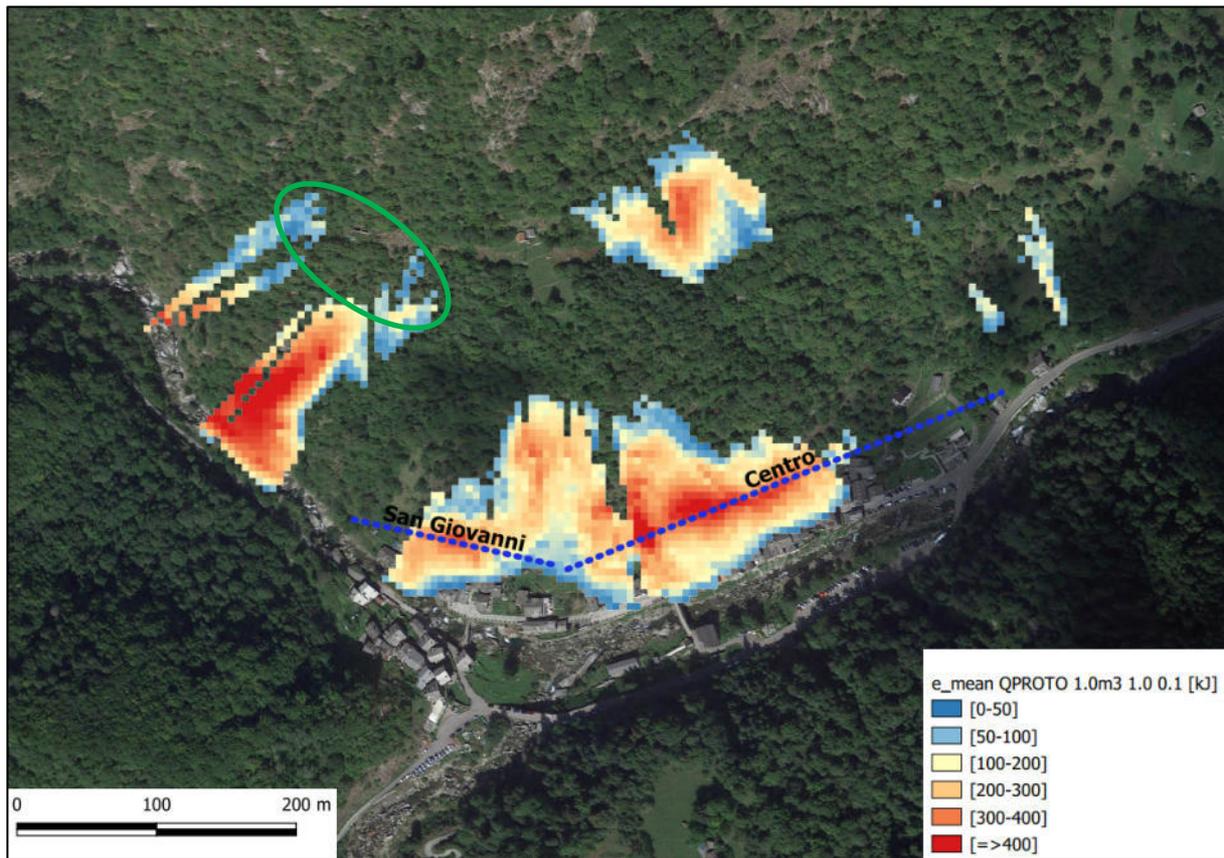


Figura 6.4-5: Energia media fornita da QPROTO per $1,0 \text{ m}^3$

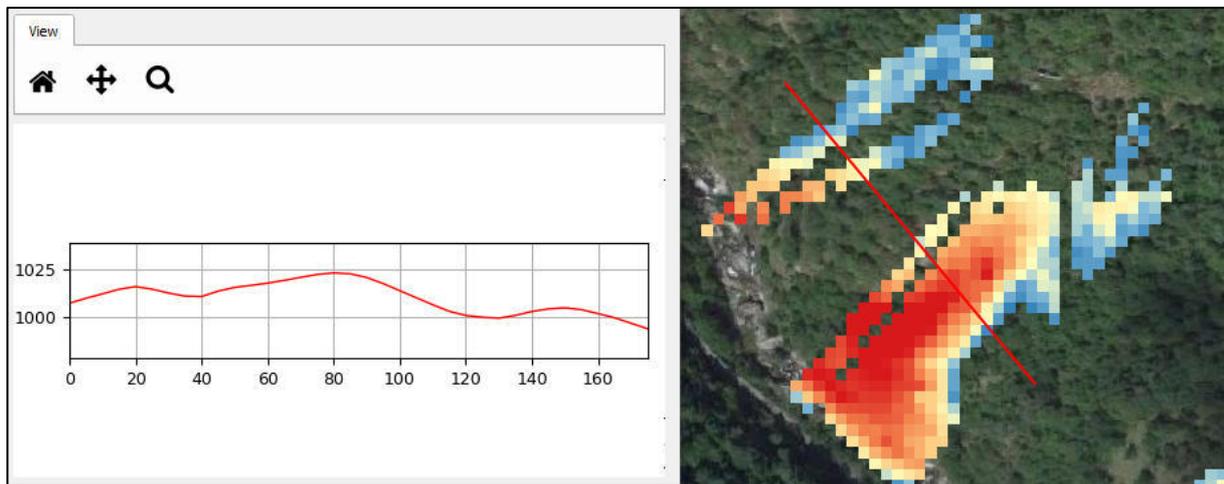


Figura 6.4-6: Profilo altimetrico trasversale al versante ovest

Per quanto riguarda la particolare forma dell'area di invasione nel versante ovest, essa si chiude seguendo una linea sostanzialmente retta e non con la classica apertura a cono, la cui

causa è individuabile dal profilo altimetrico ottenuto in direzione trasversale alla massima pendenza del versante e riportata con linee rosse in Figura 6.4-6 (quote in metri lungo le ordinate e progressiva in metri lungo le ascisse). Infatti, all'ascissa 100 m circa, il cono di invasione si trova ostacolato da un aumento di quota laterale e ne viene quindi impedita la creazione in QPROTO. Per le altre discrepanze minori valgono le considerazioni fatte in precedenza per gli altri scenari.

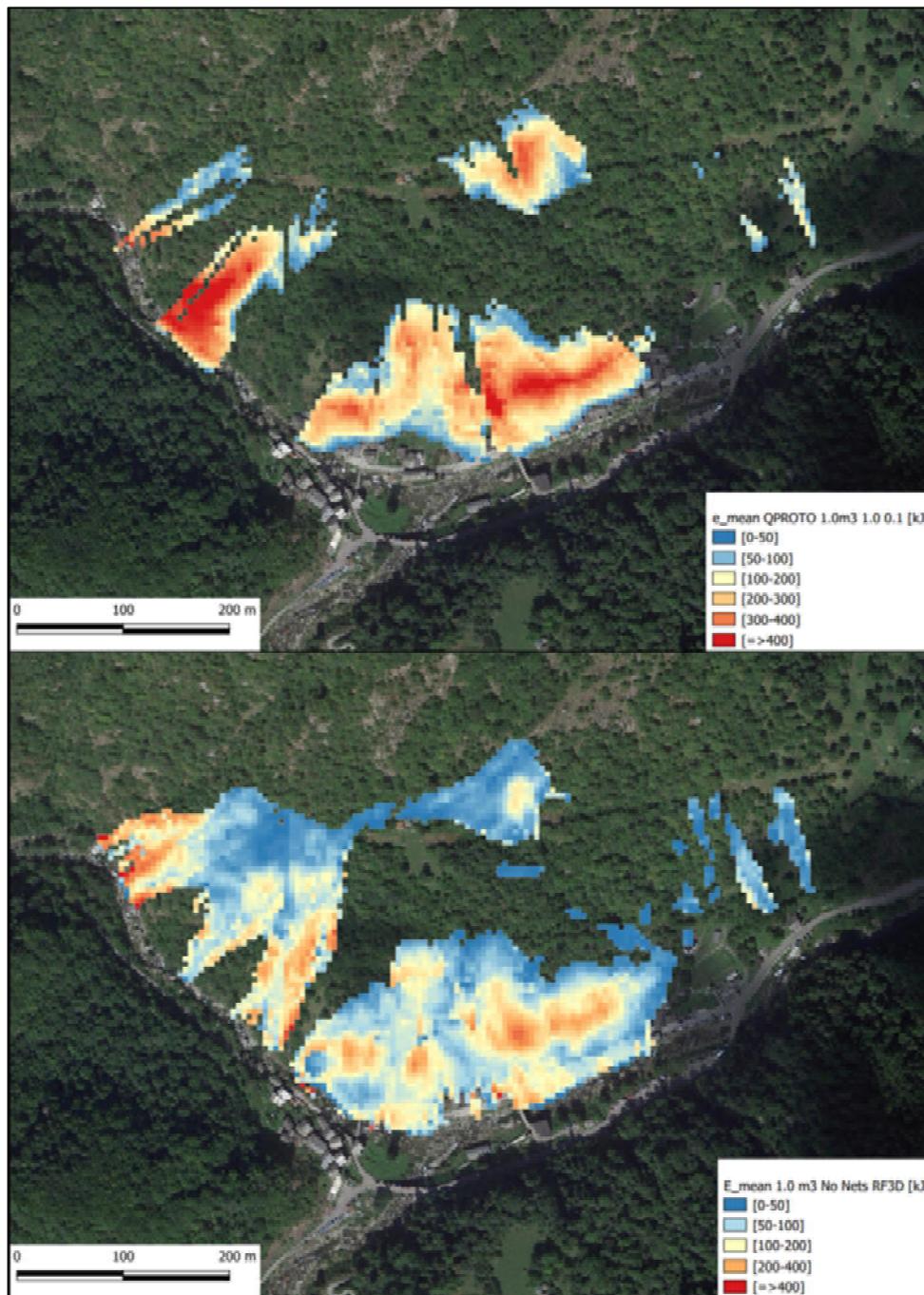


Figura 6.4-7: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per 1,0 m³

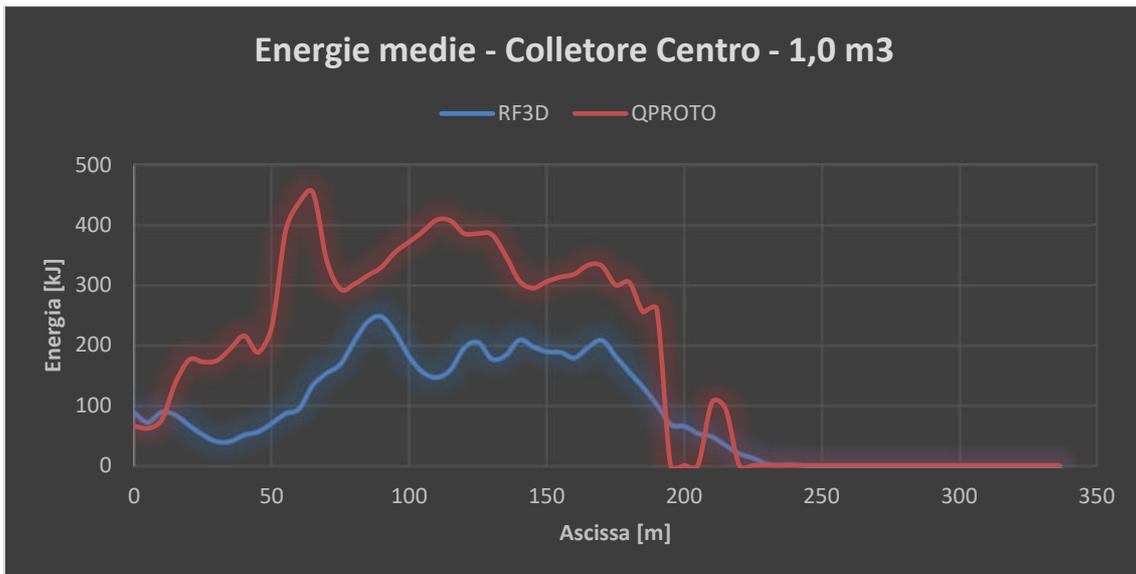


Figura 6.4-8: Confronto energie medie 1,0 m³ - Centro

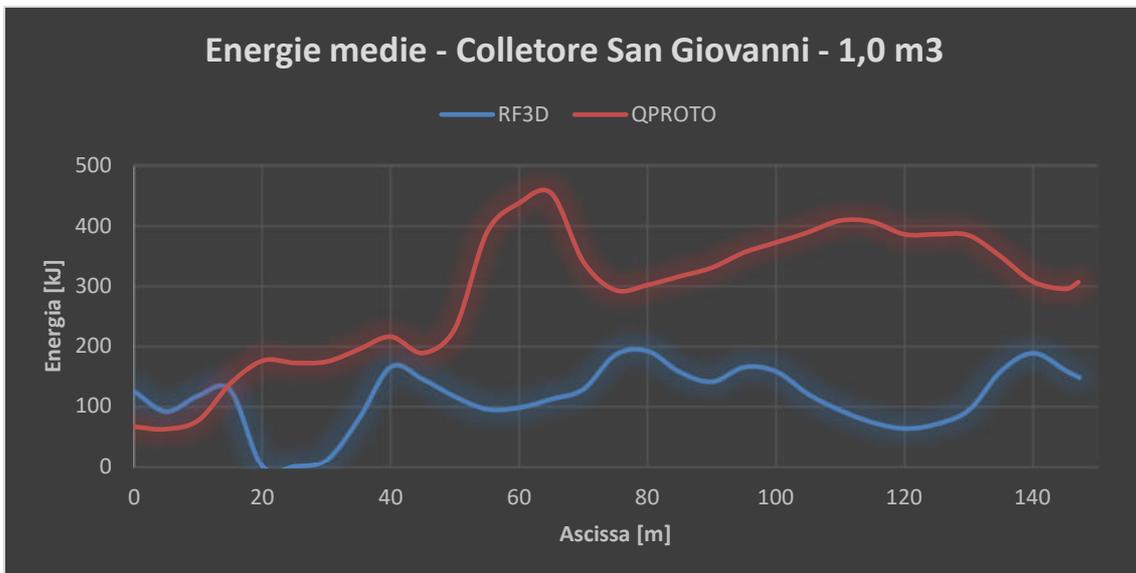


Figura 6.4-9: Confronto energie medie 1,0 m³ – San Giovanni

In termini di energie lungo i collettori in località Centro e in località San Giovanni, si può far riferimento alle Figura 6.4-8 e Figura 6.4-9. È evidente come le energie fornite da QPROTO siano globalmente molto maggiori di quelle restituite dalle simulazioni con Rockyfor3D. Per le discrepanze tra i due trend lungo i collettori valgono le stesse considerazioni fatte per lo scenario da 1,0 m³ e distacco da roccia intensamente fratturata (assenza del cono di invasione di QPROTO, brusca variazione di pendenza nelle simulazioni di Rockyfor3D, irregolarità locali del versante e differenti approcci nel modello di calcolo).

6.4.3. Scenario di 5,0 m³

L'area di invasione restituita dalle analisi di QPROTO (Figura 6.4-10) risulta molto regolare e molto compatibile con la simulazione fornita da Rockyfor3D.

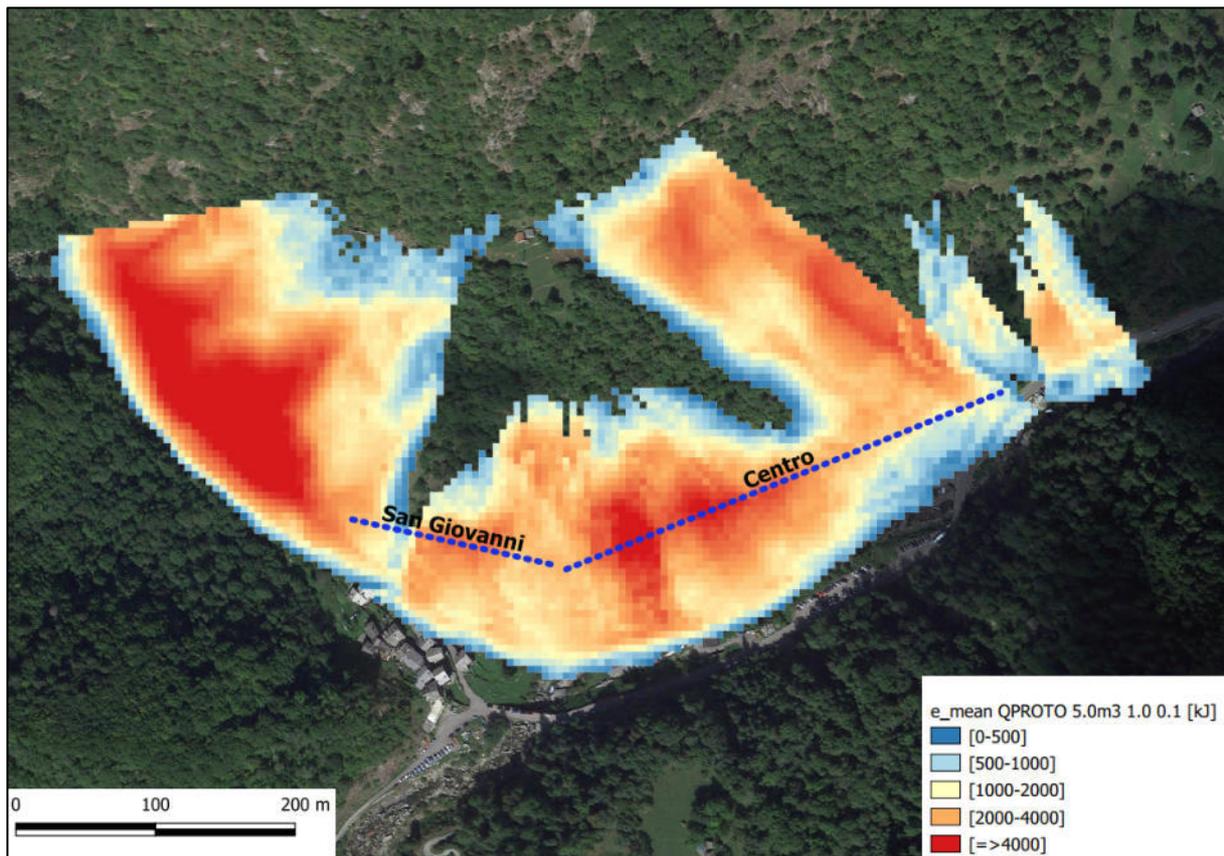


Figura 6.4-10: Energia media fornita da QPROTO per 5,0 m³

La ragione di questa somiglianza, già precedentemente anticipata è legata essenzialmente al valore assunto da φ_p , pari a 33° e costante per tutte le nicchie di distacco, che permette una più ampia visione del versante attraverso la funzione visibilità di QPROTO e la simulazione risente meno delle irregolarità dello stesso. Questo guadagno si traduce in uno svantaggio nell'ottica della determinazione delle energie, perché al diminuire di φ_p aumenta la distanza energy line – pendio e di conseguenza le energie. Ci si trova comunque in condizioni di sicurezza e questa simulazione mostra come il modello fornisca buoni risultati con fenomeni di maggiore entità in versanti molto irregolari.

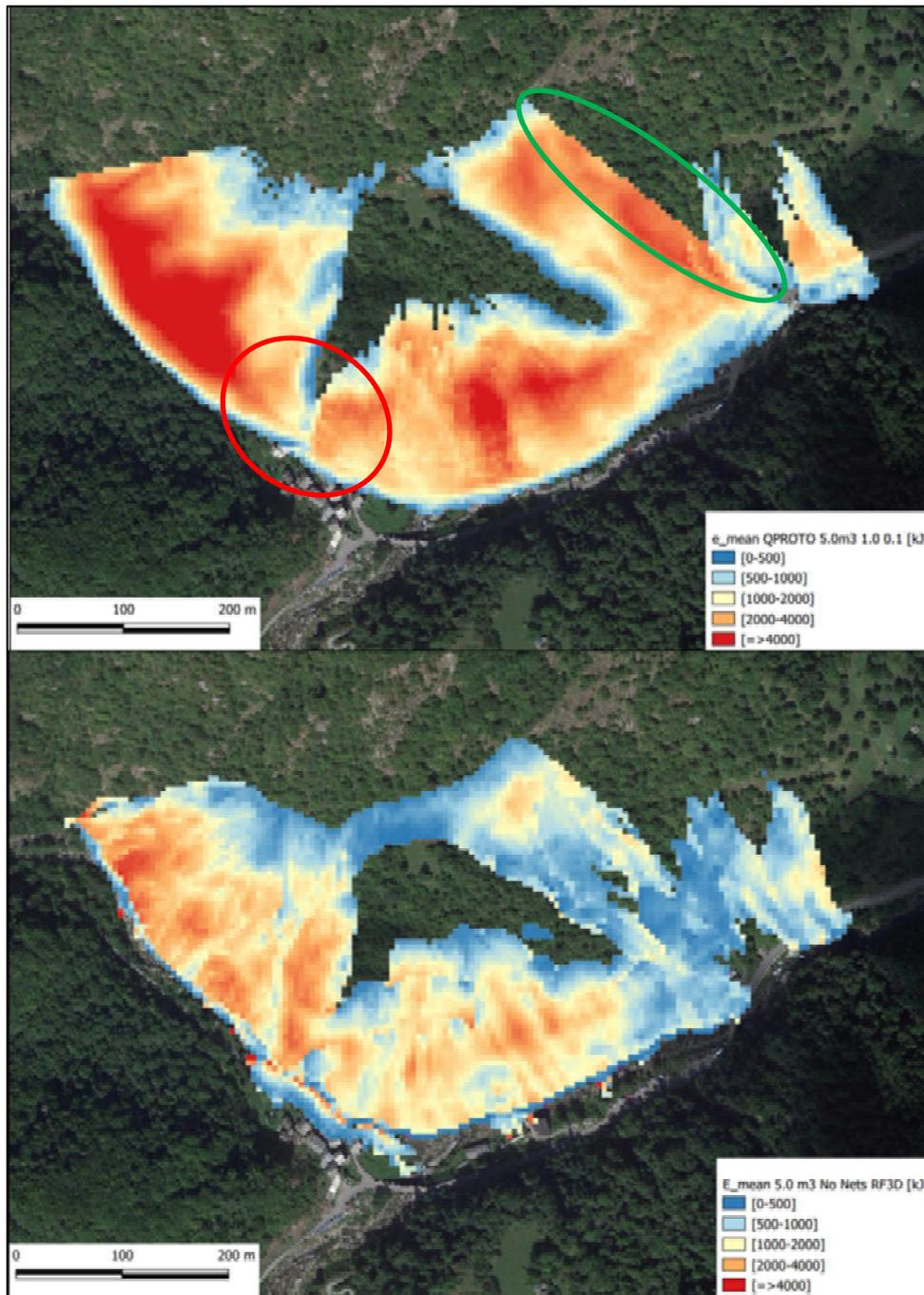


Figura 6.4-11: Confronto aree di invasione ed energie medie QPROTO (alto) e Rockyfor3D (basso) per $5,0 \text{ m}^3$

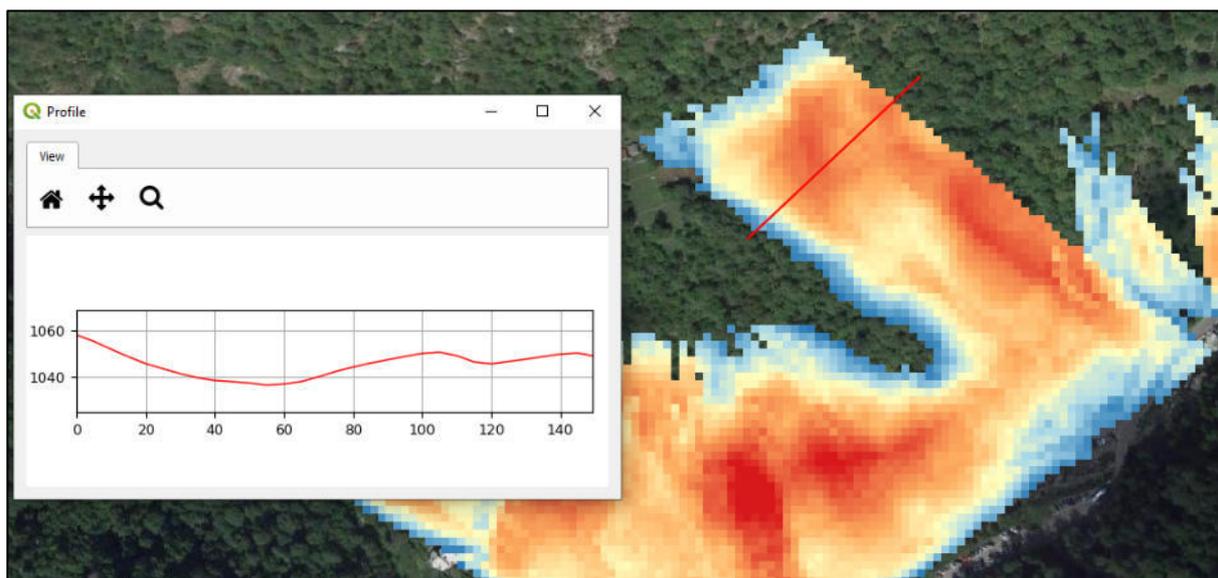


Figura 6.4-12: Sezione trasversale in corrispondenza dell'anomalia dell'area di invasione

Infatti, nonostante i picchi di energia restituiti da QPROTO siano ben maggiori di quelli forniti da Rockyfor3D, la corrispondenza delle zone in cui essi si presentano è molto buona, soprattutto a ridosso dell'abitato e del versante ovest (Figura 6.4-11). Sul lato est del versante si verifica un fenomeno molto simile a quello verificatosi nel precedente scenario, ma sul lato ovest del versante e le cui ragioni sono le medesime (Figura 6.4-6), ovvero la sezione trasversale mostra un aumento della quota oltre il quale viene arrestato il cono di invasione di QPROTO (ellisse verde in Figura 6.4-11). Come si può vedere dalla Figura 6.2-12, l'aumento di quota lungo la sezione trasversale del versante blocca l'apertura del cono di invasione.

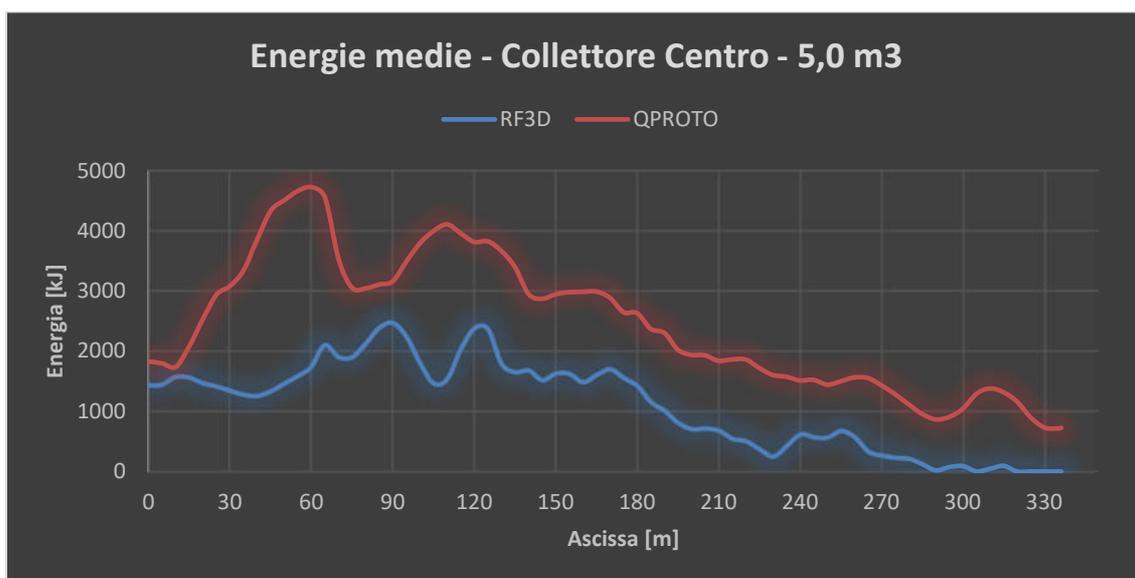


Figura 6.4-13: Confronto energie medie 5,0 m³ - Centro

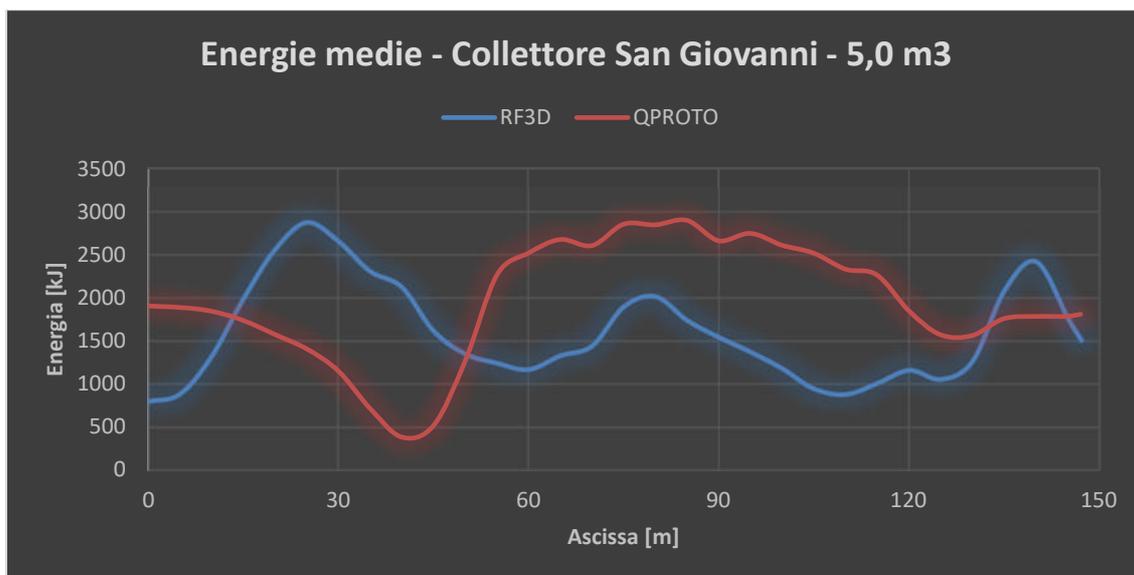


Figura 6.4-14: Confronto energie medie 5,0 m³ – San Giovanni

In merito all'andamento delle energie lungo i collettori in località Centro e San Giovanni si può fare riferimento alle Figura 6.4-13 e Figura 6.4-14. In località Centro è possibile osservare come l'andamento delle energie sia sostanzialmente lo stesso ma traslato, con QPROTO che fornisce stime a favore di sicurezza. Si può notare un'oscillazione delle energie di QPROTO tra le ascisse 60 m e 115 m, legata principalmente a variazioni di quota del DTM che riducono/aumentano la distanza energy line – pendio, come già discusso in precedenza. In località San Giovanni si riscontrano principalmente due zone di discontinuità, la prima tra le ascisse 15 m e 50 m (Figura 6.4-14) dove si ha una zona di passaggio tra due coni di invasione di QPROTO (ellisse rosso in Figura 6.4-11) ai cui estremi le energie risultano molto basse. La seconda si presenta in corrispondenza dell'ascissa 135 m, dove le energie di QPROTO sono inferiori a quelle fornite da Rockyfor3D. Non essendo presenti particolari irregolarità del versante in tale punto la differenza di energia può essere attribuita alle diverse modalità di calcolo delle energie nei due modelli.

In conclusione, per quanto riguarda i confronti effettuati sui tre scenari di distacco contemporaneo da roccia intensamente fratturata e da roccia esposta esaminati, si possono fare le medesime considerazioni fatte per gli scenari di distacco da sola roccia intensamente fratturata: QPROTO è conservativo nel calcolo delle energie e risente meno dell'influenza delle irregolarità topografiche per energy line angle minori (corrispondenti a volumetrie maggiori se si considera lo stesso pendio).

6.5. Considerazioni sulla propensione al distacco I_D

In questo paragrafo verrà brevemente esposto il risultato delle analisi, in merito al volume da $5,0 \text{ m}^3$ e nello scenario di distacco contemporaneo da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata, al variare dell'indice di distacco. Viene scelto il volume da $5,0 \text{ m}^3$ in quanto presenta l'area di invasione maggiore ed una minor presenza di irregolarità, potendo così apprezzare meglio le differenze nei casi di seguito esposti. In particolare verrà assegnato un indice di distacco $I_D = 1,0$ alla roccia intensamente fratturata (una probabilità di distacco spaziale del 100%) ed un indice variabile tra 0,1 e 1,0 alla roccia esposta. Chiaramente la probabilità spaziale che avvenga distacco dalla roccia esposta è di un ordine inferiore a quella intensamente fratturata (come infatti assunto negli scenari previsionali), ma lo scopo è di mostrare la capacità di QPROTO di poter tenere in conto della differente probabilità di distacco nel medesimo scenario.

Ci si sofferma sulla mappa di pericolosità $w_{en.tif}$, come descritta nel Capitolo 5, in quanto combina gli effetti della probabilità di distacco e della magnitudo dell'evento che interessa una data cella. Nelle Figura 6.5-1, Figura 6.5-2 e Figura 6.5-3 viene mostrata la variazione dell'indice I_D per la roccia esposta nei casi 0,1, 0,5 e 1,0. L'espressione che viene utilizzata per la costruzione dei valori contenuti nel raster è la seguente (Espressione 6.1), che rappresenta il massimo prodotto tra l'indice di distacco e l'energia cinetica registrato nella cella considerata.

$$w_{en} = \max[I_{D,i} \cdot E_{k,i}(x, y)] \quad (6.1)$$

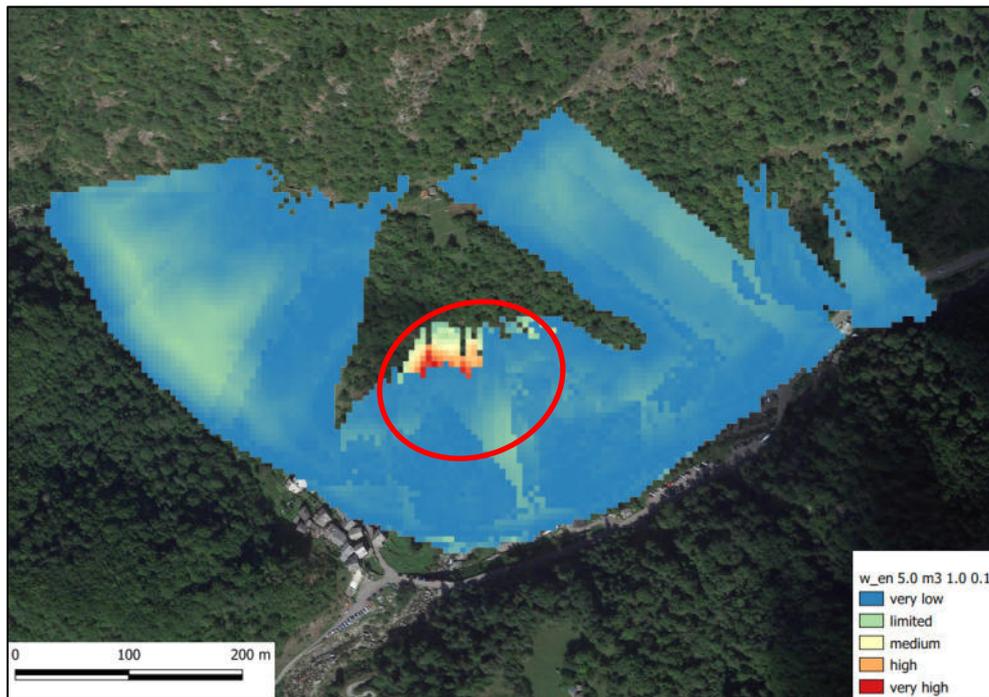


Figura 6.5-1: $w_en.tif$ nello scenario con $I_{D-RF}=1,0$ e $I_{D-RE} = 0,1$

Come si può osservare, al crescere di I_D da 0,1 a 1,0 per la roccia esposta, la mappa raster $w_en.tif$ varia significativamente. In Figura 6.5-1 è possibile osservare una stima della pericolosità tra bassa e media sostanzialmente su tutta la zona poiché l'indice per la roccia esposta è molto basso e prevale il contributo della zona a roccia intensamente fratturata a monte dell'abitato (ellisse rosso di Figura 6.5-1) con valori classificati come very high. In questo scenario la pericolosità è quindi dominata dal distacco dalla roccia intensamente fratturata. Gli scenari successivi (Figura 6.5-2 e Figura 6.5-3) sono sostanzialmente identici e mostrano una maggior contributo degli effetti dovuti al distacco dalla roccia esposta che, come visto prima, presenta un'area di distacco molto maggiore di quella che compete alla roccia intensamente fratturata. In particolare nel versante ovest, dove le nicchie di distacco sono esclusivamente di roccia esposta, la forma della mappa raster tende a quella assunta da quella dell'energia cinetica precedentemente esposta nell'analisi dello scenario previsionale (Figura 6.4-10, a meno della scala cromatica adottata e delle classi dei valori). Con l'indice I_D risulta quindi possibile tenere in conto della probabilità che un determinato evento si verifichi con una data intensità, potendo quindi identificare con più precisione le zone maggiormente soggette al fenomeno.

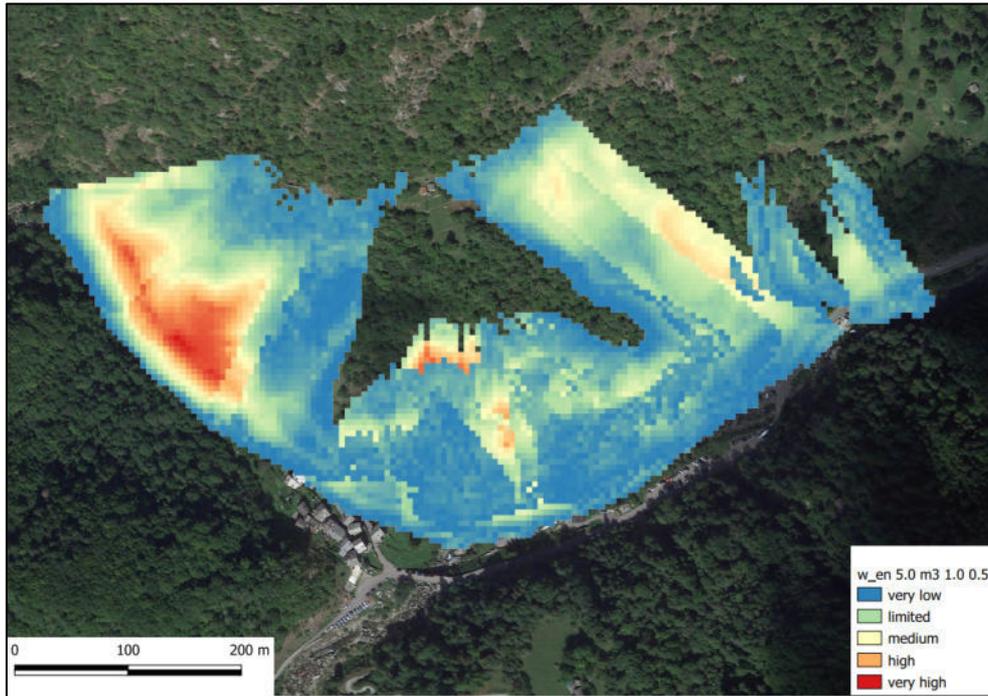


Figura 6.5-2: *w_en.tif* nello scenario con $I_{D-RF}=1,0$ e $I_{D-RE} = 0,5$

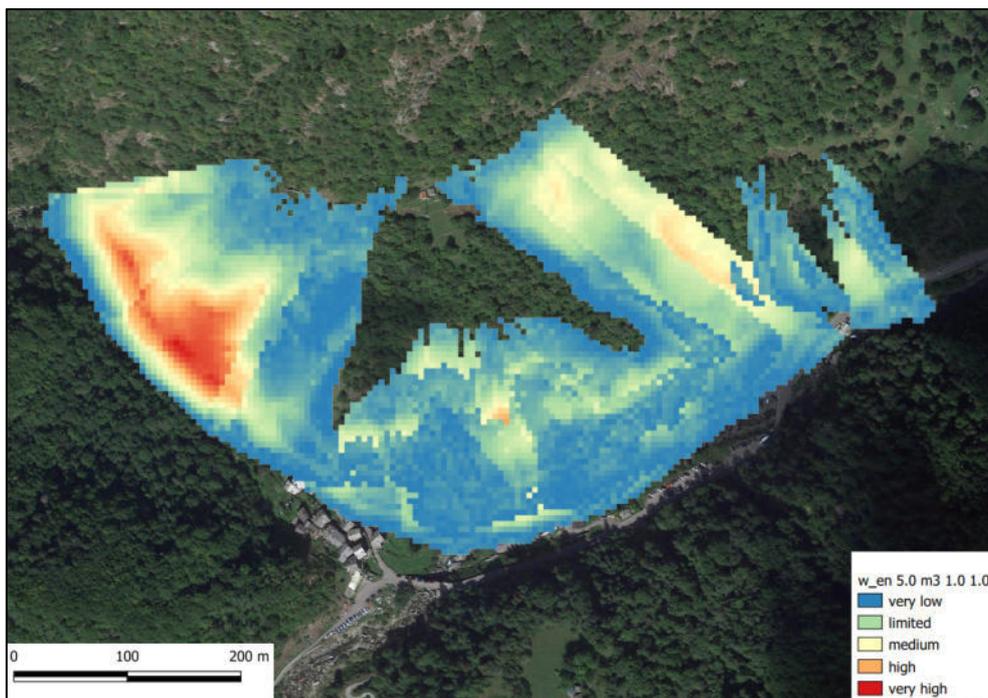


Figura 6.5-3: *w_en.tif* nello scenario con $I_{D-RF}=1,0$ e $I_{D-RE} = 1,0$

Si può concludere che, data la mappa cromatica fornita da QPROTO, tali output potrebbero essere utilizzati come affinamento dei reticoli forniti dall'inventario IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), aggiungendo quindi un maggior dettaglio nella caratterizzazione della zona in esame.

7. Progetto e analisi del danneggiamento delle opere di difesa

In questo capitolo si intende dimensionare, in termini di capacità di assorbimento energetico ed altezza, un sistema di opere di difesa a supporto delle opere già esistenti nel sito (sono presenti 6 barriere alte 4 m e di capacità pari a 1000 kJ). Verrà quindi sviluppato il calcolo di tali parametri secondo il modello proposto dalle linee guida ETAG027, aggiornate dalle EOTA2018, e ne verrà verificato il funzionamento attraverso la simulazione degli scenari previsionali già esposti nel capitolo precedente.

Successivamente verranno simulati ed esaminati gli effetti del danneggiamento delle opere a seguito di un precedente impatto, valutando le conseguenti variazioni sull'area di invasione e sulle energie dei blocchi in relazione a quanto accade in presenza delle barriere con la propria capacità d'assorbimento nominale (come da progetto).

In questa sede non verrà affrontato il dimensionamento degli elementi di ancoraggio della barriera al terreno, in quanto non necessario ai fini delle analisi che si vogliono condurre.

7.1. Cenni sui parametri caratterizzanti le opere di difesa

Secondo quanto riportato dalle ETAG027, in merito al dimensionamento della capacità di assorbimento e dell'altezza di intercettazione delle barriere, sono fundamentalmente richiesti i seguenti parametri:

- Massa del blocco [kg];
- Volume del blocco [m³]
- 95° percentile della frequenza cumulata delle altezze di passaggio nella posizione in cui si intende installare la barriera [m].
- 95° percentile della frequenza cumulata delle velocità nella posizione in cui si intende installare la barriera [m/s].

A questi parametri verranno associati dei coefficienti di sicurezza, come previsto dalle Linee Guida.

Ottenuti i parametri essenziali dalle analisi traiettografiche sarà necessario scegliere la barriera tra quelle disponibili in commercio che soddisfino le caratteristiche appena citate. Le barriere certificate (Benestare Tecnico Europeo), sono presentate dai produttori in base alle seguenti caratteristiche:

- Massima capacità di assorbimento [kJ] (Figura 7.1-1);
- Massima elongazione verso valle della struttura di intercettazione durante l'impatto [m] (Figura 7.1-2)
- Altezza residua dopo l'impatto, misurata in direzione normale alla pendenza locale del versante [m] (Figura 7.1-3)
- Carichi agenti sulle parti strutturali durante l'impatto [kN] (si ricorda che la parte di ancoraggio non viene trattata in questa sede) (Figura 7.1-4).

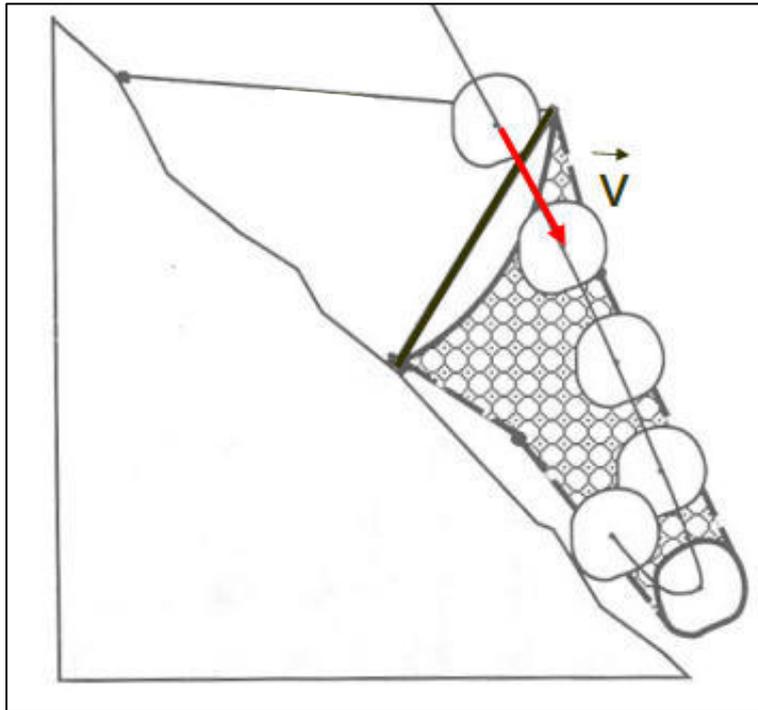


Figura 7.1-1: Massima energia assorbibile dalla barriera, con impatto di blocco avente velocità V (Barbero, 2017)

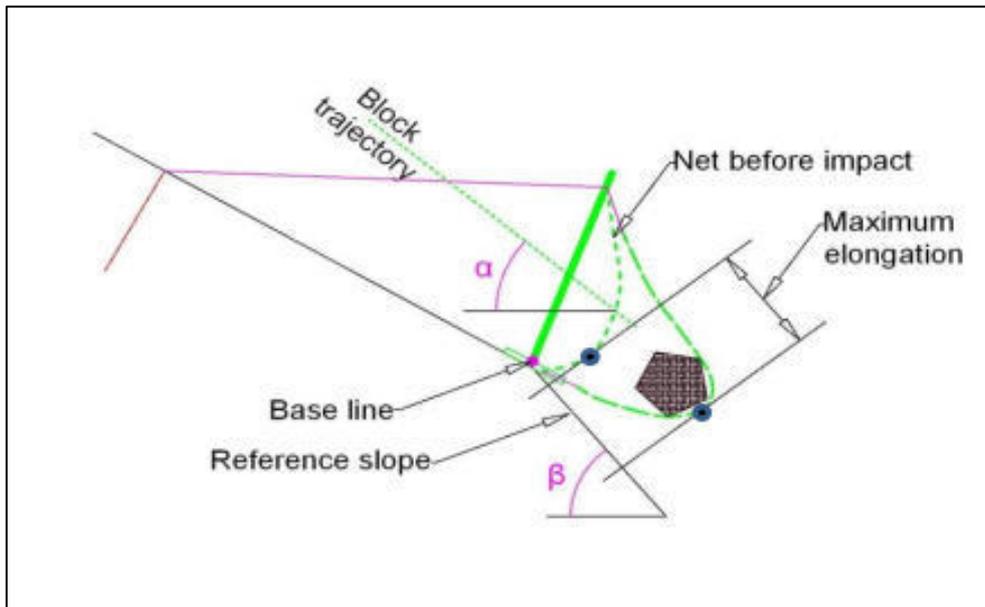


Figura 7.1-2: Massima elongazione della barriera (EOTA2018)

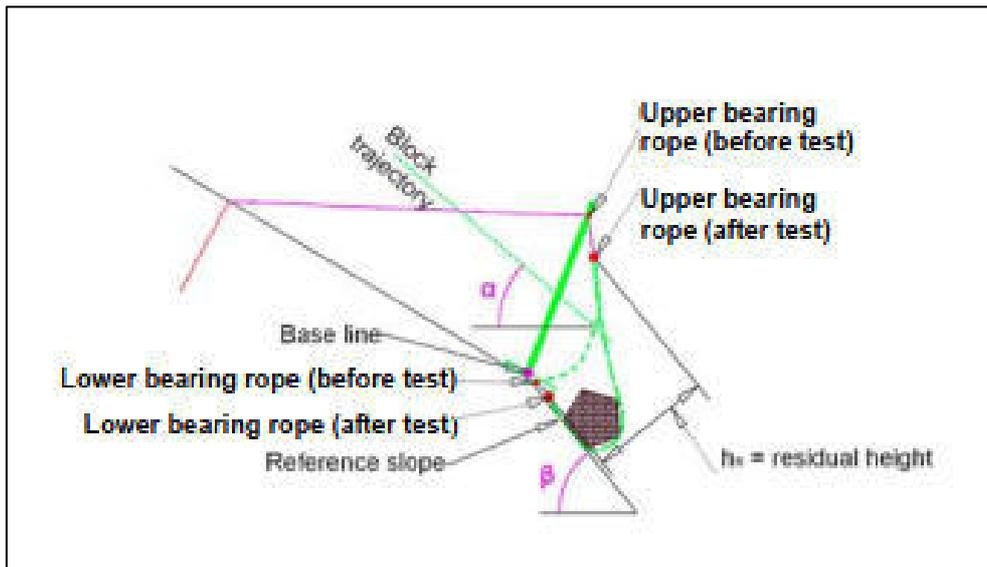


Figura 7.1-3: Altezza residua dopo l'impatto (EOTA2018)

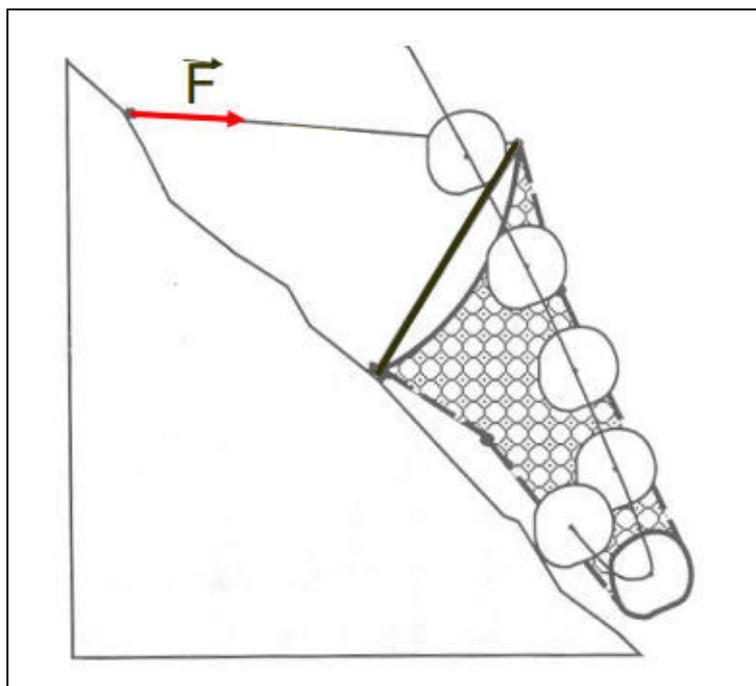


Figura 7.1-4: Forze agenti sugli elementi strutturali (Barbero, 2017)

L'EOTA2018 definisce due livelli energetici per le barriere paramassi:

- SEL: Service Energy Level

Questo livello energetico rappresenta l'energia di un blocco impattante sulla rete, la quale soddisfa le seguenti condizioni:

1. La barriera ferma il blocco dopo due impatti alla medesima energia cinetica;
2. Dopo il primo impatto il blocco è fermato, senza rottura delle componenti strutturali e variazione dell'apertura delle maglie della rete inferiore a due volte la loro dimensione iniziale. Inoltre l'altezza residua della rete deve essere maggiore o uguale al 70% dell'altezza nominale della barriera prima del test;
3. Durante l'impatto il blocco non tocca il terreno, fino al raggiungimento della massima elongazione della rete sia dopo il primo che dopo il secondo lancio SEL;
4. Dopo il secondo impatto il blocco è fermato.

- MEL: Maximum Energy Level

Questo livello energetico rappresenta la massima energia di un blocco impattante sulla rete che essa può arrestare, la quale soddisfa le seguenti condizioni:

1. $MEL \geq \gamma \cdot SEL$, con $\gamma = 3$;
2. La barriera arresta il blocco;
3. Durante l'impatto il blocco non tocca il terreno, fino al raggiungimento della massima elongazione della rete.

In merito ai livelli energetici SEL e MEL le barriere vengono suddivise in 9 classi, come riportato in Tabella 7.1-1:

Energy Level classification	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL [kJ]	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Tabella 7.1-1: Classificazione in base ai livelli energetici SEL e MEL

Un'ulteriore classificazione viene fatta per il livello energetico MEL in funzione dell'altezza residua dopo la prova di impatto:

- Categoria A): altezza residua $\geq 50\%$ dell'altezza nominale
- Categoria B): altezza residua compresa tra 30% e 50% dell'altezza nominale
- Categoria C): altezza residua $\leq 30\%$ dell'altezza nominale.

Vengono di seguito riportate la vista laterale (Figura 7.1-5) e la vista frontale (Figura 7.1-6) dello schema tipico di una barriera paramassi, come riportato nelle EOTA2018.

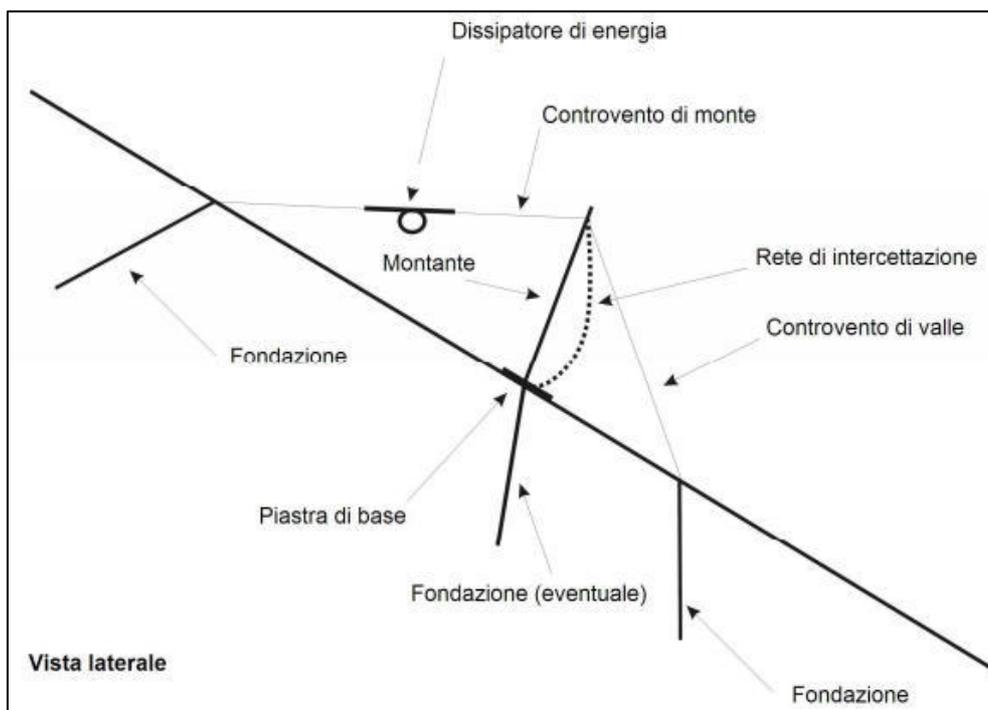


Figura 7.1-5: Vista laterale del sistema di intercettazione (EOTA2018)

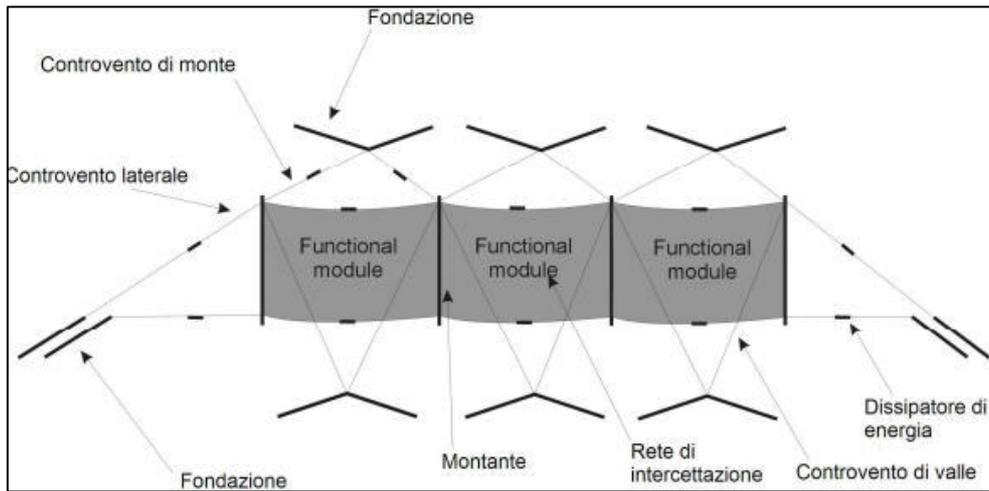


Figura 7.1-6: Vista frontale del sistema di intercettazione (EOTA2018)

7.2. Cenni sulla progettazione delle opere di difesa

Dalle analisi di propagazione del fenomeno vengono ricavati i parametri energetici, di velocità e di altezza utili alla progettazione e all'esecuzione delle verifiche di sicurezza, riportate nella UNI 11211-4:2012 e aggiornate dalle UNI 11211-4:2018.

Come già accennato nel paragrafo precedente, ai fini della progettazione della barriera, sono necessari diversi parametri:

- *Massa di progetto* m_p , ovvero la massa del blocco impattante sulla barriera, espressa come

$$m_p = (V_p \cdot \gamma) \cdot \gamma_m = (V_p \cdot \gamma) \cdot \gamma_\gamma \cdot \gamma_{vol} \quad (7.1)$$

Dove:

- γ = densità della roccia [kg/m^3];
- V_p = volume di progetto del blocco utilizzato negli scenari previsionali [m^3];
- γ_m = coefficiente di sicurezza ottenuto come prodotto dei coefficienti di sicurezza γ_γ e γ_{vol} , dove il primo è legato alla precisione con la quale si misura la densità della roccia, in genere assunto pari a 1, mentre il secondo è legato alla precisione del rilievo del volume di progetto. Il coefficiente γ_{vol} si assume pari a 1,02 per rilievi

accurati della parete (tecniche fotogrammetriche e misurazioni in situ), mentre si assume pari a 1,10 in assenza di rilievi ai fini progettuali.

- *Velocità di progetto* v_p , ovvero la velocità del blocco impattante sulla barriera, espressa come

$$v_p = v_{95} \cdot \gamma_F = v_{95} \cdot \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp} \quad (7.2)$$

Dove:

- $v_{95} = 95^\circ$ percentile della frequenza cumulata delle velocità misurata nella posizione dove si intende posizionare la barriera [m/s];
 - γ_{Tr} = coefficiente di sicurezza legato all'affidabilità delle traiettorie simulate e assume valore pari a 1,02 per analisi bidimensionali o tridimensionali i cui parametri sono stati calibrati mediante analisi a ritroso (back analysis), mentre assume valore 1,10 in caso di analisi bidimensionali basate esclusivamente sui coefficienti di restituzione dedotti dalle informazioni presenti in letteratura;
 - γ_{Dp} = coefficiente legato alla qualità di rappresentazione del versante ed assume valore pari a 1,02 per pendii rappresentati con buona precisione, sulla base di un rilievo accurato (per esempio realizzazione di un DTM), mentre assume valore pari a 1,10 per versanti discretizzati con precisione medio-bassa.
- *Energia cinetica di progetto* E_p , ovvero l'energia del blocco impattante sulla barriera di massa m_p e velocità v_p , espressa come

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v_p^2 = \frac{1}{2} [(V_p \cdot \gamma) \cdot \gamma_\gamma \cdot \gamma_{vol}] \cdot [v_{95} \cdot \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp}]^2 \quad (7.3)$$

Dove gli elementi componenti l'espressione sono quelli sopra descritti.

- *Altezza di intercettazione h_p* , ovvero l'altezza della barriera necessaria all'intercettazione della traiettoria del blocco impattante sulla barriera, espressa come

$$h_p = h_{95} \cdot \gamma_f + f \cdot \gamma_p = h_{95} \cdot \gamma_{Tr} \cdot \gamma_{Dp} + f \cdot \gamma_p \quad (7.4)$$

Dove:

- $h_{95} = 95^\circ$ percentile della frequenza cumulata delle altezze di passaggio del blocco impattante sulla barriera [m];
- $f =$ franco di sicurezza che non deve essere inferiore al raggio della sfera equivalente al blocco, ovvero una sfera di pari volume del blocco di progetto;
- $\gamma_p =$ coefficiente applicato al franco di sicurezza f , in genere posto pari a 1,50.
- I restanti coefficienti sono i medesimi sopra descritti.

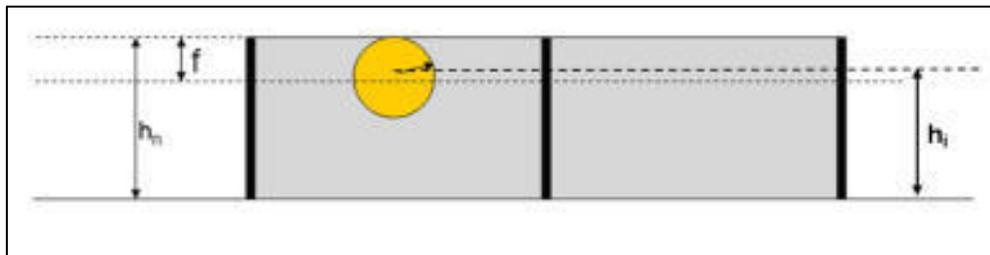


Figura 7.2-1: Schema dell'altezza di intercettazione della barriera (Barbero, 2017)

- *Massima elongazione di progetto d_A* , ovvero il massimo allungamento che la barriera subisce a seguito di un impatto di un blocco con energia cinetica pari al livello MEL, espressa come

$$d_A = d_{mel,max} \cdot \gamma_D \quad (7.5)$$

Dove:

- $d_{MEL,max} =$ massimo allungamento misurato dal produttore durante una prova MEL in vera grandezza [m];
- $\gamma_D =$ coefficiente di sicurezza legato alla tipologia di impatto, pari a 1,30 se è disponibile solo il valore registrato nella prova MEL, 1,50 nel caso in cui le campate terminali ricadano nelle aree di possibili traiettorie o barriere con meno di tre moduli funzionali, 1,00 se il progetto dell'opera è eseguito considerando il livello energetico SEL.

Tenendo conto di quanto sopra esposto, è chiaro che per minimizzare il costo dell'opera è necessario posizionare il sistema di opere in modo tale da minimizzare le energie, le velocità e le altezze di passaggio dei blocchi, considerando inoltre che (Barbero, 2017):

- È preferibile un posizionamento il più possibile a valle, per massimizzare i blocchi che si arrestano a causa delle caratteristiche morfologiche del versante, nonché per la facilità di installazione;
- Sono preferibili zone a basse pendenze;
- Il posizionamento con i criteri esposti al punto precedente deve comunque sottostare al rispetto delle distanze minime dagli elementi da proteggere (edifici, strade, opere di interesse pubblico ecc.);
- Nel caso di più allineamenti di barriere paramassi, è necessario che gli stendimenti adiacenti siano sovrapposti di almeno mezza campata del singolo modulo.

Selezionato il livello energetico di progetto della barriera, è necessario condurre le verifiche di sicurezza sui parametri sopra descritti, ovvero capacità di assorbimento, altezza di intercettazione e massima elongazione.

In primo luogo si deve garantire che l'energia dissipabile in condizioni di sicurezza dalla rete sia maggiore dell'energia cinetica del blocco impattante, avente massa m_p e velocità v_p .

$$E_p - \frac{E_{barriera}}{\gamma_E} \leq 0 \quad (7.6)$$

Dove:

- $E_{Barriera}$ = capacità effettiva della barriera, come dichiarata dal produttore a seguito delle prove sperimentali in vera grandezza [kJ];
- γ_E = coefficiente di sicurezza legato al tipo di livello energetico utilizzato, assume valore 1,20 per approccio energetico MEL, mentre assume valore pari a 1,00 per approccio energetico SEL. Nel caso la morfologia del versante port ad avere un numero di campate inferiore a 3, il coefficiente γ_E assume i seguenti valori:
 - 1,00 per approccio energetico SEL;
 - 1,20 per approccio energetico MEL, con due stendimenti paralleli;
 - 2,00 per approccio energetico MEL, con un solo stendimento.

In secondo luogo l'altezza di intercettazione h_i , ovvero l'altezza nominale della barriera misurata in direzione normale al versante, a meno del franco di sicurezza (che viene definito dal produttore) deve risultare maggiore dell'altezza di progetto h_p , come sopra calcolata, secondo la seguente espressione:

$$h_p - h_i \leq 0 \quad (7.7)$$

Infine è necessario verificare che le opere che si intende proteggere non vengano colpite nel caso in cui la rete raggiunga la sua massima elongazione al livello energetico MEL. Tale massima elongazione d_A deve quindi risultare, moltiplicata per il coefficiente di sicurezza γ_D , inferiore alla distanza della barriera dall'opera più vicina d_p secondo la seguente espressione:

$$d_p - d_A \geq 0 \quad (7.8)$$

7.3. Progetto delle barriere paramassi

In questa sede, come già esposto precedentemente, si procederà alla progettazione di uno stendimento di barriere flessibili esclusivamente in termini di capacità di assorbimento e di altezza di intercettazione. Dopo diversi tentativi è stato scelto lo schema riportato in Figura 7.3-1, il quale minimizza le energie, velocità e altezze di passaggio dei blocchi, nel rispetto delle distanze dagli edifici e dell'accessibilità alla zona.

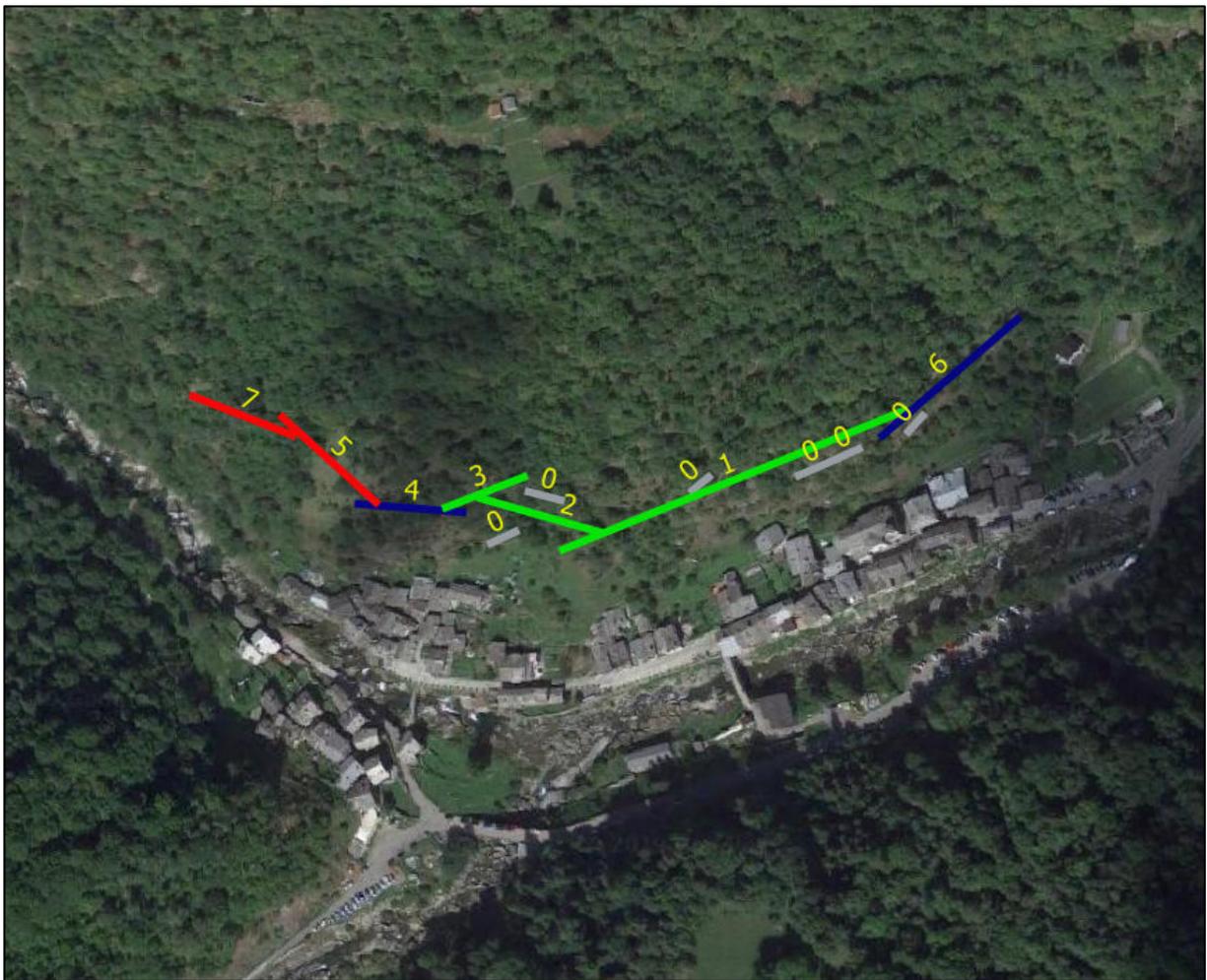


Figura 7.3-1: Schema del posizionamento delle opere di difesa

In Figura 7.3-1 sono inoltre riportate le opere di difesa esistenti, identificate dall'indice 0 e dal colore grigio, di altezza nominale 4,0 m e capacità di assorbimento di 1000 kJ. Come già dimostrato nel capitolo dedicato alla back analysis, il loro posizionamento non è ottimale e non elimina la possibilità che un blocco, anche di modeste dimensioni, possa raggiungere l'abitato.

Sono invece indicate con un numero progressivo da 1 a 7 le barriere proposte nell'ambito di questa tesi, con differenti colori a seconda della capacità:

- Blu, barriere di classe MEL 5 (2000 kJ),
- Verde, barriere di classe MEL 6 (3000 kJ)
- Rosso, barriere di classe MEL 8 (5000 kJ).

Dal catalogo online scelto, i produttori forniscono barriere di altezza 5,0 m per le classi MEL 5 e 6 e max elongazione rispettivamente 7,19 m e 7,22 m, e altezza di 6,0 m per la classe MEL 8 e max elongazione 8,62 m. Il progetto è stato eseguito facendo riferimento alle espressioni riportate nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda lo scenario di progetto, si è scelto di optare per il volume da 5,0 m³, ovvero lo scenario più gravoso in termini di energie ed aree di invasione, con distacco contemporaneo da roccia esposta e da roccia intensamente fratturata. Questa scelta è motivata dal fatto che nel sito in esame è stata riscontrata una scadente manutenzione delle barriere nel corso degli anni, in particolare è carente la rimozione dei blocchi accumulati sulla rete, con conseguente riduzione della capacità di assorbimento (a questo aspetto ci si ricollegherà più avanti per l'analisi di danneggiamento delle opere e del loro effetto sul fenomeno di propagazione). Il blocco di 5,0 m³ non rappresenta quindi lo scenario più probabile, ma quello che può fornire una maggiore sicurezza a fronte di quanto appena esposto ed in assenza di informazioni relative alla frequenza temporale degli eventi. Particolare attenzione andrà posta alla messa in sicurezza delle nicchie di distacco a valle delle opere (con altre metodologie che esulano dal percorso affrontato) in quanto un posizionamento a quote inferiori a quelle scelte, al fine di garantire la protezione degli edifici da tutti i possibili distacchi, avrebbe portato ad un posizionamento sostanzialmente aderente agli edifici, rendendo inefficace l'intervento qualora le reti fossero sottoposte ad un impatto di energia MEL, con un allungamento della rete di molto superiore alla distanza disponibile dagli edifici. Va comunque ribadito che la maggioranza delle nicchie di distacco a valle della posizione scelta per le opere sono principalmente zone di roccia esposta, la cui probabilità di distacco è sicuramente molto inferiore a quella della roccia intensamente fratturata, indicata da una freccia blu in Figura 7.3-3, per la quale andranno presi provvedimenti differenti. In Figura 7.3-3 è inoltre riportato l'insieme delle nicchie di distacco considerate nella simulazione di propagazione per ricavare i parametri energetici, di velocità e di altezza ai fini del dimensionamento (così come già effettuato nel capitolo dell'analisi previsionale).

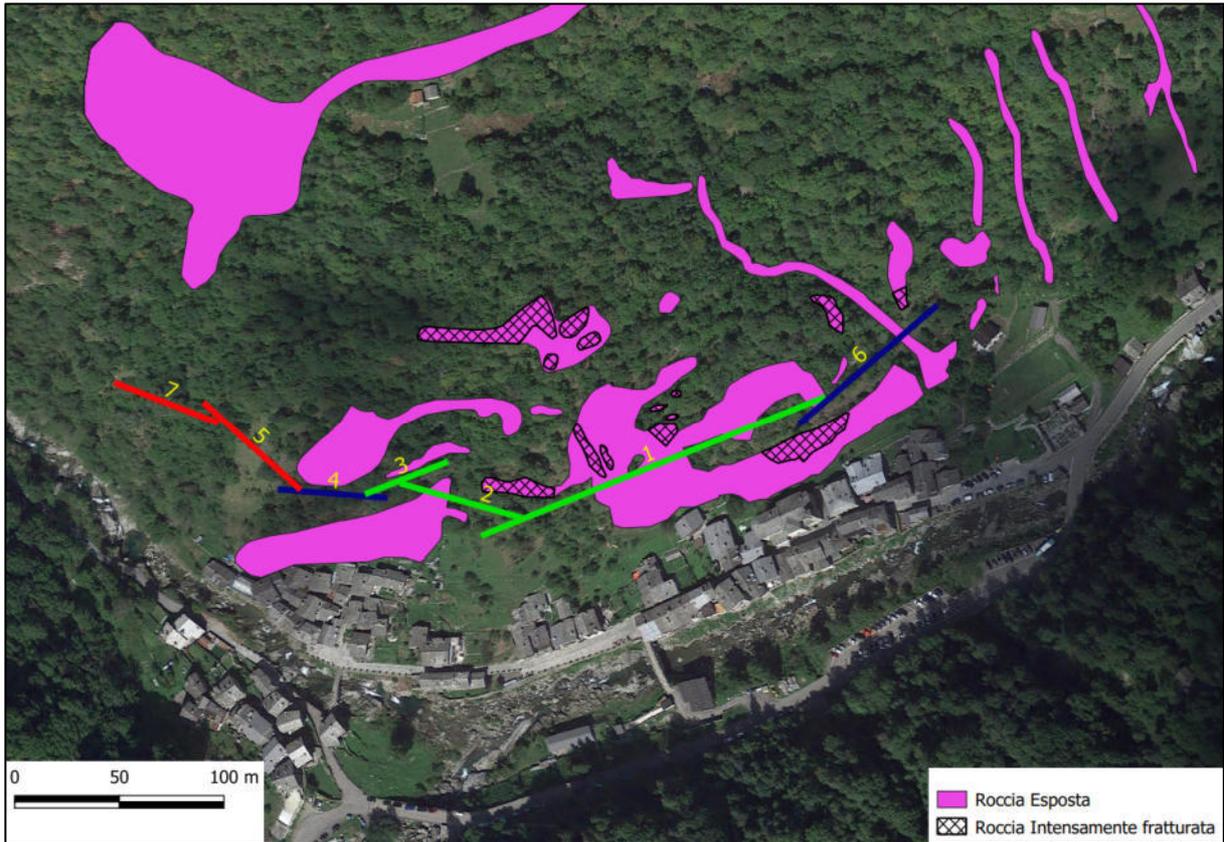


Figura 7.3-2: Posizione delle barriere in relazione alla posizione delle nicchie di distacco

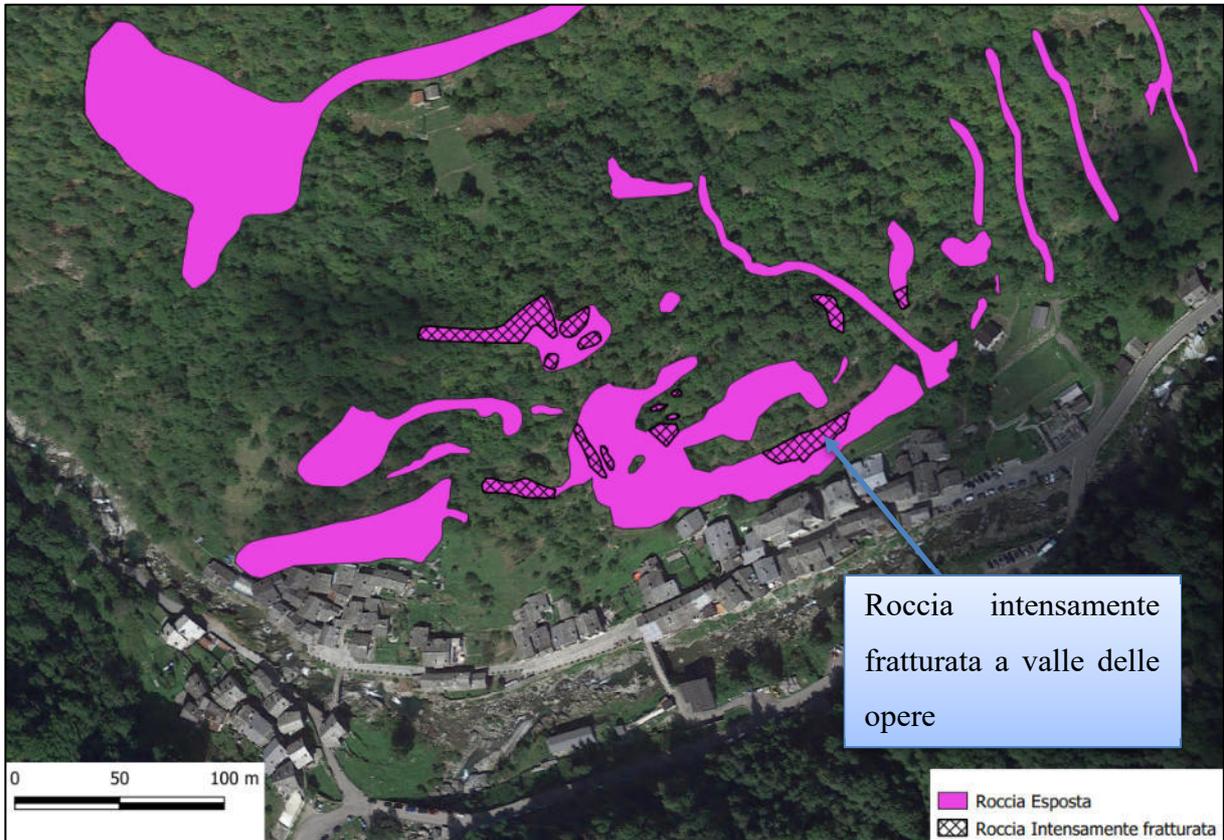


Figura 7.3-3: Schema delle nicchie di distacco

È di seguito riportata la mappa raster delle energie (Figura 7.3-4) che il software Rockyfor3D fornisce come output dalle simulazioni di distacco dalle nicchie riportate in Figura 7.3-3, nella quale, per una maggiore chiarezza visiva, sono state escluse le opere esistenti.

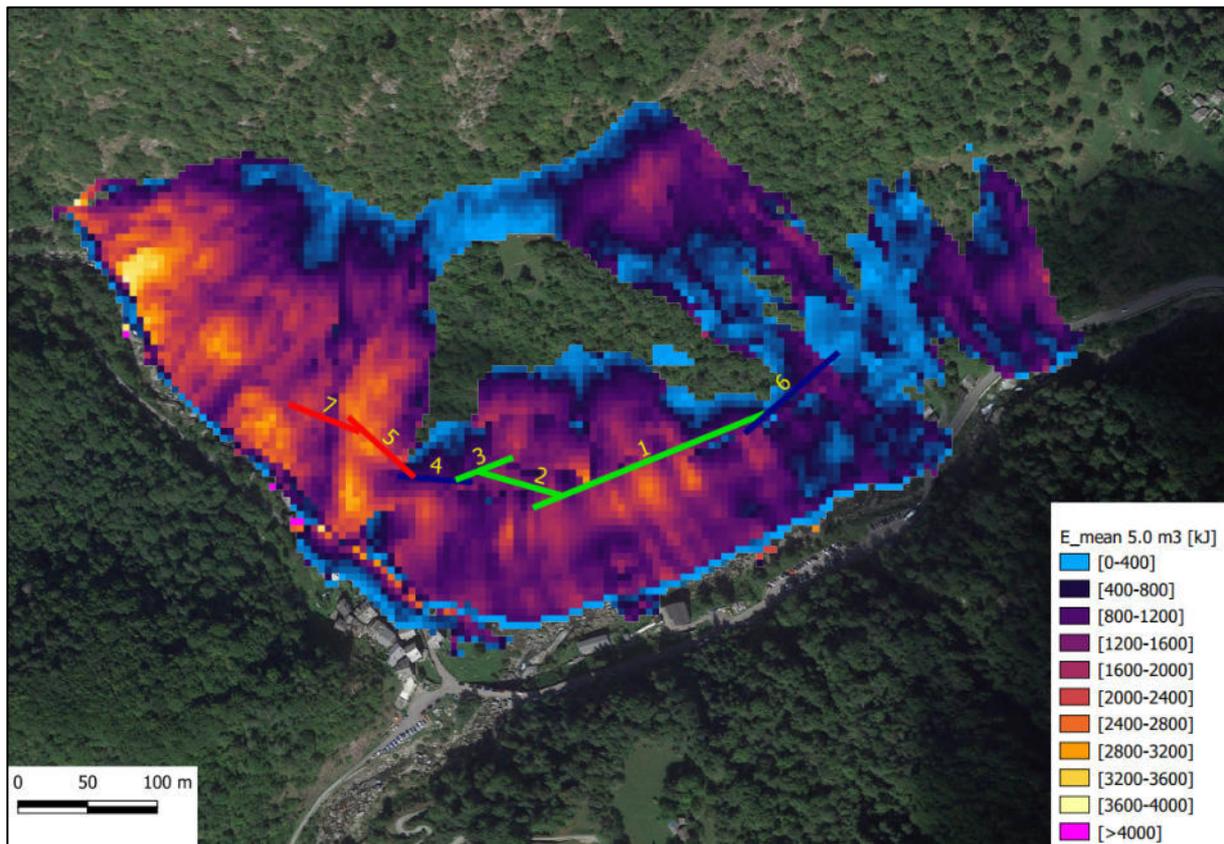


Figura 7.3-4: Mapa raster $E_mean.asc$ della simulazione con il blocco di progetto da $5.0 m^3$

Per la raccolta dei dati necessari al progetto delle barriere su Rockyfor3D sono state create delle mappe raster nella posizione desiderata, con parametri nulli per le altezze e per le energie (barriere fittizie, denominate collettori) come suggerito dal manuale del software (Dorren et al., 2014), in modo che non influissero sulla propagazione ma al tempo stesso permettendo al software di collezionare i parametri cinematici in tali posizioni. Le posizioni scelte per i collettori, nonché il loro numero come indicati in Figura 7.3-4, coincidono con l'esatta posizione delle barriere e derivano da diversi test di posizionamento nell'ottica del rispetto dell'andamento naturale delle quote nel versante (evitando dislivelli troppo elevati per la medesima barriera), di un risparmio economico (le barriere vengono posizionate possibilmente dove le energie di impatto e le altezze sono minime) e dell'accessibilità al sito (sono state posizionate al confine con la foresta).

A seguire, in Tabella 7.3-1, il riepilogo dei parametri cinematici post processati dal software Rockyfor3D e registrati nella posizione scelta per le barriere, memorizzati nel file di testo restituito a fine simulazione e già menzionato nella descrizione degli output nel Capitolo 3.7.

n° collettore	1	2	3	4	5	6	7
E_95 [kJ]	2903.4	2560.8	2371.1	1365.9	3420.9	1237.8	3080.3
Ph_95 [m]	1.7	1.3	1.2	1.0	1.2	1.1	1.1
V_95 [m/s]	19.1	17.1	16.4	12.9	19.3	12.7	18.3

Tabella 7.3-1: Frattili al 95% dei dati raccolti in corrispondenza delle barriere

Dove:

- E_95 = 95° percentile della frequenza cumulata delle energie registrate nella posizione del collettore [kJ];
- Ph_95 = 95° percentile della frequenza cumulata delle altezze di passaggio dei blocchi nella posizione del collettore, misurate normalmente alla pendenza locale del versante [m];
- V_95 = 95° percentile della frequenza cumulata delle velocità misurate nella posizione del collettore [m/s].

Nelle figure seguenti vengono riportate le curve di frequenza cumulata per la velocità, l'energia e l'altezza di passaggio misurate dal software di Rockyfor3D in corrispondenza dei collettori. I dati delle figure a seguire sono i medesimi riassunti in Tabella 7.3-1.



Figura 7.3-5: Cumulata della velocità al collettore 1

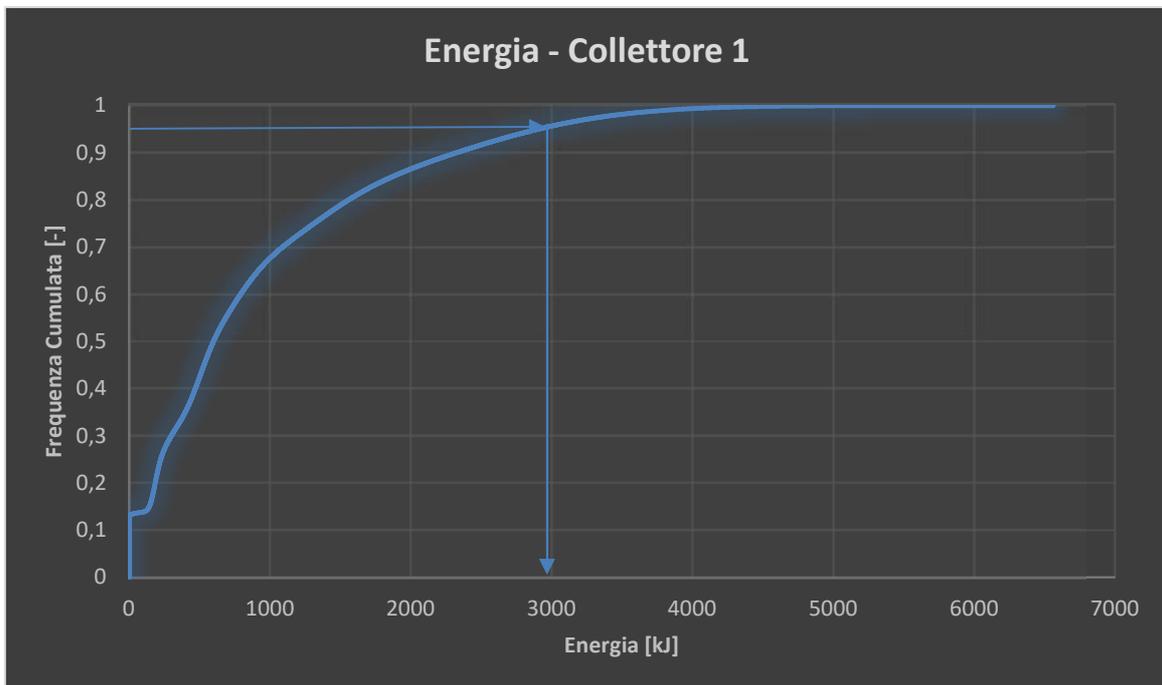


Figura 7.3-6: Cumulata dell'energia al collettore 1

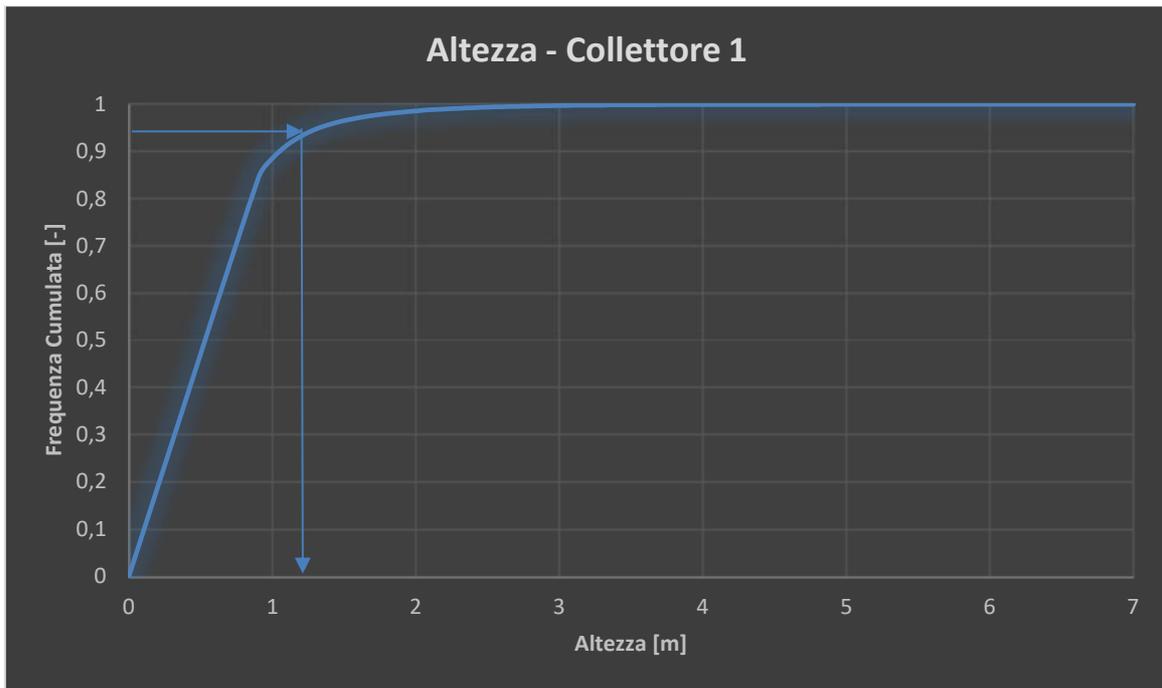


Figura 7.3-7: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 1

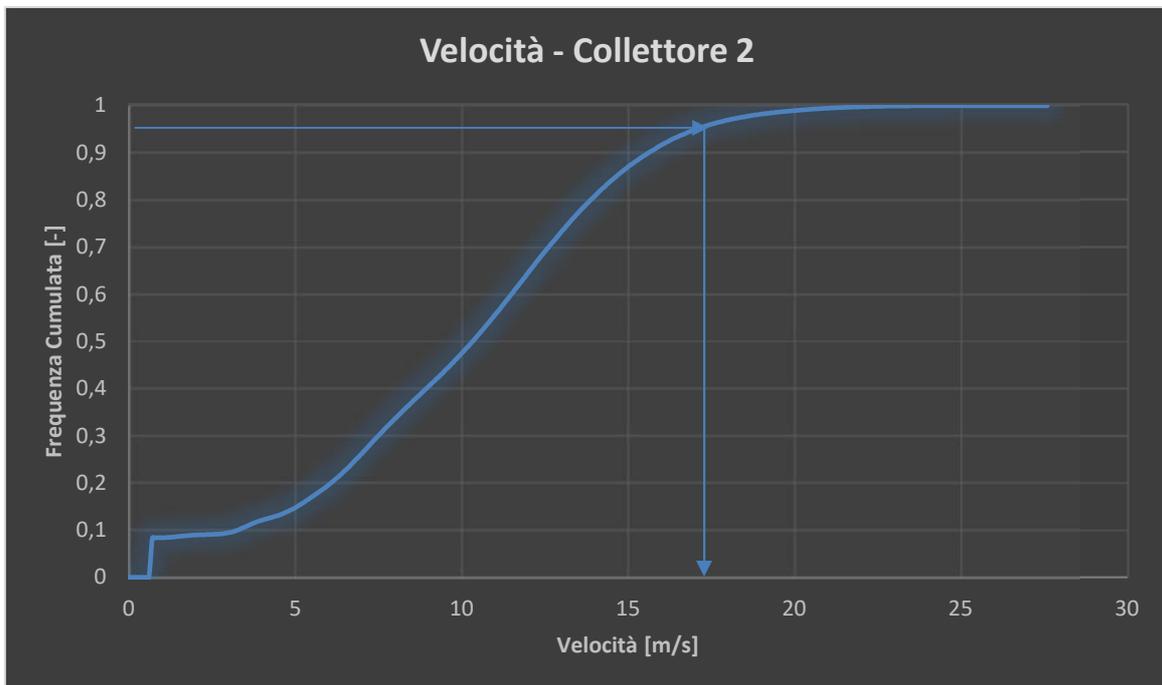


Figura 7.3-8: Cumulata della velocità al collettore 2

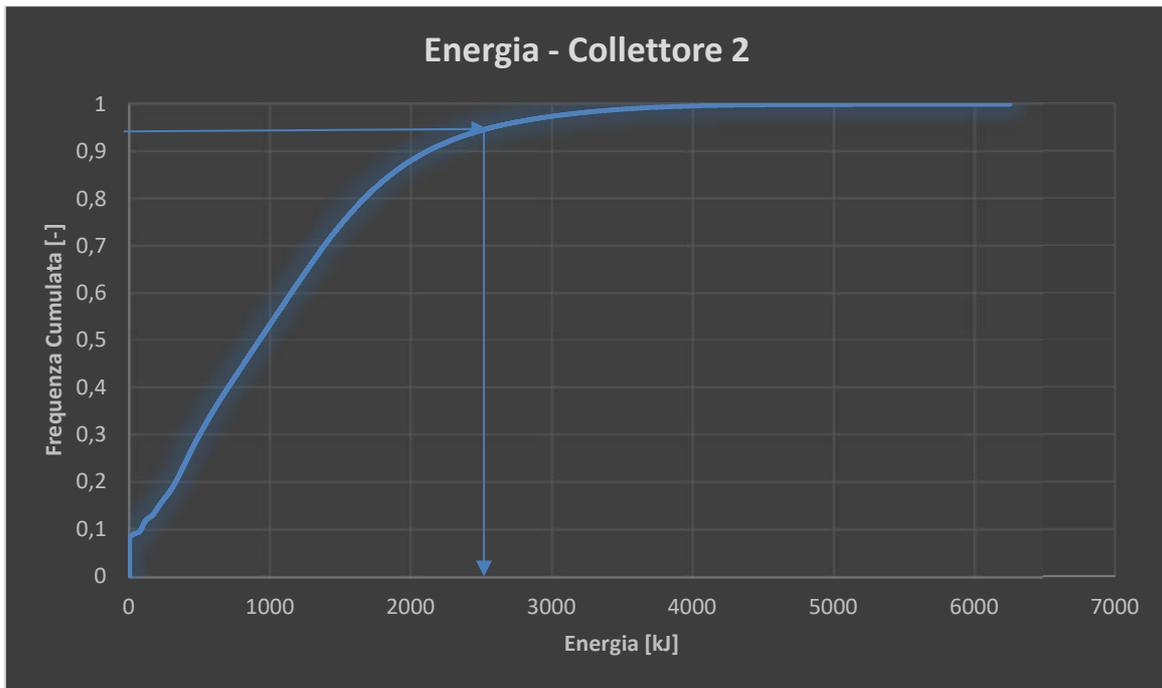


Figura 7.3-9: Cumulata dell'energia al collettore 2

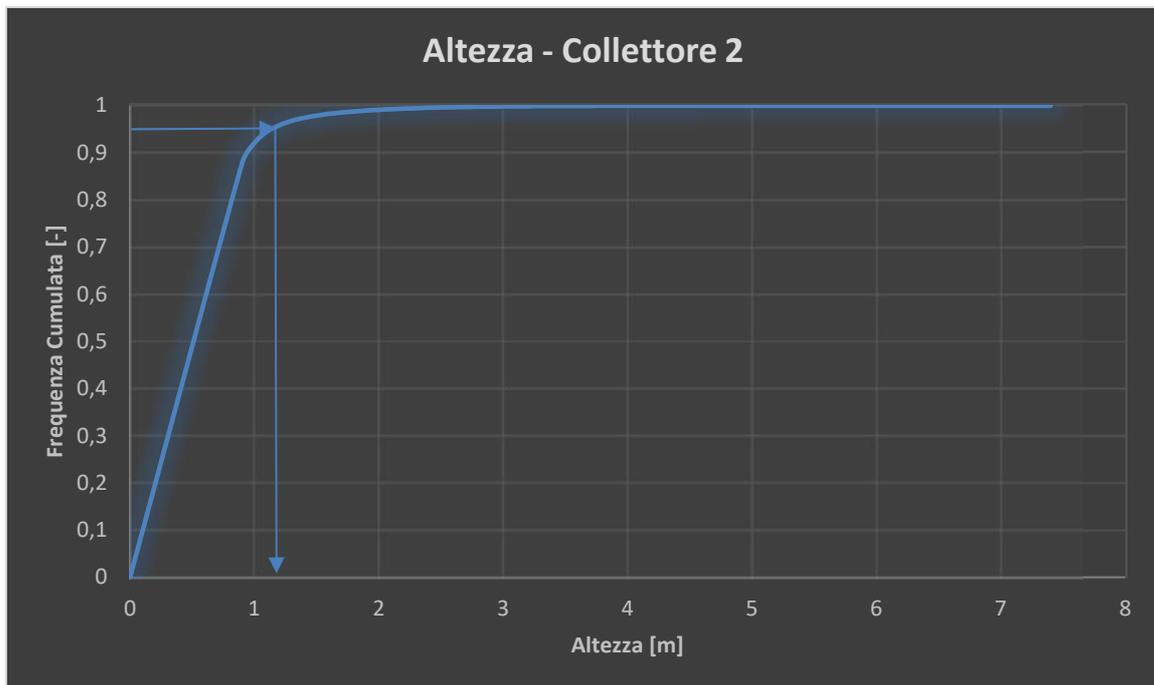


Figura 7.3-10: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 2

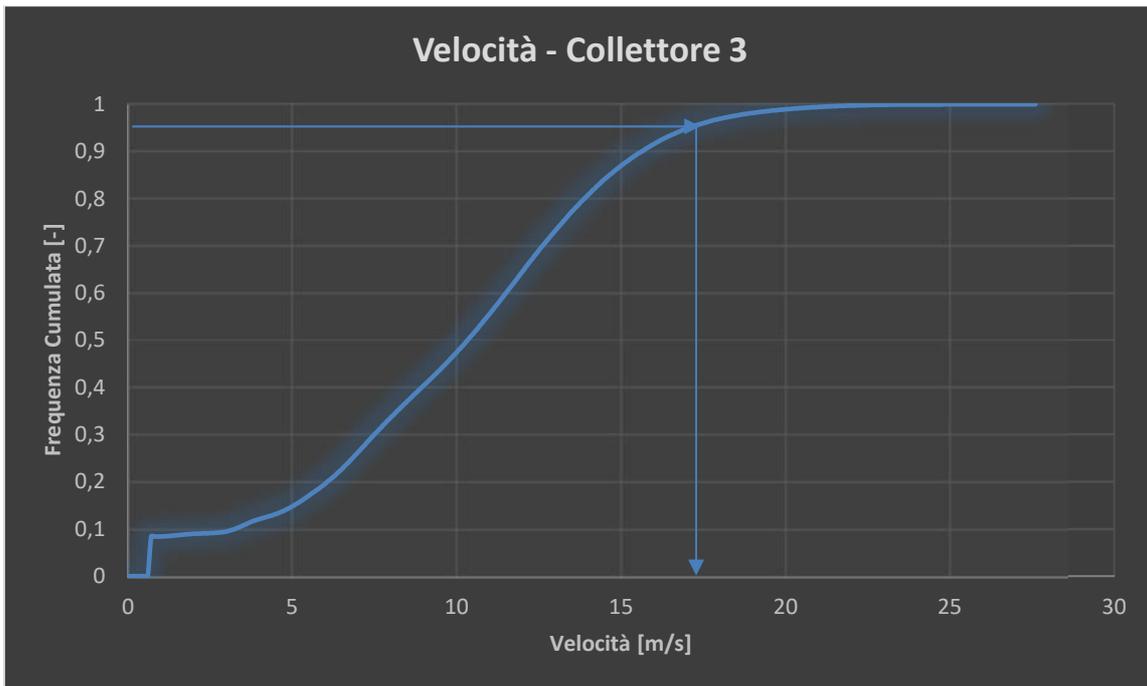


Figura 7.3-11: Cumulata della velocità al collettore 3

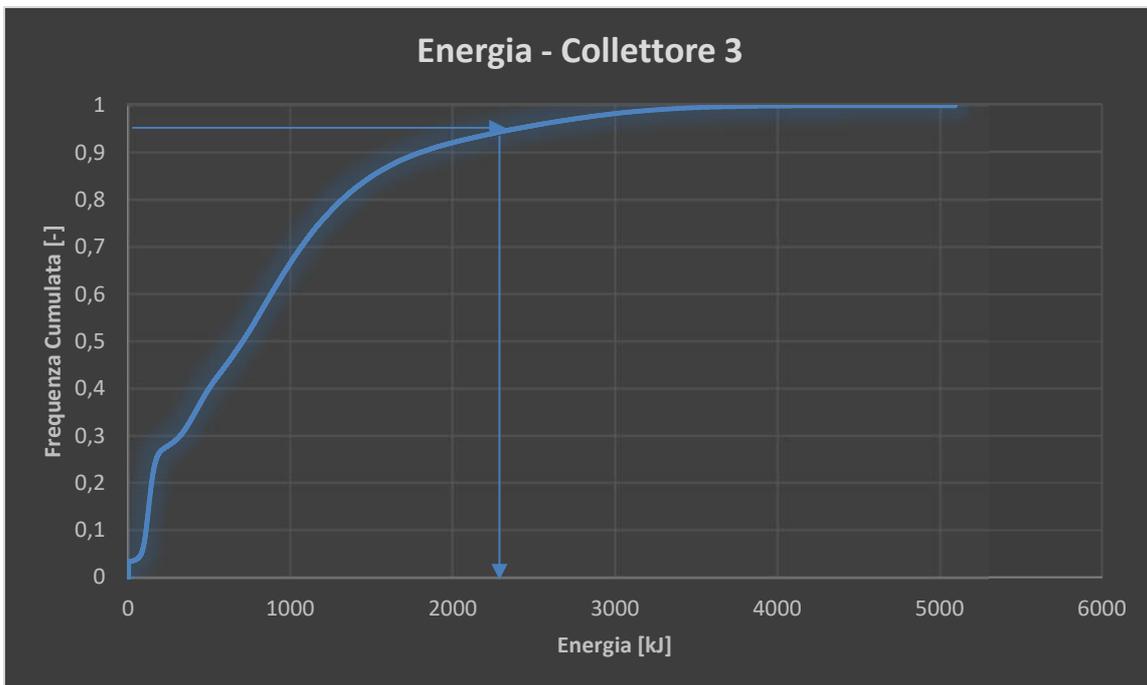


Figura 7.3-12: Cumulata dell'energia al collettore 3

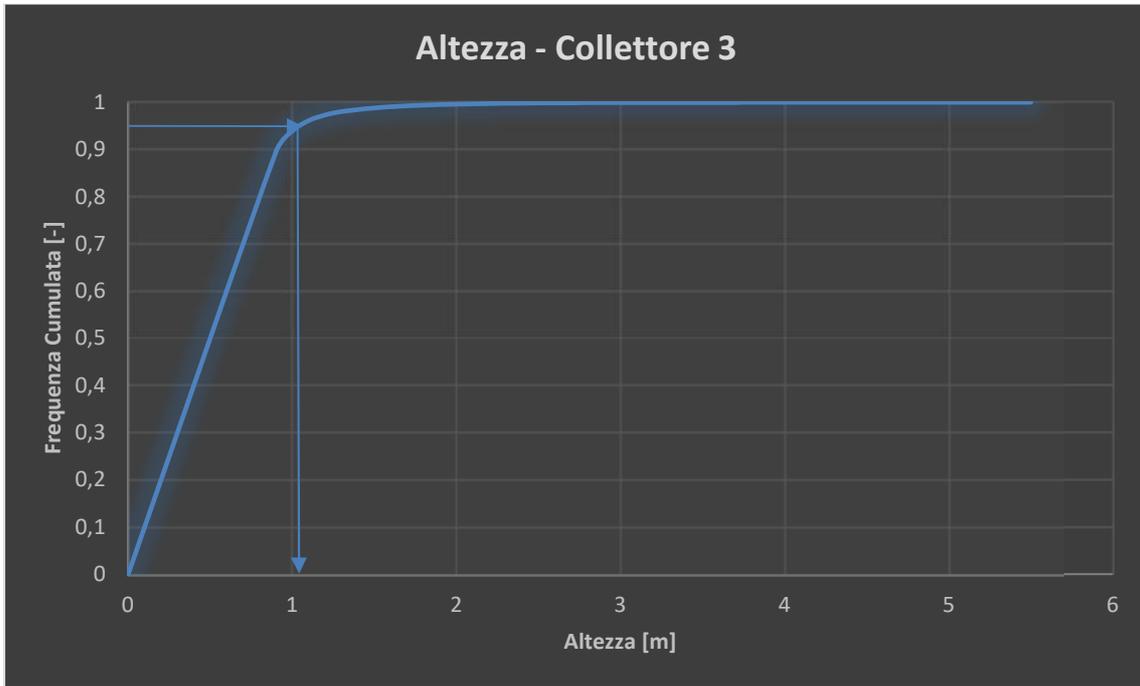


Figura 7.3-13: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 3

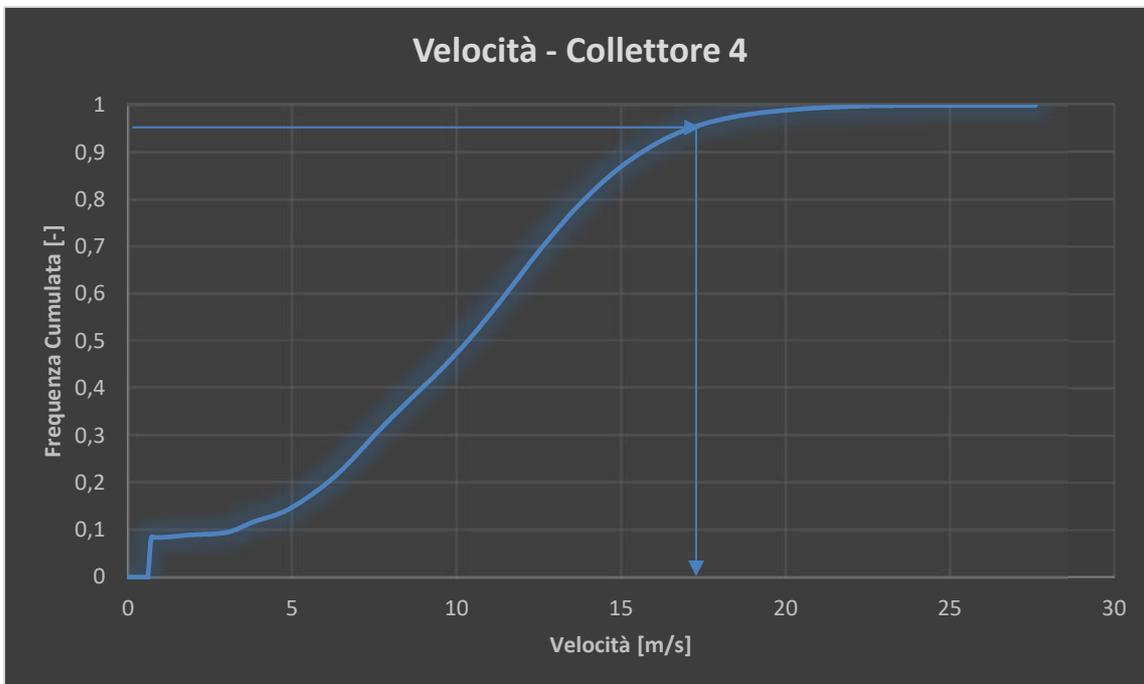


Figura 7.3-14: Cumulata della velocità al collettore 4

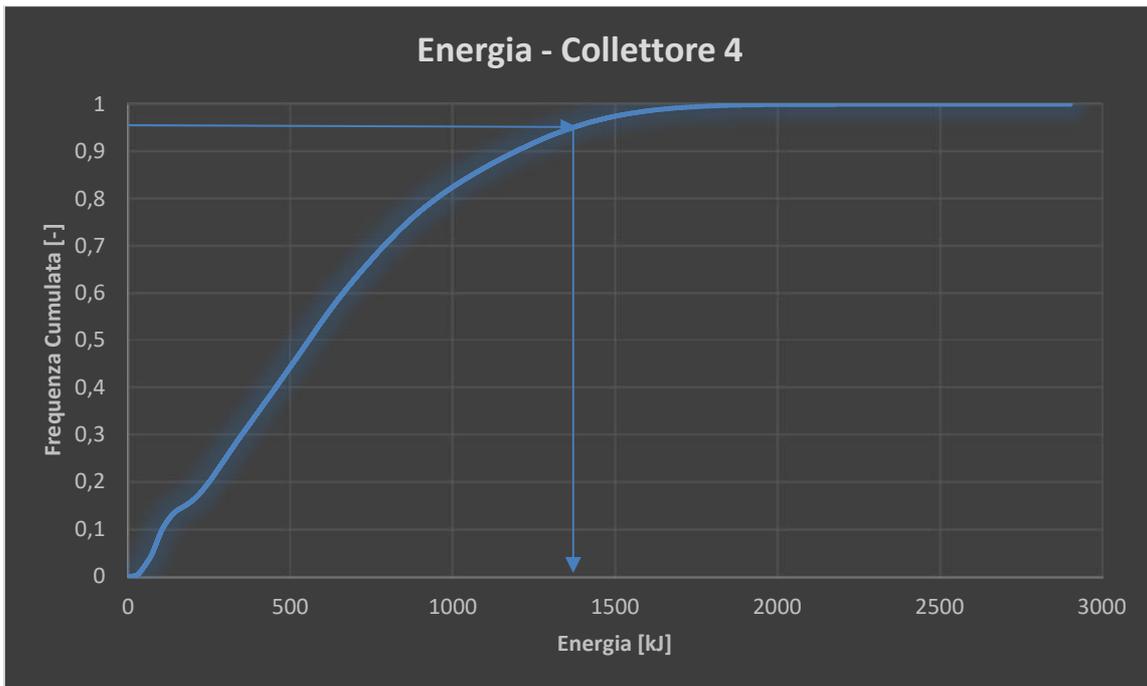


Figura 7.3-15: Cumulata dell'energia al collettore 4

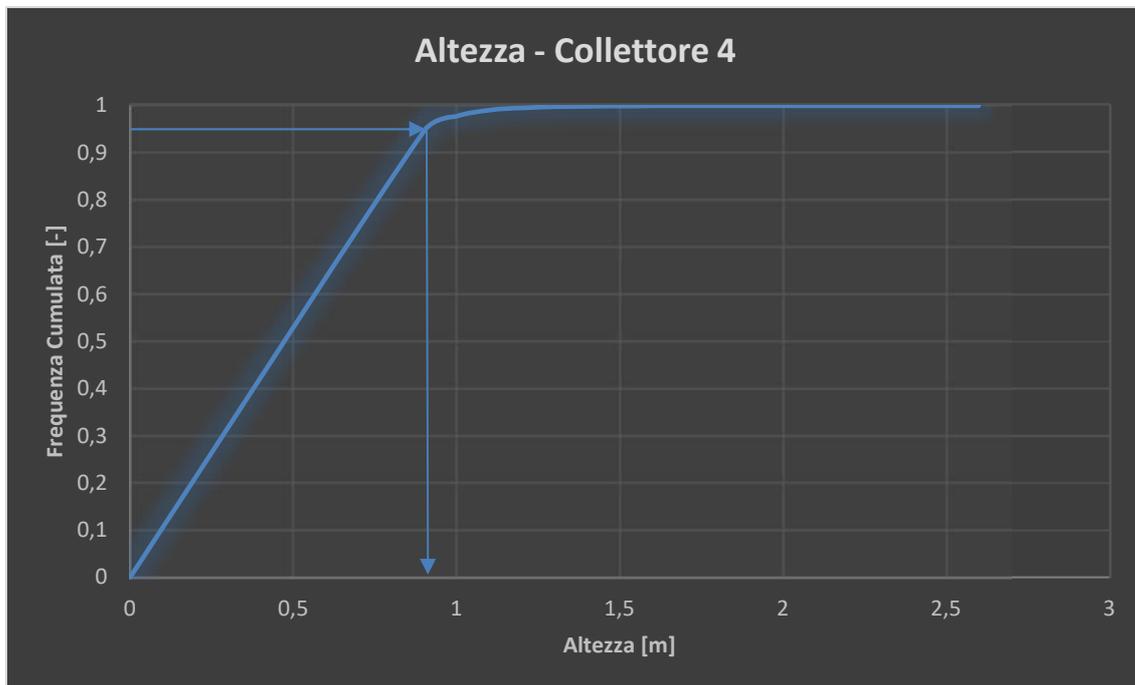


Figura 7.3-16: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 4

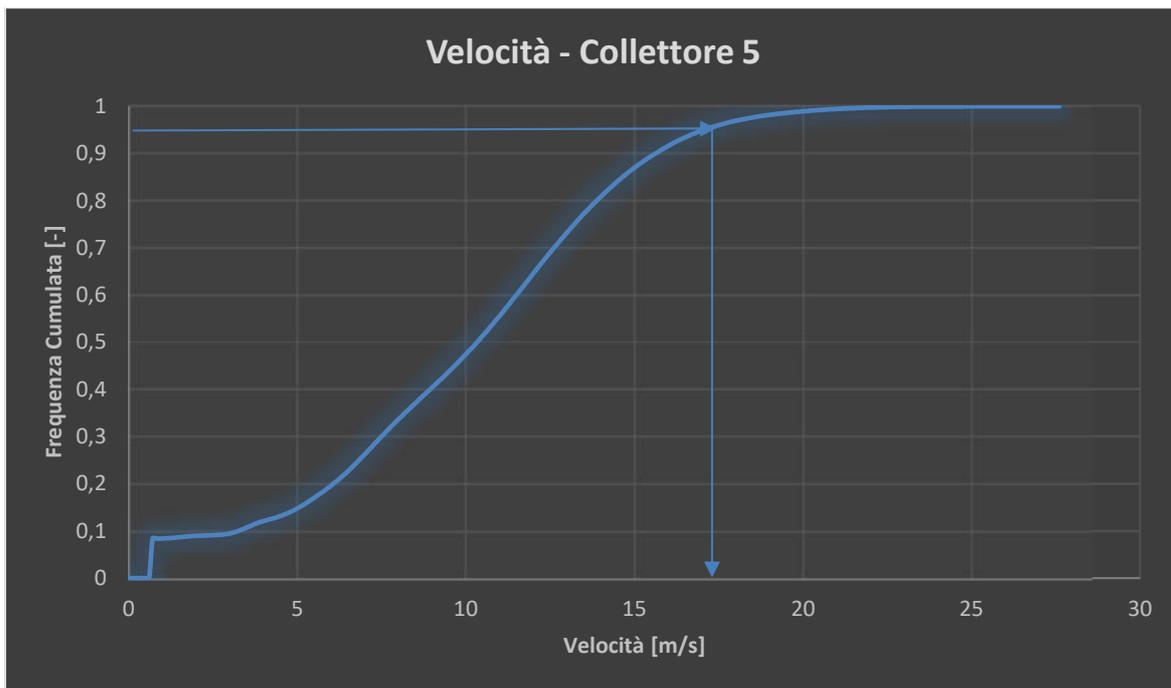


Figura 7.3-17: Cumulata della velocità al collettore 5

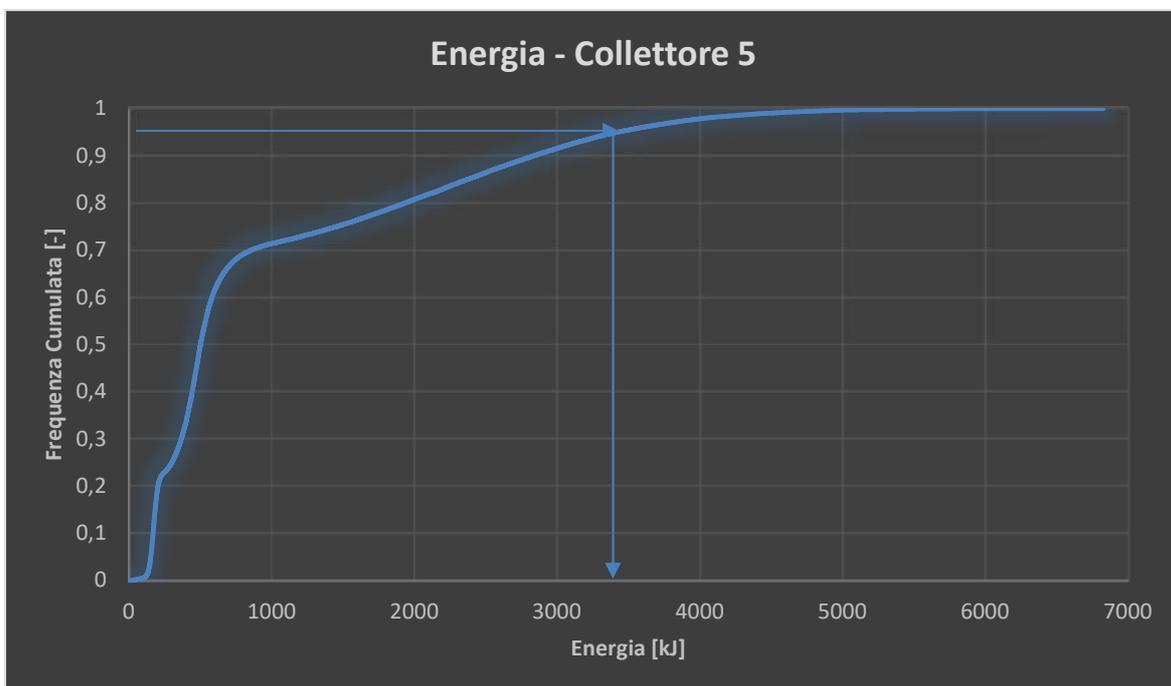


Figura 7.3-18: Cumulata dell'energia al collettore 5



Figura 7.3-19: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 5

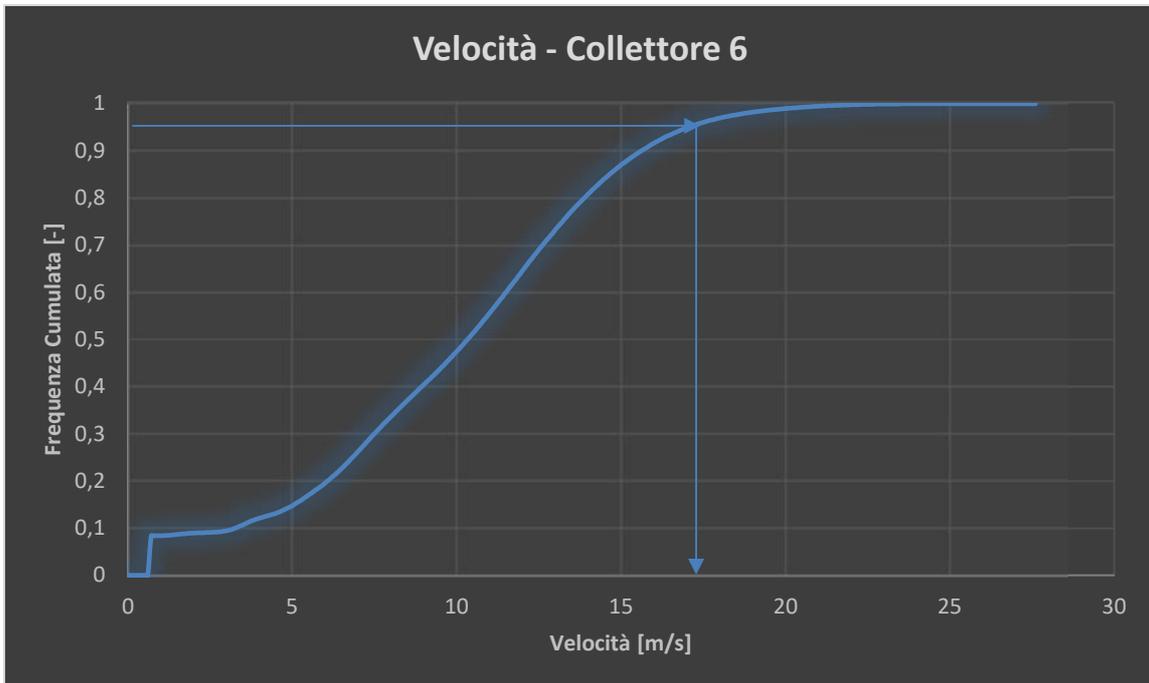


Figura 7.3-20: Cumulata della velocità al collettore 6

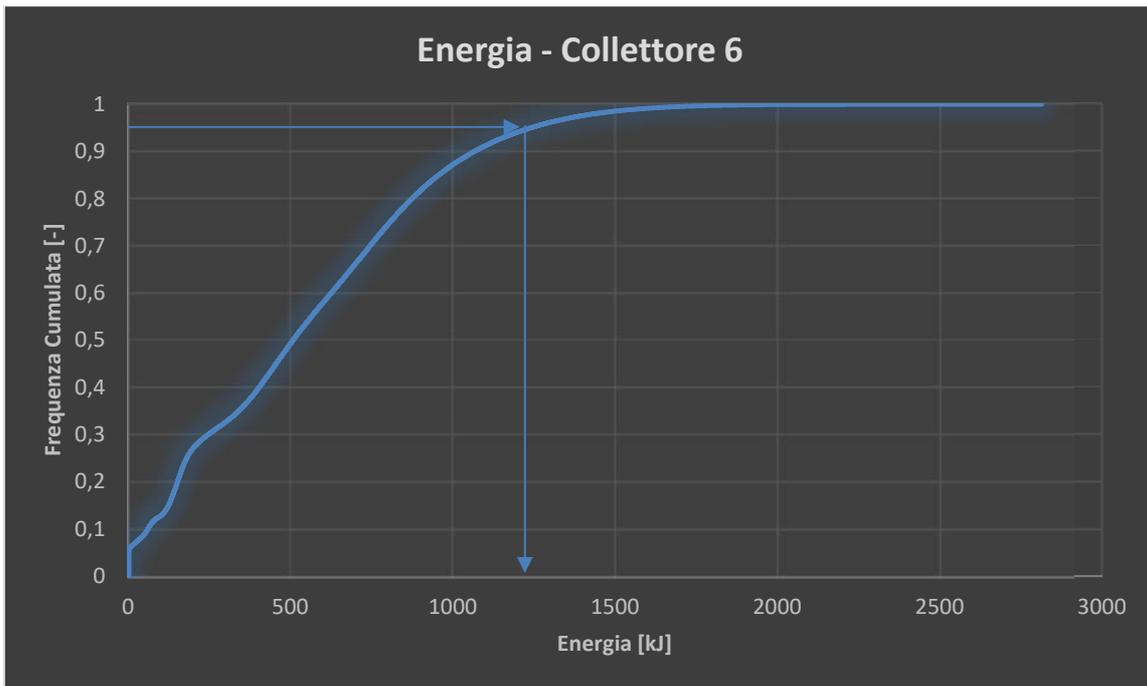


Figura 7.3-21: Cumulata dell'energia al collettore 6

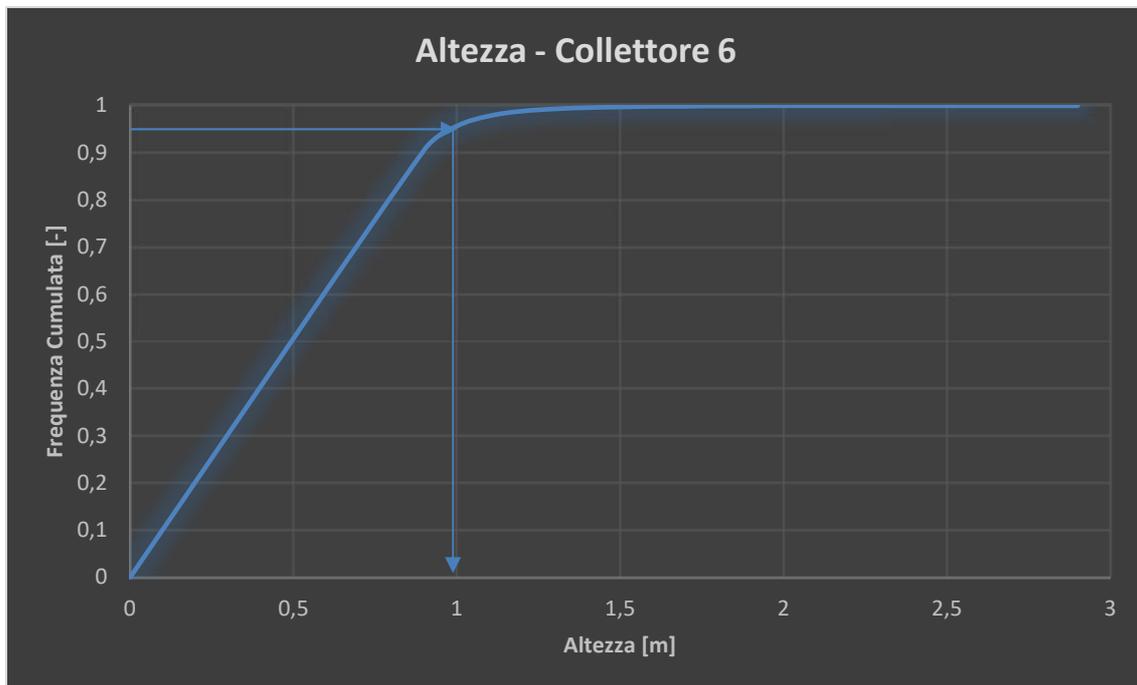


Figura 7.3-22: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 6

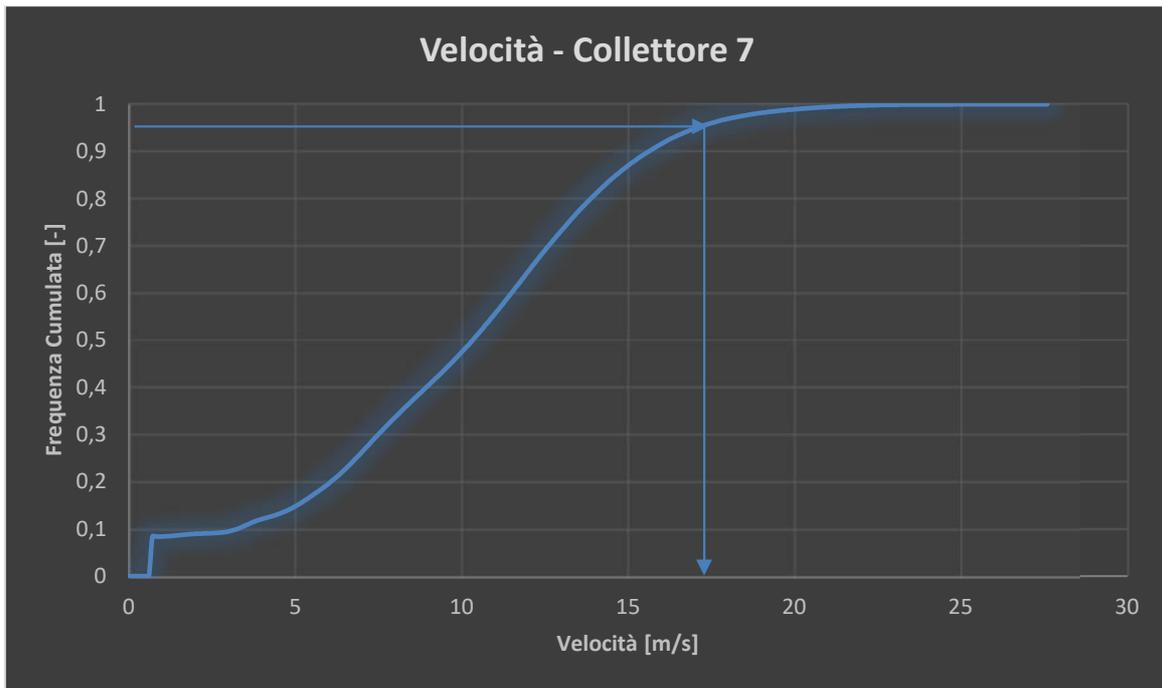


Figura 7.3-23: Cumulata della velocità al collettore 7

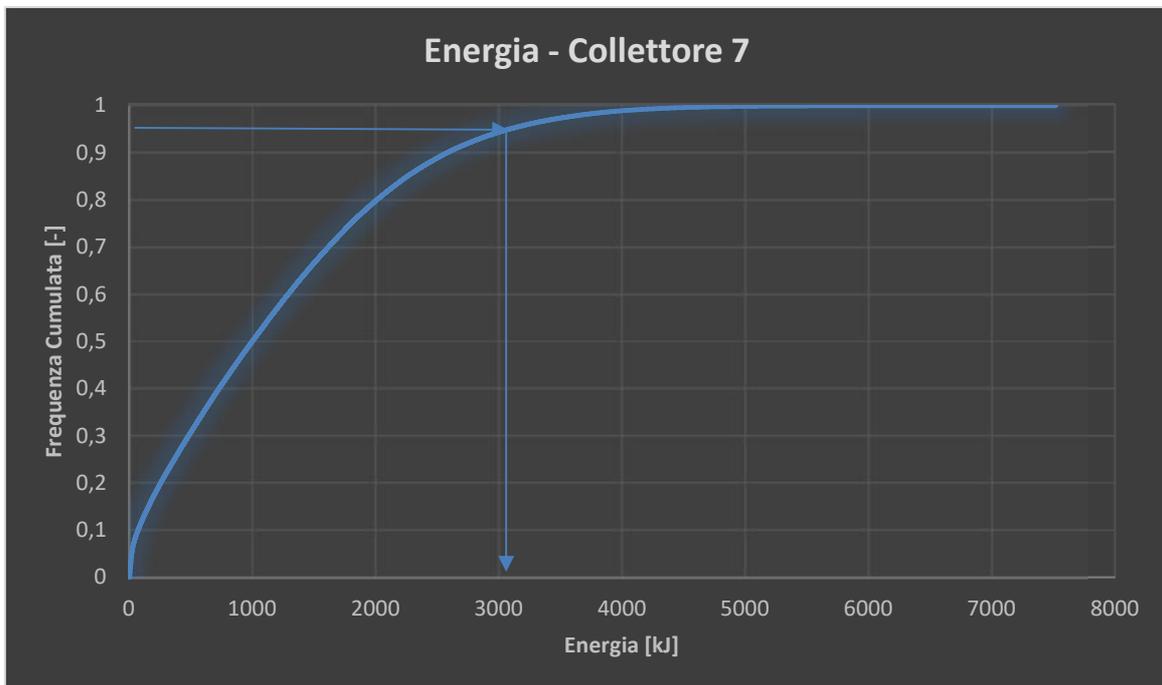


Figura 7.3-24: Cumulata dell'energia al collettore 7



Figura 7.3-25: Cumulata dell'altezza di passaggio al collettore 7

Le seguenti tabelle (Tabella 7.3-2, Tabella 7.3-3, Tabella 7.3-4 e Tabella 7.3-5) riportano in sinteticamente i risultati della procedura di progetto delle barriere esposta nel paragrafo precedente, esplicitando i coefficienti utilizzati nel progetto, i valori di progetto e i risultati delle verifiche di sicurezza (Tabella 7.3-6).

Dati comuni	Densità [kg/m ³]	Volume [m ³]	Massa [kg]	R _{eq} [m]	D _p [m]
	2500	5.202	13005	1.07	27.00

Tabella 7.3-2: Dati comuni nel progetto delle barriere

Progetto	Barriera						
	1	2	3	4	5	6	7
v _p [m/s]	19.87	17.79	17.06	13.42	20.08	13.21	19.04
m _p [kg]	13265.10	13265.10	13265.10	13265.10	13265.10	13265.10	13265.10
E _p [kJ]	2619.08	2099.29	1930.94	1194.70	2674.21	1157.95	2404.27
h _p [m]	3.38	2.96	2.86	2.65	2.86	2.76	2.76

Tabella 7.3-3: Valori di progetto di velocità, massa, energia ed altezza

n°	1	2	3	4	5	6	7
Classe MEL	6	6	6	5	8	5	8
h _{effettiva} [m]	5	5	5	5	6	5	6
E _{effettiva} [kJ]	3326	3326	3326	2347	5315	2347	5315

Tabella 7.3-4: Altezze ed energia effettiva delle barriere

Verifica di sicurezza	Barriera						
	1	2	3	4	5	6	7
Energia [kJ]	-152.59	-672.37	-840.73	-761.13	-1754.95	-797.89	-2024.90
	Verificata						
Max Elongazione [m]	16.17	16.17	16.17	16.22	14.07	16.22	14.07
	Verificata						
Altezza Residua [m]	-1.62	-2.04	-2.14	-2.35	-3.14	-2.24	-3.24
	Verificata						

Tabella 7.3-5: Verifiche di sicurezza per energia, massima elongazione ed altezza residua

In Tabella 7.3-6 sono invece riportati i coefficienti utilizzati nell'applicazione delle procedure di progetto e di verifica.

Coefficienti di sicurezza		
γ _{Tr}	1.02	Parametri tarati su back analysis
γ _{Dp}	1.02	DTM, rilievo di dettaglio
γ _γ	1.00	Assunto unitario
γ _{volF}	1.02	Rilievi in situ
γ _p	1.50	Valore raccomandato
γ _D	1.50	Estremi compresi in zone di possibili traiettorie
γ _E	1.20	Impatto energetico MEL

Tabella 7.3-6: Coefficienti utilizzati nel progetto e nella verifica

Tutte le barriere scelte sono garantite dal produttore come di classe A), ovvero con altezza residua maggiore del 50% dell'altezza nominale dopo un impatto di livello energetico MEL.

A seguito della progettazione delle barriere sono stati creati i file raster con le capacità di assorbimento ed altezze effettive, per eseguire le simulazioni successive. In questo contesto diventa superfluo, per quanto esposto nel paragrafo precedente, utilizzare come nicchie di distacco anche quelle a valle delle barriere. Si opta quindi per l'utilizzo della sola porzione di nicchie di distacco a monte delle barriere, in modo da avere una visione più marcata dell'effetto dell'inserimento delle stesse nel contesto in esame. Viene di seguito esposto il risultato delle simulazioni con le barriere alla loro capacità nominale nel caso di impatto del blocco da 5,0 m³ (quello utilizzato per il progetto) e l'impatto del blocco da 1,0 m³, quest'ultimo caso per dimostrare la totale funzionalità della barriera a fronte di un blocco di energie pari a meno di un terzo di quella di progetto (ciò significa impattare la barriera con dei blocchi di energia inferiore al livello energetico SEL, per la quale la barriera deve mantenere la sua completa funzionalità ed un'altezza residua maggiore o uguale al 70% dell'altezza nominale). Le simulazioni sullo scenario previsionale con il volume di 0,1 m³ non vengono eseguite in quanto le energie in gioco sono talmente basse da poter affermare con assoluta certezza che una barriera progettata per resistere all'impatto di un blocco di 5,0 m³ può resistere all'impatto di un blocco 50 volte più piccolo. Inoltre nelle simulazioni già esposte per lo scenario previsionale la maggioranza dei blocchi da 0,1 m³ non raggiunge le posizioni indicate per le barriere.

Come si può osservare in Figura 7.3-26 nel caso di distacco di un blocco da 5,0 m³ l'area di invasione a valle delle barriere è notevolmente ridotta. Le energie elevate che si riscontrano a valle delle stesse non devono indurre in errore in quanto nonostante negli ellissi rosso e celeste di Figura 7.3-26 vengano mostrati dei picchi ad elevata energia, intorno ai 3000 kJ, questo è dovuto al fatto che la piccolissima percentuale di blocchi che passa attraverso la barriera (dell'ordine del 5%) accumula nuovamente energia nella zona ad elevata pendenza a ridosso dell'abitato, come ampiamente discusso nei capitoli precedenti. Infatti in Figura 7.3-27 è riportata la mappa raster del numero di passaggi dei blocchi che mostra come a valle della barriera (ellisse rosso) tale parametro, nella zona centrale che individua un canale di movimento preferenziale (il medesimo discusso nel Capitolo 5), si riduca di un ordine di grandezza. In merito ai passaggi a valle delle barriere adiacenti (ellisse celeste) il numero di passaggi è dell'ordine di 10 blocchi. Stessa situazione si presenta per le altre barriere.

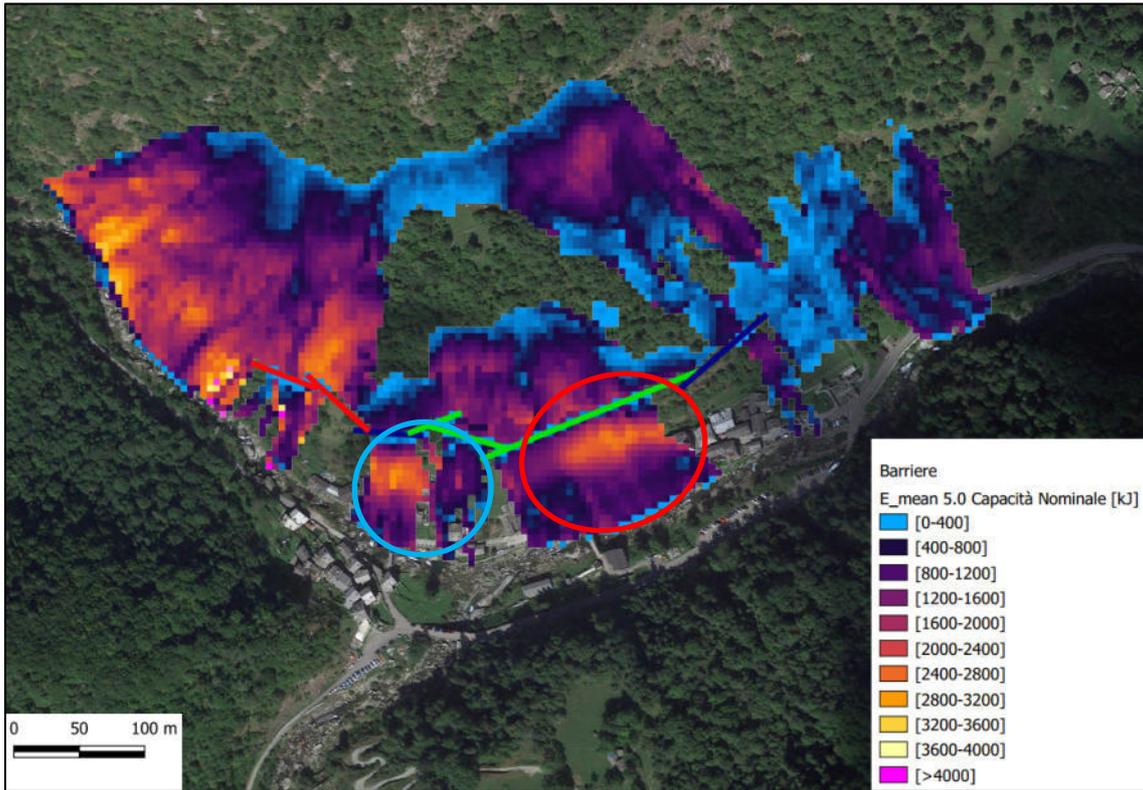


Figura 7.3-26: Energia media barriere a capacità nominale – 5,0 m³

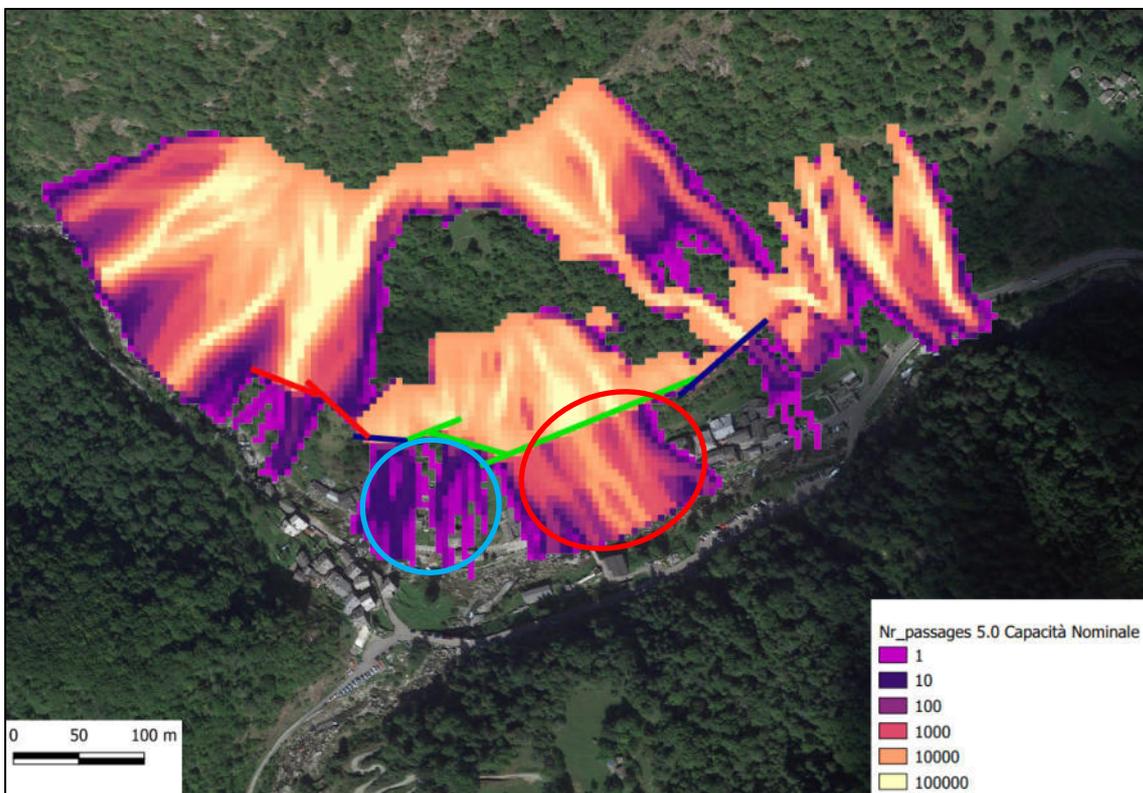


Figura 7.3-27: Numero passaggi barriere a capacità nominale – 5,0 m³

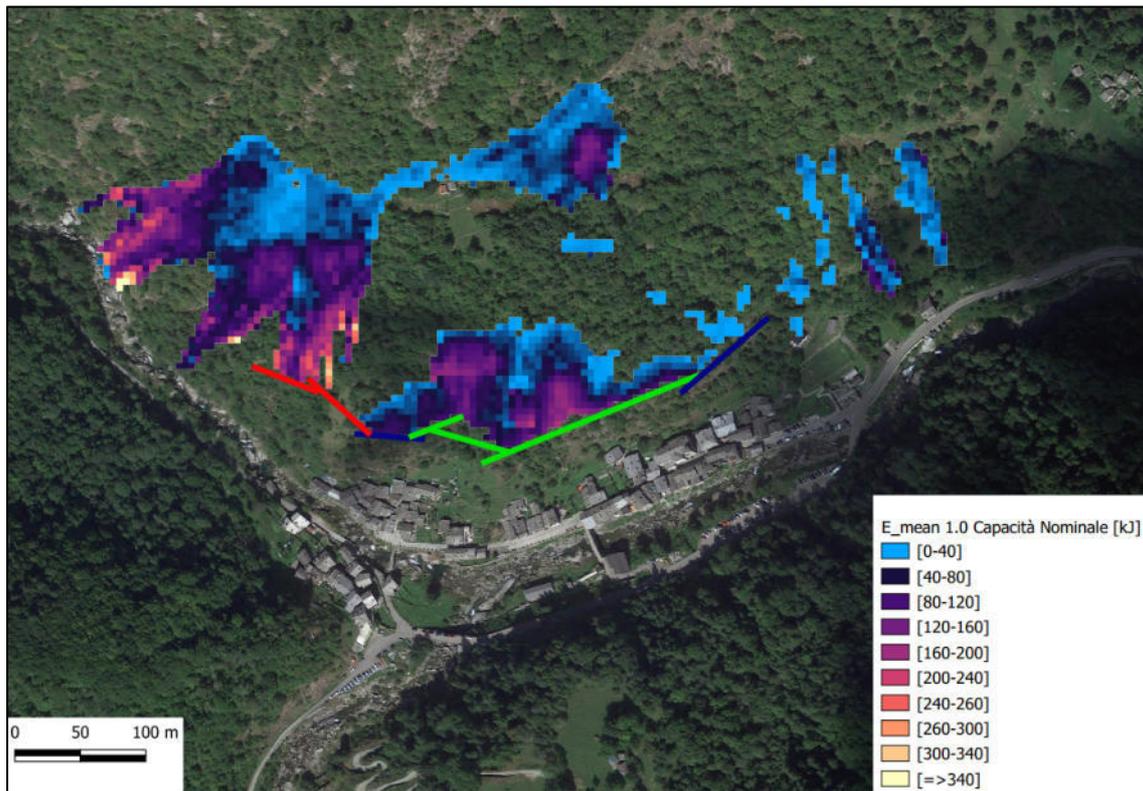


Figura 7.3-28: Energia media barriere a capacità nominale – 1,0 m³

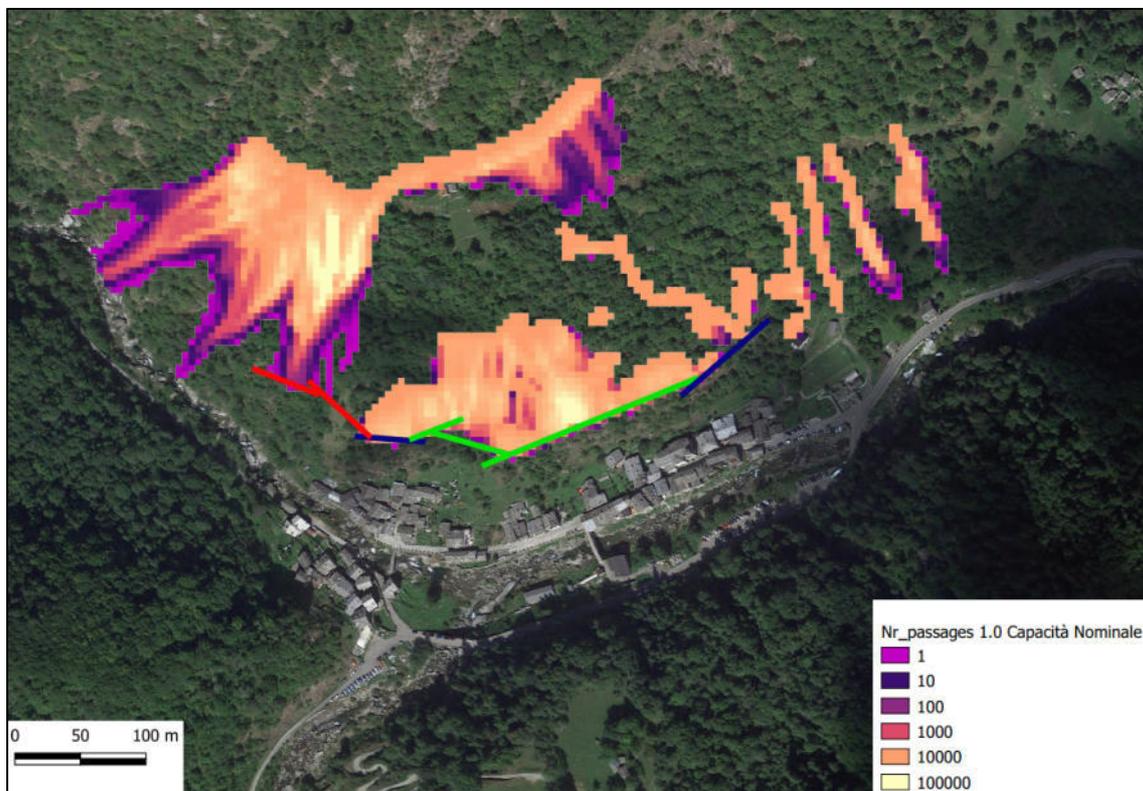


Figura 7.3-29: Numero passaggi barriere a capacità nominale – 1,0 m³

Per quanto riguarda il distacco del blocco da 1,0 m³ dalle Figura 7.3-28 e Figura 7.3-29 si evince il totale arresto dei blocchi, date le basse energie in gioco, globalmente intorno ai 200 kJ. In Tabella 7.3-7 e Tabella 7.3-8 viene riportato il riepilogo della capacità di arresto delle barriere associata al suo complemento che identifica la percentuale di passaggi. La capacità di arresto è identificabile con l'Espressione (7.9) mentre la percentuale di passaggi è il suo complemento a cento (Espressione (7.10)).

$$\%Arresto = \left(\frac{N_{paassaggi\ monte} - N_{passaggi\ valle}}{N_{paassaggi\ monte}} \right) \cdot 100 \quad (7.9)$$

$$\%Passaggi = 100 - \%Arresto \quad (7.10)$$

Lancio 5,0 m3	Capacità Nominale	
	Barriera	Percentuale di arresto [%]
1	94.98	5.02
2	99.99	0.01
3	89.02	10.98
4	99.97	0.03
5	99.11	0.89
6	99.27	0.73
7	99.94	0.06

Tabella 7.3-7: Percentuali di arresto e di passaggio – 5,0 m³ e capacità nominale

Lancio 1,0 m3	Capacità Nominale	
	Barriera	Percentuale di arresto [%]
1	100.00	0.00
2	100.00	0.00
3	99.18	0.82
4	100.00	0.00
5	100.00	0.00
6	97.68	2.32
7	100.00	0.00

Tabella 7.3-8: Percentuali di arresto e di passaggio – 1,0 m³ e capacità nominale

Come si può osservare dalle Tabella 7.3-7 e Tabella 7.3-8, per lo scenario di distacco del blocco da 5,0 m³ le percentuali di arresto sono prossime al 100% e nel caso di impatto di blocco da 1,0 m³ l'arresto è totale. L'unica percentuale che può sembrare bassa, pari all'89% circa, è quella relativa alla barriera 3 nello scenario di distacco del blocco da 5,0 m³. In realtà, come si può osservare dal numero di passaggi dei blocchi a valle (ellisse celeste di Figura 7.3-27) essi

assumono valori dell'ordine dei 10 blocchi e quindi la sua capacità di arresto risulta notevolmente maggiore di quella stimata. Il deficit di misura è imputabile principalmente, come si può osservare in Figura 7.3-30, alle sezioni di misura del numero di passaggi che sono state posizionate a monte e a valle della barriera il più vicino possibile ad esse senza intersecare i raster delle nuove barriere e di quelle esistenti e le altre sezioni di misura per non duplicare/falsare le misure stesse ed avere la certezza di tenere in conto la totalità dei blocchi effettivamente arrestati dalla barriera. L'unico caso in cui non si riesce a rispettare appieno questo criterio è proprio il caso della barriera 3, dove a causa della sua posizione trasversale, non consente un perfetto posizionamento della sezione di valle che quindi acquisisce come passaggi a valle parte dei blocchi in ingresso alla barriera 2 (ellisse rosso di Figura 7.3-30). Alla luce di ciò si può ritenere completamente efficiente anche la barriera 3. Sempre in Figura 7.3-30 sono riportate le sezioni di misura delle variazioni di energia dei blocchi a causa delle barriere, ovvero le linee centrali in corrispondenza dei raster delle barriere, poiché è stato appurato che Rockyfor3D effettua la riduzione di energia esattamente in corrispondenza delle celle in cui sono presenti i relativi raster. Queste sezioni di misura verranno mantenute tali nell'analisi degli scenari di danneggiamento delle barriere eseguite nel capitolo successivo.

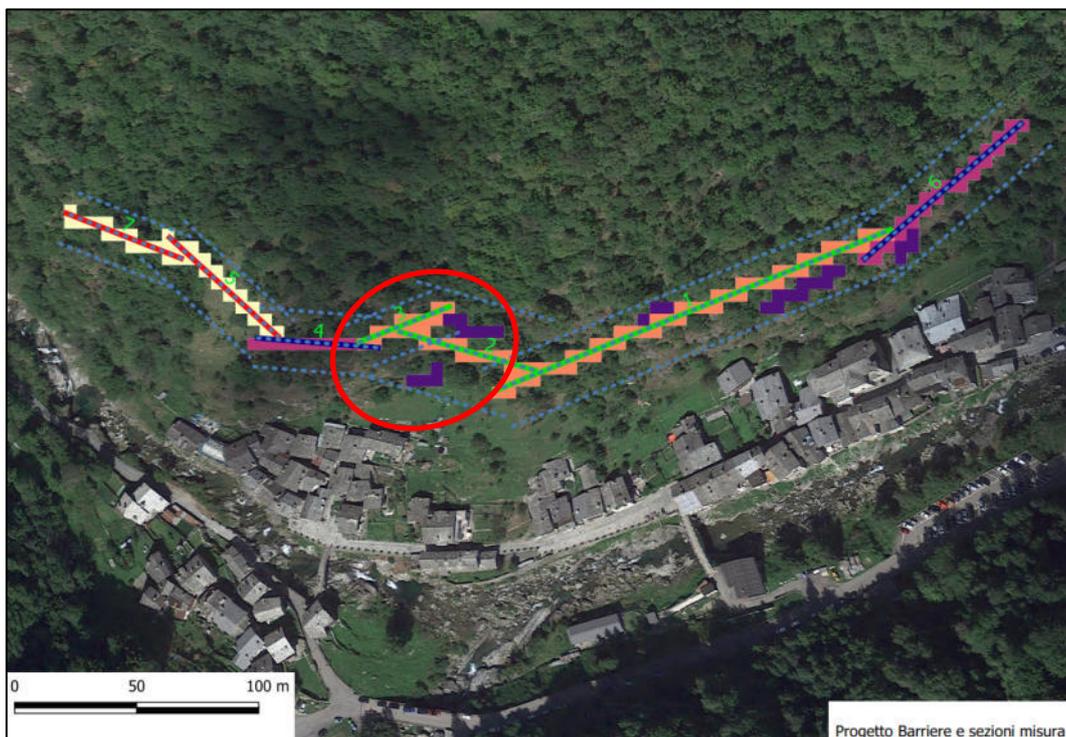


Figura 7.3-30: Sezioni di misura energie (linee centrali) e passaggi (linee a monte e a valle dei raster delle barriere)

7.4. Ipotesi di danneggiamento delle barriere paramassi

In questo paragrafo verranno discusse alcune ipotesi di danneggiamento relative alle barriere paramassi flessibili secondo alcuni autori (Govoni et al., 2016) e ci si soffermerà in particolare sull'ipotesi di danneggiamento da impatto precedente di un blocco sulla rete. Sarà considerato sia il caso di impatto di un blocco da 1,0 m³ che di un blocco da 5,0 m³, ovvero i volumi utilizzati negli scenari previsionali. Non viene simulato il danneggiamento da impatto con il volume da 0,1 m³ poiché, come già esposto, le barriere sono progettate per sostenere le energie di impatto dovute ad un blocco da 5,0 m³ e viste le energie molto basse del blocco da 1,0 m³ non ci si aspetta alcun tipo di danneggiamento da un blocco da 0,1 m³ (le energie del blocco da 0,1 m³ sono molto al di sotto della capacità SEL della barriera, che deve quindi mantenere la sua completa funzionalità per un impatto di questo tipo).

In primo luogo si fa riferimento ai lavori di simulazione numerica condotti da Govoni et al., (2016), dove viene innanzitutto esposto lo stato attuale delle opere di difesa nella Provincia Autonoma di Bolzano sia in termini di tipologia sia in termini di danneggiamento (nel caso in esame ci si trova nel medesimo arco alpino ed inoltre sono stati riscontrati accumuli di blocchi sulle reti e quindi le similitudini in termini di tipologie di danneggiamento sono accettabili).

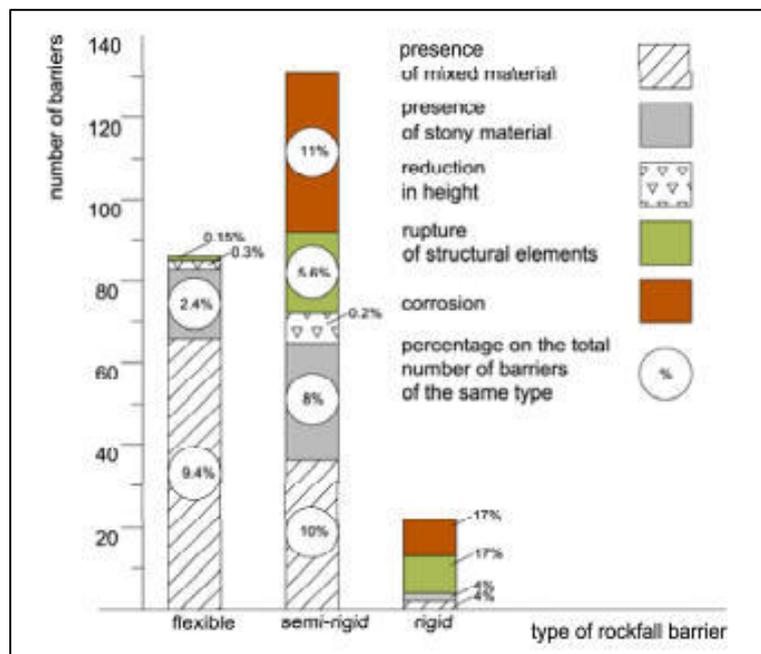


Figura 7.4-1: Percentuali delle tipologie di danno in funzione della tipologia di barriera (Govoni et al., 2016)

Come è possibile osservare dalla Figura 7.4-1 nella prima colonna, sulle barriere flessibili (le medesime progettate nell'ambito di questa tesi) presentano principalmente danni dovuti a presenza di materiale misto (9,4%) e di materiale roccioso (2,4%), mentre la riduzione di altezza nominale e la rottura di elementi strutturali sono stati osservati in sole tre barriere (rispettivamente 0,3% e 0,15%, Govoni et al., 2016). Non è stata invece osservata corrosione, fatto che può essere ricondotto alla tipologia di materiali utilizzati per gli elementi strutturali, rivestiti con materiali che li proteggono dalla corrosione. In ogni caso la corrosione può essere tenuta in conto in una modellazione agli elementi finiti, con la riduzione della sezione degli elementi strutturali (Peila et al., 2016). Dalle analisi numeriche condotte, gli stessi autori (Peila et al., 2016) osservano che la corrosione influisce sostanzialmente sulla capacità di assorbimento della barriera, che si riduce del 13% qualora la corrosione riduca la sezione di tutte le funi del 5%, e del 20% qualora la corrosione intacchi la sezione trasversale di tutte le funi per il 10%.

Alla luce di quanto esposto, nelle seguenti analisi verrà simulata la riduzione di energia delle barriere precedentemente progettate, a causa dell'impatto di un blocco in due scenari differenti: 5,0 m³ e 1,0 m³. Per tenere in conto dell'effetto degradante dell'impatto si fa riferimento al lavoro sopra citato (Govoni et al., 2016) dove è stato simulato l'impatto di blocchi con energie via via crescenti attraverso un modello numerico calibrato sulla base di esperimenti in vera grandezza su una barriera da 3000 kJ. Le analisi sperimentali hanno permesso di associare il massimo allungamento della barriera all'energia di impatto del blocco sulla stessa. Successivamente numerose serie di analisi sono state condotte sul modello della barriera precedentemente impattata al fine di verificare la massima energia cui la barriera può essere soggetta durante un secondo impatto (Govoni et al., 2016). Il risultato di tali elaborazioni è costituito da due grafici (Figura 7.4-2), il primo dei quali associa l'energia di impatto alla massima elongazione della barriera, mentre il secondo associa l'energia residua della barriera all'energia posseduta da un blocco in un precedente impatto. Lo scopo di tale lavoro risiede nella possibilità di misurare in situ l'elongazione della barriera deducendo l'energia di impatto e successivamente, nel secondo grafico, con la medesima energia è possibile stimare la capacità residua della barriera.

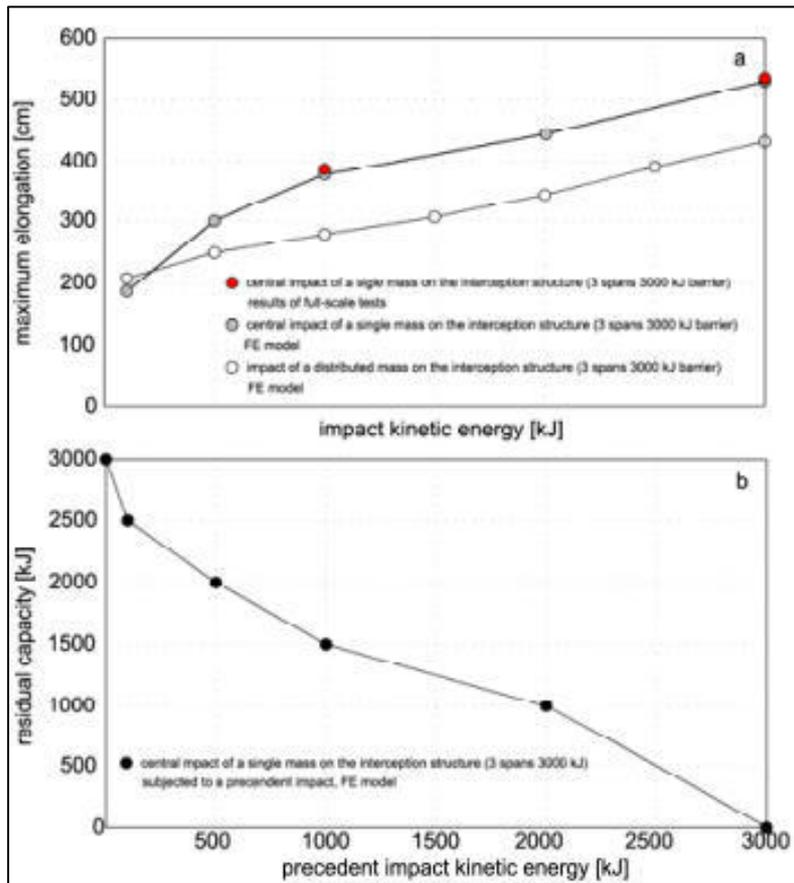


Figura 7.4-2: Massima elongazione-energia di impatto (alto) ed energia residua-energia di impatto (Govoni et al., 2016)

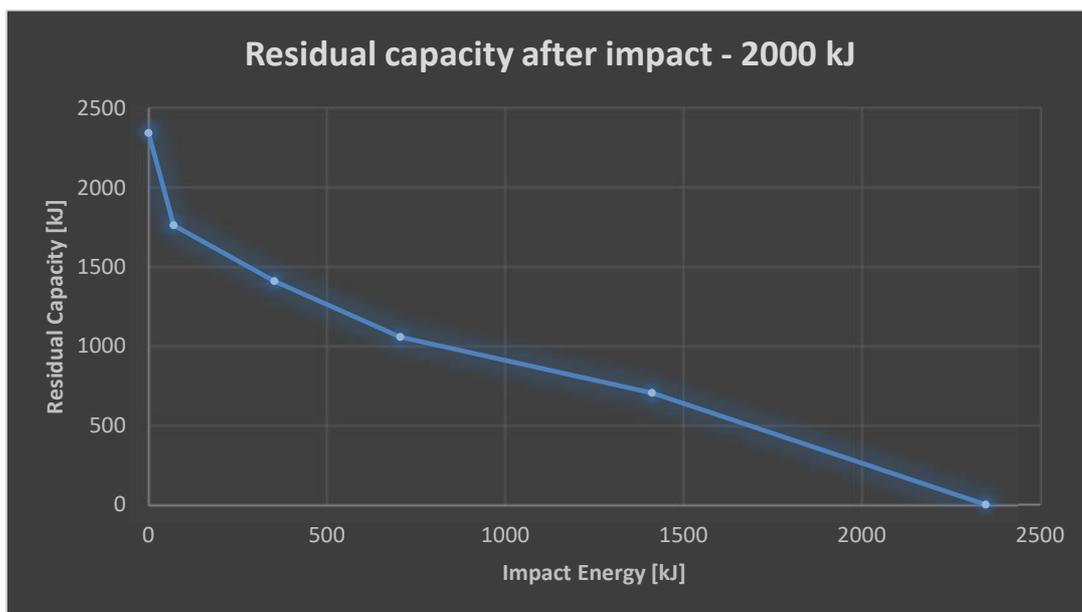


Figura 7.4-3: Energia residua barriera da 2000 kJ

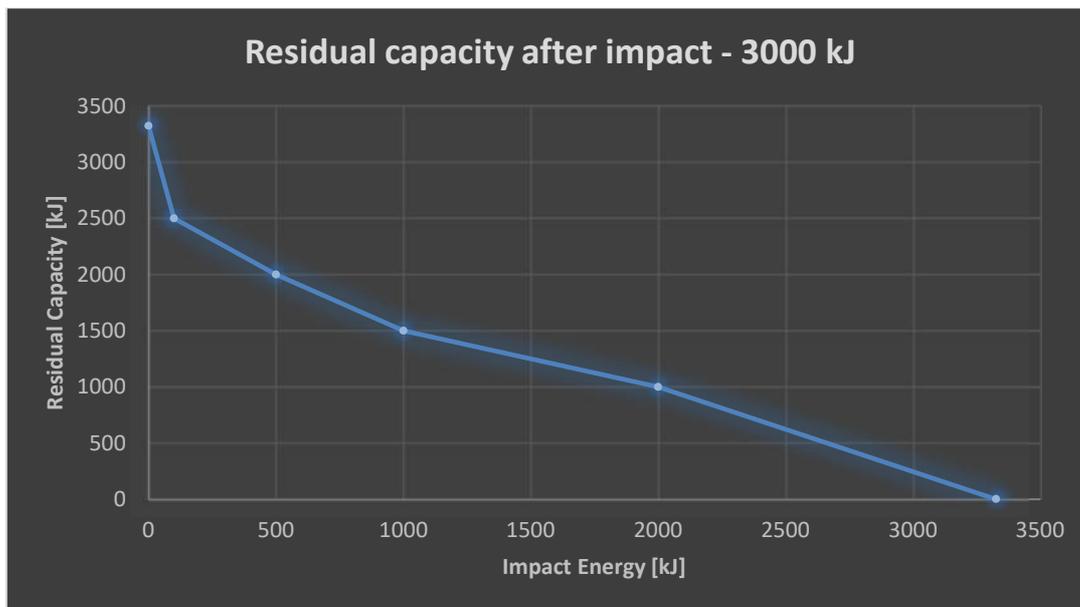


Figura 7.4-4: Energia residua barriera da 3000 kJ

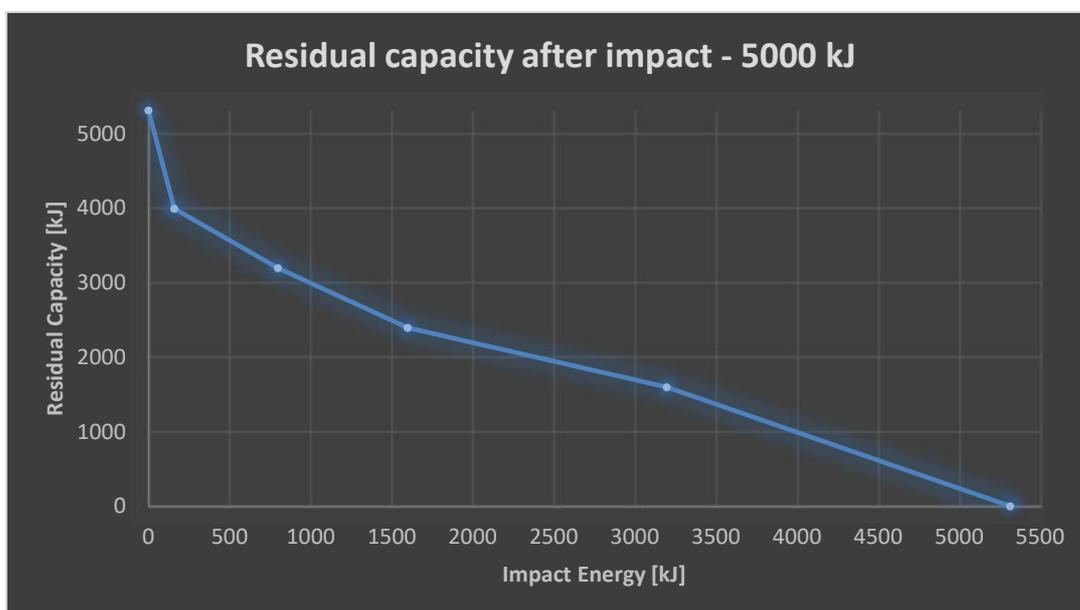


Figura 7.4-5: Energia residua barriera da 5000 kJ

Nell'ipotesi che il comportamento sia proporzionale al variare della capacità della barriera, quanto proposto da Govoni et al. (2016) è stato adattato al sito in esame per le barriere da 2000 kJ e da 5000 kJ (Figura 7.4-3, Figura 7.4-4, Figura 7.4-5). Le energie di impatto ed energie

residue sono state dedotte innanzitutto normalizzando con la capacità ultima della barriera i risultati ottenuti da Govoni et al., (2016), sia l'energia di impatto che l'energia residua ed adattando gli estremi dei grafici alle capacità ultime, ed in secondo luogo le percentuali ottenute da tale normalizzazione sono state applicate alle barriere da 2000 kJ e 5000 kJ, ottenendo la medesima curva di risposta. Di seguito sono riportate le elaborazioni effettuate (Tabella 7.4-1, Tabella 7.4-2 e Tabella 7.4-3).

Capacità Nominale [kJ]		3326	
Impact Energy [kJ]	Residual Capacity [kJ]	Impatto/Capacità [-]	Energia Residua [%]
0	3326.00	0.00	100.00
100	2500.00	3.01	75.17
500	2000.00	15.03	60.13
1000	1500.00	30.07	45.10
2000	1000.00	60.13	30.07
3326	0.00	100.00	0.00

Tabella 7.4-1: Normalizzazione per barriera da 3000 kJ

Capacità Nominale [kJ]		2347	
Impact Energy [kJ]	Residual Capacity [kJ]	Impatto/Capacità [-]	Energia Residua [%]
0	2347.00	0.00	100.00
71	1764.13	3.01	75.17
353	1411.30	15.03	60.13
706	1058.48	30.07	45.10
1411	705.65	60.13	30.07
2347	0.00	100.00	0.00

Tabella 7.4-2: Normalizzazione per barriera da 2000 kJ

Capacità Nominale [kJ]		5315	
Impact Energy [kJ]	Residual Capacity [kJ]	Impatto/Capacità [-]	Energia Residua [%]
0	5315.00	0.00	100.00
160	3995.04	3.01	75.17
799	3196.03	15.03	60.13
1598	2397.02	30.07	45.10
3196	1598.02	60.13	30.07
5315	0.00	100.00	0.00

Tabella 7.4-3: Normalizzazione per barriera da 5000 kJ

Si ricorda che la riduzione di altezza nominale non viene tenuta in conto in quanto la massima altezza di rimbalzo lungo tutto lo stendimento è stata stimata pari a 1,7 m ed essendo le barriere alte non meno di 5,0 m e garantite come di classe A) secondo le EOTA2018, ovvero con altezza residua superiore al 50% dopo un impatto di livello energetico MEL, essa è sicuramente in grado di intercettare ancora i blocchi, seppur con capacità d'assorbimento energetico minore.

In seguito a questa analisi sono stati esaminati gli scenari previsionali di distacco contemporaneo dalle nicchie di roccia esposta e roccia intensamente fratturata solo a monte delle barriere, per dedurre i frattili al 95% delle energie di impatto e calcolare conseguentemente le riduzioni di capacità di assorbimento delle barriere. Tali risultati sono stati ottenuti per interpolazione lineare nei grafici di Figura 7.4-3, Figura 7.4-4 e Figura 7.4-5, in funzione della capacità della barriera considerata. Di seguito vengono riepilogati i risultati ottenuti (Tabella 7.4-4 e Tabella 7.4-5).

Scenario distacco volume da 1,0 m ³					
Barriera n°	Capacità certificata [kJ]	Capacità MEL [kJ]	E_95 [kJ]	Capacità Residua [kJ]	Capacità Residua [%]
1	3000	3326	230	2337	70.27
2	3000	3326	125	2468	74.21
3	3000	3326	209	2364	71.06
4	2000	2347	115	1708	72.77
5	5000	5315	89	4578	86.13
6	2000	2347	60	1850	78.82
7	5000	5315	280	3845	72.34

Tabella 7.4-4: Energie di impatto e residue per distacco del blocco da 1,0 m³

Scenario distacco volume da 5,0 m ³					
Barriera n°	Capacità certificata [kJ]	Capacità MEL [kJ]	E_95 [kJ]	Capacità Residua [kJ]	Capacità Residua [%]
1	3000	3326	3081	185	5.57
2	3000	3326	2865	348	10.46
3	3000	3326	2466	649	19.50
4	2000	2347	1416	702	29.91
5	5000	5315	2847	1773	33.36
6	2000	2347	1103	860	36.64
7	5000	5315	2902	1745	32.83

Tabella 7.4-5: Energie di impatto e residue per distacco del blocco da 5,0 m³

Come si può osservare dalle Tabella 7.4-4 e Tabella 7.4-5 le riduzioni di energia più significative si hanno nel caso di impatto del blocco di 5,0 m³, comprese tra il 63% e il 94% circa, mentre sono molto contenute, tra il 14% e il 30% circa, nel caso di impatto del blocco da 1,0 m³. Sulla base di questi risultati sono stati creati i file raster con le energie residue delle barriere e sono state condotte nuove simulazioni nei due casi di danneggiamento, attraverso

Rockyfor3D, sia con distacco di blocco da 5,0 m³ sia con distacco di blocco da 1,0 m³ al fine di monitorarne il comportamento. I risultati verranno poi confrontati, per ogni scenario di distacco, in funzione del danno posseduto dalla barriera al momento del nuovo impatto, sia in termini di energie residue sia in termini di percentuale di blocchi passanti attraverso la barriera.

7.4.1. Distacco del blocco da 1,0 m³

In questo caso vengono confrontati gli scenari di distacco del blocco da 1,0 m³ in presenza delle barriere con tre diverse capacità di assorbimento:

- Capacità Nominale
- Danno da impatto di un blocco da 1,0 m³
- Danno da impatto di un blocco da 5,0 m³.

Le mappe raster di energia e di numero di passaggi nelle condizioni di capacità nominale sono le medesime riportate in Figura 7.3-28 e Figura 7.3-29 rispettivamente. Di seguito le mappe raster di energia e numero di passaggi per i casi di danno da impatto da blocco di 1,0 m³ e danno da impatto da blocco di 5,0 m³ (Figura 7.4-6, Figura 7.4-7, Figura 7.4-8 e Figura 7.4-9).

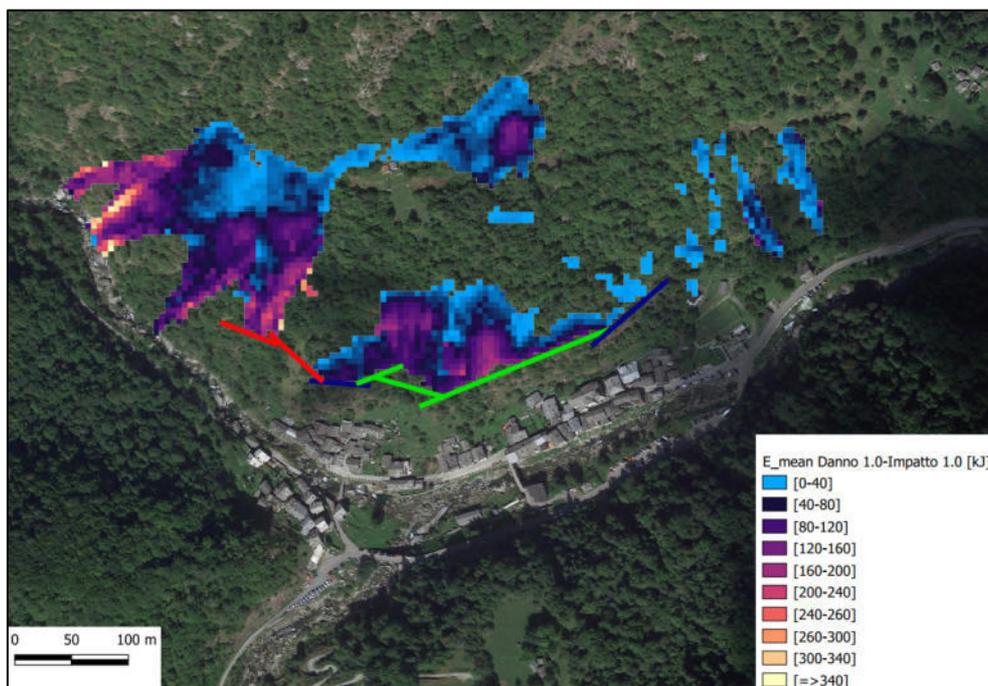


Figura 7.4-6: Energia per danno da 1,0 m³ – impatto da 1,0 m³

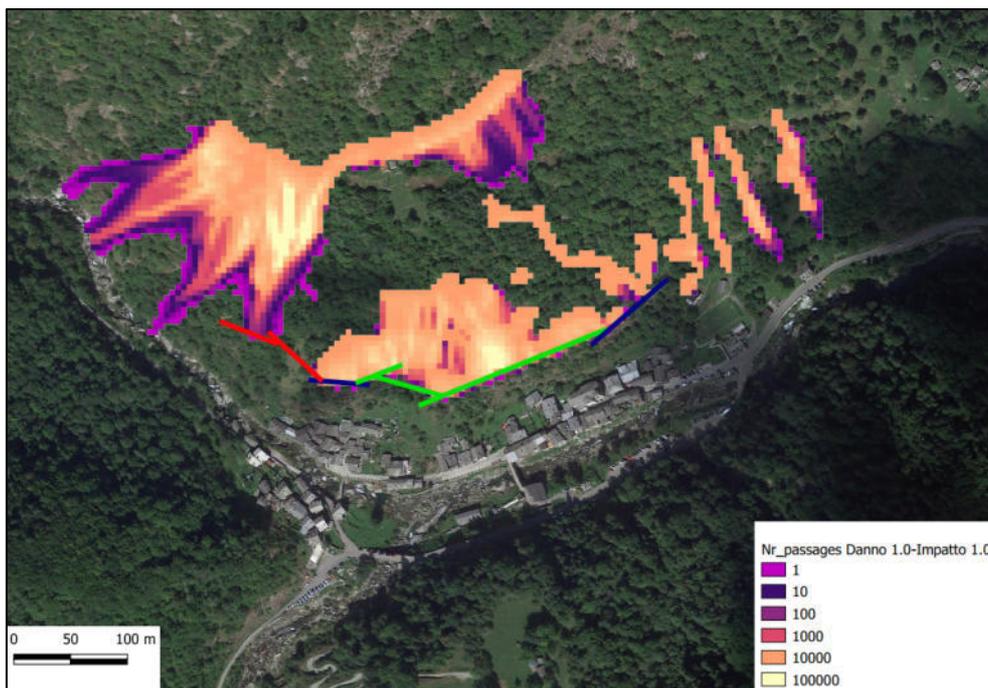


Figura 7.4-7: Numero passaggi per danno da $1,0 \text{ m}^3$ – impatto da $1,0 \text{ m}^3$

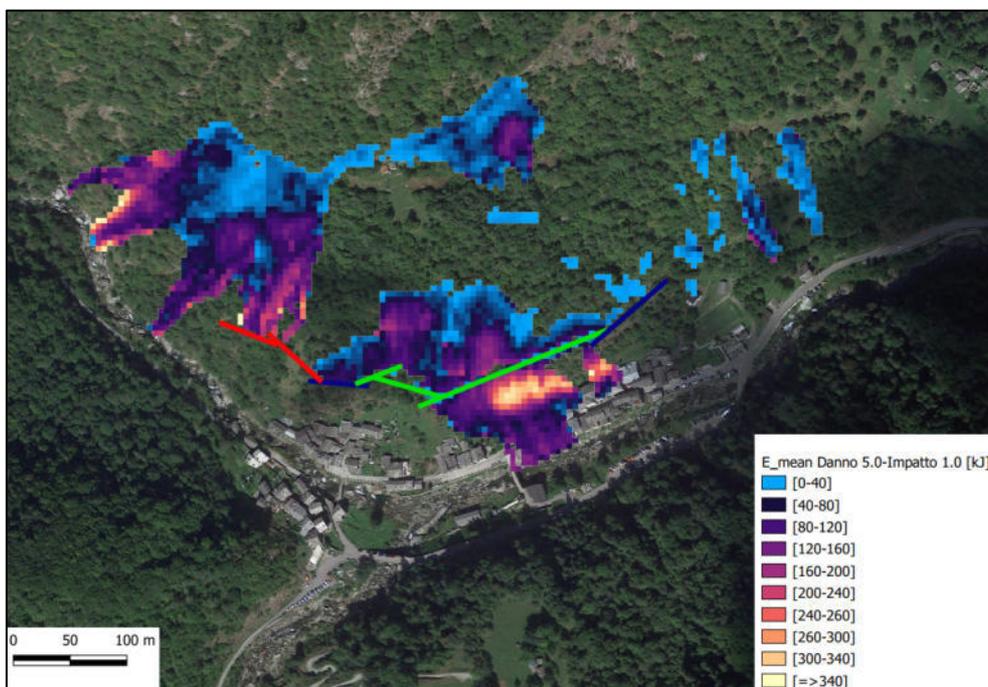


Figura 7.4-8: Energia per danno da $5,0 \text{ m}^3$ – impatto da $1,0 \text{ m}^3$

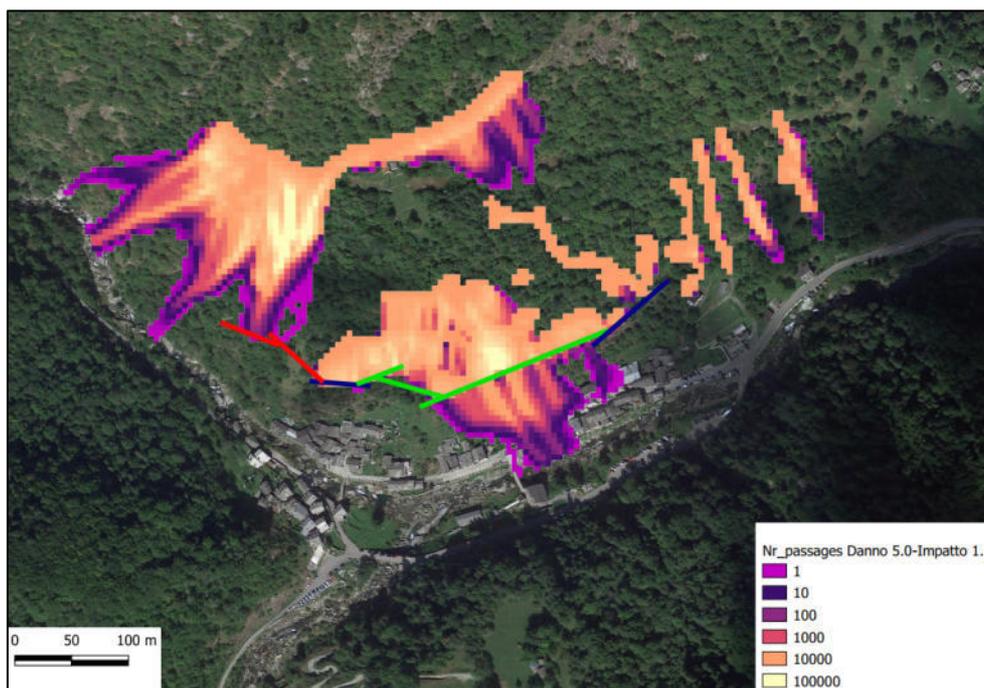


Figura 7.4-9: Numero passaggi per danno da 5,0 m³ – impatto da 1,0 m³

Come si può osservare dalle figure precedenti, nel caso di danno da impatto da blocco di 1,0 m³, la barriera riesce a sostenere un secondo impatto di un blocco da 1,0 m³, infatti i raster delle energie e del numero di passaggi si arrestano in corrispondenza delle barriere (Figura 7.4-6 e Figura 7.4-7).

Per quanto riguarda il danno da impatto da blocco di 5,0 m³ si ha un notevole incremento del numero di passaggi, in particolare in corrispondenza della barriera 1, a ridosso dell'abitato, la cui capacità di assorbimento viene quasi annullata da un impatto di 5,0 m³. Essendo comunque basse le energie possedute dal blocco di 1,0 m³ (intorno ai 300 kJ), le barriere, anche se significativamente danneggiate sono ancora in grado di sostenere tale impatto.

Di seguito vengono esposti i risultati in merito alle energie residue alle barriere associate alla percentuale di passaggi sulle stesse, per i medesimi scenari esaminati e per il caso di capacità nominale di assorbimento delle barriere. I dati sono stati raccolti attraverso il plugin qprof di QGIS, che permette di fare una sezione, con un layer vettoriale, delle mappe raster estraendone l'andamento dei valori lungo il suo sviluppo. Data la natura interpolante del plugin in alcuni casi si presentano piccole oscillazioni dei valori legate principalmente alla posizione dei layer vettoriali di acquisizione dei dati, non coincidenti con i centri delle celle raster dove i dati sono memorizzati. Essendo comunque le posizioni di acquisizione in corrispondenza della barriera

per le energie (il layer stesso della barriera è una sezione di acquisizione, in quanto Rockyfor3D effettua la sottrazione delle energie in tale punto) e a monte e a valle della stessa per il numero di passaggi (come discusso alla fine del capitolo precedente e mostrate in Figura 7.3-30) si ritiene attendibile la misura, comunque rappresentativa di un comportamento medio derivato da un'analisi che si avvale di un modello probabilistico.

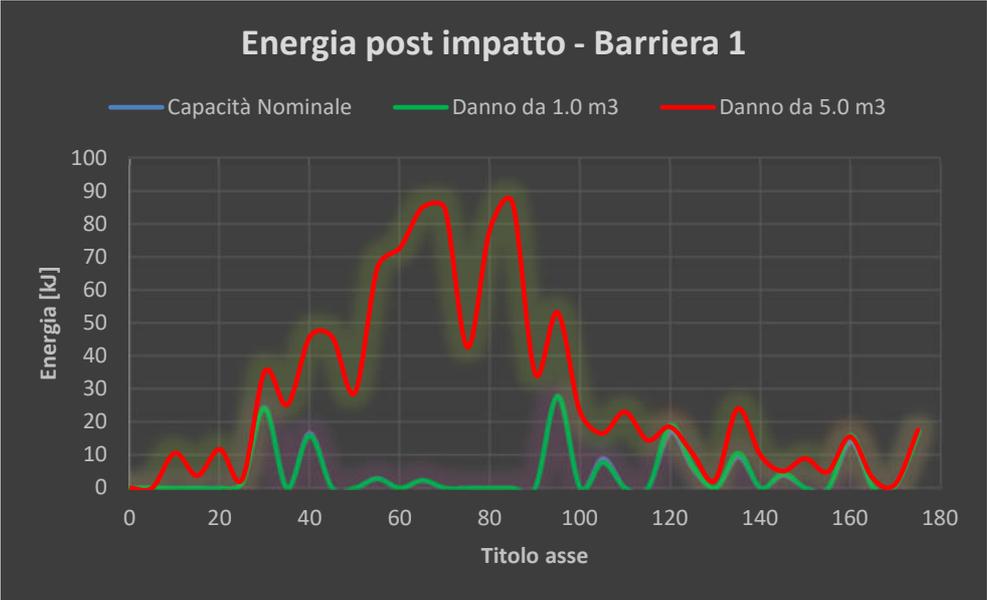


Figura 7.4-10: Energie residue alla barriera 1

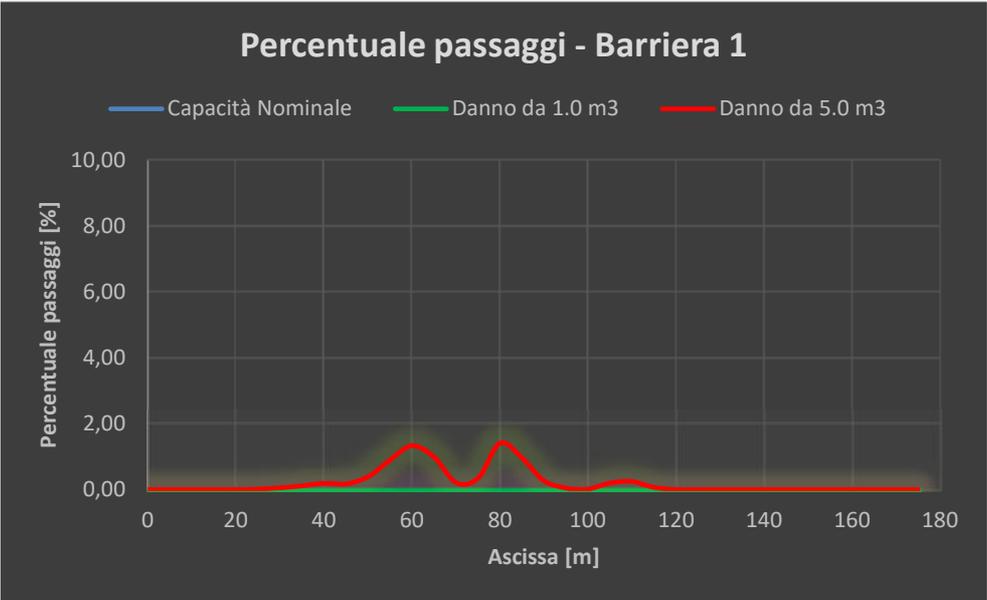


Figura 7.4-11: Percentuale di passaggi alla barriera 1

Come si può osservare dalle Figura 7.4-10 e Figura 7.4-11, gli andamenti delle energie e del numero di passaggi sulla barriera 1 rispecchiano quanto mostrato nelle mappe raster delle medesime quantità. Infatti, a causa del danno dovuto all'impatto del blocco da 5,0 m³ le energie residue sono notevolmente più elevate, con dei picchi di circa 90 kJ nella zona centrale, dove si verifica anche il picco della percentuale di passaggio dei blocchi, inferiore comunque al 2%. Le energie molto basse misurate nel caso di danno di un blocco da 1,0 m³ e di capacità nominale (le linee risultano sovrapposte in quanto il comportamento nei confronti del blocco da 1,0 m³ è il medesimo) potrebbero sembrare incompatibili con il fatto che la percentuale di arresto in tali casi è del 100%. Il deficit della misura si lega principalmente alla natura interpolante del plugin qprof (già discussa in precedenza), ma le energie sono estremamente basse e mai superiori ai 25 kJ, compatibili con l'arresto del blocco in quella posizione. Valgono le medesime considerazioni per i grafici relativi alle altre barriere.

Lancio 1,0 m3	Percentuale di arresto [%]		
Barriera	Capacità Nominale	Danno da 1,0 m3	Danno da 5,0 m3
1	100.00	100.00	92.13
2	100.00	100.00	100.00
3	99.18	99.27	99.35
4	100.00	100.00	100.00
5	100.00	100.00	100.00
6	97.68	97.77	97.61
7	100.00	100.00	100.00

Tabella 7.4-6: Percentuale di arresto nei tre casi – 1,0 m³

Lancio 1,0 m3	Percentuale di passaggio [%]		
Barriera	Capacità Nominale	Danno da 1,0 m3	Danno da 5,0 m3
1	0.00	0.00	7.87
2	0.00	0.00	0.00
3	0.82	0.73	0.65
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	2.32	2.23	2.39
7	0.00	0.00	0.00

Tabella 7.4-7: Percentuale di passaggio nei tre casi – 1,0 m³

In Tabella 7.4-6 e in Tabella 7.4-7 sono riportate rispettivamente le percentuali di arreso e di passaggio per il distacco del blocco da 1,0 m³ e nei tre diversi scenari della capacità delle barriere. Nelle seguenti figure vengono invece riportati gli andamenti delle energie residue e del numero di passaggi per le altre barriere sempre per il distacco del blocco da 1,0 m³.

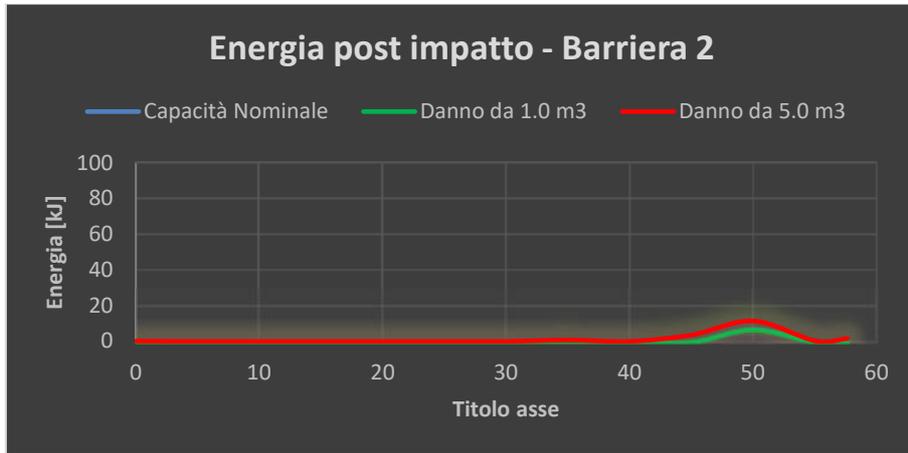


Tabella 7.4-8: Energie residue alla barriera 2

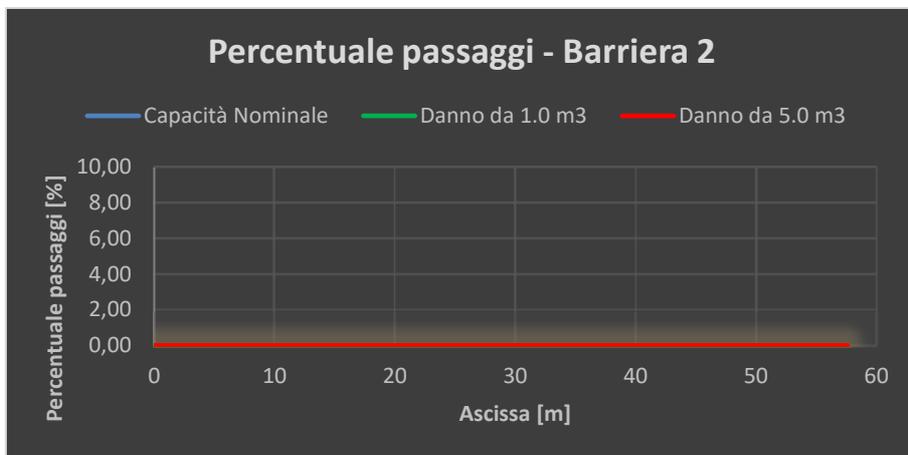


Tabella 7.4-9: Percentuale di passaggi alla barriera 2

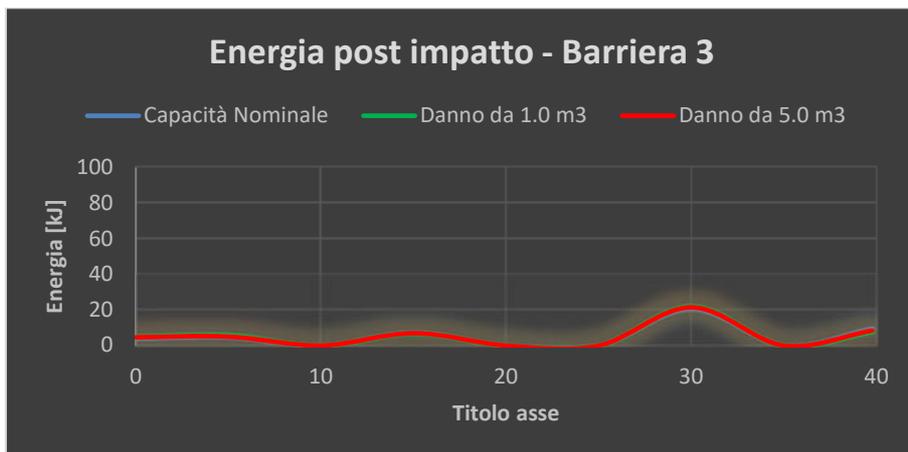


Tabella 7.4-10: Energie residue alla barriera 3

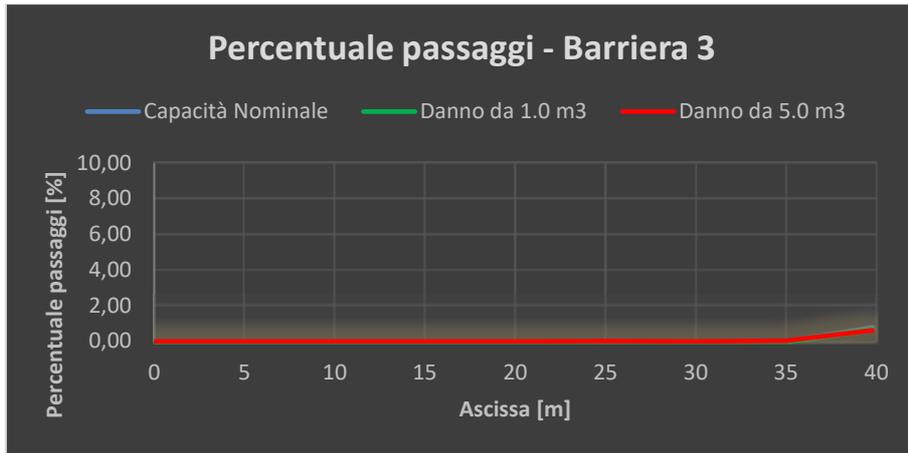


Tabella 7.4-11: Percentuale di passaggi alla barriera 3

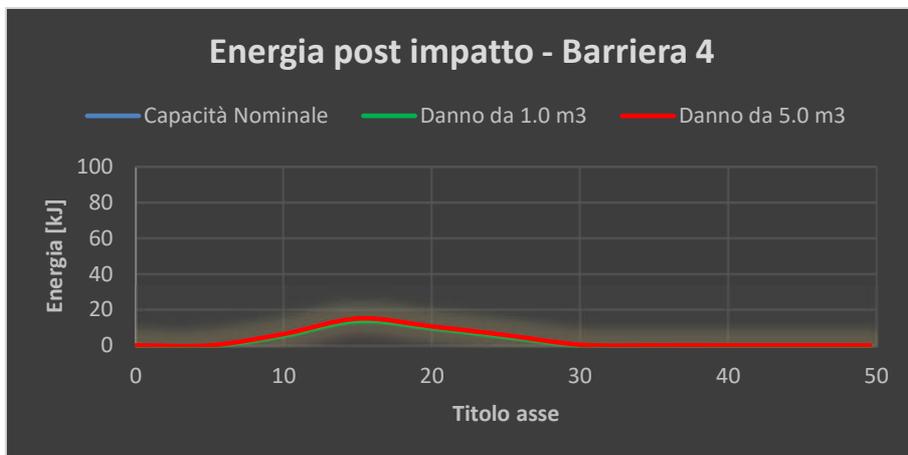


Tabella 7.4-12: Energie residue alla barriera 4

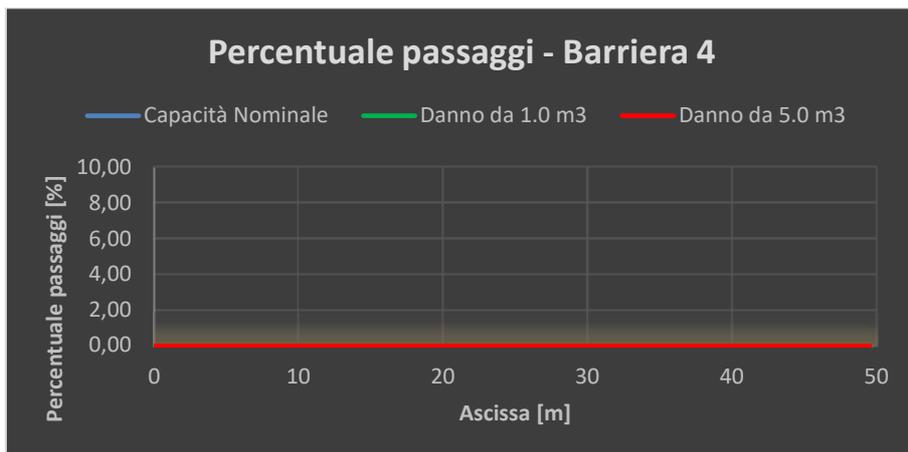


Tabella 7.4-13: Percentuale di passaggi alla barriera 4

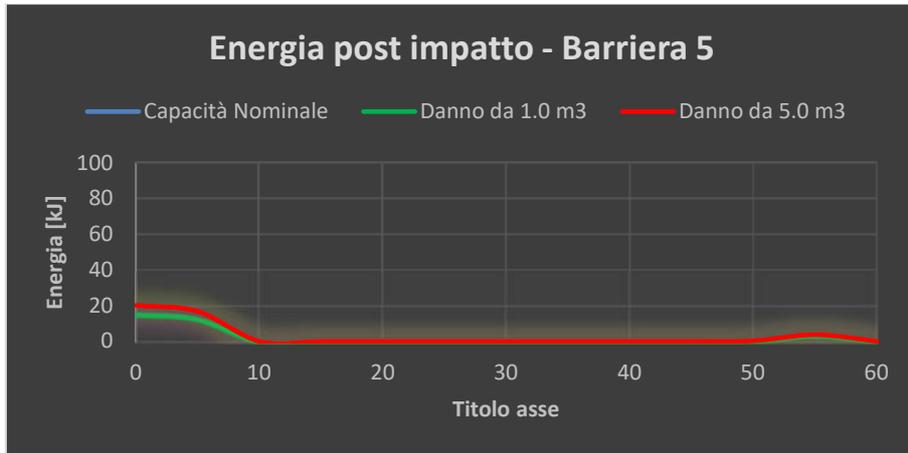


Tabella 7.4-14: Energie residue alla barriera 5

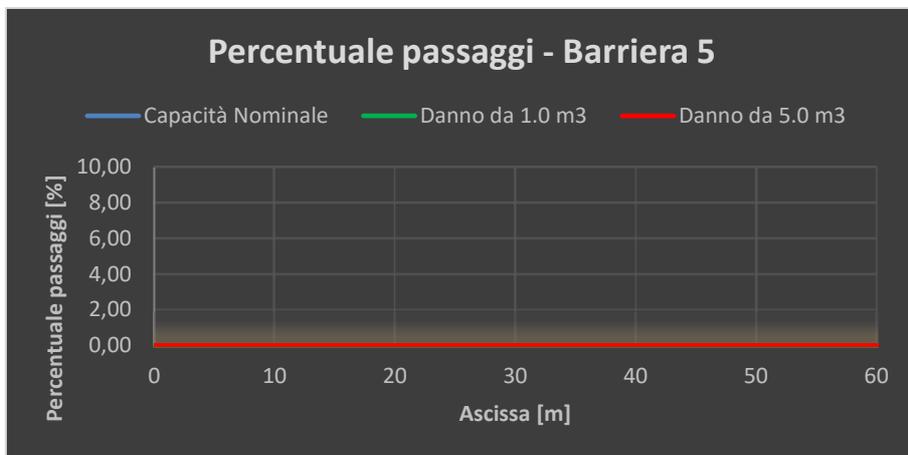


Tabella 7.4-15: Percentuale di passaggi alla barriera 5

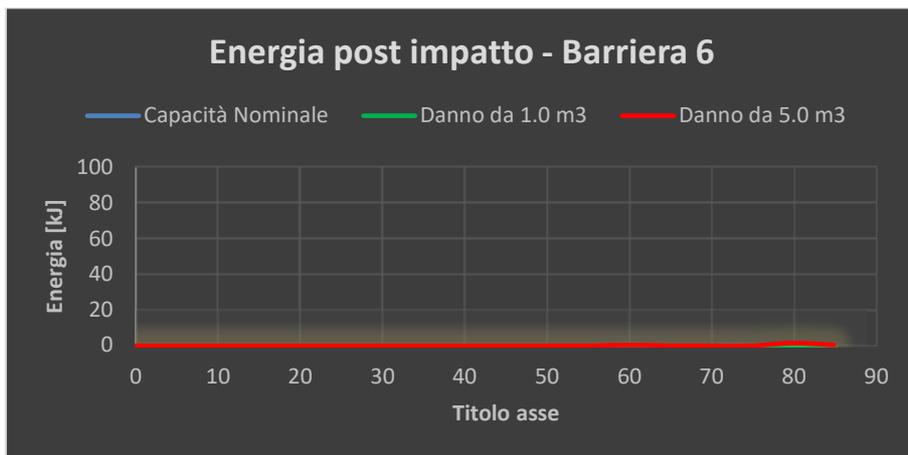


Tabella 7.4-16: Energie residue alla barriera 6

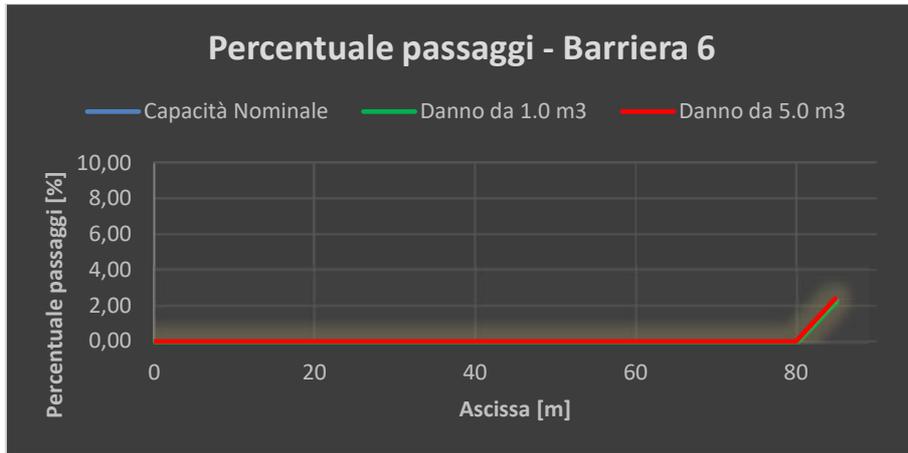


Tabella 7.4-17: Percentuale di passaggi alla barriera 6

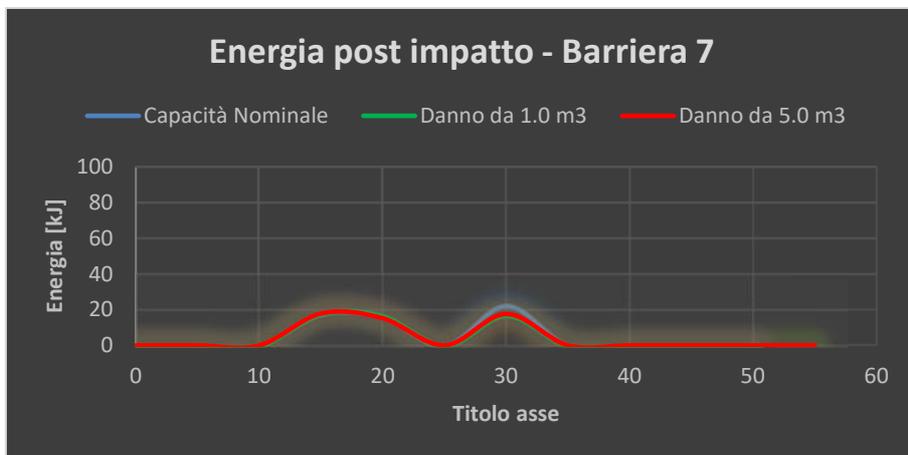


Tabella 7.4-18: Energie residue alla barriera 7

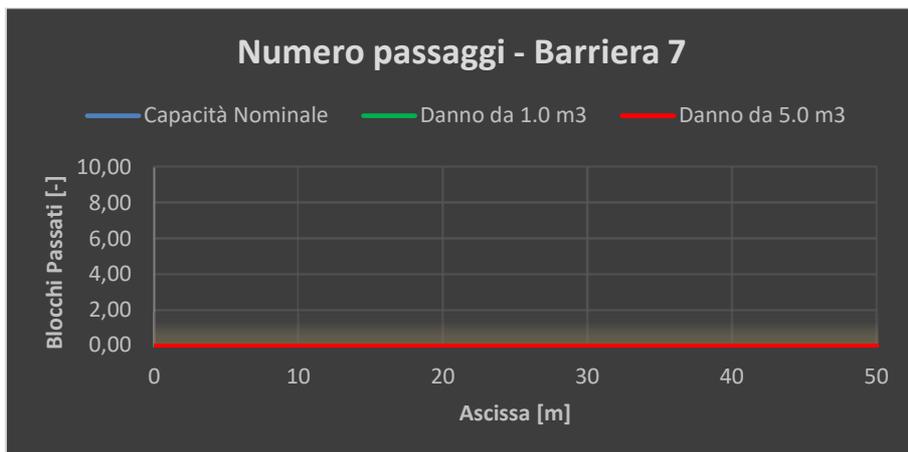


Tabella 7.4-19: Percentuale di passaggi alla barriera 7

7.4.2. Distacco del blocco da 5,0 m³

In questo paragrafo viene simulato il distacco del blocco da 5,0 m³ negli stessi scenari di danneggiamento esaminati nel caso di distacco del blocco da 1,0 m³:

- Capacità Nominale
- Danno da impatto di un blocco da 1,0 m³
- Danno da impatto di un blocco da 5,0 m³.

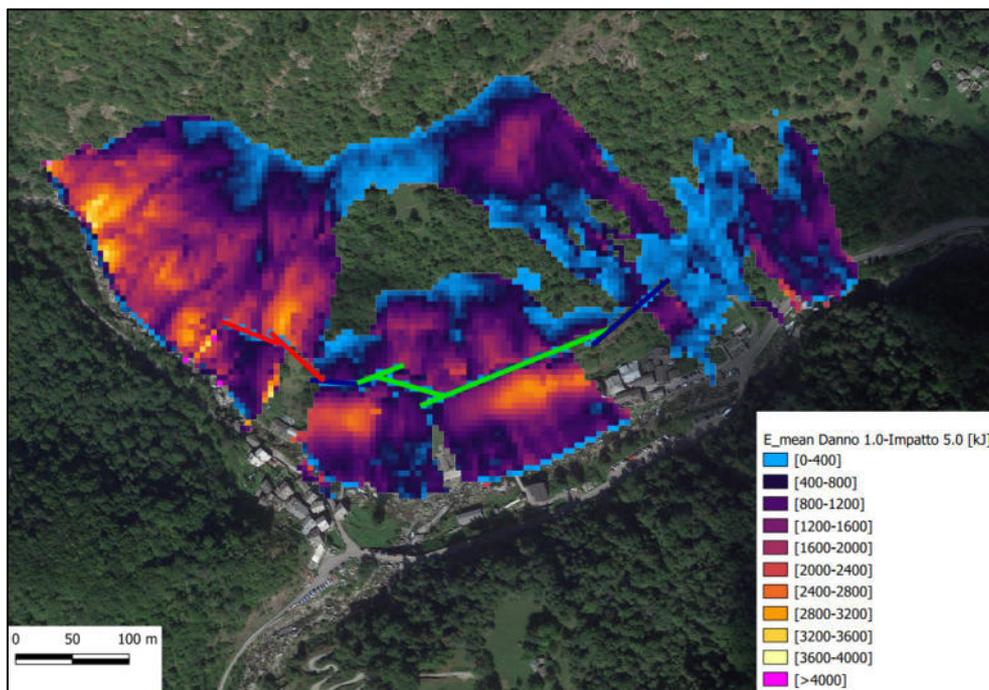


Figura 7.4-12: Energia per danno da 1,0 m³ – impatto da 5,0 m³

Le mappe raster per quanto riguarda le energie e il numero di passaggi in presenza di barriere con capacità nominale sono già state riportate rispettivamente in Figura 7.3-26 e in Figura 7.3-27.

Come è possibile osservare dalle mappe raster di energia e numero di passaggi per danno da impatto di un blocco da 1,0 m³ (Figura 7.4-12 e Figura 7.4-13) l'area di invasione nel caso di distacco di un blocco da 5,0 m³ è maggiore che nel caso di distacco di blocco da 1,0 m³ ed è paragonabile a quella che si ha nel caso di barriere alla capacità nominale. È notevole anche

l'incremento delle energie e del numero di passaggi. Si hanno infatti picchi di energia, a valle della barriera 1 intorno ai 2800 kJ, con numero di passaggi dell'ordine dei 10000, di un ordine di grandezza inferiore al numero di passaggi in caso di danno da blocco di 5,0 m³ e come si vedrà più avanti.

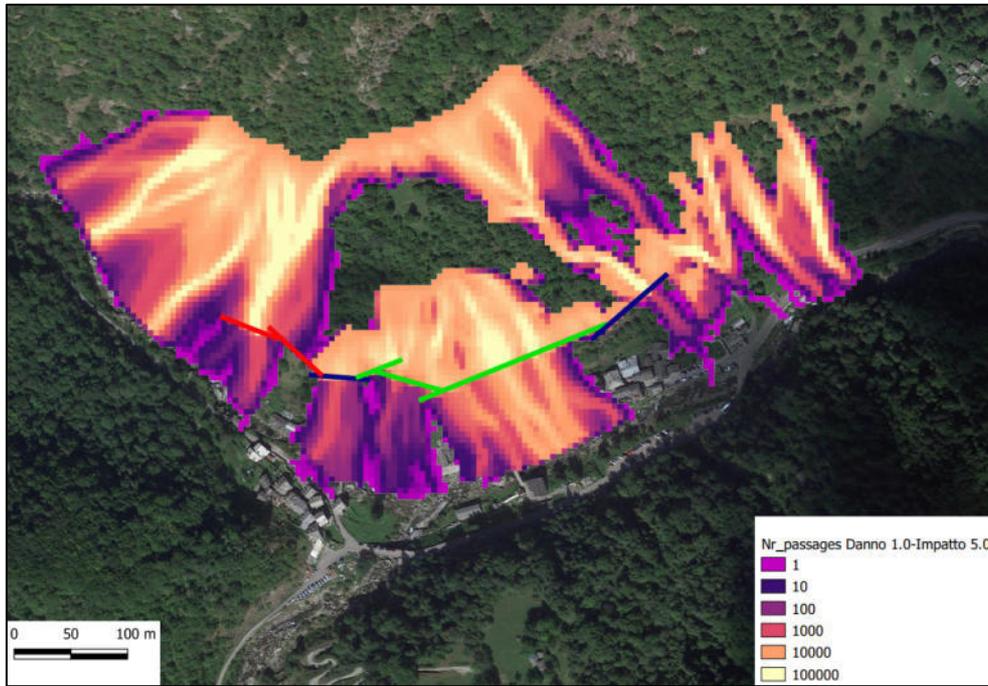


Figura 7.4-13: Numero passaggi per danno da 1,0 m³ – impatto da 5,0 m³

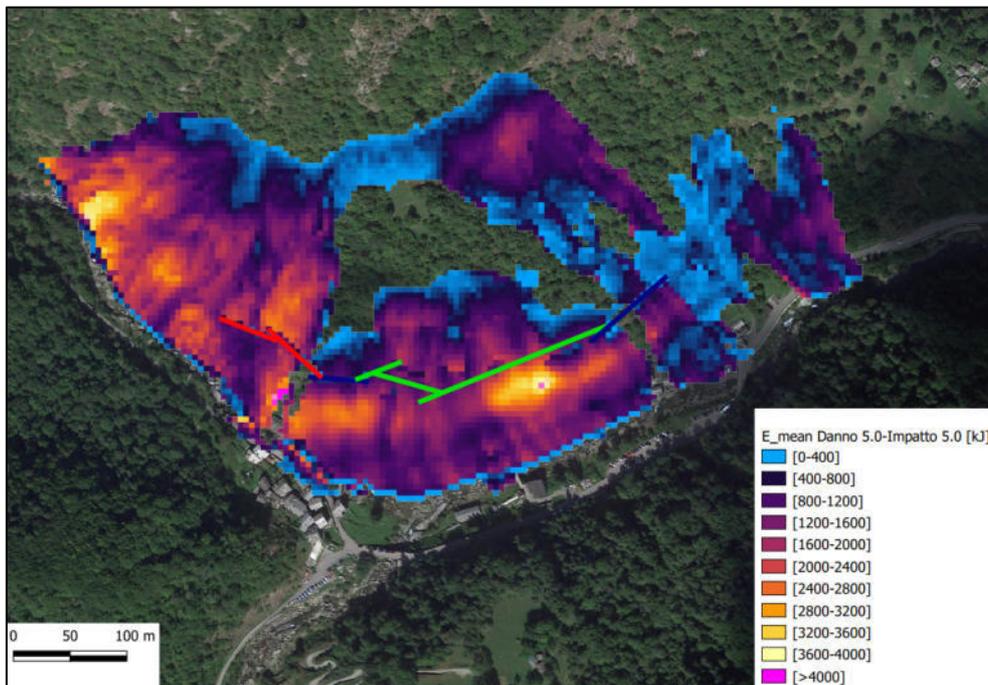


Figura 7.4-14: Energia per danno da 5,0 m³ – impatto da 5,0 m³

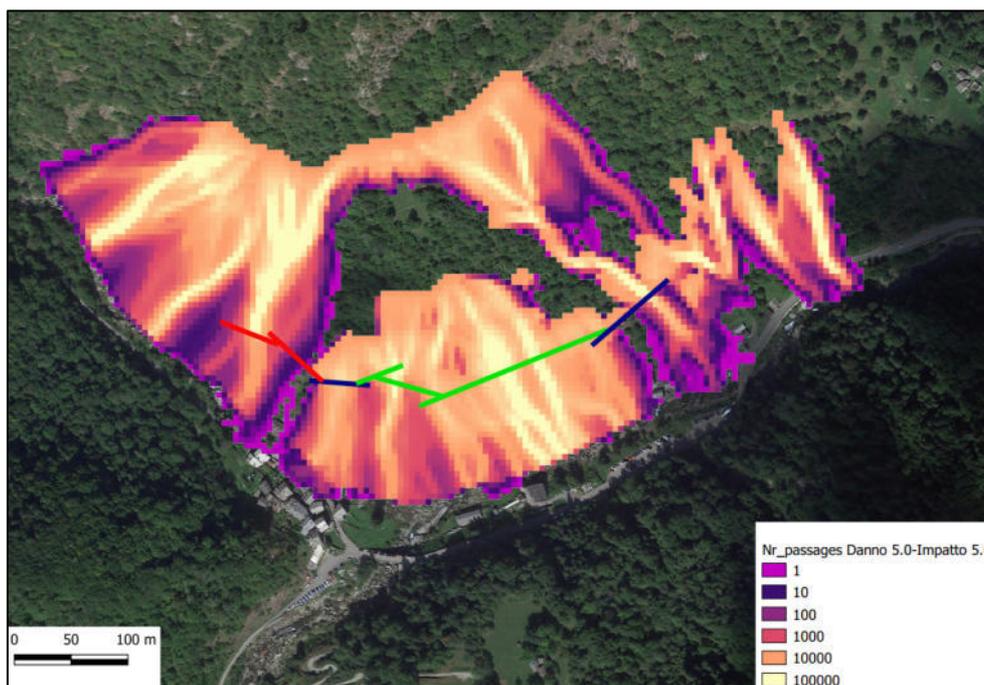


Figura 7.4-15: Numero passaggi per danno da 5,0 m³ – impatto da 5,0 m³

Per quanto riguarda invece il danneggiamento da impatto di un blocco da 5,0 m³, che in particolare porta al quasi annullamento della capacità di assorbimento della barriera 1 (barriera più lunga e verde in Figura 7.4-14), l'area di invasione tende a quella che si avrebbe in assenza delle opere di difesa. Conseguentemente le energie ed il numero di passaggi sono molto elevati, con picchi superiori ai 3600 kJ e superiori ai 100000 passaggi nel canale centrale (il numero di passaggi si mantiene sostanzialmente uguale attraverso la barriera). Anche per le altre barriere valgono i medesimi ragionamenti. Questo è certamente lo scenario peggiore, ma anche il meno probabile, in quanto prevede due impatti successivi di un blocco di 5,0 m³, considerato in sede di progettazione delle opere come evento più improbabile, ma a favore di sicurezza per le motivazioni già espone nei paragrafi precedenti.

Di seguito vengono esposti i risultati in merito alle energie residue dei blocchi in corrispondenza delle barriere e associate alla percentuale di passaggi sulle stesse, per i medesimi scenari di danneggiamento esaminati e per il caso di capacità nominale di assorbimento.

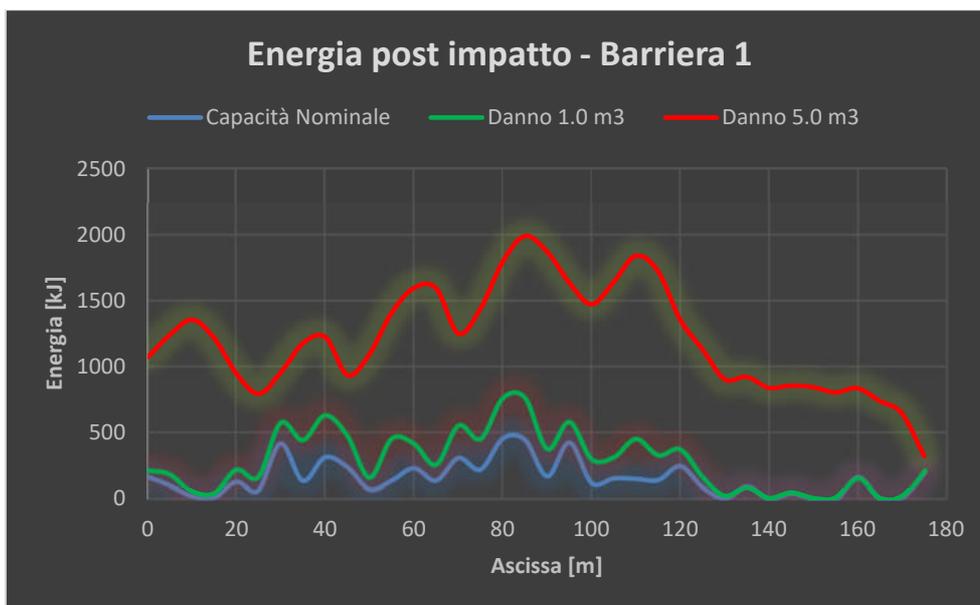


Figura 7.4-16: Energie residue alla barriera 1

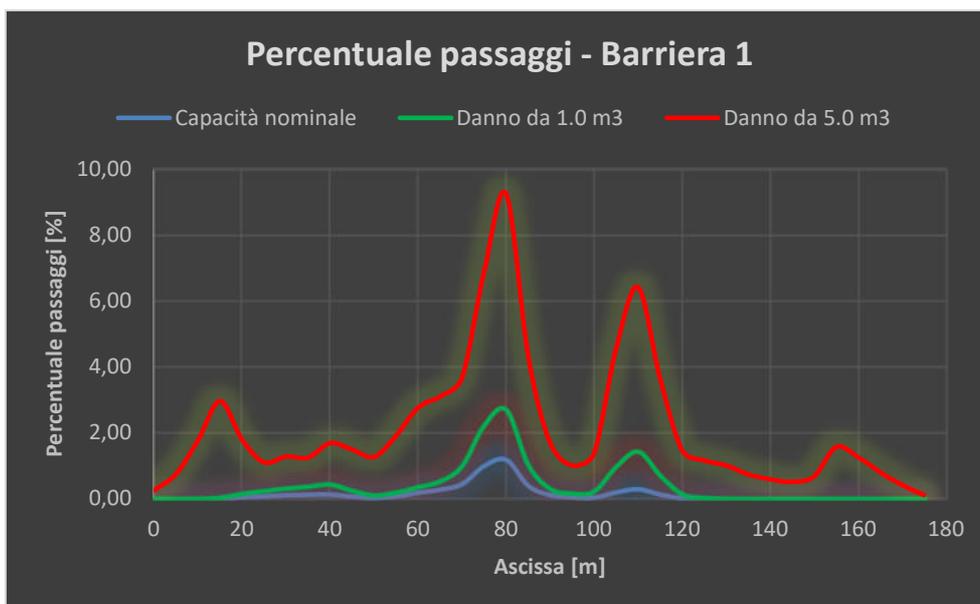


Figura 7.4-17: Percentuale di passaggi alla barriera 1

In Figura 7.4-16 e in Figura 7.4-17 sono riportati rispettivamente le energie residue dei blocchi dopo l'impatto sulla barriera 1 e la relativa percentuale di passaggi. Come si può facilmente evincere la percentuale di passaggi dei blocchi alla barriera 1 per il danno da impatto da blocco di 5,0 m³ è di poco inferiore al 10% nella zona centrale (la medesima zona di incanalamento dei blocchi individuata nelle mappe raster precedentemente espote) alla quale corrispondono

anche i picchi di energia, intorno ai 2000 kJ. È bene ricordare che tale percentuale di passaggi è misurata puntualmente lungo la barriera ed è ottenuta normalizzando il numero di blocchi in uscita rispetto al totale dei blocchi in ingresso, in modo da individuare così le zone della barriera maggiormente affette dal fenomeno. Migliora notevolmente la situazione, con percentuali di passaggio rispettivamente del 3% e del 1,5% nel caso di barriere con danno da impatto di un blocco di 1,0 m³ e capacità nominale. I tre andamenti sono comunque proporzionali sia in termini di energie residue sia in termini di percentuale di passaggio dei blocchi, mostrando come lo scenario peggiore sia quello di danno da impatto di un blocco da 5,0 m³ e successivo distacco di un blocco da 5,0 m³, con percentuale di arresto minima pari al 23% circa. Vengono di seguito riepilogati in Tabella 7.4-20 e in Tabella 7.4-21 le percentuali di arresto e di passaggio su tutte le barriere, calcolate con le stesse espressioni utilizzate nello scenario di lancio del blocco da 1,0 m³ (Espressioni (7.9) e (7.10)).

Lancio 5,0 m ³	Percentuale di arresto [%]		
Barriera	Capacità Nominale	Danno da 1,0 m ³	Danno da 5,0 m ³
1	94.98	86.12	23.38
2	99.99	99.72	74.35
3	89.02	84.65	25.38
4	99.97	98.20	61.86
5	99.11	99.11	99.11
6	99.27	98.99	84.26
7	99.94	99.08	81.32

Tabella 7.4-20: Percentuale di arresto nei tre casi – 5,0 m³

Lancio 5,0 m ³	Percentuale di passaggio [%]		
Barriera	Capacità Nominale	Danno da 1,0 m ³	Danno da 5,0 m ³
1	5.02	13.88	76.62
2	0.01	0.28	25.65
3	10.98	15.35	74.62
4	0.03	1.80	38.14
5	0.89	0.89	0.89
6	0.73	1.01	15.74
7	0.06	0.92	18.68

Tabella 7.4-21: Percentuale di passaggio nei tre casi – 5,0 m³

Come è possibile notare dalle precedenti tabelle la percentuale di arresto decresce al crescere del danno (quindi del volume che impatta la barriera) ed è massima nel caso di capacità nominale, in alcuni casi prossima al 100%. In altri casi la percentuale di arresto rimane quasi invariata, per esempio per le barriere 5 e 7, di capacità di assorbimento di 5000 kJ. Infatti tali barriere si trovano in una posizione tale per cui i frattili al 95% dell'energia per il progetto sono di poco superiori ai 3000 kJ, ma per l'indisponibilità di barriere da 4000 kJ in commercio sono state utilizzate barriere da 5000 kJ. Conseguentemente tali barriere, nonostante la riduzione dovuta agli impatti, presentano un'energia residua maggiore rispetto alle altre (Tabella 7.4-5). Per tale ragione la loro efficienza rimane elevata nei tre casi. Di seguito vengono riportate le coppie di grafici energia residua post impatto e percentuale di passaggi per le altre barriere, per i quali valgono le medesime considerazioni fatte in precedenza.

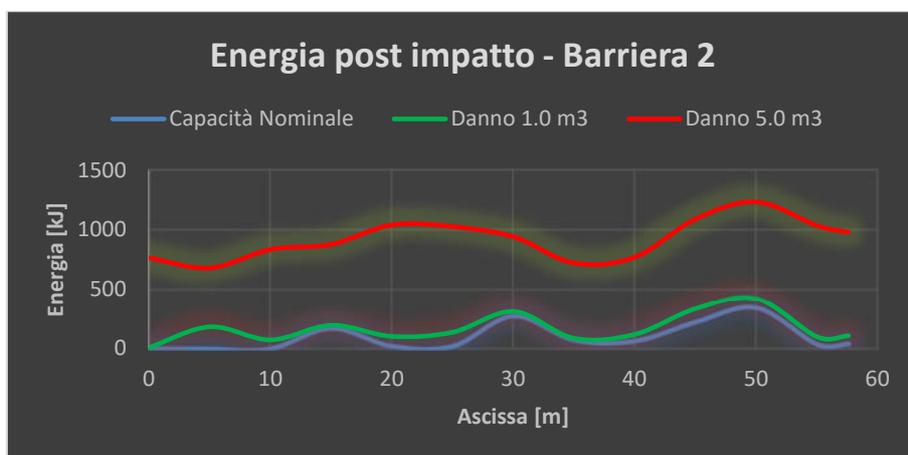


Figura 7.4-18: Energie residue alla barriera 2

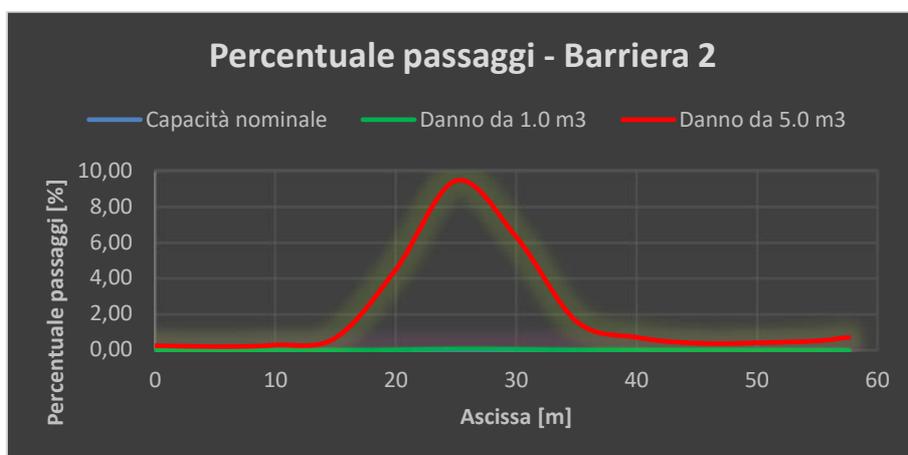


Figura 7.4-19: Percentuale di passaggi alla barriera 2

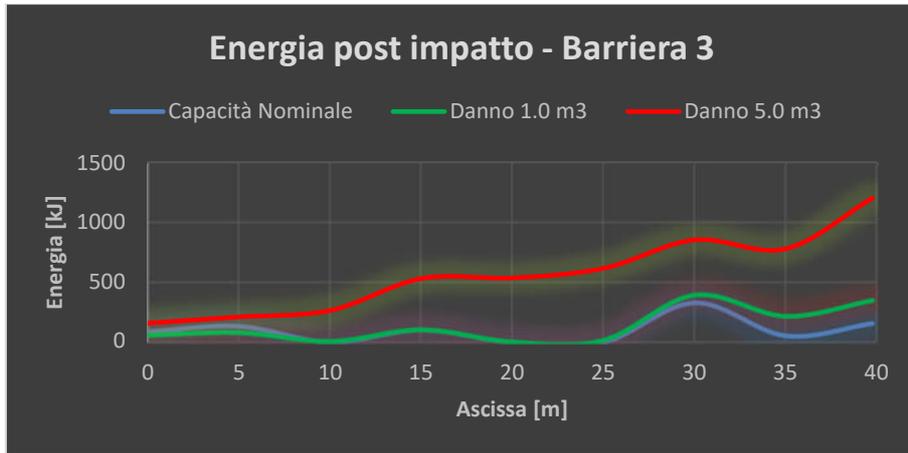


Figura 7.4-20: Energie residue alla barriera 3

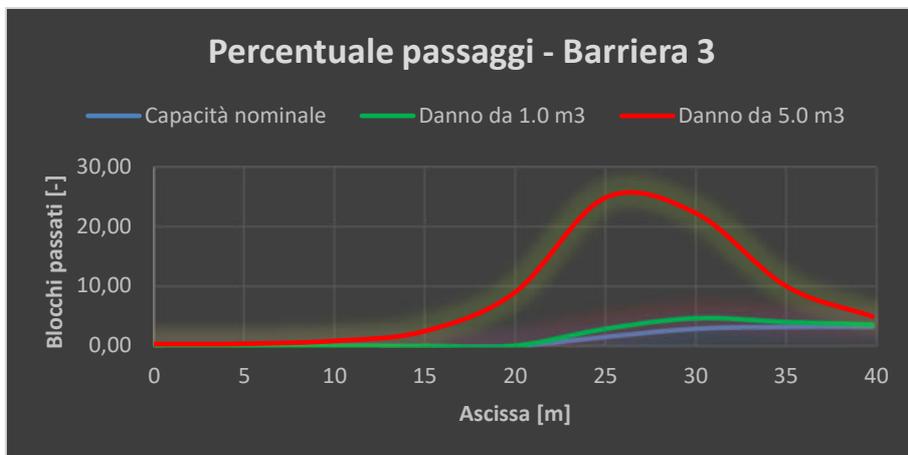


Figura 7.4-21: Percentuale di passaggi alla barriera 3

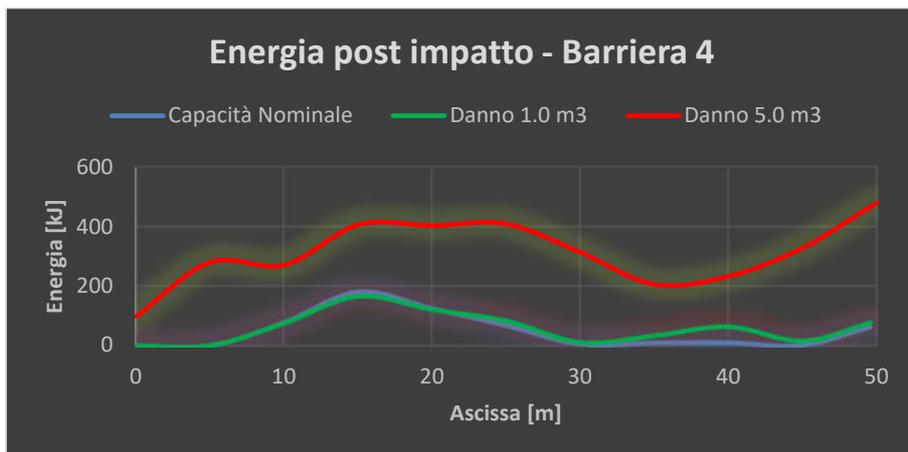


Figura 7.4-22: Energie residue alla barriera 4

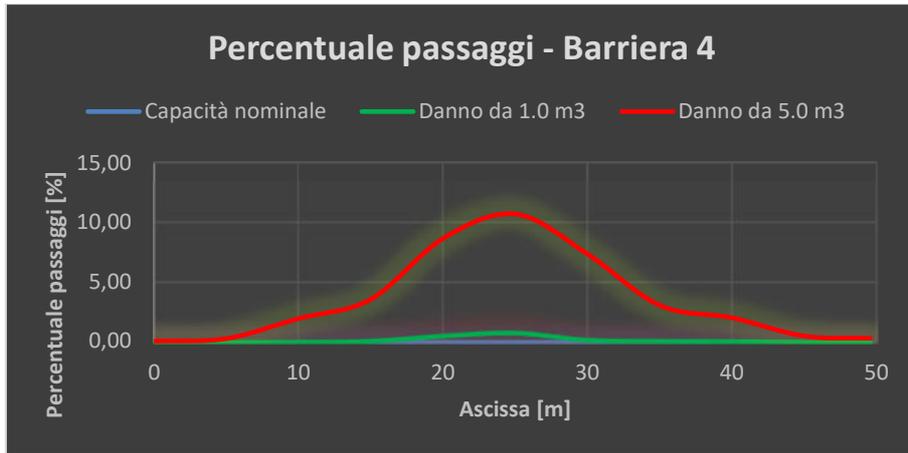


Figura 7.4-23: Percentuale di passaggi alla barriera 4

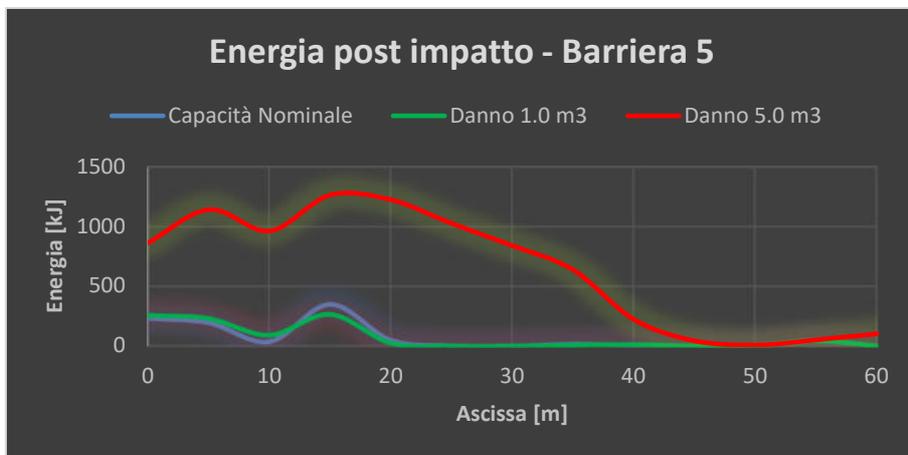


Figura 7.4-24: Energie residue alla barriera 5

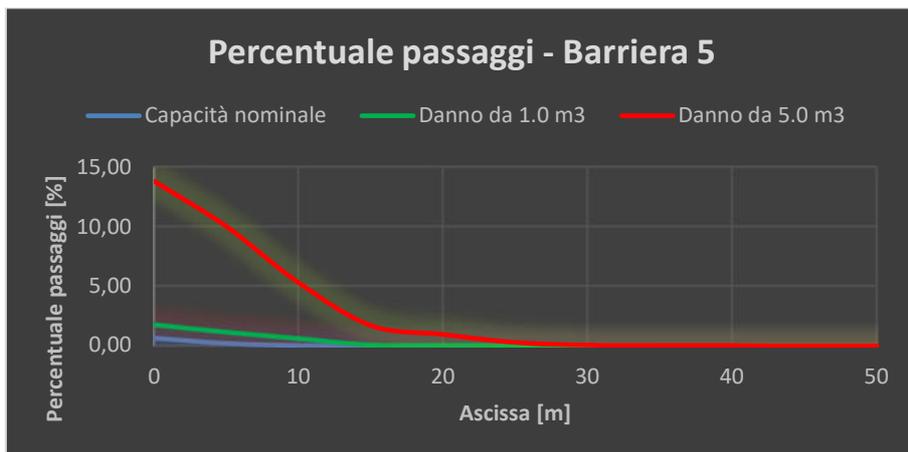


Figura 7.4-25: Percentuale di passaggi alla barriera 5

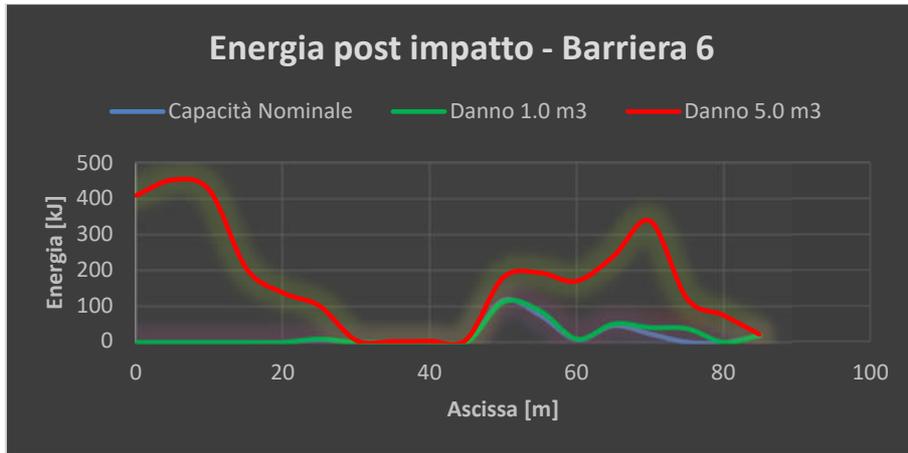


Figura 7.4-26: Energie residue alla barriera 6

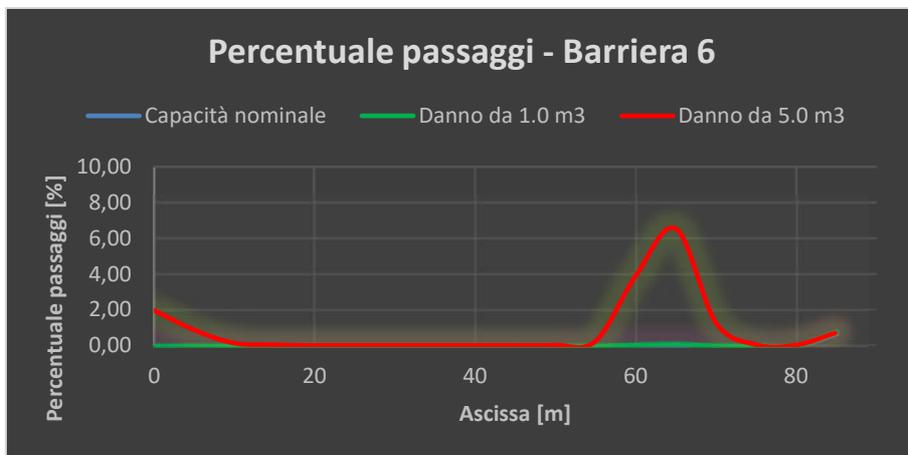


Figura 7.4-27: Percentuale di passaggi alla barriera 6

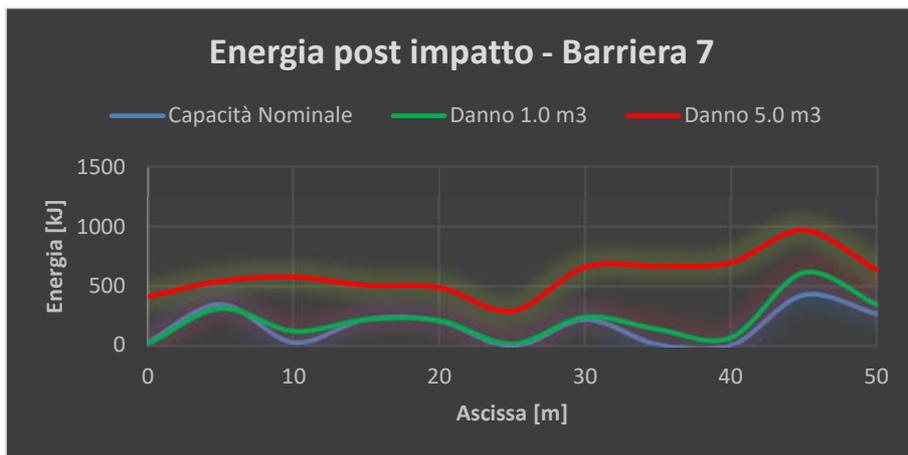


Figura 7.4-28: Energie residue alla barriera 7

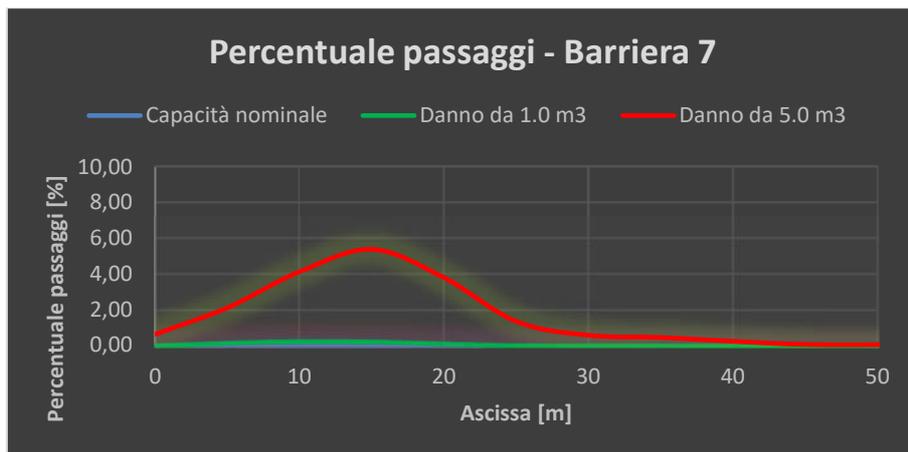


Figura 7.4-29: Percentuale di passaggi alla barriera 7

Dalle figure precedenti è possibile osservare che le energie residue e di conseguenza la percentuale di passaggi maggiore si presenta nel caso di danno da impatto con blocco da 5,0 m³, mentre queste quantità decrescono al ridursi del danno, fino alla capacità nominale. Compatibilmente con le mappe raster esistono inoltre delle zone delle barriere non interessate da passaggi di blocchi. È stato inoltre verificato, nell'ottica del dimensionamento delle barriere al 95% della frequenza cumulata dell'energia, che non vi fosse una percentuale di passaggio puntuale superiore al 5% nel caso di impatto alla capacità nominale. Globalmente le percentuali di passaggio puntuale, nello scenario di danno dal blocco di 5,0 m³, oscillano tra un minimo di 10% e un massimo del 22% circa, considerando tutte le barriere.

Conclusioni

Alla luce di quanto esposto la caduta massi, nella letteratura inglese *rockfall*, risulta essere un fenomeno che coinvolge volumetrie non elevatissime, fino ai 5 m³ in genere (ma in alcuni casi si raggiungono le volumetrie dei 10-15 m³), ma dotati di elevate energie a causa delle grandi velocità accumulate lungo il versante, che raggiungono picchi tra i 30 e 40 m/s. Questo rende la caduta massi un fenomeno altamente distruttivo che necessita di particolari attenzioni nell'ottica della salvaguardia delle vite umane e dell'integrità delle opere civili e delle infrastrutture, nonché la preservazione dell'ambiente circostante la zona interessata dagli eventi. A questo potere distruttivo si aggiungono una forte aleatorietà delle variabili cinematiche tipiche del fenomeno, la scarsa conoscenza sulla distribuzione secondo la quale variano i parametri stessi (incertezza epistemica) e le difficoltà nella determinazione di una legge spazio-temporale di accadimento che permetta di definire in maniera precisa la volumetria che ci si aspetta possa distaccarsi dal versante nella zona in esame, all'interno di una prestabilita soglia temporale. Questi fattori hanno portato allo studio di diversi modelli per la descrizione del fenomeno, la cui maggioranza è integrata in codici di calcolo, tra i quali è disponibile il software Rockyfor3D (Dorren et al., 2014), che è stato scelto come strumento di analisi in questa tesi poiché si avvale di un modello fisicamente basato integrato con osservazioni di campo su test in vera grandezza, con un approccio probabilistico nella variazione dei parametri all'interno di un range prestabilito durante le simulazioni. Con un numero di simulazioni sufficientemente elevato per ogni nicchia di distacco, qui posto pari a 50000, si può considerare raggiunta la validità statistica delle analisi e quindi si possono ritenere validi gli output forniti.

In primo luogo, con questa premessa, nel Capitolo 5 sono stati calibrati i parametri di scabrezza del versante, secondo le mappe raster Rg70, Rg20 ed Rg10 (come richieste in input dal software di simulazione Rockyfor3D) fino alla completa simulazione di quanto osservato nell'evento del 30/10/2018 nel comune di Rassa (VC), secondo quanto riportato nelle relazioni redatte dallo studio tecnico incaricato dei sopralluoghi (Tecnoesia, 2019), dove un volume di circa 0,1 m³ si è distaccato durante la notte muovendosi verso valle ed arrestandosi nei pressi della Chiesa. In merito ai dati a disposizione sono state individuate la più probabile zona di distacco, situata a monte dell'abitato nella roccia intensamente fratturata e collocata nella particella catastale 329, e la zona di arresto così come constatato dopo l'evento, collocata nel

cortile degli edifici sul retro della Chiesa Parrocchiale di Santa Croce, in località Centro. La scarsa disponibilità di dati ha portato alla focalizzazione della back analysis sulla calibrazione dei suddetti parametri di scabrezza in modo tale da far coincidere l'area di propagazione con la distanza d'arresto del fenomeno, riscontrando valori di energia inferiori ai 10 kJ al termine della zona di propagazione, compatibili con l'arresto del blocco nella zona di effettivo rinvenimento. Tutti gli output forniti da Rockyfor3D, quali velocità (in media intorno ai 10-13 m/s), energie (con valori medi intorno ai 10-15 kJ) ed altezze di rimbalzo (praticamente ovunque intorno ai 0,30 m) risultano compatibili con quanto osservato sul campo. Considerate quindi accettabili le simulazioni di back analysis, sempre all'interno del Capitolo 5, sono state testate le performance del plugin QPROTO (Q-GIS Predictive ROckfall Tool, Castelli et al., 2019) e sviluppato in ambito del software libero QGIS, nella riproduzione del fenomeno di caduta massi registrato in data 30/10/2018. Sulla base di pochi parametri (massa, angolo equivalente d'attrito, dispersione laterale, propensione al distacco, esposizione e quota) tutti facilmente ricavabili dal DTM e in parte mappe raster utilizzate in Rockyfor3D (sia dagli input che dagli output) il plugin, attraverso l'implementazione del Cone Method (Castelli et al., 2019) ed eseguendo un'analisi di visibilità è in grado di descrivere in maniera quantitativa il fenomeno con un approccio deterministico, calcolando le energie cinetiche e le velocità. Tale software è inoltre in grado di calcolare delle mappe di pericolosità e di suscettibilità indipendenti dal tempo, assegnando un ulteriore parametro detto propensione al distacco, che si pone come indicatore della probabilità spaziale di accadimento associato alle celle individuate come nicchie di distacco, a differenza di Rockyfor3D nel quale tale aspetto non può essere tenuto in conto, se non con una differenziazione indiretta attraverso l'assegnazione di differenti volumetrie all'interno delle zone di distacco, le quali richiederebbero comunque la determinazione sperimentale di una legge che leghi il volume al tempo di ritorno. A seguito della calibrazione dei parametri di scabrezza dell'evento su Rockyfor3D sono stati ricavati sia l'angolo di attrito equivalente (energy line angle ϕ_p) che la dispersione laterale della zona di invasione (angolo α) posti rispettivamente pari a 45° e $\pm 16,5^\circ$. Con il vincolo della non generazione dei coni di invasione qualora la cella sorgente possieda una pendenza locale inferiore ai 45° , il plugin mostra una buona rappresentazione del fenomeno, sia in termini di area di invasione che in termini di energie cinetiche, con queste ultime lievemente cautelative rispetto a quelle restituite da Rockyfor3D. Si riscontra quindi un'ottima funzionalità del plugin nel simulare il fenomeno e le cui differenze rispetto alle simulazioni condotte su Rockyfor3D sono da imputare esclusivamente alla differente natura dei due modelli, con QPROTO deterministico e Rockyfor3D probabilistico e fisicamente basato. In merito allo stesso evento, del 30/10/2018,

è stato appurato che qualora fosse esistita un'opera di difesa correttamente posizionata sul versante a seguito di un'indagine finalizzata a tale scopo, il blocco sarebbe stato arrestato. Questo fatto si lega principalmente ad una mancanza di indagini accurate sul sito, fino a poco tempo fa, nell'ottica di proteggere il versante. Nel corso del tempo sono stati infatti eseguiti interventi puntuali a seguito di segnalazioni di eventi di crollo, senza rendere il sistema collaborante nell'ottica di una protezione più globale nei confronti dell'abitato (Tecnosesia, 2019).

Nel Capitolo 6 è stata affrontata l'analisi di alcuni scenari previsionali di distacco. Le volumetrie ($0,1 \text{ m}^3$, $1,0 \text{ m}^3$ e $5,0 \text{ m}^3$) sono state scelte come compromesso tra i dati rilevati in situ (Tecnosesia, 2019) e gli studi in corso nel dipartimento DESEG del Politecnico di Torino (Torsello, 2019) sulla calibrazione degli angoli φ_p ed α a seconda delle caratteristiche del blocco (forma, volume) e del versante (vegetazione, qualità della discretizzazione, opere di difesa) nell'ottica di porre a confronto, così come precedentemente eseguito nell'ambito della back analysis dell'evento del 30/10/2018, i risultati ottenuti attraverso le simulazioni condotte su Rockyfor3D e quelle eseguite tramite QPROTO. Gli scenari di distacco, in termini di nicchie, riguardano in primo luogo la roccia intensamente fratturata ed in secondo luogo sia la roccia intensamente fratturata che la roccia esposta (la cui posizione è stata ricavata dalle informazioni contenute nelle relazioni tecniche dello studio Tecnosesia, 2019). Le analisi ed i confronti vengono eseguiti in termini di energia media e di area di invasione e, come ci si aspetta, tali quantità crescono al crescere del volume simulato. Per quanto riguarda gli scenari di distacco da roccia intensamente fratturata per il volume da $0,1 \text{ m}^3$ si riscontrano immediatamente, così come nella simulazione dell'evento del 30/10/2018, energie molto basse ed un'area di invasione molto contenuta, complici le scabrezze e la fitta vegetazione (con una densità di 2500 alberi/ha, ricavata da rilievi in situ su un'area campione ed adattata all'area complessiva tramite proporzione, risultato totalmente compatibile con quanto affermato nelle relazioni tecniche dello studio Tecnosesia, 2019). È comunque interessante sottolineare come l'area maggiormente soggetta al fenomeno sia la stessa interessata dal fenomeno del 30/10/2018, ovvero il retro degli edifici adiacenti alla Chiesa in località Centro. Le energie sono molto basse (con massimi di poco superiori ai 16 kJ) ed in particolare dalle nicchie più a monte alcuni blocchi non riescono a spingersi oltre le zone limitrofe. Per quanto riguarda il distacco del volume da $1,0 \text{ m}^3$ si riscontrano un'area di invasione ed un'energia decisamente maggiori, con picchi superiori ai 400 kJ, mentre per il volume di $5,0 \text{ m}^3$ si ha un'area di invasione molto estesa con picchi di energia superiori ai 4000 kJ e che si arresta, come nello scenario da $1,0 \text{ m}^3$, sul

torrente Sorba. I medesimi scenari sono stati simulati con QPROTO, assumendo un uguale dispersione laterale α , come da calibrazione nella back analysis e pari a $\pm 16,5^\circ$, e ϕ_p pari a 40° per il volume da $1,0 \text{ m}^3$ e 33° per il volume da $5,0 \text{ m}^3$, mentre rimane pari a 45° quello per il volume da $0,1 \text{ m}^3$, come dedotto nella back analysis. È stato possibile constatare una buona rappresentazione del fenomeno, al di là di alcune imperfezioni legate principalmente al differente approccio con il quale i due software modellano il fenomeno e criticità topografiche locali (bruschi cambiamenti di pendenza, oscillazioni della quota nelle direzioni longitudinale e trasversale del versante). In particolare va sottolineato che mentre Rockyfor3D non è strettamente vincolato ad un'area di invasione prestabilita, QPROTO definisce tale zona a priori attraverso la costruzione del cono di invasione governato dai parametri ϕ_p e α . Tali imperfezioni si riflettono inoltre sull'andamento delle energie lungo i collettori posizionati a ridosso delle località Centro e San Giovanni, con la presenza dell'inversione del trend in alcuni punti, in genere comunque simile, ma con QPROTO che fornisce stime cautelative rispetto a quelle simulate da Rockyfor3D.

Sempre nel Capitolo 6 sono stati analizzati i medesimi scenari previsionali, in termini di volumetrie, simulando il contemporaneo distacco da roccia intensamente fratturata e da roccia esposta. Per quanto riguarda il volume da $0,1 \text{ m}^3$ l'area d'invasione è lievemente maggiore rispetto al caso di distacco da sola roccia intensamente fratturata, ma le energie rimangono le stesse, complici la scabrezza e la densa vegetazione. Anche nel caso di distacco del volume da $1,0 \text{ m}^3$ e da $5,0 \text{ m}^3$ le aree di invasione crescono considerevolmente, ma con i massimi di energia sostanzialmente identici a ridosso dell'abitato, intorno ai 400 kJ e 4000 kJ rispettivamente, in quanto le nicchie di distacco che si affacciano sull'abitato sono costituite principalmente da roccia intensamente fratturata. Per quanto riguarda il confronto con gli output di QPROTO per i medesimi scenari, si nota ancora una buona rappresentazione del fenomeno, con le energie restituite da QPROTO generalmente cautelative, a meno delle imperfezioni precedentemente discusse e per le quali valgono le medesime considerazioni. In generale si può dire che, osservando i risultati ottenuti, che le simulazioni condotte con QPROTO sono un'ottima base per la definizione di mappe di pericolosità in fase preliminare, anche grazie al basso numero di parametri richiesto e alla semplicità con la quale tali parametri possono essere reperiti. È utile sottolineare che, al diminuire dell'angolo ϕ_p la modellazione risente meno delle imperfezioni presenti in versanti naturali, quindi si ha un lieve miglioramento dei risultati per volumetrie maggiori. Viene infine discusso il parametro più innovativo di QPROTO, ovvero l'indice di propensione al distacco I_D , sullo scenario di distacco contemporaneo da roccia intensamente

fratturata e da roccia esposta per il volume da 5,0 m³ dove, per la quasi coincidenza con i risultati di Rockyfor3D per via del minor numero di imperfezioni, è possibile apprezzare meglio l'effetto di tale parametro. In particolare è stato assegnato $I_D=1,0$ alla roccia intensamente fratturata (100% di probabilità spaziale di distacco) e I_D variabile tra 0.1, 0.5 e 1.0 alla roccia esposta (che possiede una probabilità spaziale di distacco di almeno un ordine di grandezza inferiore, ma per mostrare gli effetti della assegnazione di tale parametro viene impostata una sua variazione). Ci si sofferma in particolare sulla mappa di pericolosità w_en.tif, che viene costruita come il massimo prodotto tra l'indice di distacco e l'energia registrata in ogni cella, la quale mostra le zone maggiormente affette dal fenomeno tenendo conto della probabilità di accadimento dell'evento e della magnitudo dello stesso. Dall'analisi di tale mappa raster si evince come per valori bassi dell'indice di distacco per la roccia esposta, le zone maggiormente soggette al fenomeno sono quelle a valle della roccia intensamente fratturata. Al crescere dell'indice di distacco per la roccia esposta diventa importante il suo contributo alla pericolosità della zona, con valori paragonabili al contributo della roccia intensamente fratturata. Per l'indice di distacco $I_D=1,0$ per la roccia esposta, la mappa di pericolosità assume forma identica a quella dell'energia e la pericolosità della mappa diventa sostanzialmente di totale competenza della roccia esposta, che surclassa il contributo della roccia intensamente fratturata. In questo senso i risultati di QPROTO, oltre alla coerenza con i risultati forniti da Rockyfor3D, mostra una coerenza con quanto osservato in sito in merito alle zone maggiormente soggette al fenomeno di caduta massi e si rivela quindi un ottimo strumento di analisi. Si può concludere che, data la mappa cromatica fornita da QPROTO, tali output potrebbero essere utilizzati come affinamento dei reticoli forniti dall'inventario IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), aggiungendo quindi un maggior dettaglio nella caratterizzazione della zona in esame.

Nel Capitolo 7, sulla base delle ETAG027 aggiornate dalle EOTA2018, viene sviluppata una semplice progettazione di un sistema di opere di difesa, in termini di capacità di assorbimento energetico e di altezza di intercettazione, sulla base dei dati raccolti nelle simulazioni condotte sugli scenari previsionali. In merito allo scenario da proteggere si è scelto quello più gravoso in termini energetici, ovvero il distacco contemporaneo dalla roccia intensamente fratturata e dalla roccia esposta del blocco da 5,0 m³. Questa scelta si lega principalmente a quanto emerso dalle relazioni tecniche e dai sopralluoghi in sito, ovvero la carenza di manutenzione delle barriere e conseguente accumulo di massi e infiltrazione di vegetazione che ne riducono la capacità di assorbimento (Tecnoseisa, 2019). In assenza di informazioni sulla frequenza temporale di accadimento, la protezione da questo scenario compensa in parte questi aspetti. La

progettazione ha portato alla definizione di uno stendimento di 7 barriere flessibili di capacità variabile tra i 2000 e i 5000 kJ, con altezze variabili tra i 5,0 m e i 6,0 m. Verificata il funzionamento alla capacità nominale mediante ulteriori simulazioni condotte con Rockyfor3D, è stata definita come parametro rappresentativo dello scenario la percentuale di arresto dei blocchi, che per tutte le barriere assume valori superiori al 95%.

Sempre nel Capitolo 7, in merito alle opere di difesa, sono state formulate delle ipotesi di danneggiamento causate da impatti precedenti di blocchi secondo i gli studi di alcuni autori (Govoni et al., 2016). In tali scenari, a partire dall'energia dell'impatto sulla barriera, è possibile stimare l'energia residua della stessa (Govoni et al., 2016), potendo quindi condurre ulteriori simulazioni per determinare come questi danni influiscano sulle energie residue dei blocchi che oltrepassano la barriera e sulla percentuale di blocchi arrestati e quindi sull'area di invasione che ne deriva. Gli scenari esaminati, prevedono la combinazione del distacco dei volumi da 1,0 m³ e da 5,0 m³ nelle ipotesi di danno da impatto da blocco di 1,0 m³ e danno da impatto da blocco di 5,0 m³, questi ultimi sempre rapportati al comportamento delle barriere alla loro capacità nominale. Per ogni barriera e per ogni scenario di danno-blocco distaccato è stata assegnata una percentuale di arresto/percentuale di passaggio, in modo da avere un parametro di confronto tra gli scenari stessi, incluso quello con le barriere alla loro capacità nominale.

È interessante soffermarsi sullo scenario di distacco del blocco di 1,0 m³ non tanto perché, come atteso, le barriere arrestano completamente il fenomeno alla loro capacità nominale di assorbimento, ma come mostrato tale capacità di arresto permane anche nel caso in cui il danno sia perpetrato da un blocco di 1,0 m³, con percentuali di arresto prossime al 100%, a causa del basso danneggiamento effettuato dal blocco di 1,0 m³, legato essenzialmente alle basse energie possedute. Anche nel caso del danno da impatto di blocco di 5,0 m³ le prestazioni sono ottime, in quanto le energie possedute dal blocco di 1,0 m³ sono molto basse e la capacità residua della barriera è ancora valida nei confronti di tale scenario di distacco (si hanno percentuali di arresto minime di circa 92%).

Le simulazioni hanno portato ad evidenziare, come ci si aspettava, che lo scenario più gravoso risulta quello del distacco del blocco da 5,0 m³ nel caso di precedente impatto da blocco di 5,0 m³, nel quale alcune barriere, in particolare la barriera 1 a monte della località Centro, risulta praticamente abbattuta dall'impatto, facendo tendere l'area di invasione a quella che si avrebbe in assenza delle opere, con una percentuale di passaggi del 77% circa (del resto le barriere sono progettate sulle energie possedute da questo volume). Le altre barriere seguono questo trend

nel caso di danno da impatto di blocco di $5,0 \text{ m}^3$, con percentuali di arresto tra il 25% circa e l'81% circa nel caso migliore (alcune opere risultano meno danneggiate avendo utilizzato elementi a capacità superiore per mancanza di barriere commerciali con la capacità di assorbimento necessaria). Le percentuali di arresto crescono chiaramente al ridursi del danno sulle barriere, per lo scenario di distacco del blocco da $5,0 \text{ m}^3$. Altro caso di interesse è quello di distacco del blocco di $5,0 \text{ m}^3$ sotto l'ipotesi di danno da impatto precedente di un blocco da $1,0 \text{ m}^3$, poiché le barriere nei confronti del blocco di $5,0 \text{ m}^3$ si comportano in maniera identica al caso di capacità nominale. Infatti un blocco da $1,0 \text{ m}^3$ possiede meno di un terzo dell'energia del blocco da $5,0 \text{ m}^3$ e considerato quest'ultimo come il livello energetico MEL del progetto, l'impatto del blocco da $1,0 \text{ m}^3$ si classifica come impatto di livello energetico SEL che, secondo le linee guida europee ETAG027 e aggiornate al 2018, deve essere completamente dissipato dalla barriera senza che questa venga danneggiata ed in più la sua altezza residua deve essere superiore al 70% di quella nominale (il funzionamento della barriera non deve quindi essere compromesso da un impatto di livello energetico SEL). Queste simulazioni, sulla base di quanto riportato dalle ricerche condotte da Govoni et al., (2016), concordano pienamente con le Linee Guida Europee sulla certificazione dei kit di protezione paramassi.

Dalle analisi di danneggiamento condotte risulta chiaro che, in accordo con gli scenari previsionali e con l'evento del 30/10/2018, la zona maggiormente soggetta al fenomeno risulta quella a ridosso della Chiesa in località Centro.

Sviluppi futuri

Sulla base dei lavori svolti nell'ambito di questa tesi è interessante discutere alcuni possibili sviluppi futuri. In particolare potrebbe essere di rilievo lo studio del danneggiamento del singolo modulo della barriera, in modo tale da capire effettivamente dove si concentra il danno arrecato dall'impatto di un blocco. Infatti, nelle ipotesi di danneggiamento simulate in questo elaborato, è stata raccolta l'energia di impatto rappresentativa di tutta la barriera, applicando quindi il danneggiamento all'intero stendimento e considerando di fatto un danno che realmente potrebbe essere localizzato e quindi non interessare il funzionamento di tutta la barriera. Tale scopo potrebbe essere perseguito modellando le barriere come singoli moduli affiancati su Rockyfor3D, in modo che essi costituiscano sì parte della stessa opera, ma siano identificabili

dal software come elementi singoli (singoli vettori e singole mappe raster per modulo di barriera) e quindi vi possano essere associate le curve di frequenza cumulata delle energie, così da prevedere il più probabile danno per ogni modulo e analizzare la dinamica del fenomeno con un grado di dettaglio maggiore.

Bibliografia citata

Agliardi F., Crosta G. B., 2003 “*High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls*”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, pp. 455–470.

Azimi C., Desvarreux P., Giraud A., Martin-Cocher J., 1982 “*Méthode de calcul de la dynamique des chutes des blocs - Application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors)*”. Bull, Liais, Lab. Ponts Chauss, 122, pp. 93-102.

Azzoni A., La Barbera G., Zaninetti A., 1995 “*Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model*”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, pp. 709-724

Barbero M., Barla M., 2017 “*Corso di Stabilità degli scavi e delle opere di sostegno*”. Politecnico di Torino.

Bassato G., Cocco S. e Silvano S., 1985 “*Programma di simulazione per lo scoscendimento di blocchi rocciosi*”. Dendronatura 6 (2), pp. 34-46.

Berger F., 2006 “*Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts*”. Tree Physiology, pp. 1-10.

Bozzolo D., Pamini R., 1986 “*Simulation of rock falls down a valley side*”. Acta Mechanica 63, pp. 113–30.

Broilli L., 1974 “*Ein Felssturz in Großversuch*”, Rock Mechanics Supplement, 3, pp. 69-78.

Castelli M., De Biagi V., Netti T., 2016, “*Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis*”. Procedia Engineering 158, pp. 464–469.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.473>

Castelli M., Grisolia M., Barbero M., Vallero G., Campus S., Rocco Pispico R., Lanteri L., 2016 “*QPROTO – a QGIS plugin for rockfall analyses at small scale*”. DISEG, Politecnico di Torino, pp. 1-36.

Castelli M., Grisolia M., Barbero M., Vallero G., Campus S., Rocco Pispico R., Lanteri L., (2019, in redazione) “*A GIS-based procedure to estimate rockfall hazard at a small scale: the QPROTO plugin*”. Nat. Hazards, pp. 1-21.

Chau K.T., Wong R.H.C., Wu J. J., 2002 “Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39, pp. 69-77.

Corominas J., van Westen C, Frattini, P., Cascini L., Malet J.P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi, S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T., 2014 “*Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk*”. Bull Eng Geol Environ., 534 73, pp. 209-263.

Cundall P. A., Shimizu Y., Hart R. D., 2004 “*Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*”. Taylor & Francis Group plc, London, UK.

Cundall P. A., Strack O. D. L., 1979 “*A discrete model for granular assemblies*”. Géotechnique 29, No. 1, pp. 47-65.

De Biagi V., 2017 “*Brief communication: Accuracy of the fallen blocks volume-frequency law*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., pp. 1487–1492.

De Biagi V., Napoli M. L., Barbero M., Peila D., 2017 “*Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, pp. 103–113.

Descoedres F., 1997 “*Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs*”. Soc. Suisse Mécan. Sols Roch. 135, pp. 3-11.

Dorren L. K. A., 2003 “*A review of rockfall mechanics and modelling approaches*”. Progress in Physical Geography 27,1 pp. 69–87.

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

Dorren, L.K.A., Heuvelink G.B.M., 2004 “*Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model*”. Int. J. Geog. Inf. Sci. 18, pp. 595-609.

- Dorren L.K.A., Berger F., Le Hir C., Mermin E., Tardif P., 2005** “*Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests*”. *Forest Ecol. Manage.* 215(1-3), pp. 183-195.
- Dorren L.K.A., Berger F., 2005** “*Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts*”. *Tree Phys.* 26, pp. 63-71.
- Dorren L.K.A., Berger F., Putters U. S., 2006** “*Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes*”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, pp. 145–153.
- Dorren L. K.A., Kronholm K., Domaas U., Labiouse V., 2013** “*Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones. Ch 5 – Rockfall Engineering*”. ResearchGate, pp. 1-32.
- Dorren L.K.A., Simoni, S., 2014** “*Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi*”. ecorisQ Paper (www.ecorisQ.org), pp. 1-31.
- EOTA, 2008** “*ETAG027 - Guida per il Benestare Tecnico Europeo di Sistemi di protezione paramassi*”. EOTA, pp. 1-54.
- EOTA, 2018** “*Falling Rock Protection Kits*” EOTA, pp 1-28.
- Evans S.G., Hungr O., 1993** “*The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes*”. *Canadian Geotechnical Journal* 30, pp. 620–636.
- Falcetta J.L., 1985** “*Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux*”. *Rev. Franç. Géotech.* 30, pp. 1-80.
- Fell R., Ho K.K., Lacasse S., Leroi E., 2014** “*A framework for landslide risk assessment and management. In Landslide risk management*”. Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; Eberhardt, E. Eds.; Taylor and Francis, London, United Kingdom, pp. 13-36.
- Giani G. P. 1992** “*Rock Slope Stability Analysis*”. A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, pp. 1-346.
- Govoni L., Gottardi G., Mentani A., Strada C., 2016** “*Investigating the behaviour of existing rockfall protection barriers*”. 3rd RSS Rock Slope Stability conference, Lyon pp.1-2.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F., 2002** “*STONE: a computer program for the threedimensional simulation of rock-falls*”. *Comp. & Geosc.* 28, pp. 1079-1093.

- Habib P., 1977** “*Note sur le rebondissement des blocs rocheux*”. Proc. Meet. on Rockfall Dynamics and Protective Works, Bergamo, Italy, ISMES Publ. 90, pp. 123-125.
- Heim A., 1932** “*Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt Vierteljahrschrift Naturforsch*”. Gesell Zürich, pp. 77-218.
- Hoek E., 1987** “*Rockfall. A program in basic for the analysis of rockfall from slope*”. Unpublished notes, University of Toronto, Canada.
- Hungr, O., Evans S.G., 1988** “*Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards*”. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Rotterdam, Balkema, pp. 685–690.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Sartori M., 2003** “*Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, pp. 431–438.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., 2003** “*Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data*”. ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 575-578.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., 2011** “*Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp. 819-828.
- Jonsson M.J., 2007** “*Energy absorption of trees in a rockfall protection forest*”. PhD Thesis ETHZ No. 17214: 209 S.
- Keylock C., Domaas U., 1999** “*Evaluation of topographic models of rockfall travel distance for use in hazard applications*”. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 31(3), pp. 312–320.
- Kirkby, M. J., Statham I., 1975** “*Surface stone movement and scree formation*”. Journal of Geology 83, pp. 349–362.
- Llorens R. C., Vilaplana J. M., 2009** “*Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Sola d'Andorra la Vella, Central Pyrenees)*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp. 2107–2118.
- Luciani A., Peila D., Barbero M., 2016** “*Studio numerico dell'influenza dell'ammaloramento delle barriere paramassi a rete*” GEAM, Anno LII, n. 1, pp. 31-38.

- Lundström T., Jonsson M.J., Volkwein A., Stoffel, M., 2009** “*Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: a detailed assessment using a new experimental method*”. *Tree Phys.* 29, pp. 345-359.
- Meissl G., 1998** “*Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GISgestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28*”. Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck, pp 1-249.
- Molino G., 2006** “*Rassa e le sue valli. Ambiente, storia e tradizioni*”. Zeisciu, Magenta.
- Munjiza A., Rougier E., John N. W. M., 2004** “*Numerical comparison of some explicit time integration schemes used in DEM, FEM/DEM and molecular dynamics*”. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 61, pp. 856-879.
- O’Callaghan J.F., Mark D.M., 1984** “*The extraction of drainage networks from digital elevation models*”. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28, pp. 323–344.
- Onofri R., Candian C., 1979** “*Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976*”. Reg. Aut. Friuli-Venezia Giulia, Cluet.
- Paiola A., 1978** “*Movimenti franosi in Friuli. Comportamento dei corpi che cadono su di un pendio e calcolo del limite di espansione potenziale*”. *Tecnica Italiana*, p. 6
- Pariseau W.G., Voight B., 1979** “*Rockslides and avalanches: basic principles and perspectives in the realm of civil and mining operations*”. *Rockslides and avalanches. Engineering sites*. Elsevier, The Netherlands, pp. 1-92.
- Pfeiffer T.J., Bowen T.D., 1989** “*Computer simulation of rockfalls*”. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* XXVI (1), pp. 135–146.
- Pichler B., Hellmich Ch., Mang H.A., 2005** “*Impact of rocks onto gravel - design and evaluation of experiments*”. *Int. J. Impact Eng.* 31, pp. 559-578.
- QGIS 3.4.7, 2019** “*User Guide for Version 3.4*”. GNU General Public License
- Richards L., 1988** “*Rockfall protection: a review of a current analytical and design methods*” Secondo Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce, Torino, I(A).
- Rinaldi G., 2016** “*25 luoghi imperdibili per le vacanze in montagna*”. Edizioni del Capricorno, pp. 134-139.

Rocscience, 2000 “*Manuale utente*”. Rocscience Inc.

Scavia C., Barbero M., 2017 “*Corso di meccanica delle rocce*”. Politecnico di Torino.

Scheidegger A.E., 1973 “*On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*”. Rock Mech. 5, pp. 231-236.

Scheidegger A.E., 1975 “*Physical aspects of natural catastrophes*”. Amsterdam / New York Elsevier.

Shi G. H., 1992 “*Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of deformable block structures*”. Engineering computations, Vol. 9 Iss 2 pp. 157-168.

Shi G. H., Hatzor Y. H., Ma G., 2018 “*Discontinuous Deformation Analysis in Rock Mechanics Practice*”. CRC Press Taylor & Francis Group.

Spang M.R., Krauter E., 2001 “*Rockfall simulation - A state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers*”. Int. Conf. Landslides; Causes, Impacts and Countermeasures, 17-21 June 2001, Davos, Switzerland, pp. 607-615.

Tecnosesia, 2019 “*Relazione Generale - Comune di Rassa (VC)*”. Tecnosesia, pp. 1-23.

Tecnoseisa, 2019 “*Relazione Geologica Generale - Comune di Rassa (VC)*”. Tecnosesia, pp. 1-42.

Tecnosesia, 2019 “*Relazione Geomeccanica - Comune di Rassa (VC)*”. Tecnosesia, pp. 1-25.

Toppe R. 1987 “*Terrain models - A tool for natural hazard mapping*”. Salm, B., Gubler, H., (Eds.): Avalanche formation, movement and effects, IAHS Publ. 162, pp. 629-638.

Torsello G., 2019 “*La modellazione del fenomeno di caduta massi a piccola scala: valutazione dei parametri necessari per analisi speditive*”. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino, DISEG.

UNI 11211-4:2018 “*Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo*” UNI - Ente Italiano di Normazione.

Van Dijke J.J., Van Westen C., 1990 “*Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis*” ILWIS. ITC J. 1, pp. 40-44.

Wu S.S., 1984 “*Rockfall evaluation by computer simulation*”. Transportation Research Record, Transp. Res. Board, Washington, DC, Nr. 1031, pp. 1-5.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R., 1987 “*Quantitative Analysis of Land Surface Topography*”. Earth Surf. Proc. Landforms 12, pp. 47-56.

Zinggeler A., 1990 “*Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Modellierung der relevanten Teilprozesse*” MSc. Thesis Univ. Bern, Geog. Inst., 116 S.

Bibliografia di carattere generale

Abbas S. M. Konietzky H., 2015 “*Rock Mass Classification Systems*”. Department of Rock Mechanics, Technical University Freiberg, Germany, pp. 1-41.

Abellan A., Vilaplana J. M., Calvet J., Garcia-Selles D., Asensio E., 2011 “*Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp. 829–841.

Agliardi F., Crosta G. B., 2004 “*Parametric Evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories*”. Natural Hazards and Earth System Science, pp- 583-598.

Agliardi F., Crosta G. B., Frattini P., 2004 “*Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp. 1059–1073.

Aversa S., Cascini L., Picarelli L., Scavia C., 2016 “*Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*”. CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 1-1276.

Berretti R. et al., 2006 “*Selvicoltura nelle foreste di protezione*”. Regione Piemonte, Regione Autonoma Valle d’Aosta, pp. 1-218.

Bieniawski, Z.T., 1989 “*Engineering rock mass classifications*”. New York: Wiley, pp. 1-250.

Budetta P., 2004 “*Assesment of rockfall along roads*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 4, pp. 71–81.

Carulla R. R., Corominas J., Mavrouli O., 2015 “A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Landslides 12, pp. 815–825.

Charalambous S., Sakellariou M., 2007 “*Estimation Of Rockfall Hazard Using A Gis-Based Three-Dimensional Rockfall Simulation Model*”. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVII, pp. 1-12.

Chau K.T., Wong R.H.C., Liu J., Lee C.F., 2003 “*Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory*”. Rock Mechanics and Rock Engineering, SCI journal, Springer pp. 383-408.

Derron M. H., Blikra L. H., 2005 “*Preliminary assessment of rockslide and rockfall hazards using a DEM (Oppstadhornet, Norway)*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 5, pp. 285–292.

Dorren L.K.A., Rammer W., Brauner M., Berger F., Lexer M. J., 2010 “*Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, pp. 699–711.

Erismann T. H., Abele G., 2001 “*Dynamics of Rockslides and Rockfalls*”. Springer, pp. 1-328.

Guzzetti F., Reichenbach P., Wieczorek G. F., 2003 “*Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, pp. 491–503.

Haas F., Heckmann T., Wichmann V., Becht M., 2012 “*Runout analysis of a large rockfall in the Dolomites/Italian Alps using LIDAR derived particle sizes and shapes*”. Wiley Online Library, pp. 1-12.

Heckmann T., Bimböse M., Krautblatter M., Haas F., Becht M., Morche D., 2011 “*From geotechnical analysis to quantification and modelling using LiDAR data: a study on rockfall in the Reintal catchment, Bavarian Alps, Germany*”. wileyonlinelibrary.com, pp. 1-15.

Hoek E., Bray J., 1977 “*Rock Slope Engineering*”. Revised Second Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 1-402.

Jaboyedoff M., 2011 “*Slope Tectonics*”. Geological Society, London, Special Publications 351, pp. 1-283.

- Jaboyedoff M., Loyer A., Pedrazzini M., 2009** “*Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp. 1643–1653.
- Jaboyedoff M., Ornstein P., Rouiller J. D., 2004** “*Design of a geodetic database and associated tools for monitoring rock-slope movements: the example of the top of Randa rockfall scar*”. Natural Hazards and Earth System Sciences 4, pp. 187–196.
- Labieuse V., Heidenreich B., 2009** “*Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, pp. 1981–1993.
- Lambert S., Nicot F., 2011** “*Rock Fall Engineering*” Iste, Wiley, pp. 1-426
- Lollino G., Giordan D., Crosta G. B., 2015** “*Landslide Process - Volume 2*”. Springer, pp. 43-58.
- Margottini C., Canuti P., Sassa K., 2013** “*Landslide Science and Practice Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning* “. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-587.
- Palma B., Parise M., Reichenbach P., Guzzetti F., 2012** “*Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy*”. Nat Hazards (2012) 61, pp. 187–201.
- Pariseau W.G., 2017** “*Design Analysis in Rock Mechanics 3rd Edition*”. CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 1-704.
- Pastor M., Tamagnini C., 2004** “*Numerical Modelling in Geomechanics*”. Kogan Page Science, London and Sterling, VA, pp. 1-531.
- Peila D., Ronco C., 2009** “*Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, pp. 1291–1298.
- R.S.V. Roshan, Budhbhatti R., Korulla M., Singh T.N., 2016** “*Analysis and Design of Advanced Rockfall Mitigation Measures Implemented at Saptshrungi Gad Temple, Nashik-A Case Study*” INDOROCK 2016: 6th Indian Rock Conference 17-18 June 2016, pp. 1-16.
- Richefeu V., Villard P., 2016** “*Modeling Gravity Hazards from Rockfalls to Landslides. From Individual Rockfalls to Large Landslides*”. ISTE Press – Elsevier, pp. 1-178.

- Royán M. J., Abellán A., Jaboyedoff M., Vilaplana J. M., Calvet J., 2013** “*Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-13.
- Saroglou H., Marinos V., Marinos P., Tsiambaos G., 2012** “*Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, pp. 1823–1836.
- Sellmeier B., 2015** “*Quantitative Parameterization and 3D-run-out Modelling of Rockfalls at Steep Limestone Cliffs in the Bavarian Alps*”. Springer, pp. 1-159.
- Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G., 1996** “*Soil Mechanics in Engineering Practice – Third Edition*”. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., pp. 1-534.
- Turner K. A., Schuster R. L., 2014** “*Rockfall: Characterization and Control*”. Transportation Research Board, pp. 1-600.
- Voight B., 1979** “*Rockslides and Avalanches, 2*” College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, U.S.A, pp. 1-850.
- Volkwein A., Gerber W., 2014** “*Stronger and lighter - evolution of flexible rockfall protection systems*”. ResearchGate, pp. 1-6.
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M., 2011** “*Rockfall characterisation and structural protection – a review*”. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2617–2651, 2011, pp. 2617-2651.
- Wyllie D. C., 2014** “*Rock Fall Engineering*”. CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 1-270.
- Wyllie D. C., 2018** “*Rock Slope Engineering*”. CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 1-530.
- Yamagishi H., Bhandary N. P., 2017** “*GIS Landslide*”. Springer, pp. 1-230.

Sitografia

<http://www.ecorisq.org> – Software Rockyfor3D

<http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto/bancadatiged/sifrap> - Banca dati eventi franosi regione Piemonte

<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia> – IFFI - Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia

<http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/> - Viewer 2D del portale dell'Arpa Piemonte

<http://www.arpa.piemonte.it/dati-1> - Banca dati Arpa Piemonte

<https://www.regione.piemonte.it/web/> - Sito Web Regione Piemonte

<https://www.academia.edu> – Academia.edu, risorsa online pubblicazioni scientifiche

<https://www.researchgate.net> – Researchgate.net, risorsa online pubblicazioni scientifiche

<https://www.natural-hazards-and-earth-system-sciences.net> – Natural Hazard and Earth System Science

<https://www.qgis.org/it/site/> - Software QGIS

Ringraziamenti

Per quanto il titolo di studio possieda un solo intestatario, tutto il percorso è fatto di persone, dalla famiglia agli amici e ai docenti. Per questo mi sento in dovere di ringraziare tutti, anche chi ha solo condiviso due chiacchiere durante questi lunghi anni, perché mi hanno reso ciò che sono e mi hanno portato qua, a riscattare il tanto desiderato e ambito titolo.

In primo luogo vorrei ringraziare dal profondo papà Ivo e mamma Maria Rosa, che nonostante i fallimenti mi hanno dato la possibilità di continuare gli studi e di riscattarmi, tra rimproveri e incoraggiamenti, con i primi decisamente meritati. Grazie di tutto, davvero, ciò che avete sempre fatto e ciò che fate per me è di immenso valore, non mi basterà una vita per ripagarvi. E grazie per gli insegnamenti e i valori che mi avete trasmesso e continuate a trasmettermi. Non ve l'ho mai detto, ma ve lo dico ora grazie! Grazie a mio fratellino Fabry e ad Irene per esserci sempre.

Grazie di cuore anche all'altra metà della mia famiglia, Enrico e Marina, Vale, Stefy, Samu e Ale che mi hanno sempre supportato e da voi, anche se non l'ho mai detto, ho imparato tantissimo e sono chi sono anche grazie a voi.

Un grazie enorme agli amici Marco, Stefano, Vito, Fabio e Federico, per le risate, le uscite e il supporto durante questi anni di studio, mi avete stimolato a dare il massimo e a stare al passo e avete decisamente alleggerito il carico di questo percorso. Grazie di tutto, è stato davvero bello il percorso con voi.

Anche a voi che purtroppo non siete più qui vorrei dire grazie, sarebbe stato davvero bello potervi abbracciare e gioire con voi, ma sono sicuro che siete sempre con me comunque. Grazie a te zia Claudia, per i tanti consigli e le risate. Grazie a te nonno Nicu, tra alti e bassi siamo stati come amici e purtroppo non ho mai avuto l'opportunità di dirti quanto ti volessi bene e che porterò per sempre con me ciò che mi hai insegnato.

Un grazie particolare va alla prof.ssa Barbero, alla prof.ssa Castelli e all'Ing. Vallero, che mi hanno seguito con dedizione e passione nella stesura di questo elaborato. Grazie per avermi permesso di avervi come relatori e per i preziosi consigli ricevuti.

Ringrazio inoltre il Dott. Geologo Giovanni Cavagnino per il materiale ricevuto e per le preziose informazioni utili allo svolgimento di questo elaborato.

Infine vorrei ringraziare la mia fidanzata Francesca dal profondo del cuore, che mi ha sempre supportato e mi ha sempre spinto ad essere una persona migliore. Risate e pianti, tutto ciò che hai fatto e dato per me durante questo percorso e oltre mi hanno reso ciò che sono e ciò che sono felice di essere. Grazie per prendermi di petto e mettermi sempre nella direzione giusta, sei la mia roccia e il mio faro. Grazie davvero, grazie con tutto il cuore. Senza te non sarei qua.

Infine un grazie anche tutte le altre persone che in un modo o nell'altro sono entrate a far parte, anche per poco, della mia vita. Chi più chi meno avete contribuito alla realizzazione di questo sogno, grazie!

Grazie a tutti!