



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea di dicembre 2022

Analisi di stabilità per frana complessa

un caso studio a Campertogno, Valsesia (VC)

Relatore:

Prof.ssa Monica Barbero

Correlatori:

Prof.ssa Marta Castelli

Dott. Geol. Giovanni Cavagnino

Dott.ssa Geol. Chiara Minella

Candidata:

Francesca Pavan

“Quando devi sostenere un esame non devi partire sconfitta, ma devi presentarti da vincitrice”

Cit. papà Gianni

A Giuliana, che mi protegge e illumina il mio cammino dall'alto

Sommario

Indice delle figure	IV
Indice delle tabelle	XII
Premessa	1
1 Introduzione	3
2 I fenomeni franosi	11
2.1 Richiami normativi.....	11
2.2 Fenomeni di intensa erosione	12
2.3 Frane.....	12
2.3.1 Terminologia.....	13
2.3.2 Cause predisponenti e cause innescanti	14
2.3.3 Classificazione delle frane	16
3 Le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV).....	23
3.1 Caratteristiche comuni e identificative	23
3.2 Tipologie di DGPV	25
3.3 Cause predisponenti e cause innescanti	29
3.4 Sistemi di monitoraggio.....	30
3.4.1 Sistemi di monitoraggio superficiale	31
3.4.2 Sistemi di monitoraggio profondo.....	35
4 Caduta massi.....	40
4.1 Cause predisponenti e cause innescanti	41
4.2 Evoluzione del fenomeno	44
4.2.1 La fase di innesco.....	44
4.2.2 La fase di evoluzione.....	44
4.2.3 Effetti della forma del blocco	51
4.2.4 Effetti della dimensione del blocco	52
4.2.5 Effetti della vegetazione	53
4.3 Sistemi di monitoraggio.....	54
5 Caso studio	58
5.1 Inquadramento geografico.....	58
5.2 Inquadramento morfologico	60
5.3 Inquadramento geo-litologico.....	62
5.4 Inquadramento idrologico/idrogeologico	64

5.5	Inquadramento sismico	65
5.6	Inquadramento valanghivo	65
5.7	Inquadramento franoso	67
5.8	Evento franoso del novembre 2021	69
5.8.1	Generalità	69
5.8.2	Simulazioni.....	70
5.8.3	Interventi con carattere di somma urgenza	70
5.9	Rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	71
5.9.1	Descrizione del tracciato	71
5.9.2	Tappa 1: Strada Provinciale 299	73
5.9.3	Tappa 2: San Lorenzo.....	75
5.9.4	Tappa 3: Le Bonde	79
5.9.5	Tappa 4: Alpi Bolei	82
5.9.6	Tappa 5: Alpe Selva.....	85
5.9.7	Conclusioni sul rilevamento.....	87
6	Dati satellitari	88
6.1	Analisi dei dati satellitari	89
6.1.1	Classificazione in base alla velocità	89
6.1.2	Trend analysis	95
6.2	Controverifiche	99
6.3	Anomalie riscontrate e possibili motivazioni	99
7	Introduzione a Rockyfor3D.....	106
7.1	Generalità	106
7.2	Dati raster di input.....	107
7.3	Simulazione con foresta	112
7.4	Simulazione con reti paramassi	114
7.5	Impostazioni per le simulazioni	115
7.6	Componenti principali del modello	115
7.7	Dati di output del modello	124
7.8	Precisione dei valori di scabrezza della superficie.....	127
7.9	Valori assunti dai parametri al variare del tipo di superficie del pendio	128
8	Analisi numerica	131
8.1	Dati di input	131
8.1.1	Conversione da shapefile layer a raster	138

8.1.2	Conversione da raster a ESRI ASCII Grid	139
8.1.3	Input a Rockyfor3D	139
8.2	DTM10 e DTM5: confronto.....	140
8.2.1	Output con DTM10	142
8.2.2	Output con DTM5	143
8.2.3	Conclusioni sul confronto	143
8.3	Densità di alberi per ettaro	144
8.3.1	Output con DTM10	144
8.3.2	Output con DTM5	148
8.3.3	Conclusioni sulla densità di alberi	149
8.4	Calibrazione dei parametri di input.....	150
8.4.1	Scenario rosso.....	154
8.4.2	Scenario arancione	155
8.4.3	Scenario giallo.....	157
8.4.4	Scenario verde: parametri calibrati	159
8.5	Analisi previsionale.....	163
9	Considerazioni sugli elementi a rischio	166
9.1	Criticità conseguenti all'analisi previsionale	166
9.2	Analisi qualitativa degli elementi a rischio	166
10	Considerazioni sugli interventi	169
10.1	Verifica del nuovo rilevato in terra rinforzata.....	169
10.1.1	Parametri di ingresso per l'analisi di propagazione	170
10.1.2	Risultati ottenuti.....	171
10.2	Proposta di soluzioni	173
	Conclusioni	177
	Ringraziamenti.....	179
	Bibliografia.....	180
	Sitografia.....	182
	Allegati esterni.....	183

Indice delle figure

Figura 1 – Distribuzione delle frane in Italia secondo l'indice di franosità relativa al 2021	4
Figura 2 – Distribuzione percentuale delle tipologie di movimento	6
Figura 3 – Rappresentazione grafica relativa alla ripartizione della superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione	7
Figura 4 – Rappresentazione della pericolosità da frana PAI relativa al 2021	8
Figura 5 – Distribuzione percentuale del territorio di montagna, collina e pianura	9
Figura 6 – Modello Orografico d'Italia, ottenuto dal DEM 20x20 metri, che classifica come "pianura" i territori a quota altimetrica <300 m ed acclività <3°; "collina" le aree con acclività >3° o quota compresa tra 300 e 600 m; "montagna" i territori a quota >600 m	10
Figura 7 – Terminologia di un corpo frana	13
Figura 8 – Classifica di Skempton (1953)	16
Figura 9 – Classifica di Hungr et al. (2001)	17
Figura 10 – Tipologie di frane secondo la classifica di Varnes e Cruden (1996)	19
Figura 11 – Classifica di Varnes delle velocità	20
Figura 12 – Classifica di Varnes e Cruden (1996)	20
Figura 13 – Rappresentazione dei diversi stati di attività nel tempo	21
Figura 14 – Distribuzione d'attività nello spazio	22
Figura 15 – Alcuni dei più caratteristici elementi morfologici associati alle DGPV: a) sdoppiamenti di cresta; b) scarpate; c) controscarpate; d) ed e) trenches; f) rigonfiamenti	25
Figura 16 – Rappresentazione schematica di un Sackung (Bisci et al., 1996)	26
Figura 17 – Probabili meccanismi deformativi di un Sackung: a) distributed shear model (Mahr, 1977); b) plastic failure model (Savage and Varnes, 1987). Simbologia: 1) zona di deformazione viscosa con materiale contraente; 2) sollecitazioni di taglio su superfici discrete; 3) sollecitazioni di taglio in una zona fragile e superficiale dovute alla diminuzione del volume nella zona duttile più profonda. La linea punteggiata individua il profilo originale del versante [Dramis, F., Sorriso-Valvo, M. (1994), modificato]	27
Figura 18 – Lateral spread in formazioni fragili sovrastanti unità duttili (a sinistra); Lateral spread in rocce omogenee (a destra)	28
Figura 19 – Esempi di Block slide [Varnes et al., 1978]	28
Figura 20 – Ubicazione dei capisaldi per il monitoraggio di un corpo frana	31
Figura 21 – Colonna su cui fissare i capisaldi	32
Figura 22 – Rilievo GPS	33
Figura 23 – Esempio di pluviometro	33
Figura 24 – Esempio di laser scanning	34
Figura 25 – Esempio di fotogrammetria con drone	34
Figura 26 – Interferometria satellitare	35
Figura 27 – Esempio di piezometro	36
Figura 28 – Esempio di estensimetro in foro	37

Figura 29 – Esempio di inclinometro con sonda inclinometrica mobile	38
Figura 30 – Esempio di inclinometro fisso.....	38
Figura 31 – Corpo frana della caduta massi avvenuta nel novembre 2021 a Campertogno (VC); fotografia da drone [cortesia ditta Bertini Costruzioni S.R.L.]	40
Figura 32 – Blocchi ricoperti di muschio a Campertogno (VC); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	41
Figura 33 – Nicchia di distacco della caduta massi avvenuta nel novembre 2021 a Campertogno (VC); fotografia da drone [cortesia ditta Bertini Costruzioni S.R.L.]	42
Figura 34 – Traiettoria parabolica del blocco e rimbalzo [Giani, 1997]	45
Figura 35 – Componenti delle velocità pre-impatto e post-impatto [Giani, 1997].....	48
Figura 36 – Le tipologie di movimento di un blocco [Peng Yan et al., (2020)]	50
Figura 37 – Tipologie di movimento in base alla forma del blocco e alla pendenza del pendio.....	51
Figura 38 – Tipo di movimento relativo alle condizioni di impatto [Giani, 1997]	52
Figura 39 – Percorso di blocchi lungo un pendio di detrito: a) la dimensione del blocco è minore della dimensione del detrito costituente il pendio, b) la dimensione del blocco è maggiore della dimensione del detrito [Giani, 1992]	52
Figura 40 – Funzione di protezione delle foreste sulla caduta massi.....	53
Figura 41 – Esempio di vetrino	54
Figura 42 – Esempi di fessurimetri piano (a sinistra) e angolare (a destra)	55
Figura 43 – Esempio di estensimetro superficiale a barra	55
Figura 44 – Esempio di estensimetro superficiale a filo.....	56
Figura 45 – Esempio di clinometro di superficie	56
Figura 46 – Esempio di distometro a nastro.....	57
Figura 47 – Inquadramento geografico; scala 1:100000.....	58
Figura 48 – Vista del Monte Rosa da Alagna Valsesia	59
Figura 49 – Inquadramento morfologico con particolare dell’area di studio; scala 1:70000	60
Figura 50 – Rilievo ombreggiato; scala 1:100000.....	61
Figura 51 – Land Cover Piemonte 2021; scala 1:50000.....	61
Figura 52 – Estratto dalla Carta Geologica d’Italia in scala 1:100000 con associato estratto dalla legenda. Il cerchio giallo individua l’area di studio.....	62
Figura 53 – Inquadramento geo-litologico con relativa legenda; scala 1:70000	63
Figura 54 – Corpi idrici superficiali con relativa legenda; scala 1:70000.....	64
Figura 55 – Complessi idrogeologici; scala 1:100000	65
Figura 56 – Inquadramento valanghivo; scala 1:100000.....	66
Figura 57 – Barriera fermaneve in prossimità della zona Alpe Castello, Campertogno (VC); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	67
Figura 58 – Inquadramento franoso: il cerchio rosso individua l’area di studio; scala 1:100000	68
Figura 59 – Deformazione gravitativa profonda di versante con codice identificativo n.° 002-00632-01; scala 1:15000.....	68

Figura 60 – Area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi con codice identificativo n.° 002-00632-04; scala 1:8000	69
Figura 61 – WayPoint delle aree di saggio dei blocchi rilevati in situ [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	70
Figura 62 – Differenza di altezza tra il rilevato preesistente (a destra) ed il prolungamento (a sinistra), vista da monte; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	71
Figura 63 – Estratto dalla carta delle pendenze in scala 1:5000. Il cerchio rosso individua l’area di ubicazione del rilevato paramassi sulla S.P. 299 [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	72
Figura 64 – Estratto della carta speditiva di campagna in scala 1:5000 con indicazione del sistema di Trenches delle DGPV nel settore di sopralluogo [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella].....	72
Figura 65 – Rappresentazione del percorso seguito durante il rilevamento di campagna avvenuto il 14 luglio 2022; scala 1:8000	73
Figura 66 – Rappresentazione del percorso verso la prima tappa: Strada Provinciale 299; scala 1:5000.....	73
Figura 67 – Corpo frana della caduta di blocchi relativa all’evento del novembre 2021, vista verso monte; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	74
Figura 68 – Segni degli impatti dei blocchi rocciosi contro gli alberi [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	75
Figura 69 – Rilevati paramassi in terra rinforzata, rilevato in materiale sciolto e vallo; foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	75
Figura 70 – Rappresentazione del percorso verso la seconda tappa: San Lorenzo; scala 1:5000	76
Figura 71 – Colata detritica di recente sviluppo, vista verso monte (a sinistra) e vista verso valle (a destra); foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	76
Figura 72 – Trench identificata nella seconda tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	77
Figura 73 – Caduta di blocchi relativa all’evento del novembre 2021, vista verso valle; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	77
Figura 74 – Zona di accumulo della caduta di blocchi relativa all’evento del novembre 2021 [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	78
Figura 75 – Nicchia di distacco della caduta di blocchi relativa all’evento del novembre 2021; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	79
Figura 76 – Rappresentazione del percorso verso la terza tappa: Le Bonde; scala 1:4000	79
Figura 77 – Trench identificata nella terza tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	80
Figura 78 – Orlo di scarpata identificato nella terza tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	80
Figura 79 – Prato in pendenza con rigonfiamenti e gradini morfologici; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	81
Figura 80 – Blocchi rocciosi non associabili ad una potenziale nicchia di distacco; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	82
Figura 81 – Rappresentazione del percorso verso la quarta tappa: Alpi Bolei; scala 1:4000	82

Figura 82 – Prato in pendenza con rigonfiamenti e gradini morfologici che rivela un senso di spanciamento verso l’osservatore; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	83
Figura 83 – Identificazione di una trench nella quarta tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	83
Figura 84 – Blocchi rocciosi distaccati e accumulati sotto la parete rocciosa instabile; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	84
Figura 85 – Identificazione di una potenziale nicchia di distacco nella quarta tappa (a sinistra) con un particolare delle fratture che caratterizzano l’ammasso roccioso (a destra); foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022	85
Figura 86 – Rappresentazione del percorso verso la quinta tappa: Alpe Selva; scala 1:4000	85
Figura 87 – Identificazione di una parete rocciosa in condizioni instabili; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	86
Figura 88 – Parete rocciosa in condizioni instabili (a sinistra) e nicchia più alta della DGPV (al centro); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022.....	87
Figura 89 – Classificazione in base alla velocità media annua di spostamento dei punti osservati tramite tecnica interferometrica; scala 1:25000.....	90
Figura 90 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale della velocità media annua di spostamento.....	91
Figura 91 – Esempio di movimento associabile alla deformazione gravitativa profonda di versante; scala 1:350	92
Figura 92 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale della coherence	93
Figura 93 – Esempio 1 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:250.....	94
Figura 94 – Esempio 2 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:1600.....	94
Figura 95 – Esempio 3 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:800.....	94
Figura 96 – Esempio 4 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:700.....	95
Figura 97 – Esempio 5 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:1000.....	95
Figura 98 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale dei trend	96
Figura 99 – Distribuzione dei trend decrescenti sul territorio; scala 1:25000	97
Figura 100 – Distribuzione dei trend crescenti sul territorio; scala 1:25000	97
Figura 101 – Distribuzione dei punti classificati in base alla velocità media annua di spostamento sulla carta delle pendenze [°]; scala 1:9000.....	98
Figura 102 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD1003792 (coordinate x = 427263,60; y = 5070561)	99
Figura 103 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10031XW rappresentato dalla Strada Provinciale 299 (coordinate x = 425076,20; y = 5071541).....	100
Figura 104 – Serie temporale e trend relativi al PS: A3AQO-120 (coordinate x = 425121,50; y = 5071197)	100

Figura 105 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030Xu (coordinate x = 425111,30; y = 5071641)	100
Figura 106 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD100386n (coordinate x = 427168,20; y = 5070453)	101
Figura 107 – Serie temporale e trend relativi al PS: AEJO8-117 (coordinate x = 426968,20; y = 5071226) .	101
Figura 108 – Serie temporale e trend relativi al PS: A7ZIA (coordinate x = 425884,50; y = 5070858)	101
Figura 109 – Serie temporale e trend relativi al PS: BA1XE (coordinate x = 426562,20; y = 5070605)	102
Figura 110 – Raffigurazione di un’abitazione con quattro PS aventi velocità differenti (indicati dal cerchio blu); scala 1:150.....	103
Figura 111 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030MT (coordinate x = 424998,60; y = 5071684) dell’abitazione (punto azzurro in alto a destra)	103
Figura 112 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030NR (coordinate x = 424996,90; y = 5071683) dell’abitazione (punto verde in basso a sinistra).....	103
Figura 113 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030NQ (coordinate x = 424997,80; y = 5071682) dell’abitazione (punto rosso in basso a destra).....	104
Figura 114 – Diagramma di flusso di Rockyfor3D. I cerchi colorati in blu indicano i punti del modello in cui possono avvenire variazioni della direzione simulata di caduta del blocco [Dorren e Simoni, 2014] ..	106
Figura 115 – Le dieci mappe raster da fornire in input a Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]	110
Figura 116 – Immagine di supporto per la stima in campo della percentuale di superficie coperta da una certa scabrezza [Dorren e Simoni, 2014].....	111
Figura 117 – Simulazione della vegetazione con Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014].....	114
Figura 118 – Rappresentazione del meccanismo di rimbalzo secondo gli algoritmi utilizzati da Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]	116
Figura 119 – Rappresentazione delle quattro funzioni per calcolare la dissipazione di energia cinetica durante l’impatto con un albero. Per il grafico in alto a destra si è utilizzata un’altezza dell’albero di circa 13 m e una DBH di 20 cm [Dorren e Simoni, 2014].....	120
Figura 120 – Tre tipologie principali di impatto in base alla distanza orizzontale tra centro dell’impatto e asse verticale passante per il centro dell’albero (CTA) [Dorren e Simoni, 2014].....	121
Figura 121 – Principio dell’algoritmo di calcolo della direzione di caduta dopo un rimbalzo sulla superficie del pendio [Dorren e Simoni, 2014]	123
Figura 122 – Rappresentazione del passaggio da traiettoria 3D ai dati raster di output [Dorren e Simoni, 2014]	124
Figura 123 – Esempio di un log file [Dorren e Simoni, 2014]	126
Figura 124 – Valori assunti dai parametri relativi alla scabrezza superficiale al variare del tipo di superficie del pendio [Dorren e Simoni, 2014]	130
Figura 125 – Rappresentazione del DTM10 [m s.l.m.] ritagliato sulla zona di interesse su cui svolgere le simulazioni; scala 1:30000.....	132
Figura 126 – Carta delle pendenze; scala 1:10000	133
Figura 127 – Rappresentazione del rilievo ombreggiato; scala 1:15000.....	133
Figura 128 – Rappresentazione delle aree sorgenti; scala 1:9000	134
Figura 129 – Rappresentazione dei diversi tipi di suolo; scala 1:15000.....	136

Figura 130 – Misure relative alle diverse specie di alberi [Giovanni Rondelet (1834)].....	138
Figura 131 – Rappresentazione del DTM5 [m s.l.m.] ritagliato sulla zona di interesse su cui svolgere le simulazioni; scala 1:30000.....	140
Figura 132 – Rappresentazione della nicchia di distacco scelta per effettuare le simulazioni; scala 1:5000	141
Figura 133 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10; scala 1:8000	142
Figura 134 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM5; scala 1:8000	143
Figura 135 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	144
Figura 136 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	145
Figura 137 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 4000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	146
Figura 138 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 4000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	146
Figura 139 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	147
Figura 140 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	147
Figura 141 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM5 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	148
Figura 142 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m ³ utilizzando il DTM5 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000.....	149
Figura 143 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 1 m ³ ; scala 1:8000.....	154
Figura 144 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000.....	155
Figura 145 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000.....	155
Figura 146 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 1 m ³ ; scala 1:8000.....	156
Figura 147 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000.....	156

Figura 148 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000	157
Figura 149 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 1 m ³ ; scala 1:8000	157
Figura 150 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000	158
Figura 151 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000	158
Figura 152 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 1 m ³ ; scala 1:8000	159
Figura 153 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000	160
Figura 154 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m ³ ; scala 1:8000	160
Figura 155 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m ³ , della nicchia di distacco a San Lorenzo, e delle due sezioni di cui sono stati tracciati i profili; scala 1:8000	161
Figura 156 – Profilo bidimensionale della sezione 1 tracciato sulla base del DTM5; lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quota in m s.l.m. sulle ordinate (orientamento NW-SE)	161
Figura 157 – Profilo bidimensionale della sezione 2 tracciato sulla base del DTM5; lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quota in m s.l.m. sulle ordinate (orientamento NE-SW)	162
Figura 158 – Rilievo (evidenziato con la linea rossa) che comporta la divergenza delle traiettorie simulate da Rockyfor3D a partire dalla nicchia di San Lorenzo e con un volume dei blocchi di 8 m ³ [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	162
Figura 159 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dall'analisi previsionale per un volume di 8 m ³ ; scala 1:20000	164
Figura 160 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dall'analisi previsionale per un volume di 8 m ³ ; scala 1:20000	165
Figura 161 – Identificazione degli elementi a rischio a seguito dell'analisi previsionale; scala 1:12000	166
Figura 162 – Rilevato paramassi realizzato in somma urgenza (primo piano a sinistra), rilevato paramassi preesistente (secondo piano a sinistra) e vallo (al centro); vista verso nord [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	169
Figura 163 – Esempio di modifica delle quote del DTM5; rilevati paramassi e rilevato in materiale sciolto a sinistra (scala 1:2000), e profilo bidimensionale della sezione a destra (direzione W-E, lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quote in m s.l.m. sulle ordinate)	170
Figura 164 – Rappresentazione del poligono indicante il vallo realizzato a tergo dei rilevati paramassi e del rilevato in materiale sciolto; scala 1:2000	171
Figura 165 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta per un volume di 8 m ³ modificando le quote del DTM5 in corrispondenza del vallo; scala 1:3000	172
Figura 166 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta per un volume di 8 m ³ modificando le quote del DTM5 in corrispondenza del vallo; scala 1:3000	172

Figura 167 – Rappresentazione del rilevato preesistente, del rilevato di somma urgenza e del prolungamento proposto a nord e a sud di essi; scala 1:6000.....	174
Figura 168 – Possibili interventi per la messa in sicurezza; scala 1:15000.....	174
Figura 169 – Trincea attiva particolarmente aperta con substrato scompaginato ubicata tra gli alpeggi Le Bonde e La Preisa: vista lato sud [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]	176

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Parametri principali: Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (Progetto IFFI).....	5
Tabella 2 – Ripartizione della superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione.....	7
Tabella 3 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Giani, 1992]	49
Tabella 4 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Hoek, 1990]	49
Tabella 5 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Pfeiffer and Bowen, 1989].....	49
Tabella 6 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Robotham et al.,1995]	50
Tabella 7 – Suddivisione della velocità media annua di spostamento	90
Tabella 8 – Suddivisione della coherence.....	93
Tabella 9 – Suddivisione dei trend.....	96
Tabella 10 – Tipi di suolo da Rockyfor3D e relativi valori di R_n [Dorren e Simoni, 2014]	112
Tabella 11 – Probabilità (in %) degli intervalli dell'angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, per tre classi di velocità usate da Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]	123
Tabella 12 – Probabilità (in %) della deviazione di caduta dovuta all'impatto contro un albero [Dorren e Simoni, 2014].....	124
Tabella 13 – Precisione dei valori di scabrezza della superficie [Dorren e Simoni, 2014].....	127
Tabella 14 – Valori di prima approssimazione dei parametri di input relativi al tipo di suolo.....	141
Tabella 15 – Valori di prima approssimazione dei parametri di input relativi alle aree sorgenti	142
Tabella 16 – Valori del parametro nrtrees sia con limite che senza limite superiore (DTM10).....	145
Tabella 17 – Valori del parametro nrtrees sia con limite che senza limite superiore (DTM5).....	148
Tabella 18 – Valori massimi dell'energia cinetica media e differenze in valore assoluto per DTM10 e DTM5	149
Tabella 19 – Valori dei parametri di input relativi alle aree sorgenti	151
Tabella 20 – Risultati delle simulazioni effettuate per la calibrazione dei parametri di input.....	151
Tabella 21 – Valori calibrati dei parametri di input relativi alle diverse tipologie di suolo e alle aree sorgenti	163
Tabella 22 – Tabella riassuntiva dell'analisi qualitativa degli elementi a rischio	168
Tabella 23 – Valori dei parametri relativi alla barriera paramassi creata per simulare il nuovo rilevato paramassi	171

Premessa

Le frane sono dei fenomeni che, a seconda di più condizioni, possono comportare delle conseguenze più o meno gravose. Non tutti sono consapevoli della loro pericolosità dal momento che non si tratta di fenomeni distribuiti ovunque, bensì locali; questo vuol dire che esistono dei territori maggiormente influenzati da essi. Un esempio è l'Italia, un paese costituito da una buona percentuale di aree montane in cui le frane si manifestano con maggior frequenza; una delle regioni italiane in cui si contano ogni anno molti eventi franosi è il Piemonte.

Lo scopo di questa Tesi è quello di descrivere in sintesi un argomento molto vasto, ovvero i fenomeni franosi; nel corso degli anni sono stati portati avanti molti studi ad esso incentrati, con lo sviluppo di numerose teorie e classificazioni per poter discriminare una tipologia di frana da un'altra in modo da intervenire adeguatamente in termini sia di monitoraggio che di opere strutturali, e non strutturali, di protezione. Nonostante ciò, esistono ancora delle lacune, alcune delle quali riguardano le deformazioni gravitative profonde di versante, comunemente note con l'acronimo DGPV, che si presentano come dei fenomeni tanto lenti quanto gravosi se in determinate condizioni topografiche e di esposizione di elementi vulnerabili. La loro caratteristica di evolvere lentamente richiede delle particolari tecniche di monitoraggio, in continuo perfezionamento, e parecchi anni al fine di poter fornire delle spiegazioni sulla loro natura.

Nelle pagine seguenti viene analizzato il caso studio relativo ad un evento franoso avvenuto il 13 novembre 2021 a sud-est del Comune piemontese di Campertogno, in Valsesia (VC), che ha interessato la Strada Provinciale 299 senza provocare danni a persone e veicoli; in particolare, il presente elaborato risulta suddiviso in più capitoli. Inizialmente, viene proposto un inquadramento generale introduttivo sulla situazione franosa in Italia e in Piemonte. Nel secondo capitolo vengono analizzati i fenomeni franosi nei loro aspetti generali in termini di nomenclatura, cause predisponenti e scatenanti, e classificazioni varie a seguito di un breve richiamo normativo. Nel terzo capitolo si entra con maggior dettaglio nella tipologia principale caratterizzante l'area di studio, ovvero le deformazioni gravitative profonde di versante, in cui si descrivono inizialmente le proprietà generali, per passare alle cause predisponenti e scatenanti proprie di questa particolare categoria di frana, e terminare con i sistemi di monitoraggio più appropriati. Nel capitolo successivo si propone la descrizione della seconda tipologia di frana riscontrata nel territorio in analisi, ovvero la caduta massi; nel dettaglio, si menzionano le cause predisponenti e scatenanti, le varie fasi in cui il fenomeno in questione evolve e i sistemi di monitoraggio più adeguati. Nel quinto capitolo si entra nel caso studio vero e proprio fornendo degli inquadramenti vari in modo tale da descrivere il Comune di Campertogno prima in termini generali e poi con maggiori dettagli sull'area in esame. A seguito degli inquadramenti introduttivi si procede con la descrizione del suddetto evento franoso nelle sue caratteristiche generali e delle analisi preliminari che sono state condotte dallo Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC). Sempre nel medesimo capitolo viene descritto il rilevamento di campagna avvenuto il 14 luglio 2022, suddiviso nelle varie tappe effettuate per evidenziare tutti gli aspetti osservati durante il percorso. Il capitolo sesto è dedicato alla descrizione di alcuni dati acquisiti tramite interferometria satellitare di Arpa Piemonte, relativi agli spostamenti osservati nel tempo di alcuni punti distribuiti sul territorio presi come riferimento per il monitoraggio del versante nel suo complesso; questi dati sono stati elaborati al fine di ricavare più informazioni possibili utili allo studio del fenomeno franoso presente nell'area analizzata. Nel settimo capitolo si propone una descrizione approfondita del software Rockyfor3D utilizzato per svolgere l'analisi numerica. Nel capitolo seguente, l'ottavo, viene trattata l'analisi numerica vera e propria relativa al caso studio. Inizialmente, si pone l'attenzione su alcuni aspetti quali l'importanza del modello digitale del terreno utilizzato per lo svolgimento delle simulazioni, scelta che comporta non poche differenze

nei risultati finali, e la densità di alberi, ovvero il numero di alberi per ettaro da definire tra i parametri di input al codice di calcolo. Nel seguito viene descritta la calibrazione dei parametri di input che è stata condotta mediante una Back Analysis sulla base dell'evento registrato nel novembre 2021. A partire dai parametri calibrati è stata simulata un'analisi previsionale al fine di individuare le traiettorie che i blocchi provenienti da più aree sorgenti potrebbero percorrere, la quale viene descritta nel medesimo capitolo. Nel capitolo nove vengono esposte delle considerazioni qualitative sugli elementi a rischio individuati sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi previsionale, in termini di esposizione, vulnerabilità, valore degli elementi stessi e costi. L'ultimo capitolo, il decimo, è dedicato alla verifica degli interventi realizzati in somma urgenza a seguito dell'evento franoso del novembre 2021, essendo stati dimensionati senza considerare le potenziali nicchie di distacco emerse in tempi successivi, e alla proposta di possibili soluzioni relative a interventi di protezione e sistemi di monitoraggio.

A seguito di tutto ciò sono riportati: la conclusione, con gli aspetti principali emersi da questo lavoro, i ringraziamenti, la bibliografia e la sitografia.

Infine, esternamente all'elaborato scritto sono stati predisposti l'allegato fotografico e l'allegato grafico: il primo è costituito dalle fotografie più significative rappresentanti sia le conseguenze dell'evento accaduto sia alcuni elementi morfologici da tenere sotto periodica osservazione; il secondo è costituito da varie tavole grafiche elaborate su QGIS rappresentanti gli inquadramenti generali del territorio, il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022, l'analisi dei dati satellitari, i principali scenari ottenuti dalle simulazioni numeriche, e le considerazioni finali relative agli elementi a rischio e agli interventi.

1 Introduzione

I fenomeni franosi sono particolarmente frequenti sul territorio nazionale tanto da richiedere sempre di più attività di monitoraggio e interventi, sia strutturali che non strutturali, al fine di prevenire e gestire il rischio da essi indotto. Questi studi necessitano una conoscenza molto approfondita di tali fenomeni, che si presentano con geometrie e dinamiche differenti in base al materiale coinvolto e ad altre condizioni al contorno come la presenza di acqua o la configurazione del versante in cui si originano; queste condizioni fanno sì che i fenomeni franosi richiedano monitoraggio ed interventi decisamente differenti. È importante fare riferimento agli eventi che sono accaduti nel passato al fine di poter studiare al meglio questi fenomeni e identificare le aree più a rischio. A tale scopo è nato il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), realizzato da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) assieme alle Regioni e Province Autonome; questo Progetto consiste in una banca dati nazionale ed ufficiale sulle frane, sviluppatosi soprattutto a causa di alcuni eventi disastrosi, tra cui quello di Sarno avvenuto il 5 maggio 1998. Assume fondamentale importanza non solo per quanto riguarda la progettazione e la pianificazione territoriale, ma anche per la valutazione della pericolosità da frana presente nei PAI (Piani di Assetto Idrogeologico) e per la redazione dei Piani di Emergenza di Protezione Civile.

I dati forniti dall'IFFI sono una conferma di quanto l'Italia sia suscettibile ad eventi franosi; difatti, ad oggi sono state censite 624601 frane sul territorio nazionale, circa i 2/3 delle frane censite in Europa, interessanti un areale di circa 24000 km², ovvero il 7,9% dell'intero territorio. Ciò è dovuto all'assetto geo-morfologico italiano, costituito da aree montano-collinari per il 75%. Nella Figura 1 è possibile osservare la distribuzione delle frane in Italia sulla base dell'indice di franosità, ottenuto dal rapporto tra l'area in frana e la superficie totale calcolato su una maglia avente lato di 1 km. Mentre nella Tabella 1 sono forniti la suddivisione delle frane a livello regionale, il numero di eventi franosi principali censiti nel 2020, la densità delle frane indicante il numero di frane ogni 100 km², l'indice di franosità prima menzionato e l'indice di franosità su territorio montano-collinare, che identifica l'incidenza della franosità sul territorio regionale potenzialmente interessato da fenomeni franosi.

La registrazione delle frane nell'Inventario IFFI è avvenuta prevalentemente mediante la tecnica dell'aerofotointerpretazione, ma sono stati consultati anche dati storici o d'archivio e sono stati condotti dei rilevamenti di campagna. Tuttavia, in alcuni casi si è scelto di integrare più metodi; questo perché l'unione di più tecniche permette di fare fronte ai limiti delle tecniche stesse prese singolarmente. Ad esempio, nel caso di dati storici talvolta il numero di frane è sottostimato, in particolare nelle zone povere di abitazioni e con una minore presenza di opere antropiche. Al contrario, le zone urbanizzate possono rendere complicata l'identificazione di fenomeni quiescenti, e quindi suscettibili di riattivazione, così come la presenza di una fitta vegetazione o la pratica di attività agricole, le quali ne determinano un rimodellamento.

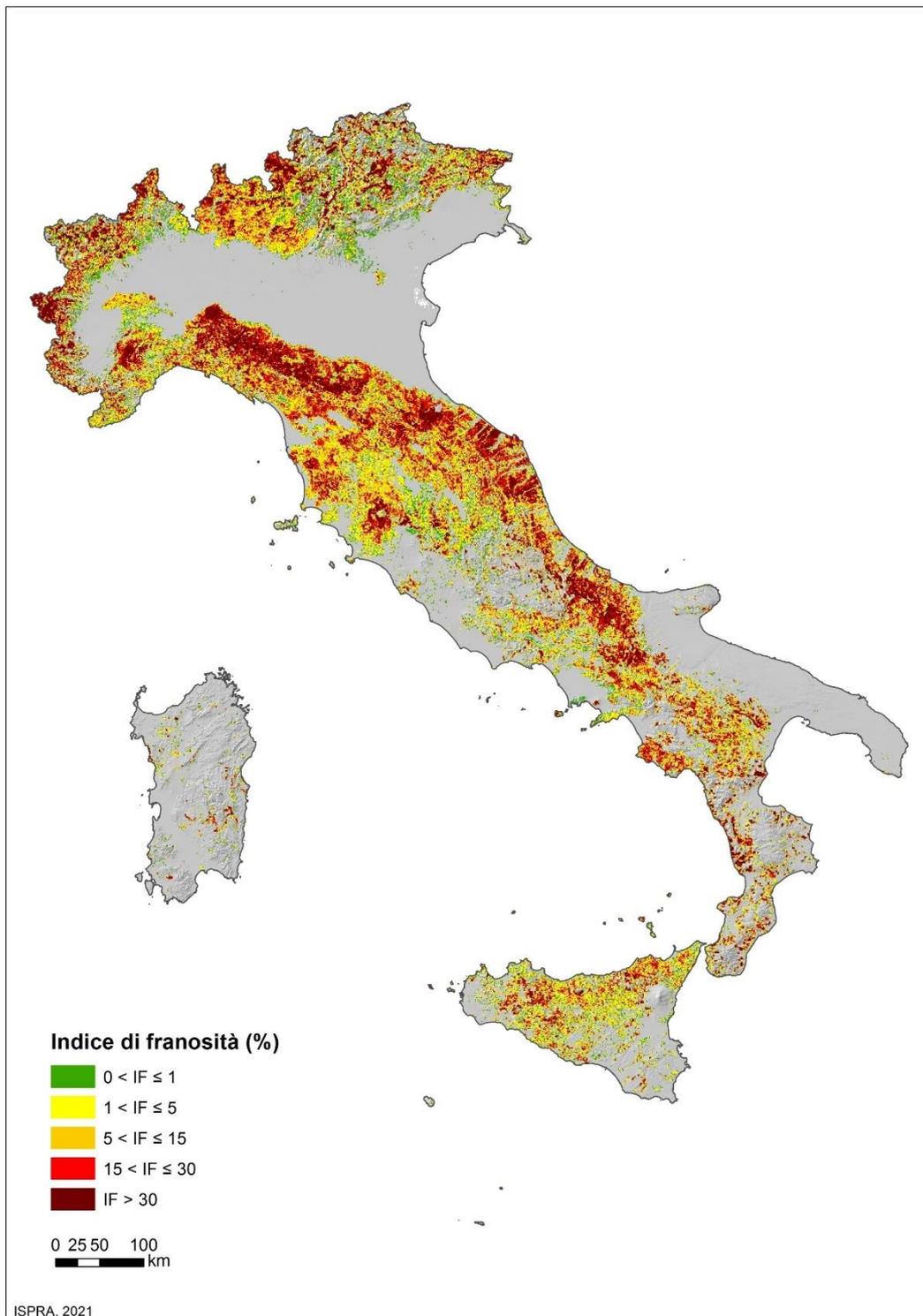


Figura 1 – Distribuzione delle frane in Italia secondo l'indice di franosità relativa al 2021
[\[https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/737\]](https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/737)

Tabella 1 – Parametri principali: Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (Progetto IFFI)
[https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/737]

Regione / Provincia autonoma	Area Regione/Provincia Autonoma ⁽¹⁾	Numero di frane ⁽²⁾	Numero di eventi franosi principali 2020	Densità delle frane	Area interessata da frane	Indice di Franosità ⁽³⁾	Indice di Franosità su territorio montano-collinare
	km ²	n.	n.	n./100 km ²	km ²	%	%
Piemonte	25387	36781	12	145	2410	9.5	12.8
Valle d'Aosta	3261	5812	3	178	607	18.6	18.6
Lombardia	23863	142007	25	595	3880	16.3	34.2
Bolzano-Bozen ⁽⁴⁾	7398	10978	1	148	806	10.9	11.1
Trento	6207	9397	11	151	888	14.3	14.6
Veneto	18345	9445	16	51	232	1.3	3.2
Friuli Venezia Giulia	7932	5822	2	73	526	6.6	11.7
Liguria	5416	13475	8	249	536	9.9	10.1
Emilia Romagna	22445	79893	1	356	2738	12.2	24.4
Toscana	22987	115625	7	503	2541	11.1	13.1
Umbria	8464	34573	3	408	654	7.7	8.7
Marche	9401	39833	5	424	1723	18.3	19.9
Lazio	17232	10548	6	61	400	2.3	2.9
Abruzzo	10831	8493	4	78	1242	11.5	11.9
Molise	4460	23940	1	537	623	14.0	14.8
Campania	13671	23439	7	171	977	7.1	8.8
Puglia	19541	843	0	4	84	0.4	1.0
Basilicata	10073	17673	0	175	774	7.7	8.2
Calabria ⁽⁵⁾	15222	10100	3	66	885	5.8	6.4
Sicilia	25833	24401	3	94	1238	4.8	5.5
Sardegna	24099	1523	4	6	186	0.8	0.9
ITALIA	302068	624601	122	207	23950	7.9	10.6

⁽¹⁾ Limiti ISTAT 2021.

⁽²⁾ I dati sono aggiornati al 2021 per la Provincia Autonoma di Bolzano; al 2018 per la Regione Umbria; al 2016 per le regioni Emilia-Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Piemonte, Sicilia e Valle d'Aosta; al 2015 per la regione Toscana; al 2014 per le regioni Basilicata e Lombardia. Per le restanti regioni i dati sono aggiornati al 2007.

⁽³⁾ L'indice di franosità esprime il rapporto tra l'area in frana e l'area totale.

⁽⁴⁾ La Provincia Autonoma di Bolzano, con riferimento alle tipologie di movimento "Aree con crolli/ribaltamenti diffusi" e "Aree con frane superficiali diffuse", ha censito nell'Inventario IFFI solo quelle la cui area di influenza insiste su zone abitate, su infrastrutture di rilevanza comunale o su attività turistiche strategiche.

⁽⁵⁾ I dati relativi alla Calabria risultano sottostimati rispetto alla reale situazione di dissesto poiché la regione Calabria – Autorità di Bacino Regionale ha effettuato l'attività di censimento dei fenomeni franosi prevalentemente nelle aree in cui sorgono centri abitati o interessate dalle principali infrastrutture lineari di comunicazione.

Nella Figura 2 è fornita la distribuzione delle diverse tipologie di movimento espressa in percentuale; si nota come si verificano più frequentemente scivolamenti rotazionali/traslattivi, con una percentuale pari al 31,81%, a cui seguono i colamenti rapidi, presenti nel 14,99% dei casi, i colamenti lenti, con percentuale del 12,67%, le frane di tipo complesso per il 9,50%, e le aree con crolli/ribaltamenti diffusi per il 9,28%. Mentre si osservano raramente aree con frane superficiali diffuse (6,03%), fenomeni di crollo/ribaltamento (4,17%), DGPV (0,26%), frane da sprofondamento (0,07%), ed infine aree con sprofondamenti diffusi ed espansioni, entrambe con percentuale dello 0,01%. Molti fenomeni franosi sono suscettibili a riattivazioni nel tempo; difatti, al verificarsi di intensi eventi pluviometrici, è possibile osservare alternanze tra periodi di quiescenza, anche di parecchi anni, e periodi di rimobilizzazione.

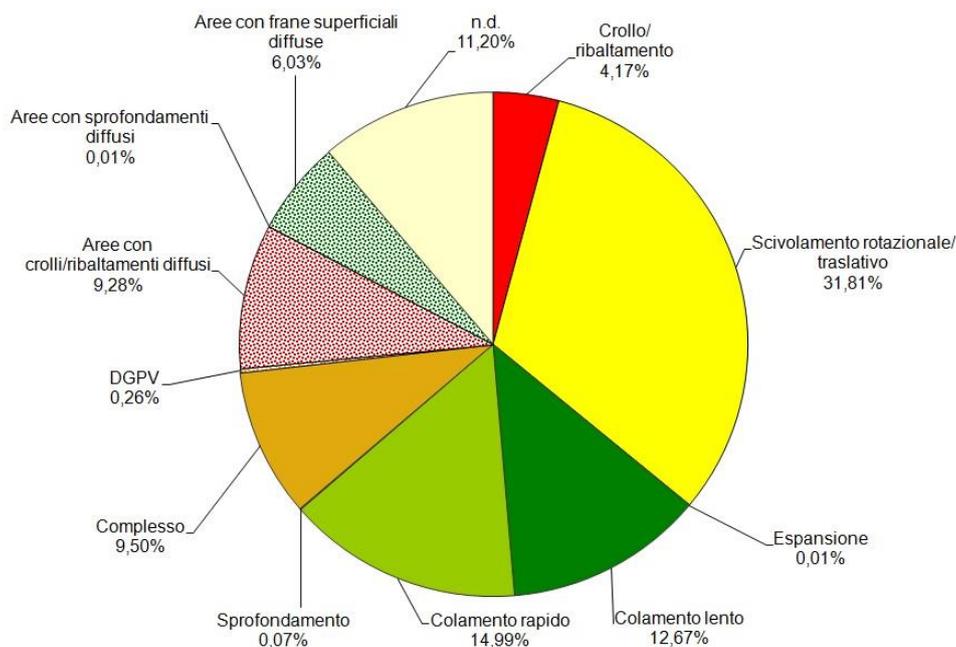


Figura 2 – Distribuzione percentuale delle tipologie di movimento
[\[https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/737\]](https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/737)

Inoltre, è stata realizzata una mosaicatura delle aree a pericolosità da frana secondo una suddivisione in cinque classi:

- AA – aree di attenzione, corrispondenti alle aree che non sono state ancora associate alle altre quattro classi. È necessario uno studio geomorfologico per determinare il livello di pericolosità al fine di realizzare degli interventi;
- P1 – pericolosità moderata, laddove sono ammessi gli interventi previsti dagli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica;
- P2 – pericolosità media, laddove sono ammessi gli interventi previsti dagli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, previo studio di compatibilità;
- P3 – pericolosità elevata, laddove sono ammessi gli interventi previsti per le aree a pericolosità molto elevata, interventi di ampliamento di edifici preesistenti, interventi di ampliamento degli impianti di trattamento delle acque reflue e la realizzazione di nuovi impianti di questo tipo;
- P4 – pericolosità molto elevata, laddove sono permessi unicamente interventi di demolizione, interventi di riduzione della vulnerabilità degli edifici preesistenti, le opere di bonifica dei siti contaminati, interventi di sistemazione dei versanti, interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, e la realizzazione di infrastrutture essenziali non delocalizzabili.

Va sottolineato come le aree a pericolosità da frana non si riferiscano unicamente alle frane che si sono già verificate, ma anche alle zone soggette a possibile evoluzione dei fenomeni e potenzialmente suscettibili a nuovi fenomeni franosi. Questa suddivisione del territorio nazionale è stata effettuata sulla base dei dati provvisti dalle Autorità di Bacino Distrettuali e dalle Province Autonome di Trento e Bolzano; la valutazione e la mappatura sono avvenute diversamente tra le Autorità di Bacino, le Regioni e le Province Autonome, dal momento che sono state utilizzate varie metodologie quali il metodo qualitativo a matrice, il metodo geomorfologico, i metodi quantitativi statistici e approcci di tipo misto, che corrispondono ad una combinazione di più metodi. Ogni metodo si basa sull'inventario delle frane e su alcuni parametri quali tipologia di movimento, stato di attività, probabilità di accadimento, velocità dei fenomeni franosi e severità geometrica in termini di spessore coinvolto o dimensioni dei blocchi; inoltre, il metodo geomorfologico basa la zonizzazione a seconda dei fenomeni franosi in atto, di indizi morfologici associati all'instabilità e delle litologie predisposte alla franosità, mentre i metodi quantitativi statistici si basano sulla probabilità che le aree già interessate da frane in passato lo saranno anche in futuro. Per la Regione Piemonte (ex Autorità di Bacino del Fiume Po), che è la regione di interesse per i fini di questo elaborato, è stato utilizzato il metodo qualitativo a matrice con modello ad un parametro, ovvero l'attribuzione della classe di pericolosità è avvenuta sulla base dello stato di attività della frana.

I dati aggiornati al 2021 affermano come la superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione sia pari a 60481 km², ovvero il 20% di tutto il territorio nazionale, suddivisa come riportato nella Tabella 2 e rappresentato graficamente in Figura 3 e in Figura 4.

Tabella 2 – Ripartizione della superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione
[\[https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/730\]](https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/730)

Classi	Superficie	
	km ²	%
AA	6988	2,3
P1	12556	4,2
P2	14551	4,8
P3	16891	5,6
P4	9495	3,1

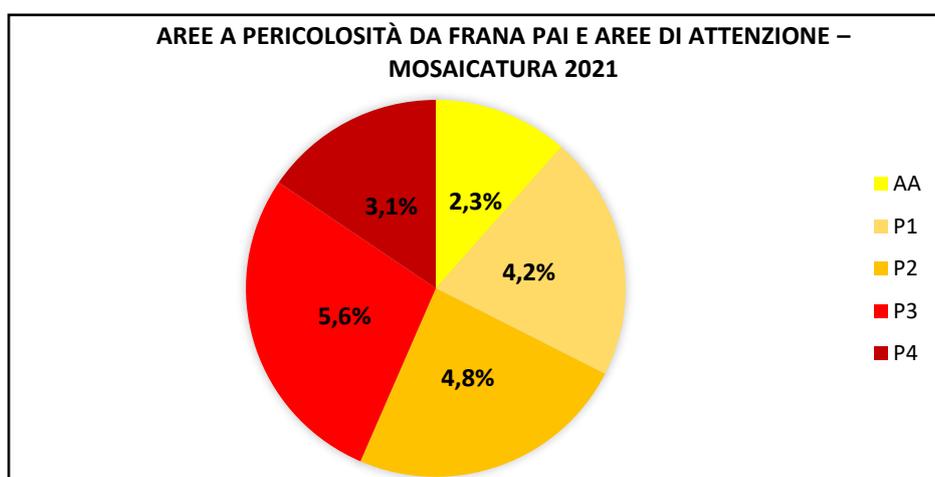
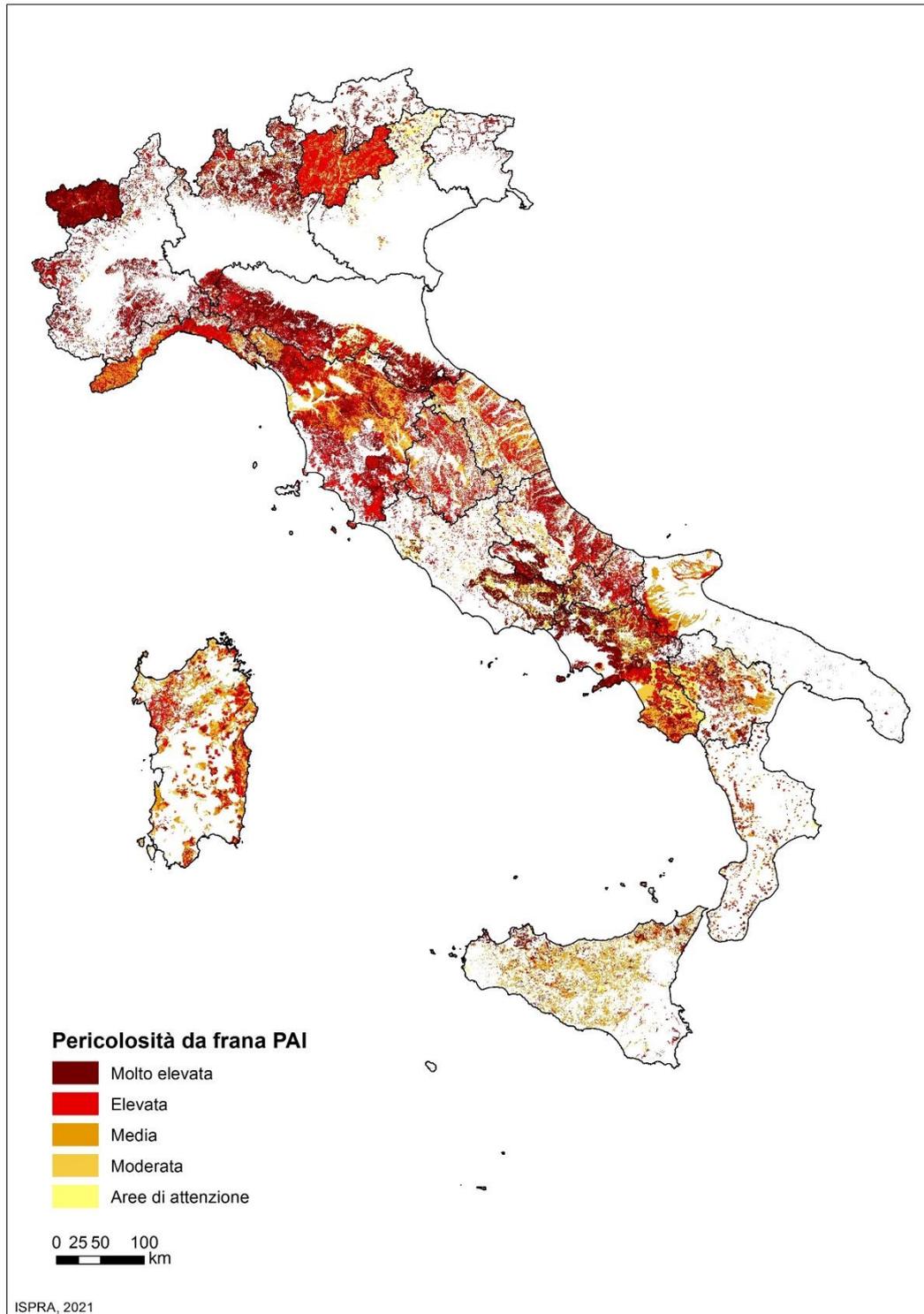


Figura 3 – Rappresentazione grafica relativa alla ripartizione della superficie complessiva delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione



*Figura 4 – Rappresentazione della pericolosità da frana PAI relativa al 2021
[https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/730]*

Confrontando i dati aggiornati al 2021 con quelli relativi al 2017 si è osservato come l'area totale classificata dai PAI sia aumentata dello 0,8%, mentre risultava un incremento del 2,9% confrontando i dati del 2017 con quelli del 2015; queste variazioni sono dovute a studi più dettagliati e alla mappatura di ulteriori fenomeni franosi.

Per quanto riguarda la Regione Piemonte, in base ai dati precedentemente riportati si può dire come sia interessata da fenomeni franosi, anche se in misura minore rispetto ad alcune delle altre regioni. Ciò è concorde con l'estensione del territorio montano-collinare, essendo quello potenzialmente interessato da fenomeni franosi; difatti, il Piemonte, caratterizzato da una superficie di 25387 km², si presenta per la maggior parte montuoso, circa il 43%, con territori collinari per circa il 30% e pianeggianti per il restante 27% (Figura 5, Figura 6).

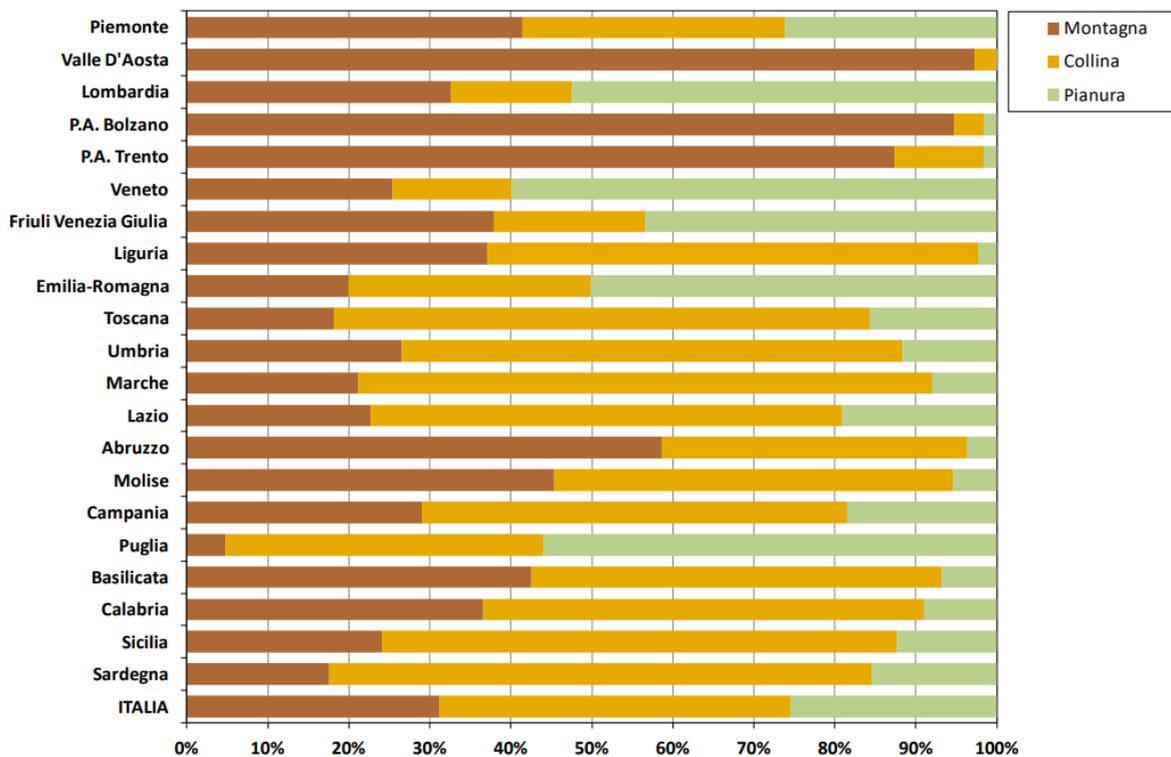


Figura 5 – Distribuzione percentuale del territorio di montagna, collina e pianura
[\[https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/rapporto_dissesto_idrogeologico_italia_ispra_356_2021_finale_web.pdf\]](https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/rapporto_dissesto_idrogeologico_italia_ispra_356_2021_finale_web.pdf)

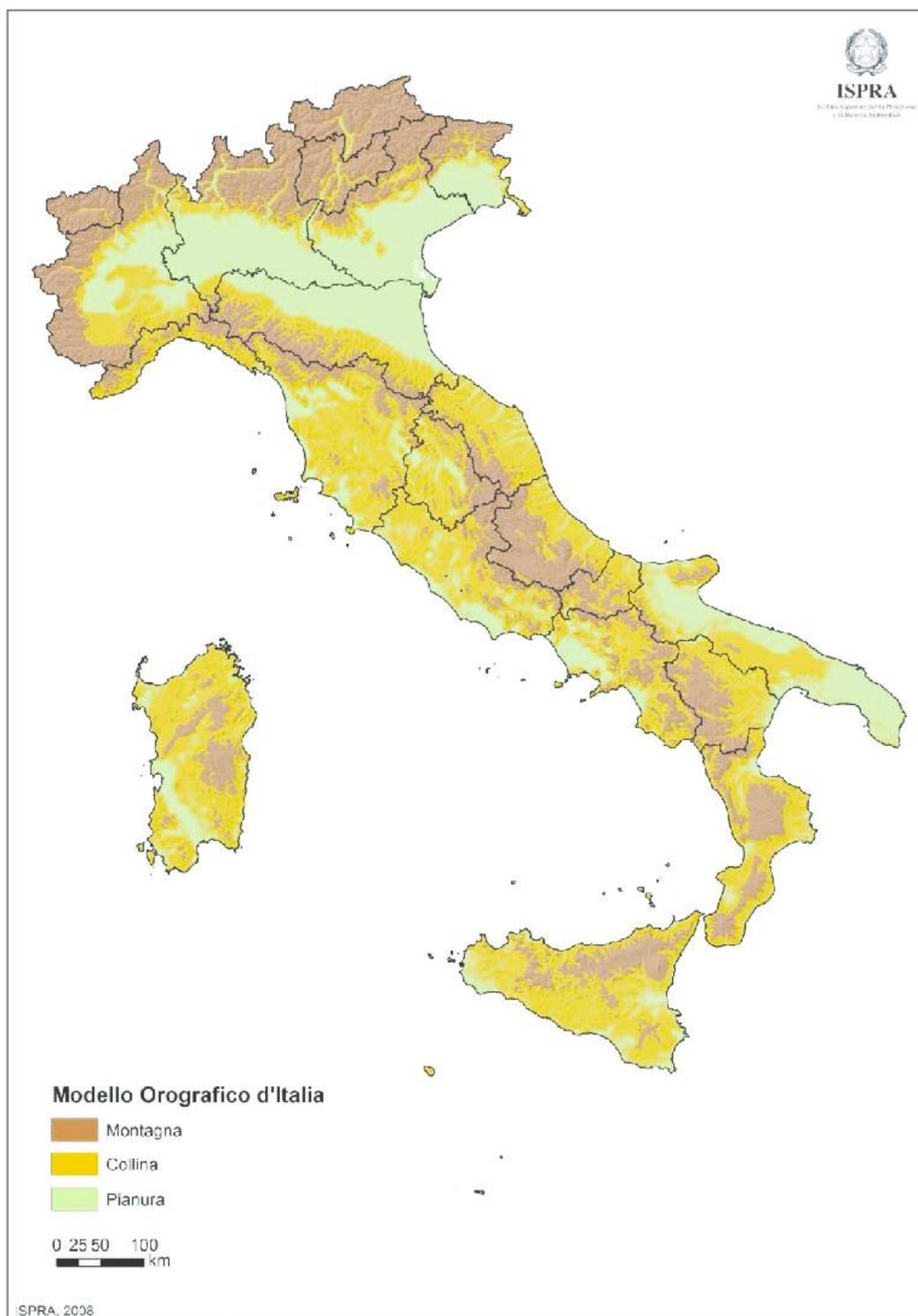


Figura 6 – Modello Orografico d'Italia, ottenuto dal DEM 20x20 metri, che classifica come “pianura” i territori a quota altimetrica <300 m ed acclività <3°; “collina” le aree con acclività >3° o quota compresa tra 300 e 600 m; “montagna” i territori a quota >600 m
 [https://www.researchgate.net/figure/Figura-112-Modello-Orografico-dItalia-ottenuto-dal-DEM-20x20-metri-che-classifica_fig2_296678030]

2 I fenomeni franosi

Un fenomeno franoso è definito come lo spostamento verso il basso e verso l'esterno del materiale che costituisce un pendio, sia esso naturale o artificiale. Questi fenomeni sono caratterizzati da vari cinematismi e geometrie a seconda di più condizioni quali il tipo di materiale coinvolto nel movimento, il grado di saturazione, ma anche la configurazione del versante. Inoltre, si possono generare volumi di varie dimensioni, anche superiori al miliardo di metri cubi, che si spostano con velocità estremamente variabili, da pochi millimetri all'anno a metri al secondo. Questi fattori portano alla necessità di classificare i fenomeni franosi al fine di identificare le tecniche di monitoraggio più opportune, nonché gli interventi di protezione adeguati al contesto che si sta analizzando. Nei paragrafi successivi si propone una descrizione più approfondita su questi fenomeni, i quali si suddividono principalmente in fenomeni di intensa erosione e frane, in relazione alla terminologia, alle più comuni classificazioni elaborate negli anni e alle principali cause predisponenti e scatenanti, in seguito ad un breve richiamo sugli aspetti normativi che regolano questi processi di modifica del paesaggio geologico.

2.1 Richiami normativi

Negli anni la normativa italiana sul dissesto idrogeologico si è evoluta parallelamente al verificarsi di eventi disastrosi. Si cominciò a trattare il tema della salvaguardia dei boschi già nella seconda metà dell'Ottocento con il Regio Decreto n. 3918/1877, introducendo il concetto di vincolo forestale. All'inizio del Novecento l'attenzione venne posta sulla difesa delle infrastrutture e dei centri abitati dal dissesto idrogeologico, con la Legge n. 293/1904, e sugli eventi alluvionali, con il primo testo unico sulle opere idrauliche, ovvero il Regio Decreto n. 523/1904 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie"; questi interventi normativi furono connessi all'incremento dell'antropizzazione nelle aree di pianura con conseguente abbandono delle aree collinari, da cui nacque la necessità di tutelare le aree boschive. Per tale motivo, nel 1910 e nel 1911 vennero emanate rispettivamente le Leggi n. 277 e n. 774; nel dettaglio, mentre la prima fu indirizzata alla costituzione del demanio forestale mediante l'acquisto di boschi e terreni, la seconda fu relativa alla sistemazione forestale e idraulica dei bacini montani. Successivamente, nel 1923 si cercò di limitare l'azione antropica con il Regio Decreto n. 3267 per il quale al vincolo idrogeologico corrisponde la conservazione dell'ambiente fisico; in particolare, si cominciò a parlare di uso del suolo, stabilendo le modalità di utilizzazione e di lavorazione dei suoli per proteggerli da fenomeni erosivi e, di conseguenza, dal verificarsi di eventi franosi. Altre norme che segnarono la storia in materia di dissesto idrogeologico riguardano il Regio Decreto n. 1126 del 1926 e il Regio Decreto n. 215 del 1933; con il primo vennero stabiliti dei criteri al fine di delimitare le aree sottoposte a vincolo, con il secondo vennero definite le opere di bonifica da attuare nei terreni montani dissestati dai punti di vista idrogeologico e forestale.

Dal Dopoguerra la normativa subì altre modifiche in seguito alle piene del Reno nel 1949, nel 1950 e nel 1951, alle piene del Po nel 1949 (Torino) e nel 1951 (Polesine), e alle alluvioni in Calabria, Sardegna e Sicilia nel 1951; in particolare, vennero redatte la Legge n. 184/1952, per la quale al Governo venne affidato l'incarico di predisporre ed attuare un piano orientativo relativo alla regolazione delle acque con indicazione delle opere da realizzarsi, e la Legge n. 11/1962 "Piano di attuazione per una sistematica regolazione dei corsi di acqua naturali". Negli anni '60 l'Italia fu interessata da ulteriori eventi quali il disastro del Vajont (1963) che causò 1917 vittime, l'alluvione di Firenze (1966), e le alluvioni che colpirono le aree alpine (Veneto, Trentino e Friuli). A seguito di questi eventi ci fu una svolta, quando venne istituita la Commissione De Marchi per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo con l'emanazione della Legge n. 632/1967; la relazione conclusiva della Commissione De Marchi (1970) prevede la progettazione di serbatoi di laminazione

delle piene al fine di attenuare il picco di piena in arrivo da monte, rilasciando le portate verso valle in maniera più distribuita nel tempo, ma anche la scelta di unità territoriali per svolgere attività di pianificazione, gestione delle risorse idriche e interventi mirati alla difesa idraulica e alla sistemazione del suolo indipendentemente dai confini amministrativi, i cosiddetti bacini idrografici. Questi ultimi vennero definiti nella Legge n. 183 del 1989 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”, la quale introdusse le Autorità di Bacino, degli enti che operano sui bacini idrografici, e i Piani di Bacino, ovvero degli strumenti di pianificazione e coordinamento delle attività connesse alla difesa del suolo, all’utilizzo delle acque e alla loro tutela. Qualche anno prima, nel 1977, venne emanato il D.P.R. n. 616 mediante il quale vennero affidati alle Regioni i compiti relativi alla conservazione del suolo, alla sistemazione idrogeologica, alla manutenzione forestale e alla definizione del vincolo idrogeologico. Nel 1992 con la Legge n. 225 venne istituito il Servizio Nazionale della Protezione Civile a cui compete l’esercizio della funzione di protezione civile. Nel 1998 venne emanato il Decreto Legge n. 180, anche noto come Decreto Sarno in memoria dell’alluvione di Sarno, poi convertito nella Legge n. 267/1998 contenente delle misure urgenti con la finalità di prevenire il rischio idrogeologico. Con questa Legge venne affidata alle Autorità di Bacino la realizzazione dei PAI (Piani di Assetto Idrogeologico), incluse le mappature delle aree a rischio idrogeologico per alluvioni e frane. Nel 2000 fu emanata la Direttiva acque (Direttiva 2000/60), recepita in Italia qualche anno dopo, nel 2006, con il Decreto Legislativo n. 152 il quale istituì i Distretti idrografici, intesi come degli accorpamenti di più bacini idrografici. Si tratta della “Norma in materia ambientale” con cui vennero definite le competenze di più soggetti quali Stato, Regioni/Province Autonome e Autorità di Bacino, e descritti i contenuti dei Piani di Bacino e dei PAI.

2.2 Fenomeni di intensa erosione

Come accennato all’inizio del presente capitolo, i fenomeni franosi si suddividono in fenomeni di intensa erosione e frane. I primi possono interessare rocce lapidee fratturate e ammassi detritici, identificando la caduta di blocchi, o sedimenti fini, i ruscellamenti superficiali e i calanchi. Nella caduta di blocchi può essere sufficiente l’infiltrazione di acqua nelle fratture e discontinuità per mettere in moto i blocchi stessi. I calanchi, invece, sono tipiche forme di erosione superficiale accelerata da fossi e rivoli; si creano delle creste affilate a causa dell’erosione dovuta ai corsi d’acqua che ne provocano l’arretramento.

2.3 Frane

Le frane, chiamate anche dissesti o collassi, sono delle masse di roccia, detriti o terra in movimento lungo un pendio. Nello studio di questi fenomeni per le successive azioni, quali monitoraggio ed interventi di stabilizzazione, è necessario ricostruirne la dinamica individuando:

- Tipologia di ammasso roccioso;
- Cause predisponenti;
- Cause scatenanti;
- Velocità del dissesto;
- Prevedibilità del dissesto.

Difatti, in base alla tipologia di ammasso roccioso si possono verificare fenomeni differenti che possono raggiungere velocità estremamente variabili. Talvolta, le frane sono prevedibili grazie alla presenza di segni premonitori quali fratture di detensionamento, che indicano blandi movimenti del versante. Esse sono presenti nella maggior parte delle frane e sono dovute a vari fenomeni come ad esempio l’arretramento di

un ghiacciaio che provoca un rilascio, un'espansione del versante stesso, o l'erosione; sono fratture deboli in cui l'acqua può infiltrarsi aumentando il carico idraulico o, in periodi freddi, trasformarsi in ghiaccio provocando ulteriori spinte.

2.3.1 Terminologia

In un versante soggetto a frane si identificano principalmente tre zone: la zona di distacco, quella posta più in alto e dove ha origine la frana, la zona di scorrimento, situata al centro del versante e laddove il fenomeno raggiunge la massima velocità e si incanala in presenza di canali e gole, ed infine la zona di accumulo, laddove il fenomeno si ferma definitivamente ed accumula il materiale che ha trasportato con sé.

Nella Figura 7 è riportata la nomenclatura di un corpo frana, i cui termini principali sono:

- *Coronamento*: zona situata nella parte più alta del pendio in frana laddove è presente il materiale non coinvolto nel movimento;
- *Testata*: parte più alta del terreno franato;
- *Scarpata principale*: identifica la zona in cui è avvenuto il distacco e laddove è visibile la superficie di rottura;
- *Scarpata secondaria*: scarpata generata sul corpo frana in seguito a movimenti differenziali;
- *Corpo principale*: parte del materiale coinvolto nel movimento che ricopre la superficie di scorrimento;
- *Fianco*: materiale non coinvolto nel movimento adiacente ai lati della superficie di rottura. Si identificano i fianchi destro e sinistro riferiti osservando verso valle;
- *Superficie di scorrimento*: superficie su cui scorre il materiale coinvolto nel movimento. Lungo di essa si concentra il flusso idrico, dunque si riconosce un altro tipo di vegetazione che durante l'estate si presenta più verde di quella circostante proprio grazie all'acqua che la alimenta;
- *Piede*: intersezione tra la superficie di scorrimento e la superficie originaria del versante, identificata da crepe e rigonfiamenti;
- *Unghia*: margine inferiore situato alla maggior distanza dalla scarpata principale.

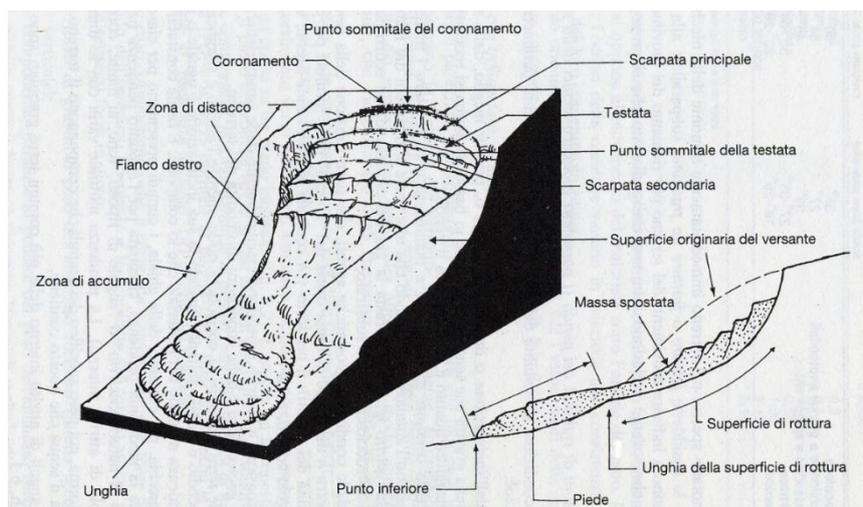


Figura 7 – Terminologia di un corpo frana

[<https://www.unife.it/scienze/lm.geologia/insegnamenti/geomorfologia-applicata/materiale-didattico/FRANE%20NOMENCLATURA%20ED%20INTERVENTI.pdf>]

2.3.2 Cause predisponenti e cause innescanti

Le cause predisponenti sono definite come quei fattori che predispongono un versante all'accadimento di un evento franoso, associati alle caratteristiche litologiche, strutturali, tessiturali e giaciture dei materiali che costituiscono il versante stesso. Ad esempio, la presenza di rocce fratturate può divenire causa di una caduta di blocchi, che possono raggiungere distanze elevate senza fratturarsi in blocchi più piccoli nel caso in cui il materiale di cui sono costituiti sia duro; ma ciò dipende anche dall'acclività del versante. Quest'ultimo fattore diviene molto importante parlando di colamenti; difatti, ne può influenzare sia la velocità sia la distanza raggiunta provocando danni più o meno gravi. Fondamentali sono le fratture, sia di detensionamento che quelle formatesi da processi tettonici come le faglie, ma anche i piani di stratificazione, ovvero i piani di contatto tra due strati di diversa litologia, ed i piani di scistosità, dei piani paralleli lungo i quali le rocce possono sfaldarsi in strati sottili; questi fattori giocano un ruolo importante quando sono disposti a franapoggio. Con questo termine si intende la disposizione di un piano, o di una frattura, con immersione concorde al pendio ed inclinazione inferiore al pendio stesso. In particolare, lungo le fratture ed i piani di stratificazione, specie se fortemente alterati, si può avere circolazione idrica che favorisce l'innescarsi di frane.

Le cause innescanti, o scatenanti, sono quei fattori che agiscono su un pendio innescando il movimento franoso. Generalmente, un evento franoso non è associato ad una sola causa, ma ad un'interazione sinergica di più cause. Esistono numerosi fattori geologici, idrologici, topografici e climatici che possono determinare l'innescamento di una frana. Uno dei fattori principali è l'acqua, derivante sia dalle precipitazioni che dalla fusione nivale. Le precipitazioni, soprattutto se di forte intensità, provocano un'azione battente sulle superfici dei versanti indebolendoli e favorendo lo sviluppo di fenomeni di intensa erosione. Tuttavia, assieme alla fusione nivale che si presenta come un processo lento, si può infiltrare nel terreno fino a raggiungere il substrato roccioso compatto; il terreno si satura più o meno velocemente in relazione alle sue caratteristiche di permeabilità portando al verificarsi di colamenti e scivolamenti. In presenza di versanti costituiti da roccia fratturata sovrapposta a substrato roccioso compatto, anche se della stessa litologia, si genera un flusso idrico in corrispondenza del contatto con la parte stabile; con l'incrementarsi dell'infiltrazione, i livelli idrici risalgono nelle fratture aumentando il carico idraulico e, di conseguenza, le sottospinte che innescano i dissesti. Inoltre, l'acqua che circola nelle fratture può trasportare del materiale solido che intasa le fratture stesse; anche in questo caso l'acqua risale nelle fratture e, grazie all'azione del gelo, incrementa il volume introducendo ulteriori spinte sfavorevoli alla stabilità. Tuttavia, gli apporti idrici non derivano unicamente dalle precipitazioni e dalla fusione della neve, ma anche da perdite da canali, canalette di scolo e condutture, e dal ruscellamento superficiale. Infine, è noto come la presenza di acqua sia connessa a fenomeni carsici che avvengono in rocce solubili quali calcari, dolomie ed evaporiti, a causa della dissoluzione del carbonato di calcio; il carsismo contribuisce al modellamento del paesaggio geologico con la creazione di grotte e cavità sotterranee a cui conseguono crolli e subsidenze.

Un altro fattore è l'erosione al piede dei versanti di origine naturale o artificiale, che ne determina l'arretramento e successivo cedimento. Anche i movimenti terra da parte dell'uomo e l'incremento del peso sono fattori innescanti fenomeni franosi; difatti, alcune lavorazioni quali la realizzazione di tagli stradali o gli scavi minerari possono favorire l'innescamento. La costruzione di opere vicino al margine del pendio può portare alla concentrazione di sforzi lungo il pendio stesso. Queste situazioni dipendono anche dal tipo di materiale che costituisce il versante, alcuni dei quali non sono in grado di sostenere dei pesi come le argille, o i gessi, che per la loro fragilità possono portare a crolli. Una causa molto comune è rappresentata dai terremoti e dalle vibrazioni di origine sia naturale che artificiale; talvolta degli errori durante l'esecuzione di lavori in

pendii instabili possono divenire fonte di conseguenze gravi, basti pensare alla perforazione di pali di grosso diametro o alle esplosioni. I terremoti, invece, inducono nel materiale un'accelerazione di intensità e direzione variabili nel tempo, ma che agisce sia orizzontalmente che verticalmente; in presenza di sabbie è possibile il verificarsi della liquefazione, un insieme di fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o all'accumulo di deformazioni permanenti in terreni saturi sottoposti ad azioni sia cicliche che dinamiche in condizioni non drenate. Tale processo, costituito da liquefazione ciclica, fluidificazione e mobilità ciclica, comporta il passaggio improvviso dallo stato solido allo stato liquido, in cui il materiale perde la sua consistenza originaria comportandosi come un fluido viscoso per incremento delle sovrappressioni interstiziali e conseguente annullamento delle tensioni efficaci. In particolare, prima del fenomeno sismico le particelle di sabbia sono a contatto tra loro con determinate tensioni efficaci; durante il fenomeno si è di fronte alla perdita dei contatti con accumulo di pressioni interstiziali tale da portare all'annullamento delle tensioni efficaci, fino a quando le sovrappressioni vengono dissipate con recupero dei contatti tra le particelle ed un loro addensamento. Questo processo comporta dei cedimenti, la formazione di vulcanelli di sabbia e crateri, espansioni laterali e, in presenza di manufatti, la perdita di capacità portante delle fondazioni e sviluppo di elevati cedimenti e rotazioni.

L'essiccamento comporta l'effetto opposto a quello indotto dalla presenza di acqua, in quanto la diminuzione del contenuto idrico favorisce sia la perdita di peso che il ritiro del materiale riducendo lo stato tensionale, da cui derivano fessure e/o lesioni.

Un ulteriore fattore innescante le frane è la presenza di invasi, ed in particolare i cicli riempimento-svuotamento, che possono comportare delle conseguenze negative sulla stabilità dei terreni costituenti le sponde e i fianchi della valle sovrastante l'invaso. Durante il riempimento l'acqua influisce negativamente aumentando il peso specifico dei terreni, eliminando le tensioni superficiali, e provocando eventuali fenomeni di dissoluzione; in fase di svuotamento, soprattutto in terreni poco permeabili, si possono creare delle sovrappressioni che riducono gli sforzi efficaci e, di conseguenza, la resistenza al taglio del terreno.

La vegetazione è un fattore che può partecipare sia positivamente sia negativamente alla stabilità dei versanti; difatti, essa permette la riduzione del quantitativo di acqua che si infiltra nel sottosuolo tramite il fogliame che intercetta la pioggia, ma anche la sottrazione di acqua dal sottosuolo stesso e, di conseguenza, delle pressioni, mediante la traspirazione. Inoltre, l'apparato radicale contribuisce a legare i grani alla superficie del suolo ostacolando l'erosione, e a rafforzare il sottosuolo conferendo un contributo aggiuntivo alla resistenza al taglio; si può affermare come la vegetazione partecipi analogamente ad un micropalo di fondazione. Tuttavia, nonostante il fogliame sfavorisca l'infiltrazione di acqua intercettando la pioggia, l'apparato radicale agisce contrariamente aumentando le asperità e la permeabilità della superficie del suolo. In più, la traspirazione rimuove parte di acqua dal sottosuolo, ma allo stesso tempo ne favorisce anche l'essiccamento. Dal punto di vista meccanico, invece, l'azione del vento sulla vegetazione può avere effetti negativi per il sottosuolo, che potrebbe trovarsi sottoposto a sollecitazioni dinamiche. Anche il peso della vegetazione influisce in modo favorevole o sfavorevole a seconda della sua posizione; essa comporta un carico aggiuntivo gravante sul pendio che può contribuire alla sua stabilità se non genera forze instabilizzanti. Gli incendi influiscono sullo sviluppo di fenomeni franosi attraverso la riduzione di vegetazione sul suolo, favorendo l'azione battente delle precipitazioni e, di conseguenza, il ruscellamento superficiale e l'erosione. Inoltre, il fuoco comporta la disgregazione delle particelle di terreno, alterandone la struttura e riducendone la permeabilità idraulica e la resistenza.

2.3.3 Classificazione delle frane

Le frane sono dei fenomeni particolarmente complessi dipendenti da più fattori; perciò, è importante definire una classificazione univoca, e quindi comune a tutti coloro che si occupano di questa tematica, che permetta una semplice e rapida distinzione durante un'osservazione in campo. Va detto che l'ampia variabilità di questi fenomeni, in termini di materiale coinvolto, cause predisponenti ed innescanti, tipologia e velocità del movimento, non rende immediata questa operazione; difatti, negli anni sono state elaborate varie classificazioni basate su differenti parametri.

Alcune di esse sono:

- La *classifica di Skempton (1953)*: si tratta di una classificazione morfometrica basata sullo spessore massimo della frana D e sulla lunghezza nella direzione di massima pendenza L . Secondo il rapporto tra questi due parametri vengono identificate tre tipologie di frane: scorrimenti rotazionali, scorrimenti traslazionali e flussi (Figura 8);

<i>Tipologia di frana</i>	<i>D/L [%]</i>
Scorrimenti rotazionali	15 ÷ 30
Scorrimenti traslazionali	5 ÷ 10
Flussi	0,5 ÷ 3,0

da Walker et al (1987)

Figura 8 – Classifica di Skempton (1953)

[https://corsofraneunisa2013.files.wordpress.com/2013/10/frane_aa2013-14_lezione_classifiche.pdf]

- La *classifica di Blong (1973)*: identifica quattro tipologie di frane in base al tipo e alla velocità di movimento, ovvero scorrimenti con uno o più piani di scivolamento paralleli al pendio, scorrimenti rotazionali con superfici di scorrimento curve, colate e crolli;
- La *classifica di Hutchinson (1988)*: distingue rotture confinate, scorrimenti rotazionali, scorrimenti composti, rotture traslazionali e colate veloci;
- La *classifica di Hungr et al. (2001)*: si basa sul tipo di materiale coinvolto, sul contenuto d'acqua e sulla velocità. Nella Figura 9 è riportata la classificazione.

<i>Materiale</i>	<i>Contenuto d'acqua</i>	<i>Velocità</i>	<i>Nome (ingl. - ital.)</i>
<i>Limi, sabbie, ghiaie, detriti (talus)</i>	Asciutto, umido o saturo	Varie	<i>Dry (or non-liquified) sand (silt, gravel o debris) flow</i> Colate di sabbia (limo, ghiaia, detrito) non-liquefatta/o
<i>Limi, sabbie, detriti, rocce tenere</i>	Saturo	Estr. rapide	<i>Sand (silt, debris, weak rock) flow slide</i> Scorrimenti di flusso di sabbia (limo, detrito, roccia tenera)
<i>Argille sensitive</i>	Pari o superiore al limite liquido	Estr. rapide	<i>Clay flow slide</i> Scorrimenti di flusso in argilla
<i>Torbe</i>	Saturo	Da lente a molto rapide	<i>Peat flow</i> Colate di torbe
<i>Argille o terre</i>	Prossimo al limite plastico	< rapide	<i>Earth flow</i> Colate di terra
<i>Detriti</i>	saturo	Estr. rapide	<i>Debris flow</i> Colate di detrito
<i>Mud</i>	Pari o superiore al limite liquido	> molto rapide	<i>Mud flow</i> Mud flow
<i>Detriti</i>	Presente acqua libera	Estr. rapide	<i>Debris flood</i> Alluvione detritico
<i>Detriti</i>	Saturo o parzialmente saturo	Estr. rapide	<i>Debris avalanche</i> Valanghe di detrito
<i>Frammenti di roccia</i>	Vario, principalmente asciutto	Estr. rapide	<i>Rock avalanche</i> Valanghe di roccia

Figura 9 – Classifica di Hungr et al. (2001)

[https://corsofraneunisa2013.files.wordpress.com/2013/10/frane_aa2013-14_lezione_classifiche.pdf]

Tuttavia, la classificazione più diffusa ed accettata a livello internazionale è quella elaborata da Varnes nel 1978 e rivista nel 1996 da Cruden. Questa classificazione è basata sul tipo di movimento, sul materiale coinvolto e sulla velocità del movimento (Figura 10, Figura 11, Figura 12).

Per quanto riguarda il materiale coinvolto si distinguono principalmente roccia (*rock*), ovvero un ammasso intatto e in posto prima del movimento, e terreno (*soil*), ovvero un aggregato di particelle solide generatesi dall'alterazione (*weathering*) della roccia in posto caratterizzato dalla presenza di gas o liquidi nei pori. A sua volta, il terreno si suddivide in:

- Terra (*earth*), un materiale in cui almeno l'80% delle particelle ha dimensioni inferiori a 2 mm, corrispondente al limite superiore delle sabbie;
- Fango (*mud*), un materiale in cui almeno l'80% delle particelle ha dimensioni inferiori a 0,06 mm, corrispondente al limite superiore del limo;
- Detrito (*debris*), un materiale costituito da una percentuale variabile da 20% a 80% di particelle con dimensioni superiori a 2 mm, mentre il restante ha dimensioni inferiori.

Sulla base di queste considerazioni, sono state individuate sei classi principali:

- Frane da crollo (*falls*): distacco di singoli massi o di porzioni di ammassi rocciosi da un pendio acclive lungo una superficie sulla quale non è avvenuto scivolamento o, in caso contrario, è stato di piccola entità. In seguito al distacco il materiale esegue una caduta libera seguita da rimbalzi e rotolamenti. Il movimento è rapido, dell'ordine di metri al secondo. Essendo di interesse per il presente elaborato, verranno analizzate più dettagliatamente nel seguito;
- Frane per ribaltamento (*topples*): si tratta di fenomeni rapidi, con velocità variabile da metri al minuto a metri al secondo, caratterizzati dalla rotazione di un blocco di roccia attorno ad un punto o asse situato al di sotto del suo baricentro a causa di un momento ribaltante. Avvengono in versanti

laddove del materiale coerente, quale arenaria o tufi vulcanici, poggia su del materiale fine e plastico, quali marne, argille o cineriti;

- Scorrimenti o scivolamenti traslazionali/rotazionali (*slides*): fenomeni in cui una massa di roccia o di terreno scivola lungo una o più superfici. Nel primo caso la superficie di scivolamento è piana e può avere una pendenza ridotta, anche di 10°; il versante è costituito da alternanze di materiali differenti, come ad esempio marne e arenarie, con piani di discontinuità a franapoggio. Sono causati dalle precipitazioni e, una volta innescati, evolvono in minuti; una volta raggiunto il fondovalle, possono creare degli sbarramenti dando origine a bacini idrici con possibili crolli successivi e formazione di onde di piena. I secondi, invece, interessano per lo più materiali fini ed evolvono più lentamente, talvolta quasi a intermittenza; anch'essi sono innescati da infiltrazione di acqua nel materiale, anche se con una dinamica più lenta dovuta alla bassa permeabilità. A differenza dei precedenti, la superficie di scivolamento non è preesistente, ma di neoformazione, ed assume una forma a mezzaluna. Si riconoscono a causa dei rigonfiamenti al piede, dei piani orizzontali presenti sul versante dovuti alla rotazione, e dell'inclinazione verso monte di oggetti quali alberi e pali della luce;
- Espansioni laterali (*lateral spreads*): fenomeni che si verificano quando un materiale a comportamento rigido, come una roccia, poggia su un materiale a comportamento plastico, come l'argilla. A causa delle deformazioni e della liquefazione del materiale plastico, il materiale rigido sovrastante si estende lateralmente con conseguenti fratturazione e subsidenza;
- Colate o flussi (*flows*): fenomeni in cui le superfici di scivolamento hanno vita breve e laddove le velocità all'interno della massa, che può essere satura o insatura, sono distribuite analogamente al caso di un fluido viscoso. Si tratta di fenomeni rapidi o lenti a seconda dell'acclività del versante, delle dimensioni della massa che compone la frana e del suo grado di saturazione. Si distinguono più tipologie di colate in base al materiale coinvolto, quali *soil slip*, caratterizzati da suolo poggiate su substrato roccioso, *mud flows*, ovvero colamenti lenti che coinvolgono materiali coesivi umidi, *debris flows*, delle colate rapide di detrito che si sviluppano nelle incisioni di torrenti montani (*debris torrent*) o sul versante di una valle (*debris avalanches*), e *bedrock flows*, ovvero deformazioni della roccia dovute a fenomeni di *creep* (deformazioni viscosi), accompagnate da movimenti differenziali molto lenti suscettibili di trasformarsi in scivolamenti.

In questa classe rientrano le *deformazioni gravitative profonde di versante* (DGPV), che assumono un ruolo importante nell'elaborazione del presente lavoro ed alle quali è dedicato un capitolo;

- Frane complesse o composite (*complex*): fenomeni franosi che avvengono in rocce lapidee fratturate anche a grande profondità, il cui movimento è il risultato della combinazione nel tempo e nello spazio dei movimenti descritti nei punti precedenti; si parla di combinazione nello spazio perché essendo fenomeni estesi si possono osservare più tipi di movimenti contemporanei nello stesso corpo frana, e di combinazione nel tempo perché un movimento può evolvere in un altro.

Inoltre, si parla anche di frane da sprofondamento (*sinkholes*), dei fenomeni rapidi, e che per questo non presentano fratture di detensionamento prima del loro verificarsi, associabili al collasso di cavità sotterranee sia di origine naturale, ad esempio cavità carsiche, che antropica, ad esempio cave e gallerie. Spesso le cause scatenanti vanno ricercate nelle precipitazioni che, infiltrandosi, saturano il terreno instabilizzandolo e facendolo collassare in una cavità sotterranea; talvolta l'innescò è dovuto anche a perdite idriche da condutture sotterranee che favoriscono fenomeni erosivi.

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		<p>Rock fall</p>	<p>Debris fall Scree Debris cone</p>	<p>Earth fall Colluvium Debris cone</p>
	TOPPLES	<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple Debris cone</p>	<p>Earth topple Debris cone</p>
SLIDES	Rotational	<p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	<p>Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface Toe</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	Translational (Planar)	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
SPREADS	<p>Cap rock Normal sub-horizontal structure Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge structure (planed off by erosion) Thinning of beds Plane of decollement Competent substratum</p> <p>e.g. cambering and valley bulging</p>			<p>Earth spread</p>
FLOWS	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>	
COMPLEX	<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>	

Figura 10 – Tipologie di frane secondo la classifica di Varnes e Cruden (1996)
[\[https://monito.irpi.cnr.it/wp-content/uploads/2022/06/image1.png\]](https://monito.irpi.cnr.it/wp-content/uploads/2022/06/image1.png)

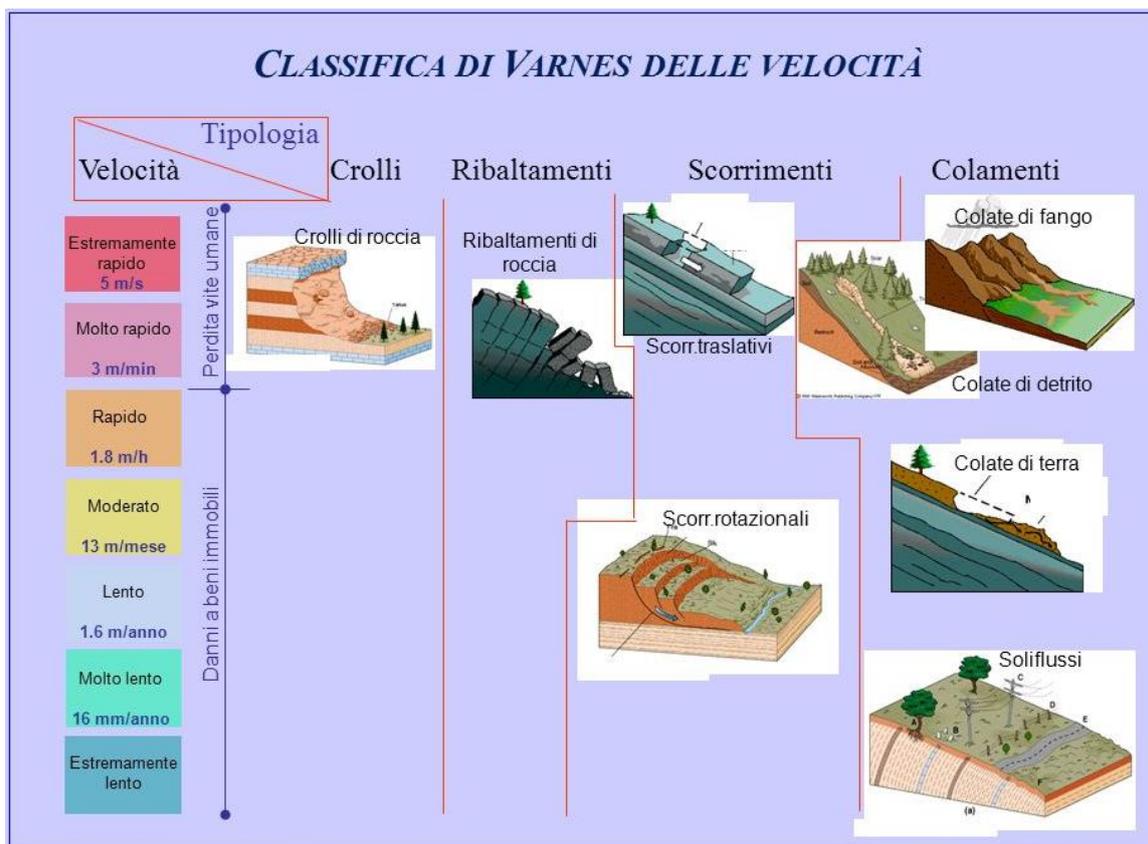


Figura 11 – Classifica di Varnes delle velocità
[\[https://slideplayer.it/slide/10669405/\]](https://slideplayer.it/slide/10669405/)

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità tipica	Velocità (m/s)
7	Estremamente rapida	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	> 5 m/s	5
6	Molto rapida	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	> 3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	Rapida	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	> 1.8 m/hr	$5 \cdot 10^{-4}$
4	Moderata	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	> 13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Lenta	Possibilità di intraprendere lavori di riabilitazione e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di riabilitazione se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	> 1.6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	Molto lenta	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	> 16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	Estremamente lenta	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzioni di edifici possibile con precauzioni.	< 16 mm/anno	

Figura 12 – Classifica di Varnes e Cruden (1996)
[\[https://corsofraneunisa2013.files.wordpress.com/2013/10/frane_aa2013-14_lezione_classifiche.pdf\]](https://corsofraneunisa2013.files.wordpress.com/2013/10/frane_aa2013-14_lezione_classifiche.pdf)

Tuttavia, le frane sono state classificate anche sulla base dello stato di attività nel tempo e della distribuzione d'attività nello spazio.

Nel primo caso si identificano (Figura 13):

1. Frana *attiva*: attualmente in movimento;
2. Frana *sospesa*: si è mossa durante l'ultimo ciclo stagionale, ma attualmente inattiva;
3. Frana *riattivata*: attiva dopo un periodo di inattività;
4. Frana *inattiva*: non si muove da più di un ciclo stagionale;
5. Frana *quiescente*: inattiva ma suscettibile di riattivazione;
6. Frana *naturalmente stabilizzata*: inattiva e non più influenzata da cause scatenanti;
7. Frana *artificialmente stabilizzata*: inattiva in seguito a misure di stabilizzazione;
8. Frana *relitta*: paleofrana inattiva che si è verificata in condizioni geomorfologiche o climatiche diverse dalle attuali.

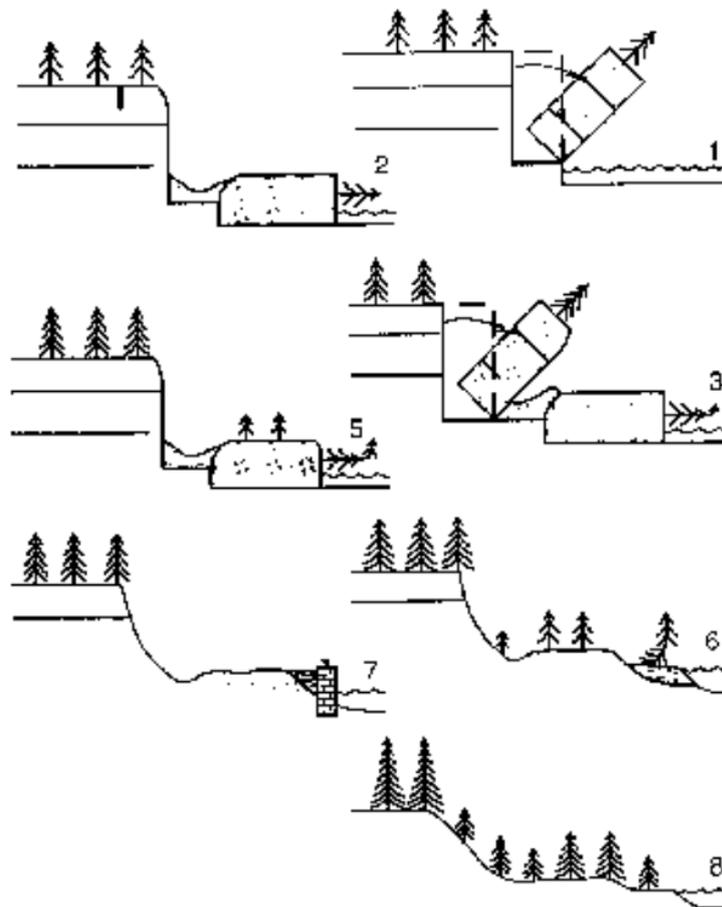


Figura 13 – Rappresentazione dei diversi stati di attività nel tempo
[[http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20\(ac tive\)%3A%20attualmente,prima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale](http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20(ac tive)%3A%20attualmente,prima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale)]

Nel secondo caso si identificano (Figura 14):

1. Frana *in avanzamento*: la superficie di rottura si propaga nella direzione del movimento;
2. Frana *retrogressiva*: la superficie di rottura si propaga in direzione opposta a quella del movimento;
3. Frana *multidirezionale*: la superficie di rottura si propaga in due o più direzioni;
4. Frana *in diminuzione*: il volume del materiale spostato diminuisce nel tempo;
5. Frana *confinata*: la superficie di rottura non è visibile;
6. Frana *costante*: il corpo frana si sposta senza cambiamenti della superficie di rottura e del volume del materiale movimentato;
7. Frana *in allargamento*: la superficie di rottura si propaga su uno od entrambi i margini laterali.

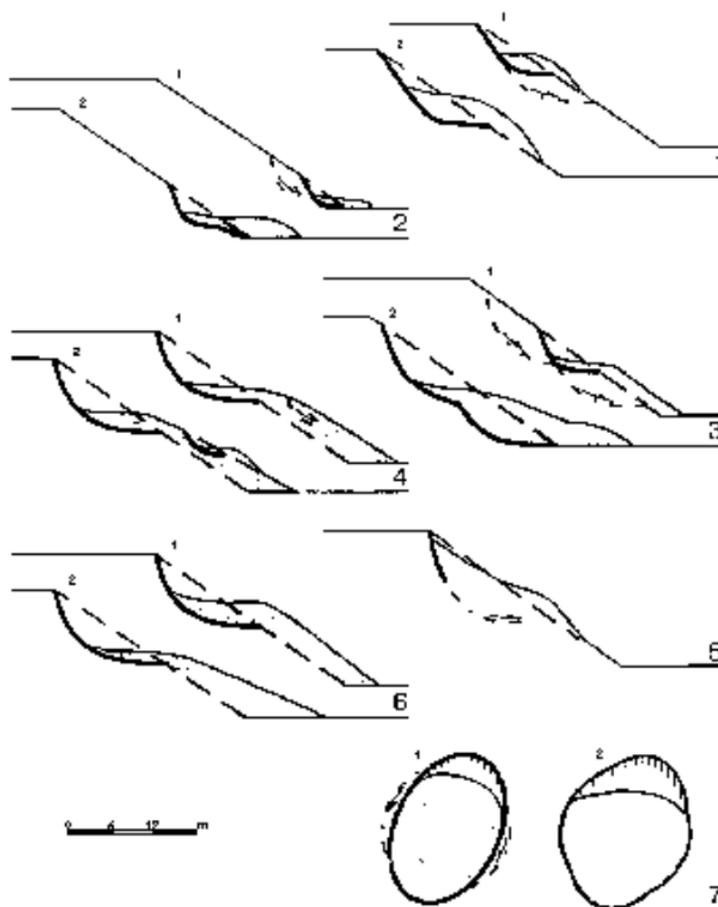


Figura 14 – Distribuzione d'attività nello spazio
[[http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20\(active\)%3A%20attualmente,prima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale](http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20(active)%3A%20attualmente,prima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale)]

3 Le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV)

Nel sottoparagrafo 2.3.3, tra le colate e i flussi sono state introdotte le deformazioni gravitative profonde di versante, comunemente note come DGPV o DSGSD (*deep-seated gravitational slope deformation*). Questa tipologia di frana possiede delle caratteristiche tali da renderla una classe a sé stante, ovvero con comportamenti e dinamiche differenti dalle altre. Nonostante siano fenomeni ampi che possono presentarsi anche in contemporanea ad altri cinematismi, non si hanno tuttora delle conoscenze approfondite; difatti, si è cominciato a trattare le DGPV solo recentemente, a partire dagli anni Sessanta del XX secolo, anche se un maggiore approfondimento, per il momento non ancora pienamente sviluppato, è relativo agli ultimi due decenni grazie al progresso nella tecnologia, nel telerilevamento e nel monitoraggio strumentale. Essendo lo studio delle DGPV piuttosto recente, in letteratura ci sono ancora molte lacune in relazione ai loro impatti sul territorio e su ciò che lì è presente; nonostante siano stati sviluppati dei modelli per spiegare al meglio questi fenomeni, gli inventari elaborati risultano poco attendibili per la loro tendenza a limitarsi ad aree poco estese e con bassi gradi di dettaglio, da cui risultano delle mappature molto superficiali in termini di elementi segnalati. Tale mappatura si basa sul riconoscimento di caratteristiche distintive e sulla disponibilità di strumentazione adeguata come immagini aeree e satellitari, e rilevamenti sul campo.

Dunque, sulla base di molte definizioni elaborate nel corso degli anni e riportate in letteratura, le DGPV sono definite come dei fenomeni gravitativi che evolvono nell'arco di un intervallo di tempo molto lungo, e che interessano masse ampie in termini sia di estensione laterale sia di estensione verticale.

Si tratta di fenomeni diffusi in tutto il mondo. Si è visto precedentemente come anche il territorio nazionale sia interessato da queste frane, seppur in misura minore rispetto ad altre tipologie; ciò può essere dovuto ad alcune problematiche nel riconoscerle, trattandosi di movimenti molto lenti. Proprio per questo motivo, si tratta di fenomeni persistenti che sono stati influenzati da più fattori differenti in termini di tipologia, intensità, rilevanza e ricorrenza temporale, come la glaciazione, la deglaciazione, l'attività sismica, le precipitazioni, l'erosione, e i fattori che al giorno d'oggi sono sempre di più al centro di dibattiti: l'azione dell'uomo e i cambiamenti climatici.

3.1 Caratteristiche comuni e identificative

A differenza delle altre tipologie di frane per le quali gli studi sono decisamente più approfonditi e condivisi su scala globale, per le DGPV la situazione è diversa; difatti, il loro studio è particolarmente complesso a causa della loro lenta cinematica, la quale richiede degli appositi strumenti di monitoraggio in modo da poter acquisire dati sul lungo periodo. Nonostante ciò, tutti gli studi concordano su alcune caratteristiche comuni e su alcuni segni distintivi che aiutano ad individuarle durante un rilevamento in situ. Tali caratteristiche sono:

- *Le dimensioni del fenomeno*: le DGPV interessano interi settori di versanti coinvolgendo volumi di centinaia di migliaia, talvolta anche milioni, di metri cubi su superfici che possono raggiungere qualche chilometro quadrato di estensione, e con spessori dell'ordine di decine o centinaia di metri. Sussiste la possibilità di raggiungere anche i 200-300 metri di profondità;
- *La cinematica*: gli spostamenti sono di piccola entità in relazione ai grandi volumi di materiale coinvolto e alle dimensioni del versante instabile, si parla in genere di velocità dell'ordine di millimetri all'anno. Questi movimenti sono dovuti in particolar modo a deformazioni plastiche nell'ammasso roccioso indotte dal peso dell'ammasso stesso associato alla forte energia di rilievo; ovvero, il dislivello tra sommità e pendici fa sì che la massa sia maggiormente soggetta alla gravità, la quale tende a muoverla verso il basso provocando così delle deformazioni. Il meccanismo deformativo è

variabile da caso a caso, in quanto può essere ricondotto a meccanismi convenzionali di rottura o ad un'evoluzione con fasi di deformazioni più o meno prolungate a cui segue il collasso vero e proprio (*creeping secondario*);

- *L'assenza di una superficie di scivolamento*: il movimento della massa non avviene lungo una superficie di rottura continua e ben definita, ma piuttosto lungo una zona di deformazione posta a grande profondità e caratterizzata da una microfratturazione dell'ammasso roccioso;
- *L'effetto scala*: interessando interi versanti e avendo estensioni imponenti, non è corretto affermare che le caratteristiche dell'ammasso roccioso siano le stesse in ogni punto, in quanto possono essere soggette a variazioni all'interno dell'intero corpo franoso;
- *I fenomeni secondari*: non sempre si riconoscono delle discontinuità nel corpo frana, ed è possibile che altri fenomeni secondari si sviluppino rendendo difficile l'analisi relativa al tipo di meccanismo di rottura. Difatti, si possono sviluppare delle frane da scivolamento rotazionale all'interno del versante che creano dei ripiani orizzontali, dovuti proprio alla rotazione lungo la superficie di scorrimento, e dei rigonfiamenti; la loro presenza è riconoscibile osservando l'inclinazione verso monte degli alberi. Ma è possibile anche il verificarsi di cadute di blocchi, soprattutto nelle parti centrale ed inferiore del versante instabile;
- *Le morfostrutture*: le DGPV presentano alcuni segni distintivi quali sdoppiamenti di cresta, scarpate e controscarpate, rigonfiamenti al piede, gradini morfologici e depressioni in corrispondenza della sommità e all'interno del versante stesso, spanciamiento verso l'osservatore, *tension cracks* e trincee, comunemente note come *trenches*. Tutti questi aspetti sono le tipiche strutture, le comuni evidenze morfologiche osservabili sia durante i rilevamenti in situ che dall'analisi delle immagini acquisite tramite aerofotointerpretazione. Nella Figura 15 sono rappresentate schematicamente alcune di queste strutture; in particolare: a) gli sdoppiamenti di cresta, generatisi da un'espansione laterale che forma un'area depressa e, di conseguenza, lo sdoppiamento. Il ribassamento della parte sommitale di un versante vicino alla linea di cresta comporta la formazione di una controscarpata, e la dorsale manifesterà due creste separate da una trincea; b) le scarpate, ovvero strutture morfologiche derivanti dal movimento verso il basso del versante che possono indicare un collasso imminente; c) controscarpate, ovvero delle scarpate in salita, rivolte verso monte, che determinano delle discontinuità posizionate a reggipoggio; d) ed e) trenches, ovvero dei tagli lineari e profondi che dislocano e deformano il pendio. Spesso si presentano con una forma stretta ed allungata, talvolta con il fondo riempito di materiale detritico; f) rigonfiamenti, indicanti la morfologia convessa assunta dalla parte inferiore del versante instabile.

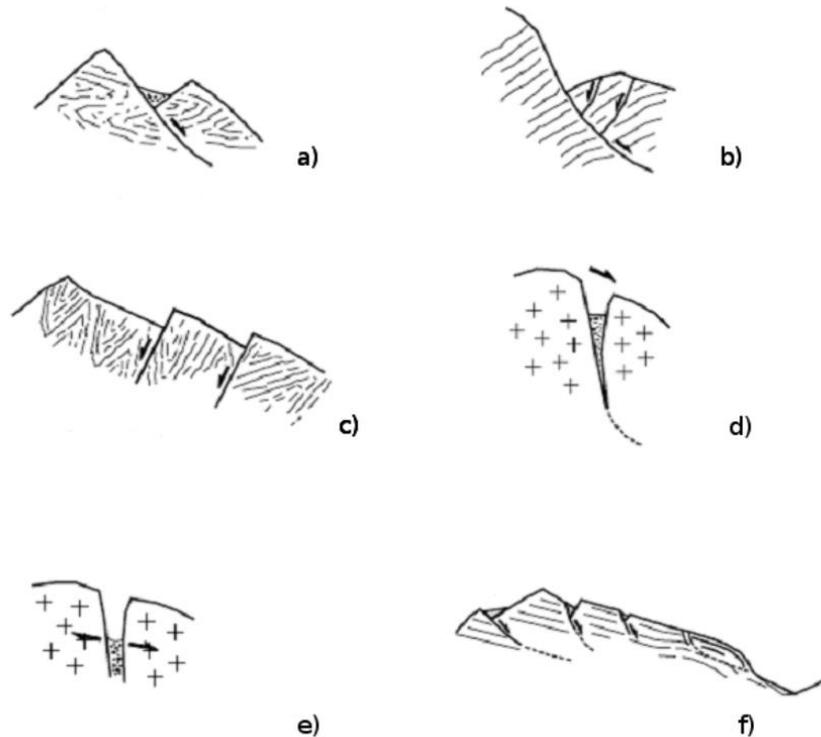


Figura 15 – Alcuni dei più caratteristici elementi morfologici associati alle DGPV:
 a) sdoppiamenti di cresta; b) scarpate; c) controscarpate; d) ed e) trenches; f)
 rigonfiamenti
 [https://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/territorio/dwd/pianifica
 zione-territoriale/ptc2/allegato1/DS4.pdf]

3.2 Tipologie di DGPV

Le DGPV indicano una categoria generale di fenomeni franosi che possono manifestarsi in modalità diverse in funzione del tipo di cinematisimo e dei materiali coinvolti dal movimento; fondamentalmente, si distinguono tre tipologie di DGPV:

- *Sackung*: noto come colata di roccia nella classificazione di *Varnes* (1978). Secondo gli studi effettuati da *Zischinsky* (1966, 1969), è un fenomeno conosciuto anche come *rock flow* (flusso di roccia), ovvero una deformazione visco-plastica che interessa versanti alti e acclivi costituiti da ammassi rocciosi omogenei, fratturati o stratificati a comportamento fragile (*Bisci & alii, 1966*) e, in generale, da rocce metamorfiche, ignee e sedimentarie. Le tipiche strutture identificative includono faglie ripide ed orientate nella stessa direzione del versante. Spesso questi fenomeni risultano dal rilassamento degli ammassi rocciosi in seguito alla deglaciazione, ma si possono attivare e/o accelerare anche a causa dei terremoti, il che giustifica la presenza di molti *Sackung* in corrispondenza di faglie attive. Altri studi affermano come essi possano verificarsi anche in seguito a cedimenti del suolo causati da fenomeni carsici o di dissoluzione delle evaporiti in profondità.

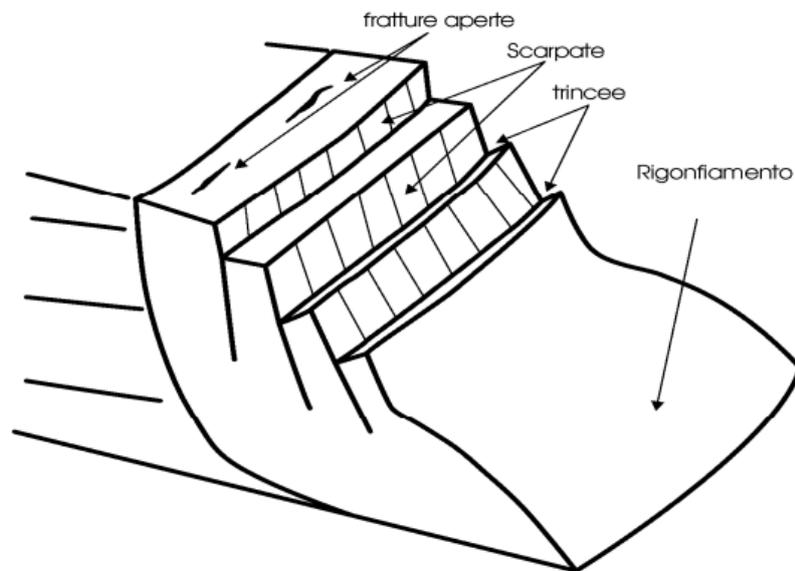


Figura 16 – Rappresentazione schematica di un Sackung (Bisci et al., 1996)
 [http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/territorio/dwd/pianificazione-territoriale/ptc2/allegato1/DS4.pdf]

La reologia di questo fenomeno non è ben conosciuta; a tal proposito, sono state sviluppate più teorie, la cui prevalenza di una rispetto all'altra non è ancora stata giustificata. Ad esempio, uno dei tanti modelli accettati è quello proposto da *Menci* (1968), simile a quello elaborato da *Zischinsky* (1966, 1969), per il quale ad alta profondità nella parte centrale del versante, laddove la pressione di confinamento è elevata, si verificano prevalentemente deformazioni viscosi. Nel resto del versante, e quindi sia nella parte sommitale che alle pendici, la pressione di confinamento è bassa e la roccia cede lungo superfici di scivolamento. Qualche anno più tardi è stata elaborata un'altra teoria da *Savage and Varnes* (1987), che implica un flusso plastico lungo una superficie di taglio continua. Quest'ultima teoria viene associata per lo più allo stadio finale dell'evoluzione di un Sackung, quando tutta la massa rocciosa è al limite di rottura.

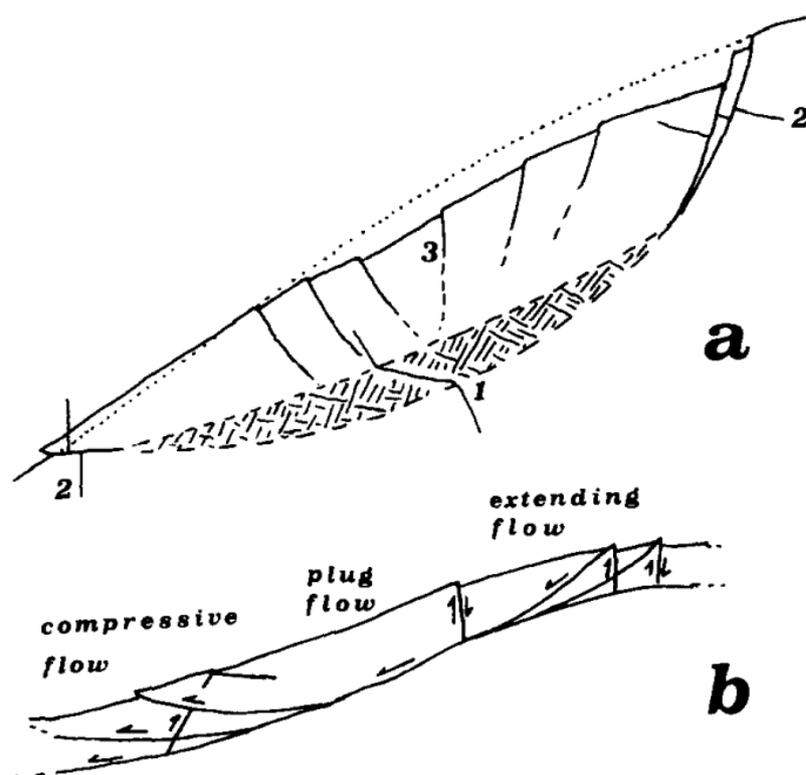


Figura 17 – Probabili meccanismi deformativi di un Sackung: a) distributed shear model (Mahr, 1977); b) plastic failure model (Savage and Varnes, 1987).
 Simbologia: 1) zona di deformazione viscosa con materiale contraente; 2) sollecitazioni di taglio su superfici discrete; 3) sollecitazioni di taglio in una zona fragile e superficiale dovute alla diminuzione del volume nella zona duttile più profonda. La linea punteggiata individua il profilo originale del versante
 [Dramis, F., Sorriso-Valvo, M. (1994), modificato]

Secondo altri Autori, i Sackung sono connessi a comportamenti di tipo plastico di masse rigide di grandi dimensioni che si presentano stratificate o con discontinuità, ma complessivamente omogenee. A causa del loro peso queste masse rocciose sono soggette a deformazioni lente nel tempo. In particolare, si osservano diversi comportamenti in base alla profondità: in superficie si formano piani di taglio, talvolta in corrispondenza di strutture tettoniche quali fratture e faglie, a causa di stress gravitativi, mentre in profondità, laddove la pressione di confinamento è elevata, si sviluppano deformazioni in assenza di una superficie di scivolamento ben definita (Mahr & Nemcok, 1977); queste deformazioni di tipo plastico comportano un aumento di volume della massa rocciosa provocando un rigonfiamento nella parte centrale del versante. Perciò, lungo il versante stesso si distinguono diversi comportamenti: nella parte sommitale si esercitano sollecitazioni di trazione con successive estensioni e formazione di piani di taglio, gradini morfologici e trenches (Sorriso-Valvo, 1979), alla base, invece, prevalgono gli sforzi di compressione che producono rigonfiamenti ed eventualmente piani di taglio con inclinazione pressoché orizzontale (Nemcok, 1972; Mahr, 1977; Ter-Stepanian, 1977);

- *Lateral spread of ridges*: sono fenomeni di espansione laterale che possono avere luogo sia in rocce omogenee, come rocce scistose e/o lapidee fratturate, sia in ammassi rocciosi a litologia variabile, ad esempio quando dei blocchi di roccia rigida poggiano su livelli plastici. In quest'ultimo caso il movimento è prevalentemente orizzontale lungo fratture di trazione o discontinuità tettoniche con andamento subverticale. A questa tipologia vengono associati fenomeni di crollo e ribaltamento negli ammassi rocciosi e rigidi, e scivolamenti rotazionali e colate detritiche e di terra nelle formazioni duttili;

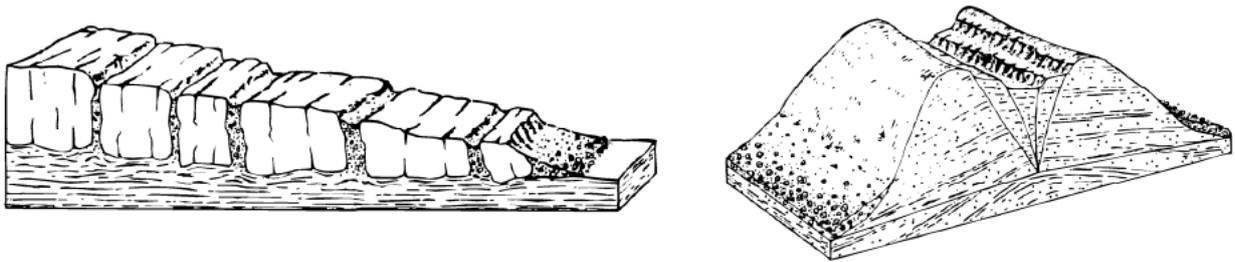


Figura 18 – *Lateral spread in formazioni fragili sovrastanti unità duttili (a sinistra); Lateral spread in rocce omogenee (a destra)*

[<https://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/territorio/dwd/pianificazione-territoriale/ptc2/allegato1/DS4.pdf>]

- *Block slide*: implica uno scorrimento di grossi blocchi di roccia rigida con discontinuità, pur senza presentarsi in piccoli conchi come avviene nei Lateral spread, su una superficie definita che può essere preesistente o di neoformazione.

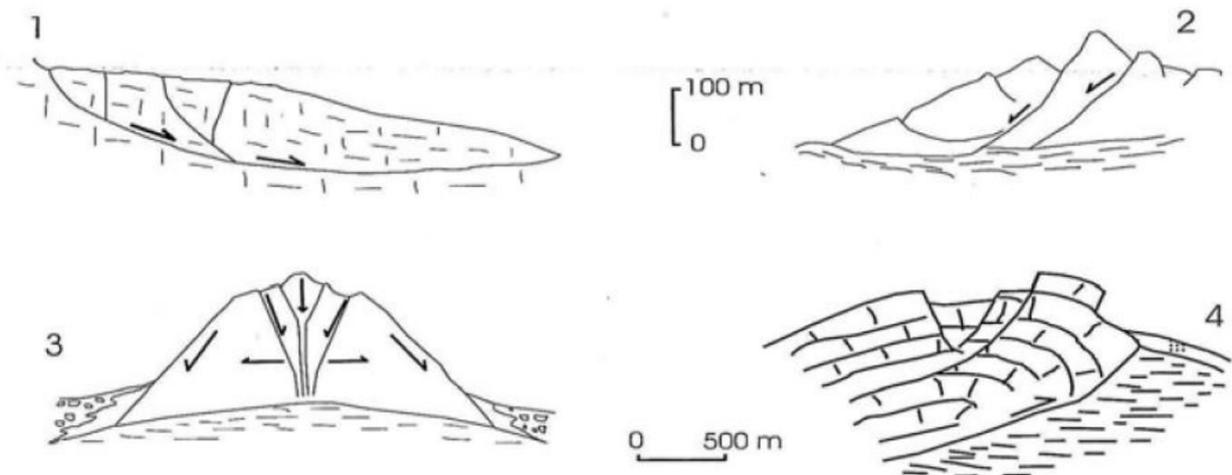


Figura 19 – *Esempi di Block slide [Varnes et al., 1978]*

3.3 Cause predisponenti e cause innescanti

Le principali cause predisponenti le DGPV, ovvero quelle che predispongono il fenomeno e favoriscono il suo verificarsi, sono:

- *Paleofrane*: accumuli di frane preesistenti costituiti da rocce già mobilizzate e, di conseguenza, con caratteristiche meccaniche piuttosto scadenti tali da poter indurre ulteriori movimenti;
- *Caratteristiche litologiche delle rocce*: la presenza di coperture di alterazione, quali detritiche o eluvio-colluviali, caratterizzate da un grado di addensamento variabile e soggette a fenomeni erosivi, può essere indice di instabilità del versante. Anche eventuali formazioni marnoso-argillose possono comportare fenomeni di instabilità a causa dell'assorbimento di acqua con conseguenti degradazione e diminuzione della resistenza, soprattutto in presenza di continui cicli stagionali umidi-secchi. Dunque, la presenza di rocce con caratteristiche più o meno scadenti e con un certo grado di alterazione influisce sulla predisposizione alle DGPV; difatti, materiali poco coerenti sono soggetti a cedimenti anche su versanti poco acclivi, mentre i materiali coerenti favoriscono la formazione di versanti caratterizzati da alti dislivelli, condizione favorevole allo sviluppo di DGPV di dimensioni più estese. Gli studi hanno evidenziato come molte DGPV siano state individuate principalmente lungo versanti acclivi di origine glaciale e in rocce scistose e fratturate, quali filliti, micascisti e paragneiss. Anche i piani di stratificazione o di scistosità assumono fondamentale importanza, soprattutto quando disposti a franapoggio;
- *Alta energia di rilievo*: è definita come il dislivello tra la parte superiore e la parte inferiore del versante deformato. Secondo alcuni studi, è stato dimostrato come nelle Alpi Occidentali la metà dei fenomeni analizzati avvenga su versanti con energie di rilievo comprese tra 500 e 1000 metri (Mortara e Sorzana, 1987);
- *Acclività del versante*: la pendenza gioca un ruolo fondamentale nel predisporre le DGPV, laddove l'instabilità aumenta all'aumentare della pendenza stessa;
- *Assetto strutturale del versante*: la presenza di faglie o fratture disposte a franapoggio implica una condizione favorevole allo sviluppo di DGPV.

Tra le principali cause scatenanti si menzionano:

- *Le precipitazioni e la fusione nivale*: si distinguono due casistiche, ovvero 1) piogge intense e brevi, le quali generano frane superficiali ed in genere molto diffuse; 2) piogge non intense ma di lunga durata, le quali favoriscono l'innescamento di frane profonde. Queste condizioni sono connesse ai cambiamenti climatici, che determinano eventi sempre più estremi e, spesso, con gravi conseguenze;
- *I terremoti*: essi, soprattutto se di forte intensità, possono determinare una perdita di contatto tra le masse rocciose con conseguenti diminuzione della resistenza, sviluppo di sovrappressioni che riducono le tensioni efficaci, e variazione della geometria dei versanti. Tuttavia, ci possono essere conseguenze di una certa entità anche con terremoti meno intensi in relazione al territorio, considerando che il moto sismico potrebbe venire più o meno amplificato in funzione della stratigrafia e della topografia che caratterizzano l'area interessata;
- *L'uomo*: è definito come una causa esogena che grazie alle sue azioni determina fenomeni di instabilità;
- *L'attività tettonica*: intendendo le sollecitazioni derivanti dai processi tettonici sia passati che presenti. Difatti, i processi tettonici passati possono permanere come stress residui suscettibili di riattivazione in mancanza di una pressione di confinamento, determinata ad esempio dalla deglaciazione. In base ad uno studio condotto da Onida (2001), sussiste una relazione tra processi

tettonici e movimenti di versante. Questa relazione è di tipo diretto quando la geometria del versante viene modificata attraverso deformazioni tettoniche, quali faglie e pieghe, generate da sollecitazioni, o di tipo indiretto quando i movimenti verticali della crosta terrestre indotti dal sollevamento tettonico generano dislivelli, o stress, topografici;

- *La glaciazione e la deglaciazione*: mentre la presenza di ghiacciai determina un contributo favorevole alla stabilità agendo come sostegno, la deglaciazione comporta un rilascio tensionale per la perdita di carico e la formazione di fratture di detensionamento sul versante instabile.

Una considerazione sugli ultimi due punti riguarda gli stress topografici, o energia di rilievo, i quali possono interagire con le sollecitazioni derivanti dai processi tettonici o dai cicli di carico-scarico dei ghiacciai, provocando rilassamenti o compressioni che comportano danni all'interno degli ammassi rocciosi; questi stress topografici sono influenzati dalla topografia locale, dalle strutture geologiche come le faglie e le pieghe, e dall'evoluzione della topografia stessa. Difatti, la topografia è soggetta a cambiamenti indotti, ad esempio, dagli apparati glaciali, i quali modellano i fianchi delle vallate conferendogli la classica forma a U.

Negli anni sono stati portati avanti degli studi basati su modelli numerici e soluzioni analitiche per approfondire meglio il ruolo della topografia sulla stabilità dei versanti; uno di essi è quello condotto da *Ambrosi and Crosta* (2011), in cui sono state eseguite delle simulazioni numeriche tridimensionali per capire il ruolo della pendenza dei versanti, della loro geometria, dei rilievi locali, dei cicli carico-scarico di natura glaciale, dell'erosione e dell'intensità e direzione delle sollecitazioni tettoniche sul controllo delle instabilità dei pendii. Il risultato ha mostrato come stress topografici, tettonici e cicli di carico-scarico dei ghiacciai comportino diverse e complesse distribuzioni degli sforzi sul versante; difatti, gli stress topografici possono comportare un aumento delle sollecitazioni di compressione sulle creste e di trazione lungo il fondovalle, così come il carico indotto dai ghiacciai, che induce una diminuzione dell'estensione in corrispondenza delle creste a causa della pressione idrostatica. L'arretramento degli apparati glaciali, invece, comporta un effetto opposto, ovvero un'estensione in corrispondenza delle creste ed uno stato di compressione nel fondovalle; tutto ciò provoca sforzi differenziali e danni alla roccia. Infine, gli sforzi indotti dai processi tettonici possono indurre sollecitazioni di compressione sia nelle creste che nel fondovalle; questi sforzi possono essere in parte compensati dal carico dei ghiacciai, con conseguente aumento delle sollecitazioni al momento della deglaciazione. Il motivo di questi studi risale al fatto che molte DGPV sono presenti nelle valli di origine glaciale. In più, è stato dimostrato che la diminuzione della resistenza per il progressivo danneggiamento della roccia in seguito ai cambiamenti sia geometrici che di sollecitazione durante la fusione glaciale può proseguire anche per parecchi anni dopo la deglaciazione stessa; la superficie di rottura può propagarsi a partire dal piede del pendio fino alle parti più elevate del pendio stesso, laddove possono generarsi anche delle fratture di trazione (tension cracks).

3.4 Sistemi di monitoraggio

Nel corso degli anni si assiste ad un vero e proprio progresso nella strumentazione utilizzata per il monitoraggio; difatti, grazie al crescendo dell'utilizzo di sistemi di monitoraggio a terra ed interferometrici, si è osservato come le DGPV, nonostante siano in genere considerate dei fenomeni quiescenti, possano subire dei movimenti anche senza la presenza di evidenze morfologiche o di fenomeni di dissesto secondari ad esse associate. Il monitoraggio permette di avere un controllo di alcune aree in quanto: sono stati rilevati dei fenomeni dissestivi di cui se ne vuole conoscere la futura evoluzione, sono presenti morfologie dubbie, sono presenti opere importanti che richiedono un attento controllo, si vuole verificare l'efficacia nel tempo degli interventi di sistemazione, e si vogliono fornire dati relativi a fenomeni franosi noti per supportare le

decisioni in caso di eventi alluvionali. Questa operazione non è così semplice e immediata, ma richiede alcune accortezze; innanzitutto, è fondamentale avere una conoscenza preliminare sulla tipologia del fenomeno, sulla sua geometria, sui cinematismi osservati o possibili, sulla circolazione idrica e sulla suddivisione del fenomeno in settori identificando quelli più attivi. Inoltre, non vanno dimenticate la gestione e la manutenzione una volta installata la strumentazione, che spesso vengono trascurate con conseguenze significative. Dunque, è bene avere un quadro generale dei fenomeni franosi a livello regionale, che deriva da un'attenta analisi degli eventi passati; la raccolta di informazioni da banche dati, riviste, bollettini storici ed archivi può aiutare a capire gli eventi che potrebbero verificarsi nuovamente e le aree più suscettibili.

In più, nella scelta dei sistemi di monitoraggio più opportuni occorre chiedersi: con quale frequenza acquisire i dati, quanti dati servono e quanti/quali dati si è in grado di gestire, se si è in grado di mantenere il sistema in efficienza e di gestirlo in termini di risorse economiche e umane, e se sono stati valutati i costi e i benefici. Tuttavia, la scelta dipende anche da altri fattori come la velocità del fenomeno, l'accessibilità al sito di installazione, le condizioni in cui si opera in quanto la strumentazione e la frequenza di acquisizione dei dati dipendono a seconda che ci si trovi in periodo di emergenza o di post-emergenza, il tempo a disposizione, gli elementi a rischio presenti, le risorse economiche disponibili, la disponibilità di rete elettrica e telefonica, l'esposizione in caso di strumentazione GPS o pannelli fotovoltaici, il clima che può danneggiare la strumentazione, e la protezione dei componenti da eventuali atti vandalici o furti.

Ai fini del monitoraggio, e quindi per valutare le superfici e i volumi coinvolti, il meccanismo di rottura, l'istante di rottura, il tipo di movimento e la distanza di propagazione, si distinguono sistemi di monitoraggio superficiale e sistemi di monitoraggio profondo.

3.4.1 Sistemi di monitoraggio superficiale

Tra i sistemi di monitoraggio superficiale, necessari per individuare gli spostamenti del corpo franoso in superficie, si menzionano:

- *Controllo topografico convenzionale*: prevede l'utilizzo di teodoliti, tacheometri, distanziometri laser e stazioni totali. Si individuano alcuni punti all'interno del corpo frana in cui ubicare i prismi ottici e dei punti all'esterno del corpo frana in cui ubicare i capisaldi di controllo, al fine di avere una verifica

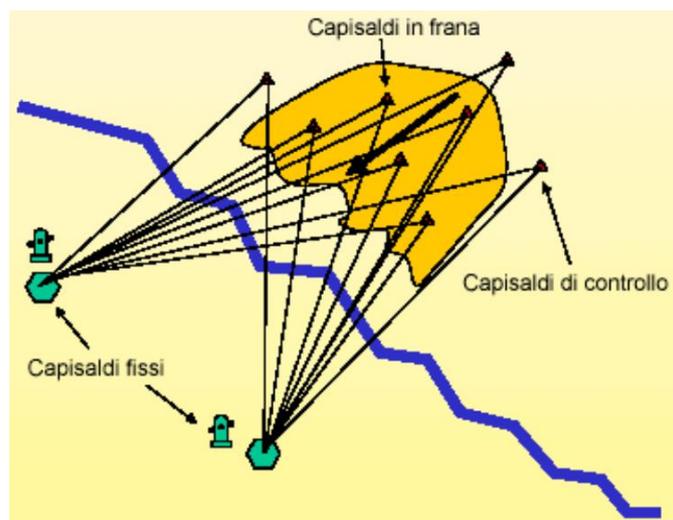


Figura 20 – Ubicazione dei capisaldi per il monitoraggio di un corpo frana

[Corso di Geologia Tecnica Ambientale. Politecnico di Torino (2022)]

sull'effettiva osservazione di movimenti del fenomeno franoso piuttosto che movimenti dei capisaldi per errori di fissaggio. Infine, si posizionano i capisaldi fissi sul versante opposto a quello instabile tramite i quali eseguire le misure. È necessario che i capisaldi siano ben materializzati sul terreno attraverso l'uso di supporti metallici saldamente infissi su manufatti solidi, su elementi rocciosi non soggetti a movimenti o su colonnine in metallo o cemento ben fondate e adeguatamente fissate al substrato. Questa tipologia di monitoraggio può essere manuale, effettuando delle misure manuali in situ, o automatizzata, mediante l'installazione di stazioni totali robotizzate che acquisiscono automaticamente i dati; per la trasmissione dei dati occorre considerare il fatto che durante gli eventi estremi normalmente non si ha disponibilità di corrente, e che i pannelli fotovoltaici, oltre ad essere problematici in caso di insolazione, sono soggetti a furti. Con il controllo topografico convenzionale è possibile effettuare delle misure rapide e con costi contenuti, si può operare anche in zone coperte purché i prismi siano visibili. Tuttavia, è necessario del personale competente, i capisaldi devono essere intervisibili, e la massima distanza tra stazione totale e capisaldi non raggiunge i 1500 metri;



Figura 21 – Colonna su cui fissare i capisaldi
[<https://www.arpalombardia.it/Pages/Monitoraggio-geologico/Le-reti-di-controllo/La-Strumentazione/Strumentazione-topografica.aspx?firstlevel=Rete+geotecnicadia>]

- *Controllo topografico con sistemi di rilevamento satellitare (GPS):* analogamente a prima, si posizionano i capisaldi nel corpo frana e i capisaldi di controllo, mentre i capisaldi fissi sono costituiti da un'antenna GPS. Anche in questo caso, è bene ubicare i capisaldi su dei pilastri ben fondati. Con questo sistema è possibile raggiungere delle distanze tra stazioni e capisaldi di 3000 o 5000 metri, non è necessario che i capisaldi siano intervisibili, si possono effettuare delle misure anche di notte, e si possono controllare ampi areali. Tuttavia, i costi sono più elevati del metodo precedente, gli elettrodotti e i ripetitori possono divenire fonti di disturbo, e i tempi per effettuare le misure sono inversamente proporzionali al numero di antenne a disposizione;



Figura 22 – Rilievo GPS

[<https://www.arpalombardia.it/Pages/Monitoraggio-geologico/Le-aree-monitorate/MONTE-MASUCCIO.aspx?firstlevel=RUINON>]

- *Pluviometri*: questi strumenti rilevano l'altezza di pioggia. Sono utilizzati come strumenti di monitoraggio in quanto molti fenomeni franosi sono innescati proprio dalle precipitazioni. In particolare, sono costituiti da un imbuto avente una bocca con diametro superiore a 20 cm al fine di favorire l'ingresso della pioggia senza sottostimare le letture, da due vaschette basculanti con la funzione di accumulare la pioggia e contare gli impulsi, ovvero quante volte si svuotano sapendo che ogni impulso equivale a 0,2 mm, e da un acquirente. Vanno ubicati lontano da zone con vento elevato e da zone alberate per evitare sottostime nei dati, e in zone facilmente accessibili per la manutenzione, necessaria ogni 3-6 mesi. Esistono anche i radar meteorologici per scopi di previsione e stima della precipitazione che cade al suolo; si basano sull'invio di onde elettromagnetiche con una certa lunghezza d'onda verso degli oggetti costituiti da gocce di pioggia, un'interazione con i quali ne comporta la riflessione. I radar più sofisticati permettono di fare una distinzione tra le diverse tipologie di idrometeore (precipitazioni liquide e solide) e, in caso di radar ad effetto doppler, di determinare la componente radiale della velocità del vento;



Figura 23 – Esempio di pluviometro

[<https://www.comaitorino.it/il-pluviometro/>]

- *Laser scanning*: è una tecnica di *remote sensing* che misura la variazione nel tempo della posizione di alcuni punti in superficie mediante il tempo di volo di onde elettromagnetiche. È vantaggiosa per l'elevata risoluzione e l'accesso al sito non necessario, perciò sfruttabile in luoghi difficilmente raggiungibili. Tuttavia, è una tecnica costosa e non automatizzabile;



Figura 24 – Esempio di laser scanning
[<https://www.geoside.it/rilievi-laser-scanner/>]

- *Fotogrammetria*: è una tecnica che permette di valutare l'evoluzione del paesaggio nel tempo mediante la ripresa aerea di porzioni di territorio e misurando la differenza in quota tra diverse superfici. Si basa sulla visione stereoscopica di fotografie scattate da un aereo in volo;

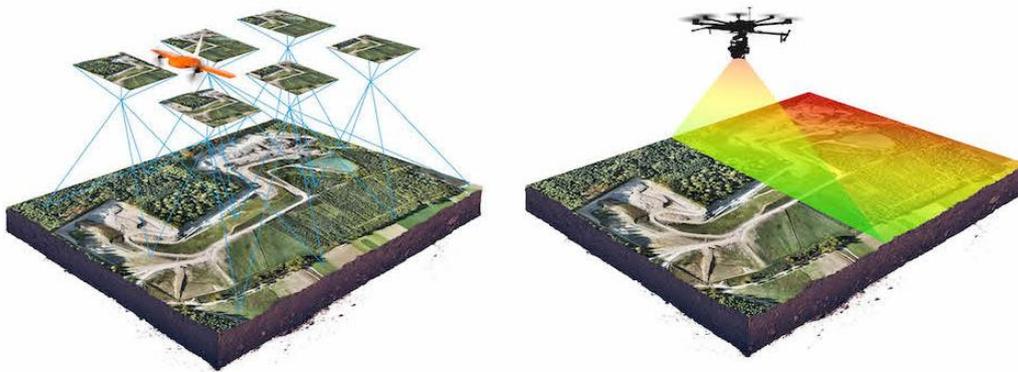


Figura 25 – Esempio di fotogrammetria con drone
[<https://www.ispezionicondrone.it/fotogrammetria-con-drone-rilievi-rischio-frane-controllo-fiumi-canali/>]

- *Interferometria satellitare*: il principio di funzionamento è basato sulla misura della variazione nel tempo della posizione dei punti in superficie mediante la differenza di fase delle onde elettromagnetiche. Una tecnica appartenente a questa tipologia è il *DInSAR*, ovvero *Differential Interferometry*, utilizzato per monitorare superfici estese a costi contenuti in quanto basato sul confronto tra due immagini radar acquisite in tempi differenti. Il *PSInSAR*, invece, fa uso di *Permanent Scatterers*, ovvero punti riflettori significativi aventi la stessa risposta elettromagnetica per le acquisizioni, quali spigoli di edifici, rocce esposte, strutture metalliche ubicate nell'area sotto investigazione. È una tecnica molto accurata per il monitoraggio di vasti areali che permette di

elaborare analisi storiche e, perciò, di indagare la riattivazione di fenomeni di dissesto dal 1992 ad oggi grazie ai dati provenienti dagli archivi dei satelliti ERS di ESA (Agenzia Spaziale Europea); tuttavia, il costo non è trascurabile, è necessaria un'interpretazione elaborando più immagini radar, e i tempi di rivisitazione sono tali da non permettere l'osservazione di spostamenti più rapidi.

InSAR: How it works

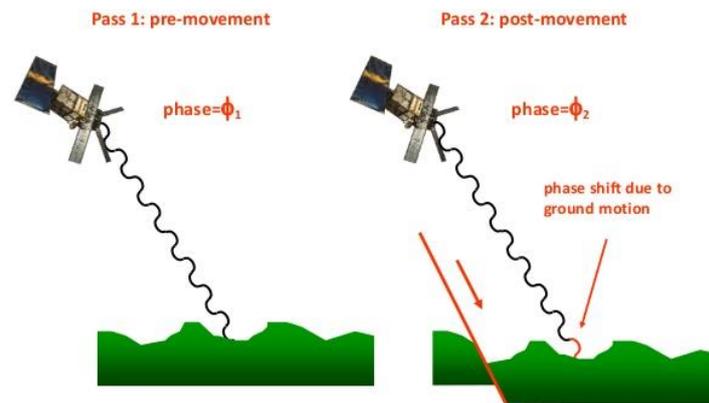


Figura 26 – Interferometria satellitare
[<https://comet.nerc.ac.uk/earth-observation/insar/how-insar-works/presentation-on-the-background-theory-of-insar-13-638/>]

3.4.2 Sistemi di monitoraggio profondo

I sistemi di monitoraggio profondo consentono di determinare il campo deformativo in profondità, di localizzare la superficie di scivolamento, e di determinare il regime delle pressioni interstiziali, nonché la direzione del flusso idrico sotterraneo. Alcuni di essi sono:

- *Piezometri*: sono strumenti utili per la misura dei livelli idrici e delle loro variazioni nel tempo, e delle pressioni interstiziali in quanto l'acqua è il più importante fattore di instabilità di un pendio in seguito alla gravità. In un foro preventivamente realizzato si inserisce il piezometro, ovvero un tubo in PVC di diametro generalmente di 1''1/2; esso è finestrato in corrispondenza della zona satura per permettere all'acqua di entrarvi al fine di poter misurare il livello idrico, ed è cieco nella zona insatura. La misura del livello idrico può essere effettuata usando la sonda piezometrica costituita da una sonda di livello, che deve essere posizionata appena sotto il pelo libero dell'acqua, connessa tramite un cavo metrato ad un acquirente da tenersi sempre lontano dall'acqua per evitare che venga danneggiato; oppure si fa uso di un freatimetro, ovvero uno strumento con cavo e sondino che emette un segnale sonoro quando il sondino stesso tocca il pelo libero dell'acqua. Per la misura delle pressioni interstiziali in terreni mediamente permeabili si fa uso della Cella di Casagrande, un piezometro con un filtro poroso in ceramica isolato dal resto del foro e connesso in superficie da una tubazione tramite la quale effettuare la misura con freatimetro elettrico o sonda piezometrica;

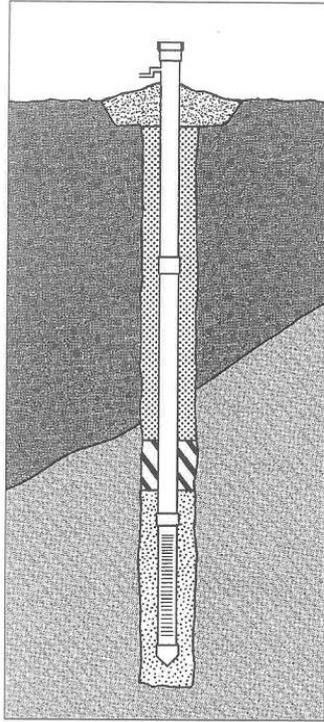


Figura 27 – Esempio di
piezometro
[https://www.afs.enea.it/protprev/www/lineeguida4/fascicolo4_4.htm]

- *Estensimetri in foro*: permettono di misurare lo spostamento tra uno o più punti ubicati lungo un foro e la testa dello strumento installata all'imbocco del foro stesso. Nel caso di un solo ancoraggio, esso è cementato a fondo foro ed è a contatto con un'asta in fibra di vetro libera di scorrere al fine di determinare il movimento relativo tra l'ancoraggio e la testa dello strumento. Nel caso di estensimetro multiplo sono presenti più basi ancorate a varie profondità lungo il foro. Le misure possono essere manuali mediante l'uso di un calibro di profondità, o automatizzate attraverso l'uso di un trasduttore di spostamento connesso ad una centralina di acquisizione dei dati;

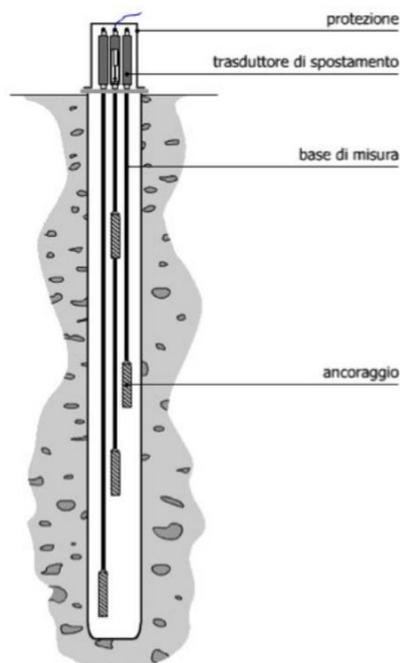


Figura 28 – Esempio di estensimetro in foro
[\[https://simstrumenti.com/products/D830_IT.pdf\]](https://simstrumenti.com/products/D830_IT.pdf)

- **Inclinometri con lettura manuale:** sono degli strumenti in grado di fornire delle informazioni circa la profondità della superficie di scivolamento e l'entità degli spostamenti nel tempo. In un foro preventivamente realizzato si inserisce il tubo inclinometrico in acciaio, in quanto più suscettibile a subire deformazioni rispetto ad altri materiali, costituito da guide lungo le quali far scorrere la sonda inclinometrica; esso viene fissato nel foro cementandolo in tutta la sua lunghezza. È bene non installare l'inclinometro nel corpo frana laddove i movimenti sono maggiori, ma in prossimità, altrimenti potrebbe subire dei danneggiamenti irreversibili. Una volta installato si effettua la prima misura, chiamata lettura zero, facendo scorrere la sonda dal basso verso l'alto ed acquisendo dati a più profondità; finite le misurazioni si ruota la sonda di 180° e si ripetono le misure alle stesse profondità. In particolare, si misura l'inclinazione dell'asse longitudinale della sonda rispetto alla verticale, da cui si risale allo spostamento orizzontale ad ogni profondità in cui è stata effettuata la misura; le letture vengono successivamente confrontate con la lettura zero di riferimento. Con più letture nel tempo si ottiene un grafico che correla lo spostamento alla profondità;

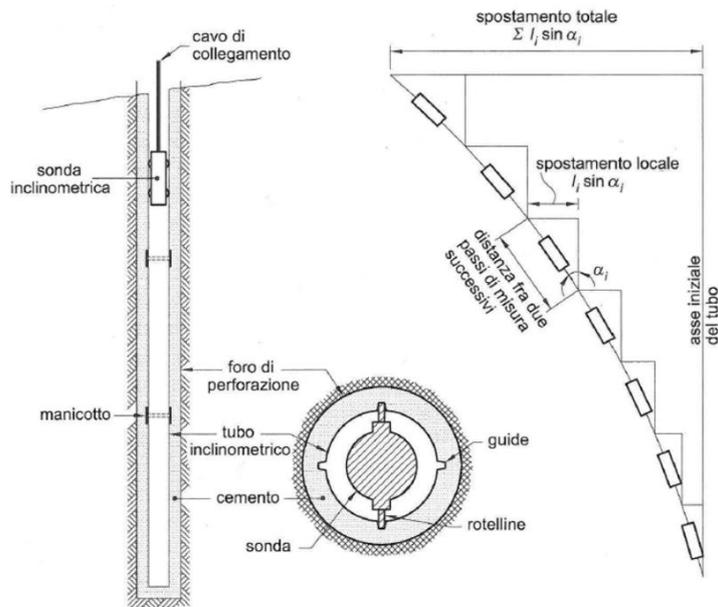


Figura 29 – Esempio di inclinometro con sonda inclinometrica mobile

[https://moodle2.units.it/pluginfile.php/228829/mod_resource/content/1/GT_201819_T8.pdf]

- *Inclinometri con sonde inclinometriche fisse*: il processo di installazione è analogo al caso precedente, ma qui si inseriscono più sonde inclinometriche ancorate a varie profondità; in particolare, una sonda andrà posizionata al di sotto della superficie di scivolamento, un'altra sonda andrà posizionata in prossimità della superficie di scivolamento, e altre sonde andranno al di sopra. Il sistema è collegato ad una centralina di acquisizione e trasmissione dati posta in superficie;

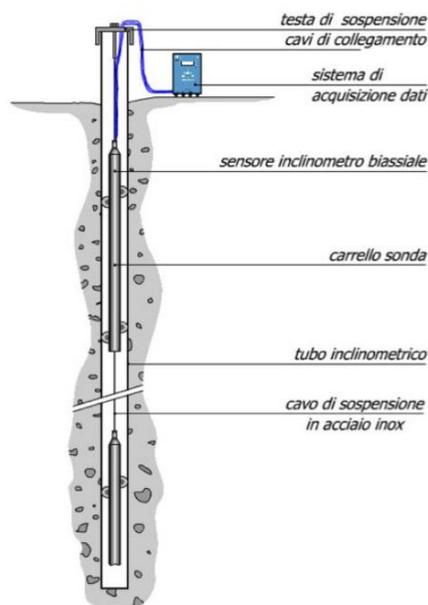


Figura 30 – Esempio di inclinometro fisso

[https://simstrumenti.com/products/IN935_IT.pdf]

- *Differential monitoring of stability*: corrisponde ad una catena di inclinometri automatizzabile. Si tratta di una colonna strumentale costituita da più moduli connessi tra loro da giunti flessibili e contenenti dei sensori per la misura contemporanea ad ogni profondità anche di più parametri, e di schede elettroniche per la raccolta e la trasmissione dei dati;
- *Fibra ottica*: è una tecnica che permette la misura di più parametri quali fratture, deformazioni, temperature, spostamenti ed accelerazioni. In particolare, per mezzo di un diodo viene emesso un fascio di luce infrarossa all'interno di un cavo in fibra ottica. La luce viene riflessa laddove è presente una deformazione dovuta allo spostamento del corpo franoso e, conoscendo la velocità di viaggio del fascio di luce ed il tempo speso, si può determinare la profondità alla quale è avvenuto il movimento;
- *Time domain reflectometry*: è una tecnica analoga alla precedente, ma basata su misure elettriche. Il sistema è costituito da un emettitore, un ricevitore ed un cavo coassiale. L'emettitore produce un impulso elettrico che si propaga nel cavo e, in presenza di deformazioni generate da movimenti, viene riflesso. Noti la velocità di viaggio dell'impulso elettrico ed il tempo di arrivo si può risalire all'ubicazione della deformazione;
- *Geoelettrica Microsismica*: si misurano le variazioni della resistività elettrica della superficie di scivolamento, in quanto tali variazioni danno indicazioni riguardo ai cambiamenti nel regime idrico delle frane, e quindi alla presenza di mutamenti all'interno del corpo frana stesso.

4 Caduta massi

Con caduta massi, che corrisponde ad uno dei classici fenomeni indotti dalle DGPV, si intendono degli eventi di crollo, i quali hanno origine con il distacco di roccia da un versante particolarmente acclive lungo una superficie caratterizzata da una resistenza al taglio ridotta o nulla. I versanti su cui avvengono, oltre ad essere caratterizzati da un'elevata pendenza, sono interessati dalla presenza di discontinuità strutturali, quali faglie e piani di stratificazione, che possono anche essere di neoformazione. Inoltre, per la velocità con cui si manifestano non sempre ci sono segni premonitori che permettono di identificare il possibile accadimento di un fenomeno franoso di tale tipologia, ma talvolta si osservano solamente dei cedimenti ai lati dell'ammasso roccioso e delle fessure superficiali di lieve entità. Dunque, spesso sono imprevedibili, ma molto pericolosi per gli elementi esposti: sia l'uomo con le sue opere sia l'ambiente.



Figura 31 – Corpo frana della caduta massi avvenuta nel novembre 2021 a Campertogno (VC); fotografia da drone [cortesia ditta Bertini Costruzioni S.R.L.]

I blocchi che si distaccano presentano volumetrie diverse: dai $0,02 \text{ m}^3$ fino a decine di metri cubi. Una volta distaccatisi dalla nicchia sorgente, i blocchi si muovono verso valle acquisendo maggiore energia cinetica e raggiungendo velocità anche al di sopra di 30 m/s ; generalmente, i blocchi non interagiscono tra loro, ma con il materiale che costituisce il versante. Tuttavia, vengono fatte delle distinzioni tra vari fenomeni a seconda della dinamica dei blocchi e della volumetria dei blocchi stessi o della massa rocciosa: in caso di volumi di blocchi isolati e non interagenti tra loro compresi tra $0,02 \text{ m}^3$ e 5 m^3 si parla di caduta massi, se i blocchi sono di varia pezzatura ed interagiscono tra loro allora si parla di crollo di massa per un volume superiore ai 1000 m^3 della massa rocciosa che si distacca, o di valanga di roccia per un volume maggiore di $1 \text{ milione di } \text{m}^3$ della massa rocciosa; quest'ultima tipologia viene inserita tra i movimenti complessi.

Sul territorio nazionale non sono le frane più ricorrenti, ma possono comportare gravi conseguenze. Inoltre, vengono classificate assieme alle frane da ribaltamento per il fatto che non è immediato distinguere queste due tipologie: in entrambi i casi si ha un distacco di blocchi di roccia da un versante acclive. Tuttavia, in alcune situazioni è possibile identificare il tipo di fenomeno sulla base di un rilevamento in situ, osservando i blocchi accumulati alle pendici del versante stesso; per una frana da ribaltamento, se le caratteristiche meccaniche della roccia sono buone, si nota un blocco roccioso integro che scivola lungo il versante dopo aver effettuato una rotazione, mentre nella caduta di blocchi si osservano più massi a distanze diverse a seconda delle loro

dimensioni. Difatti, i blocchi più piccoli tenderanno a depositarsi prima dei blocchi più grandi che, a causa della dipendenza dell'energia cinetica dalla massa, percorreranno distanze più lunghe.

4.1 Cause predisponenti e cause innescanti

Nonostante le cadute di blocchi siano fenomeni estremamente rapidi e imprevedibili, talvolta si possono comunque osservare dei segni che potrebbero far pensare ad un potenziale evento franoso. Innanzitutto, la prima cosa da fare è l'analisi storica; cercando informazioni tra gli archivi storici e banche dati, nonché riviste e rapporti di evento, è possibile risalire agli eventi che sono avvenuti nel passato, e che con molta probabilità potrebbero verificarsi nuovamente. Inoltre, gli eventi passati vengono sempre più utilizzati nell'esecuzione della *Back Analysis*, un'analisi a ritroso che permette di calibrare i modelli numerici utilizzati nelle simulazioni. Difatti, con questo genere di analisi si ricercano i valori dei coefficienti che meglio descrivono i fenomeni già avvenuti; inizialmente si ipotizzano alcuni valori dei vari coefficienti, come la scabrezza del suolo, necessari all'implementazione dei codici di calcolo, anche aiutandosi con dati di letteratura, e successivamente mediante l'analisi a ritroso si variano fino ad ottenere in output le condizioni osservate in campo.

Sempre relativamente ad eventuali segni premonitori, durante un sopralluogo è possibile osservare la presenza di blocchi di varie dimensioni che giacciono alle pendici di un versante; questo indica l'avvenuto crollo in un tempo più o meno recente, ipotizzabile sulla base della crescita della vegetazione, come i muschi, sui blocchi stessi (Figura 32).



Figura 32 – Blocchi ricoperti di muschio a Campertogno (VC); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Sempre in campo, è possibile notare lo stato di alterazione dei versanti, individuando eventuali fratture e/o discontinuità. Inoltre, per mezzo della tecnologia come le foto aeree o satellitari, nonché l'uso di droni, si possono identificare alcuni fattori predisponenti ad un fenomeno di caduta massi, come la configurazione del versante, ma anche l'evoluzione di fenomeni già attivi e le nicchie di distacco, che appaiono con una colorazione differente dal territorio circostante (Figura 33).



Figura 33 – Nicchia di distacco della caduta massi avvenuta nel novembre 2021 a Campertogno (VC); fotografia da drone [cortesia ditta Bertini Costruzioni S.R.L.]

Le cause predisponenti sono:

- **Morfologia del versante:** la pendenza è un fattore importante in quanto un pendio molto acclive comporta un'azione maggiore della forza di gravità, che è la causa primaria del distacco dei blocchi rocciosi; inoltre, influenza la velocità assunta dai blocchi e, di conseguenza, la loro energia cinetica, e il tipo di movimento dei blocchi stessi durante il loro percorso. Tuttavia, anche la configurazione del versante gioca un ruolo fondamentale; difatti, la presenza di zone convesse, in cui si sviluppano sollecitazioni di trazione, può favorire il rimbalzo dei blocchi che si distaccano e, di conseguenza, la loro propagazione verso zone più distali dalla nicchia sorgente. Al contrario, la presenza di zone concave, laddove si sviluppano sollecitazioni di compressione, può favorire la decelerazione e, se si tratta di ampi ripiani, anche l'arresto definitivo dei blocchi. Proprio per questo motivo quando si parla di interventi sul versante al fine di prevenire la propagazione dei blocchi e, nel peggiore dei casi, la loro interazione con opere antropiche, una scelta è proprio quella di sfruttare le zone pianeggianti presenti sul versante per favorirne quantomeno il frenaggio;
- **Caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei blocchi e del versante:** la tipologia di materiale che costituisce un versante è fondamentale; la presenza di rocce più fragili, come dei gessi, può comportare una maggiore fratturazione e in tempi brevi quando sottoposte ad un fattore innescante rispetto ad una roccia più dura, come il granito o la quarzite, favorendone il distacco dalla parete rocciosa. Inoltre, queste caratteristiche determinano anche le future interazioni tra blocchi e pendio una volta avvenuto il distacco; difatti, i blocchi possono muoversi con modalità differenti, fratturarsi durante il loro percorso diminuendo le dimensioni, nonché rallentare grazie all'attrito generato tra i blocchi stessi e il pendio durante un moto radente. In più, la presenza di rocce solubili indica la possibilità che si verifichino dei collassi per carsismo;
- **Grado di fratturazione:** è un indicatore sia dell'instabilità del pendio sia delle dimensioni dei blocchi che si potrebbero staccare dalla parete rocciosa; nel dettaglio, le fratture e discontinuità generano dei prismi di roccia da cui si può stimare la volumetria dei blocchi. Questo aspetto influisce sulla scelta degli interventi più adeguati e sul loro dimensionamento, come ad esempio le reti paramassi semplici o rinforzate, i rilevati e le barriere paramassi;

- *Scistosità*: è una caratteristica tipica delle rocce metamorfiche che indica la loro tendenza a sfaldarsi lungo dei piani paralleli tra loro; si tratta, quindi, di discontinuità, di piani deboli lungo i quali si può verificare la rottura della roccia con successivo distacco di blocchi. Così come per i piani di stratificazione e le discontinuità, è importante determinarne la giacitura, la quale viene descritta tramite l'immersione, l'inclinazione e la direzione; l'immersione è l'angolo misurato in senso orario tra il Nord e la proiezione della linea di massima pendenza sul piano orizzontale. L'inclinazione è l'angolo formato tra il piano dello strato ed il piano orizzontale, e varia tra 0° e 90°. Infine, la direzione è l'angolo misurato in senso orario tra il Nord e la linea di intersezione tra il piano dello strato ed il piano orizzontale; perciò, risulta sempre perpendicolare all'immersione. Noti questi parametri, se il versante e il piano di discontinuità hanno andamento discorde, allora la situazione è definita a reggipoggio e non si hanno problemi di instabilità. Diversamente, se hanno andamento concorde occorre analizzare i rapporti tra le inclinazioni: un pendio con inclinazione minore determina situazioni stabili, mentre un pendio con inclinazione maggiore del piano di discontinuità identifica un versante a franapoggio suscettibile a fenomeni di instabilità;
- *Idrogeologia*: legata alla porosità e alla permeabilità; per gli ammassi rocciosi non si parla tanto di porosità, tipica dei terreni, ma di fratture e discontinuità che costituiscono delle vie preferenziali per lo scorrimento dell'acqua.

Tra le principali cause innescanti un fenomeno di caduta massi si menzionano:

- *Acqua*: è una delle cause principali che può agire in vari modi; ad esempio, in presenza di fratture e discontinuità nell'ammasso roccioso l'acqua circola e, in assenza di vie di uscita, comporta la risalita dei livelli idrici con successivo aumento delle spinte idrauliche. L'aumento delle spinte sulle pareti delle discontinuità è dovuto anche al congelamento dell'acqua stessa, che aumenta di volume provocando ulteriori sollecitazioni. Diviene un fattore innescante anche quando è associata ai cicli gelo-disgelo e asciutto-umido, provocando continui aumento-diminuzione del volume che stancano il materiale portandone il cedimento. Quest'ultimo caso si verifica principalmente quando il versante è costituito da materiali plastici come le argille o quando essi si trovano all'interno delle discontinuità, i quali sono suscettibili alla variazione di volume in presenza di acqua. Infine, essa è anche associata al carsismo, che può generare delle cavità laddove sono presenti rocce solubili;
- *Precipitazioni*: soprattutto se intense, svolgono un'azione battente che incide sui blocchi stessi favorendone il distacco, ma contribuiscono anche all'infiltrazione di acqua nelle discontinuità;
- *Forti escursioni termiche*: svolgono un'azione simile ai cicli gelo-disgelo e umido-asciutto stancando il materiale. Difatti, le rocce tendono ad espandersi in presenza di calore elevato e a contrarsi quando le temperature sono più basse;
- *Erosione*: l'erosione al piede del versante, dovuta ad esempio agli alvei fluviali, comporta un arretramento del versante stesso fino a quando, trovandosi in condizioni di forte instabilità, cede;
- *Sollecitazioni sismiche*: l'attività sismica, con le vibrazioni da essa indotte, provoca una condizione di instabilità che favorisce il distacco di blocchi;
- *Vegetazione*: è un fattore che, in base alla tipologia e alla sua disposizione, può agire positivamente alla stabilità ma anche negativamente. Nel secondo caso, il distacco di blocchi è dovuto principalmente agli apparati radicali che agiscono come una spinta meccanica introducendosi all'interno delle fratture allargandole;
- *Fulmini*: durante gli eventi estremi, che costituiscono condizioni favorevoli al verificarsi di fenomeni franosi, la presenza di fulmini che colpiscono la superficie dei versanti costituisce un'altra causa

scatenante la caduta massi dal momento che le rocce, soprattutto se contenenti acqua o minerali particolarmente conduttivi, attirano le scariche elettriche;

- *Uomo*: anche le attività antropiche contribuiscono alla destabilizzazione dei versanti sia tramite la costruzione di grandi opere e infrastrutture, che con il loro peso inducono delle sollecitazioni aggiuntive, sia con l'uso di esplosivi che generano vibrazioni tali da favorire il distacco di blocchi.

4.2 Evoluzione del fenomeno

Lo studio del fenomeno della caduta massi si articola principalmente in due fasi:

1. *L'innesco*: rappresentato dalla nicchia di distacco, dal volume, dalla velocità iniziale del blocco e dal cinematismo di rottura;
2. *L'evoluzione/propagazione*: consiste nella diffusione dei blocchi in zone distali dalla nicchia di distacco in cui andranno determinate le traiettorie, le velocità e le energie cinetiche assunte dai blocchi, le altezze di rimbalzo e le interazioni con gli ostacoli presenti sul versante e con il versante stesso.

4.2.1 La fase di innesco

In questa fase si procede con un'analisi cinematica ed un'analisi di stabilità del versante, individuando le possibili aree sorgenti, forma, volume e velocità iniziale del blocco. Si tratta di una fase soggetta a numerose incertezze dal momento che la caduta massi rappresenta un fenomeno complesso in termini di comportamento del blocco in movimento per l'elevato numero di variabili in gioco, per la variabilità aleatoria dei parametri che influenzano il processo e per l'incertezza epistemica a causa della difficoltà nell'ottenere le informazioni e i dati necessari alla modellazione e alla comprensione del fenomeno stesso. Queste incertezze richiedono l'uso di approcci probabilistici che associano a ciascun parametro una distribuzione di probabilità da cui prelevare un valore diverso per ogni simulazione.

4.2.2 La fase di evoluzione

Questa fase rappresenta la dinamica dei blocchi a seguito del distacco, che viene suddivisa in più passi.

4.2.2.1 La traiettoria aerea

È la fase immediatamente dopo il distacco. Il blocco può seguire due cinematismi differenti a seconda delle condizioni iniziali in termini di velocità iniziale: *caduta libera* o *caduta a gittata*.

Caduta libera

Nella caduta libera i blocchi che si distaccano hanno la componente orizzontale della velocità nulla, e perciò si ritrovano sottoposti alla sola azione della forza di gravità. In questa tipologia, i blocchi possono raggiungere velocità anche di 40 m/s fino ad impattare contro la superficie del pendio e dare inizio ad altri cinematismi, in seguito ad eventuale disgregazione del blocco impattante e alla dissipazione di parte della sua energia cinetica.

La velocità viene calcolata come:

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = g \cdot t = 9,81 [m/s^2] \cdot t [s] \quad (1)$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità;

- t è il generico istante di tempo.

Caduta a gittata

In questo caso la velocità iniziale del blocco non è nulla, ma assume un valore diverso da zero grazie alla presenza di sollecitazioni esterne. In particolare, il blocco segue una traiettoria parabolica.

Considerando un sistema di riferimento cartesiano con lo spostamento orizzontale sulle ascisse (asse x) e lo spostamento verticale sulle ordinate (asse y), date la posizione iniziale $P_0(x_0, y_0)$ e la velocità iniziale $v_0(v_{0x}, v_{0y})$, è possibile calcolare la posizione del blocco all'istante di tempo t resolvendo le seguenti equazioni:

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

dove g è l'accelerazione di gravità.

Inoltre, per determinare il punto di rimbalzo è sufficiente calcolare il punto di intersezione tra il blocco e la superficie del versante, ovvero l'intersezione tra la parabola che descrive il moto del blocco e la retta passante per due punti facenti parte del profilo del versante.

Dunque, essendo tali due punti: $A(x_1, y_1)$ e $B(x_2, y_2)$, le coordinate del punto di intersezione $P(x_P, y_P)$ si ottengono resolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} y_P = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{(x_P - x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \cdot \frac{x_P - x_0}{v_{0x}} + y_0 \\ \frac{y_P - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x_P - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases} \quad (3)$$

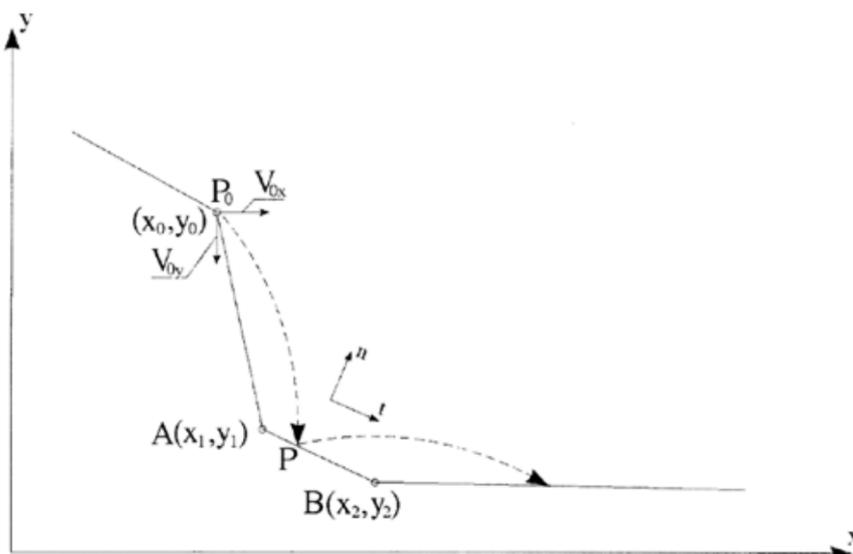


Figura 34 – Traiettoria parabolica del blocco e rimbalzo [Giani, 1997]

4.2.2.2 Interazione blocco-pendio

Dopo aver percorso il primo tratto della traiettoria in aria, il blocco in moto interagisce con il versante mediante un urto che provoca la dissipazione di parte della sua energia cinetica. L'entità di questa dissipazione è influenzata da più fattori, quali:

- *Caratteristiche del blocco:*
 - *Peso;*
 - *Forma;*
 - *Dimensioni;*
 - *Caratteristiche meccaniche del materiale quali resistenza e rigidezza.*
- *Caratteristiche del pendio:*
 - *Topografia;*
 - *Presenza di ostacoli;*
 - *Presenza di vegetazione e coperture detritiche;*
 - *Caratteristiche meccaniche del materiale.*
- *Cinematica:*
 - *Velocità traslazionale;*
 - *Velocità rotazionale;*
 - *Angolo di impatto;*
 - *Configurazione del blocco all'impatto.*

Le tipologie di meccanismi in seguito all'interazione tra blocco e pendio sono: *scivolamento, rotolamento, rototraslazione, rimbalzo, frantumazione del blocco e arresto.*

Scivolamento

In seguito all'urto contro la superficie del versante, il blocco non prosegue più il suo percorso in aria, ma scivola, slitta lungo il versante seguendo la linea di massima pendenza. Questo moto è caratterizzato da una velocità angolare nulla e da una velocità traslazionale dipendente dall'inclinazione del pendio e dal coefficiente di attrito dinamico agente tra il blocco ed il pendio stesso, e che si attesta più elevata rispetto al caso del moto per rotolamento, anche se la dissipazione di energia cinetica è maggiore.

Rotolamento

Durante questo tipo di movimento, la velocità angolare assume un valore diverso da zero in contemporanea ad una diminuzione della velocità traslazionale. Per determinare la velocità del blocco che rotola lungo la superficie del pendio si ricorre alla teoria della cinematica rotazionale di un corpo rigido, mediante gli studi condotti da *Paiola (1978), Bassato, Cocco e Silvano (1985)*:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \alpha \cdot g \cdot s \cdot (\tan\beta - \tan\delta_{rot}) \cdot \cos\beta} \quad (4)$$

dove:

- β è l'inclinazione del piano;
- δ_{rot} è l'angolo di attrito dinamico di rotolamento;
- s è la lunghezza del segmento, ovvero la distanza percorsa dal blocco in moto;
- g è l'accelerazione di gravità;

- α è il fattore dipendente dalla forma del blocco;
- v_0 è la velocità iniziale del massa.

Rototraslazione

Questa tipologia di movimento è data dalla combinazione delle due precedenti, ovvero dallo scivolamento e dal rotolamento. In letteratura sono presenti varie relazioni empiriche per il calcolo della velocità che il blocco possiede nel percorrere un tratto rettilineo del pendio; tuttavia, quella su cui si pone maggiore interesse è la formula suggerita da *Hoek* (1987), definita come:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot s \cdot K} \quad (5)$$

dove:

- v_0 è la velocità iniziale di discesa del blocco;
- s è la distanza percorsa dal blocco in moto;
- g è l'accelerazione di gravità;
- K è una costante dipendente dalla pendenza del versante θ e dall'angolo di attrito del materiale con cui avviene il contatto φ ; questa costante può essere approssimata con $\text{sen}\theta$, anche se in letteratura esistono alcuni grafici per una sua stima.

La relazione (5) non risulta, però, dipendente da alcuni parametri propri del blocco in movimento, quali forma e dimensioni, supponendo che questi non influenzino in alcun modo né lo scivolamento né il rotolamento. Questo perché durante il suo movimento lungo il versante il blocco subisce varie interazioni, come degli urti o dei rimbalzi, che ne possono provocare la rottura o una modifica della forma, ad esempio uno smussamento degli spigoli; ciò comporta una grande complessità nel definire le dimensioni e la forma del blocco durante la modellazione della caduta. Tuttavia, alcuni studi hanno affermato come, invece, le variazioni di questi parametri siano importanti nell'evoluzione del movimento del blocco lungo il versante. Nonostante ciò, la relazione di *Hoek* (1987) risulta una valida approssimazione.

Rimbalzo

Questa interazione tra blocco e superficie del versante comporta l'acquisizione di energia potenziale da parte del blocco. Si tratta di una fase transitoria, nella quale le componenti della velocità del blocco subiscono una variazione legata alla pendenza locale, alle caratteristiche del materiale ed alla forma del blocco stesso.

In particolare, il rimbalzo viene descritto per mezzo del *coefficiente di restituzione R*:

$$R = \frac{v_{post}}{v_{pre}} \quad (6)$$

dove:

- v_{post} è la velocità del blocco in seguito all'impatto con la superficie del versante;
- v_{pre} è la velocità del blocco prima dell'impatto con la superficie del versante.

Dunque, si tratta di un parametro che definisce la variazione di velocità dovuta all'urto, o meglio, la dissipazione di energia cinetica ad esso dovuta. Questo coefficiente viene scomposto nelle sue due

componenti normale e tangenziale al piano di impatto, identificando un *coefficiente di restituzione normale* R_n ed un *coefficiente di restituzione tangenziale* R_t .

$$R_n = \frac{v_{post,n}}{v_{pre,n}} \quad (7)$$

$$R_t = \frac{v_{post,t}}{v_{pre,t}} \quad (8)$$

dove:

- $v_{post,n}$ è la componente normale della velocità del blocco dopo l'impatto con la superficie del versante;
- $v_{pre,n}$ è la componente normale della velocità del blocco prima dell'impatto con la superficie del versante;
- $v_{post,t}$ è la componente tangenziale della velocità del blocco dopo l'impatto con la superficie del versante;
- $v_{pre,t}$ è la componente tangenziale della velocità del blocco prima dell'impatto con la superficie del versante.

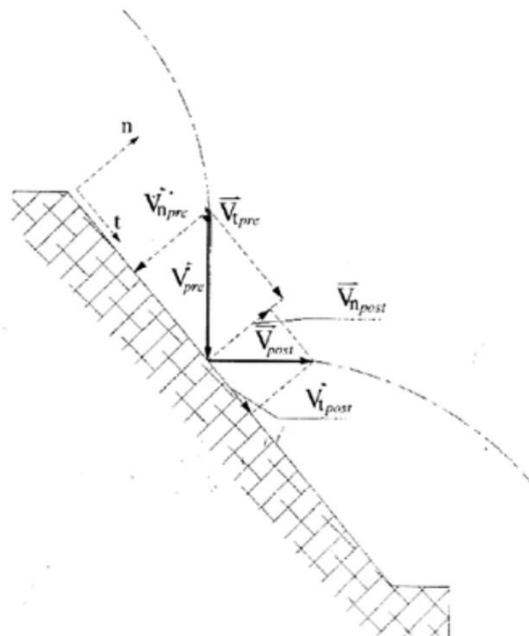


Figura 35 – Componenti delle velocità pre-impatto e post-impatto [Giani, 1997]

I valori di questi parametri sono presenti in letteratura in funzione dei vari materiali con cui può avvenire l'impatto; ad esempio in Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5 e Tabella 6 sono riportati i valori suggeriti da vari Autori. Si osserva come i valori più alti siano associati a materiali più duri, mentre valori più bassi a materiali più soffici e a superfici vegetate, laddove la dissipazione di energia cinetica è maggiore con conseguente

riduzione della velocità in seguito all'impatto. Inoltre, va menzionato come questi parametri siano stati definiti in luoghi e in condizioni differenti, giustificando alcune variazioni tra i valori forniti da diversi Autori per gli stessi materiali.

Tabella 3 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Giani, 1992]

Slope material	Normal coefficient of restitution (e_n)	Tangential coefficient of restitution (e_t)
Bedrock	0.50	0.95
Bedrock covered by large blocks	0.35	0.85
Debris formed by uniformly distributed elements	0.30	0.70
Soil covered by vegetation	0.25	0.55

Tabella 4 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Hoek, 1990]

Slope material	Normal coefficient of restitution (e_n)	Tangential coefficient of restitution (e_t)
Clean, hard rock	0.53	0.90
Asphalt roadway	0.40	0.90
Bedrock outcrops with hard surfaces and large boulders	0.35	0.85
Talus cover	0.32	0.82
Talus cover with vegetation	0.32	0.80
Soft soil some vegetation	0.30	0.80

Tabella 5 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Pfeiffer and Bowen, 1989]

Slope material	Normal coefficient of restitution (e_n)	Tangential coefficient of restitution (e_t)
Hard surface paving	0.37-0.42	0.87-0.92
Bedrock or boulders with little soil or vegetation	0.33-0.37	0.83-0.87
Talus with little vegetation	0.30-0.33	0.83-0.87
Talus with some vegetation	0.30-0.33	0.80-0.83
Soft soil slope with little vegetation	0.28-0.32	0.80-0.83
Vegetated soil slope	0.28-0.32	0.78-0.82

Tabella 6 – Coefficienti di restituzione in funzione del materiale costituente il pendio [Robotham et al.,1995]

Slope material	Normal coefficient of restitution (e_n)	Tangential coefficient of restitution (e_t)
Limestone face	0.315	0.712
Limestone scree, partially vegetated	0.303	0.613
Uncovered limestone blast pile	0.315	0.712
Chalk face	0.276	0.835
Vegetated chalk scree	0.271	0.596

La soluzione migliore ricade, però, sulla Back Analysis, ricercando i valori che consentono di riprodurre al meglio gli eventi passati.

Arresto

È la fase in cui il blocco in movimento si ferma definitivamente, e perciò l'intera energia cinetica da esso posseduta viene dissipata in relazione alla sua velocità, alla sua dimensione, alla sua forma, ma anche in funzione del tipo di suolo, della rugosità e della presenza di vegetazione sul versante. Inoltre, i blocchi di dimensioni inferiori possiedono una minore energia cinetica e sono più influenzati dall'attrito dinamico che si sviluppa tra di essi e la superficie del versante; mentre i blocchi più grandi possiedono energie cinetiche decisamente superiori, risentendo molto meno dell'attrito dinamico. Proprio per questi motivi, i blocchi più grandi tendono a raggiungere distanze maggiori rispetto a quelli più piccoli, che tendono, invece, ad arrestarsi precocemente per dissipazione totale di energia cinetica.

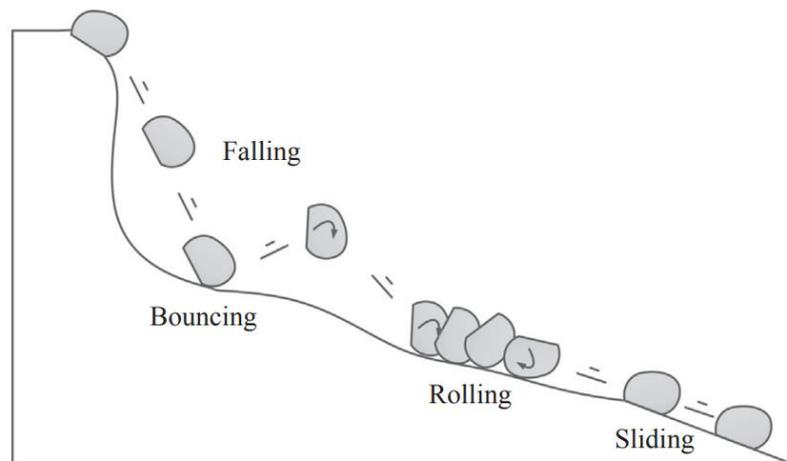


Figura 36 – Le tipologie di movimento di un blocco [Peng Yan et al., (2020)]

4.2.3 Effetti della forma del blocco

La forma del blocco influenza notevolmente la traiettoria percorsa in termini di:

- *Tipologia di impatto*: si possono verificare diversi tipi di impatto, quali spigolo-spigolo, spigolo-piano o piano-piano a seconda che il blocco sia sferico, spigoloso o tabulare;
- *Possibilità che il blocco si frantumi*: questo aspetto è legato al tipo di roccia di cui è costituito il blocco; se si tratta di roccia tenera il blocco potrebbe subire una smussatura degli spigoli fino ad un vero e proprio arrotondamento della sua forma. Se le rocce sono scistose allora la frattura avviene principalmente lungo i piani di scistosità. La rottura comporta la dissipazione di energia cinetica posseduta dal blocco, ed avviene per lo più quando la rigidità del blocco stesso è minore della rigidità del materiale costituente il versante;
- *Moto successivo all'impatto*: come visto precedentemente, si possono avere rimbalzo, rotolamento, scivolamento, rototraslazione o l'arresto definitivo.

In Figura 37 e Figura 38 è rappresentato quanto descritto.

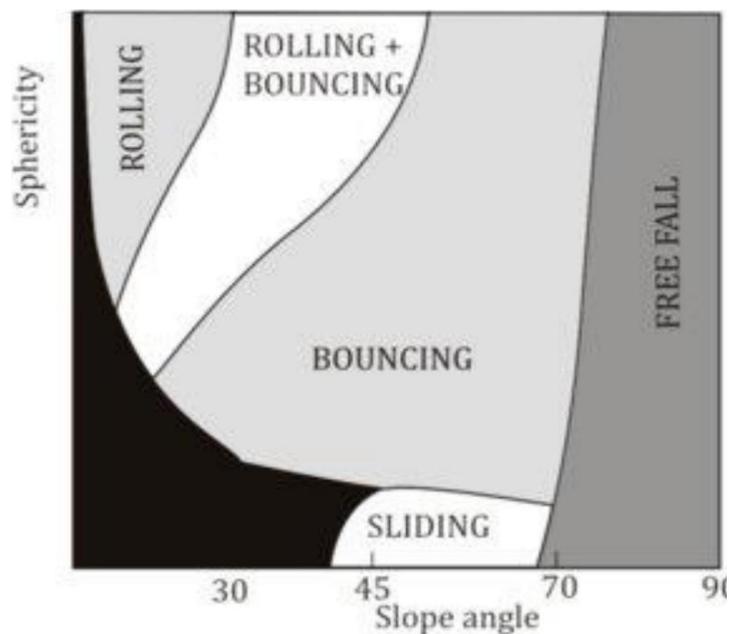


Figura 37 – Tipologie di movimento in base alla forma del blocco e alla pendenza del pendio

[Corso di Landslides and slope engineering. Politecnico di Torino (2021)]

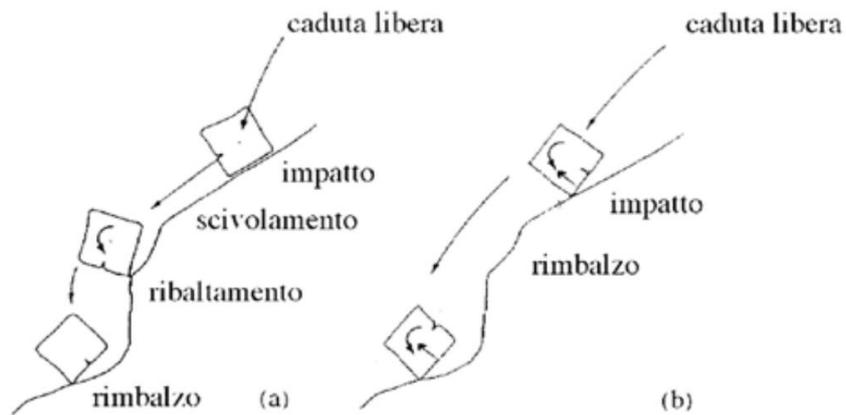


Figura 38 – Tipo di movimento relativo alle condizioni di impatto [Giani, 1997]

4.2.4 Effetti della dimensione del blocco

La dimensione gioca un ruolo importante nella dissipazione dell'energia cinetica del blocco, soprattutto in caso di pendii ricoperti da depositi detritici. In particolare, è fondamentale il rapporto tra le dimensioni del detrito e del blocco, ovvero:

- Se il blocco ha dimensioni maggiori dei detriti presenti sul versante, allora gran parte dell'energia cinetica viene dissipata ed esso tende a rotolare sulla superficie;
- Se il blocco ha dimensioni minori dei detriti presenti sul versante, parte dell'energia cinetica viene dissipata, anche se in misura minore rispetto al caso precedente, ed il movimento predominante è il rimbalzo.

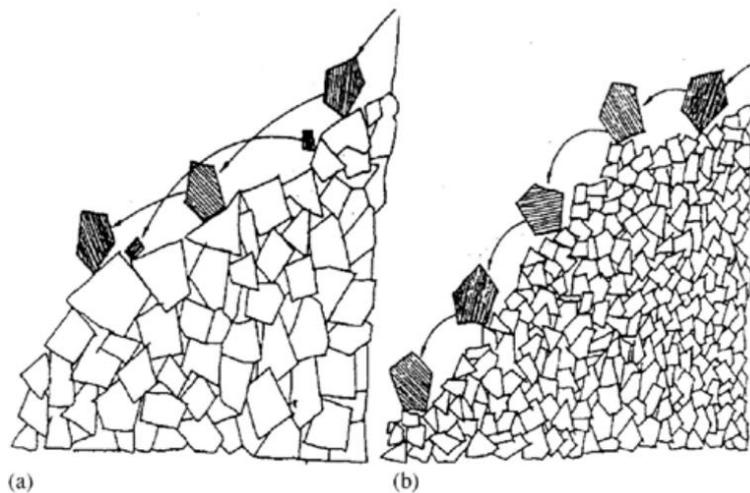


Figura 39 – Percorso di blocchi lungo un pendio di detrito: a) la dimensione del blocco è minore della dimensione del detrito costituente il pendio, b) la dimensione del blocco è maggiore della dimensione del detrito [Giani, 1992]

4.2.5 Effetti della vegetazione

Come già anticipato nel paragrafo 4.1 relativo alle cause predisponenti ed innescanti la caduta massi, la vegetazione, presente in forma sia arborea sia arbustiva che erbacea, agisce sui versanti in maniera sia positiva che negativa. Difatti, essa agisce:

- Dissipando parte di energia cinetica posseduta dal blocco roccioso mediante l'impatto diretto;
- Dissipando parte di energia cinetica posseduta dal blocco roccioso mediante l'interazione con la vegetazione arbustiva;
- Ostacolando la propagazione dei blocchi deviandoli, frenandoli e/o arrestandoli;
- Aumentando la scabrezza del versante, diminuendo in tal modo il valore del coefficiente di restituzione;
- Migliorando le caratteristiche geotecniche del suolo attraverso una vera e propria cucitura del blocco al versante o rafforzando i legami interparticellari di un terreno;
- Intercettando l'acqua proveniente dalle precipitazioni ostacolandone l'azione battente sulla superficie, causa di fenomeni erosivi, e l'infiltrazione sia nel terreno che nelle fratture;
- Esercitando delle sollecitazioni aggiuntive sul versante che tendono a stabilizzarlo.

Per quanto riguarda l'interazione tra blocchi e alberi, diventa fondamentale la dimensione dei blocchi che cadono; difatti, per poter fermare i blocchi con grandi volumetrie sono necessari alberi con grossi diametri. Per poter fermare i blocchi con volumetrie più piccole risulta molto efficace la presenza di una foresta fitta, in quanto aumenta la probabilità di impatto. La dimensione dei blocchi in movimento non è l'unico parametro influente, gioca un ruolo importante anche la tipologia di vegetazione, dal momento che alcune specie di alberi, quali querce e faggi, oppongono una maggiore resistenza agli impatti piuttosto che gli alberi di conifere, quali abeti, pini e larici.

Tuttavia, dal punto di vista negativo essa comporta un peso aggiuntivo sul versante che non sempre è favorevole, ma al contrario può destabilizzare il versante stesso anche grazie all'azione della neve o del vento; inoltre, gli apparati radicali penetrando nelle fratture ne comportano un allargamento agendo similmente a dei cunei.



Figura 40 – Funzione di protezione delle foreste sulla caduta massi
[<https://forestefauna.provincia.tn.it/Foreste/Foreste-in-Trentino/Funzioni-delle-foreste>]

4.3 Sistemi di monitoraggio

Come già affermato per le DGPV, il monitoraggio è un'operazione fondamentale per prevedere l'evoluzione di un fenomeno da cui potrebbero derivare conseguenze disastrose, per sorvegliare le aree già instabili sulle quali i fenomeni potrebbero essere suscettibili di riattivazione, e per verificare l'efficacia degli interventi di protezione.

Alcune tecniche utilizzate per monitorare ampi areali sono, come nel caso delle DGPV, la fotogrammetria e l'interferometria satellitare, che permettono di osservare l'evoluzione del territorio e dei fenomeni nel tempo, di determinare le aree potenzialmente instabili e di identificare le eventuali nicchie di distacco, oltre a segni di dissesto e fratture sia negli ammassi rocciosi che nelle opere strutturali.

Altri strumenti molto usati per l'osservazione e/o la misura delle deformazioni di fratture di un ammasso roccioso fratturato o di fratture di detensionamento sui pendii sono:

- *Vetrini*: anche chiamati spie, consistono in lastre molto sottili di vetro che vengono posizionate a cavallo di una frattura e fissate con malta cementizia o resine. Si tratta di una soluzione a bassissimo costo e di facile installazione che non richiede strumenti specifici di supporto. In particolare, il vetrino si rompe in presenza di blandi movimenti, ma non fornisce l'entità dei movimenti stessi e la rottura impedisce la ripetibilità del monitoraggio nel tempo, richiedendone infatti la sostituzione;



Figura 41 – Esempio di vetrino
[<https://www.fessurimetri.it/vetrini-per-crepe/>]

- *Fessurimetri*: si tratta di strumenti simili ai vetrini, ma a differenza di questi ultimi forniscono anche l'entità dello spostamento. Sono costituiti da due parti mobili, ovvero due lamine plastiche su una delle quali è riportata una griglia millimetrata e sull'altra un riferimento cartesiano. I fessurimetri vengono fissati a cavallo della fessura, generalmente di modesta entità, mediante l'uso di viti o silicone in modo tale che il riferimento cartesiano sia inizialmente coincidente con gli assi della griglia. Questi strumenti si installano facilmente e rapidamente, con costi contenuti e tempi di vita lunghi, e forniscono informazioni valide sul movimento di una frattura; però, essi richiedono un facile accesso al sito per l'installazione e la lettura.

Esistono varie tipologie di fessurimetri in commercio in funzione dei metodi di misura ed acquisizione dati, ad esempio quelli lineari o elettrici, differenti per la precisione: centesimo di millimetro per i misuratori elettrici, millimetro per i fessurimetri lineari. In più, in base al tipo di frattura che si vuole tenere sotto controllo, esistono anche fessurimetri di tipo angolare;



Figura 42 – Esempi di fessurimetri piano (a sinistra) e angolare (a destra)
[<https://www.meccaniciterrestri.it/articoli/43-crepe-nei-muri-come-monitorarle>]

- **Estensimetri:** si tratta di strumenti automatizzabili, che quindi non necessitano la lettura in situ, per misurare lo spostamento relativo tra due punti di misura ubicati ai due lati della frattura. In commercio si possono trovare più tipologie: estensimetri meccanici ed elettrici a barra o a filo, bidimensionali o tridimensionali. Gli estensimetri a barra vengono usati in caso di brevi distanze tra i due lati della frattura, dell'ordine di circa 1-3 metri, mentre gli estensimetri a filo vengono installati per il monitoraggio di fratture più estese, anche di 50 metri. Il funzionamento prevede la misura dello spostamento di uno dei due punti di misura tramite l'estensione del filo o della barra, a seconda della tipologia di cui si fa uso. Lo spostamento rilevato viene registrato da un sensore e trasmesso ad una centralina di acquisizione. La risoluzione è dell'ordine dei centesimi di millimetro. Per quanto riguarda gli estensimetri a filo, essi vengono talvolta protetti da una tubazione in PVC per evitare danni al filo stesso dovuti al passaggio di persone o animali. Nel caso degli estensimetri elettrici, le variazioni dimensionali della frattura comportano una variazione della resistenza elettrica del filo da cui risalire all'entità del movimento;

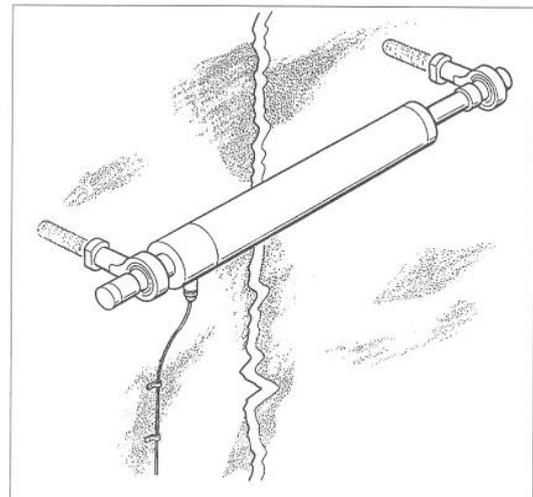


Figura 43 – Esempio di estensimetro superficiale a barra
[https://www.afs.enea.it/protprev/www/linee guida4/fascicolo4_4.htm]

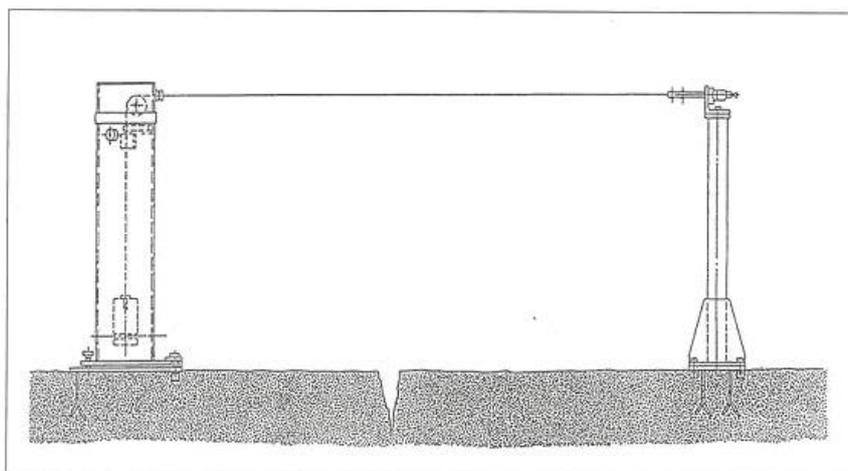


Figura 44 – Esempio di estensimetro superficiale a filo
[\[https://www.afs.enea.it/protprev/www/lineeguida4/fascicolo4_4.htm\]](https://www.afs.enea.it/protprev/www/lineeguida4/fascicolo4_4.htm)

- **Clinometri:** sono strumenti che permettono di misurare la verticalità, ovvero le variazioni di inclinazione delle strutture monitorate. In particolare, questi strumenti determinano gli spostamenti dalla verticale ideale passante per il punto di installazione relativi agli assi x e y sul piano orizzontale. In commercio sono disponibili clinometri di varie forme e dimensioni con sensori mono o biassiali, e realizzati con materiali adeguati a garantirne la tenuta nel tempo. I dati possono essere letti manualmente mediante delle centraline portatili o automaticamente tramite un sistema di acquisizione dati con funzionamento continuo;



Figura 45 – Esempio di clinometro di superficie
[\[https://www.sisgeo.com/uploads/manuali/s500_03.pdf\]](https://www.sisgeo.com/uploads/manuali/s500_03.pdf)

- *Distometri a nastro*: consistono in strumenti per la misura manuale delle variazioni di distanza tra due punti fissi, anche nel caso di fratture di grandi dimensioni. In commercio ne esistono di varia tipologia, sia con lettura manuale che distometri a laser; ad esempio, il distometro a nastro riportato in Figura 46 è costituito da un corpo cilindrico metallico sul quale sono presenti alcuni elementi: un nastro millimetrato in acciaio inox con fori ogni 25 mm, un telaio in alluminio che incorpora il nastro, un calibro centesimale, una ghiera ruvida per il tensionamento del nastro, e due terminali per la connessione ai punti di misura, di cui uno è solidale con lo strumento e l'altro è fissato alla parte libera del nastro.



Figura 46 – Esempio di distometro a nastro
[https://www.sisgeo.com/uploads/manuali/distometro_a_nastro_it_01_12.pdf]

Gli strumenti descritti poc'anzi vengono applicati nel caso di instabilità di singoli blocchi, ed inoltre, come la maggior parte dei sistemi di monitoraggio, permettono di controllare le aree di distacco e non quelle di propagazione. Tuttavia, esistono degli strumenti specifici per monitorare i crolli diffusi, ad esempio i sensori sismici ed acustici; si tratta di tecniche molto efficaci e vantaggiose per la loro facilità di installazione e per la loro abilità di operare su vasti areali e in qualsiasi condizione meteorologica. Il loro funzionamento si basa sui segnali che vengono generati e trasmessi sotto forma di vibrazioni ed emissioni acustiche a seguito di scorrimenti relativi o di fratture dei terreni e delle rocce. Questi segnali vengono captati da sensori di vibrazione, quali accelerometri, sismometri e geofoni, o da sensori acustici, tra cui idrofoni e microfoni, appositamente distribuiti sull'area di interesse. Nel caso dei sensori sismici, che vengono utilizzati maggiormente in campo rispetto a quelli acustici, le vibrazioni vengono convertite prima in segnali elettrici e successivamente in segnali digitali, i quali vengono poi registrati da un sistema di acquisizione. Si rivelano degli strumenti molto utili nel campo dei crolli diffusi dal momento che consentono di riconoscere delle anomalie connesse al possibile verificarsi di eventi di crollo, di analizzare la dinamicità di un versante roccioso permettendo l'identificazione delle aree più attive e, di conseguenza, di potenziali nicchie di distacco, e di studiare gli effetti delle condizioni meteorologiche sulla dinamica dei versanti stessi.

5 Caso studio

Il caso studio è inerente all'analisi di una deformazione gravitativa profonda di versante che interessa un'area montana appartenente a Campertogno, un comune italiano della Provincia di Vercelli situato in Valsesia. In particolare, l'analisi prevede lo studio della deformazione gravitativa profonda stessa a partire dall'evento franoso avvenuto nel novembre 2021 associato ad un crollo in roccia diffuso. Nei paragrafi successivi viene proposto un inquadramento preliminare dell'area oggetto di studio dai punti di vista geografico, morfologico, geo-litologico, idrologico, idrogeologico, sismico, valanghivo e franoso, a cui segue la descrizione dell'evento franoso del novembre 2021. Infine, viene descritto quanto emerso dal rilevamento di campagna avuto luogo in data 14 luglio 2022, suddiviso in più parti per evidenziare le criticità e gli elementi significativi riscontrati nelle varie tappe effettuate durante il tragitto.

5.1 Inquadramento geografico

Come già accennato, l'area di studio appartiene a Campertogno, un comune piemontese della Provincia di Vercelli; esso confina con i comuni di Mollia a nord, Boccioleto e Scopello ad est, Piode e Rassa a sud, e Alagna Valsesia a nord-ovest (Figura 47). È situato in Valsesia, una valle alpina del Vercellese settentrionale.

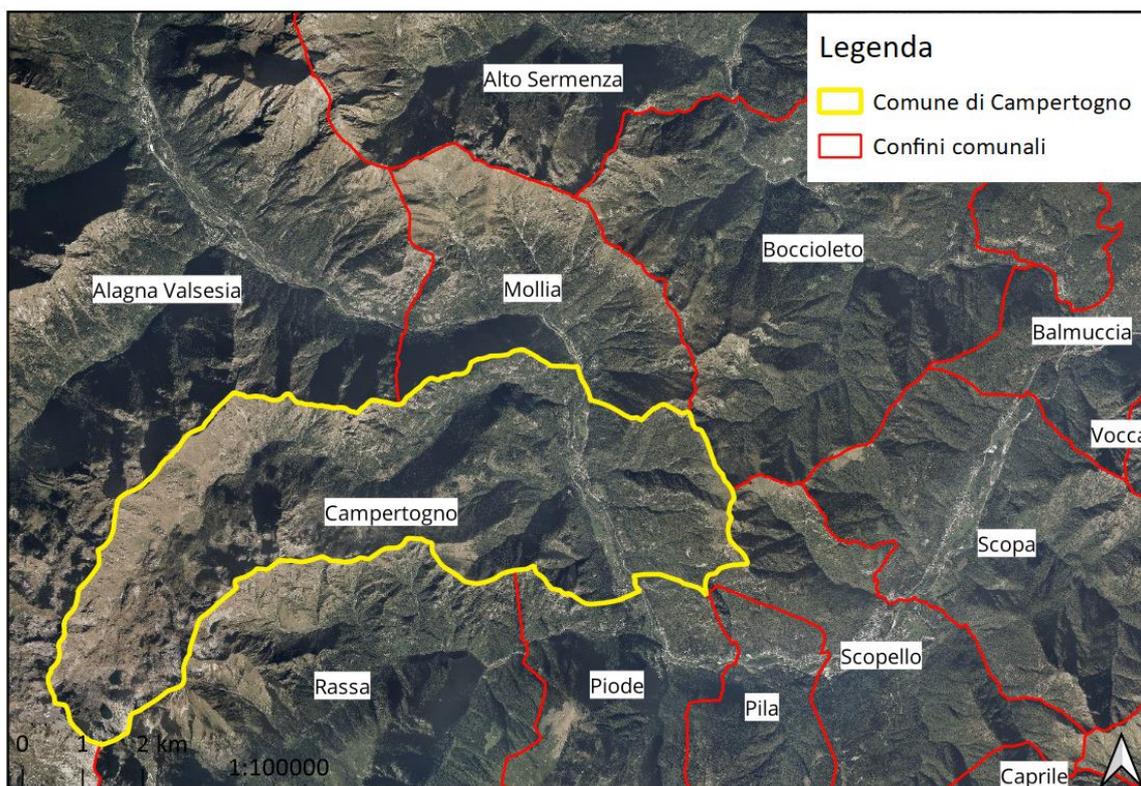


Figura 47 – Inquadramento geografico; scala 1:100000

Conta 214¹ abitanti e si estende su una superficie di 34,14 km². Il territorio comunale è suddiviso in più frazioni, quali Rusa, Otra, Tetti, Avigi, Villa, Piana, Piana Ponte, Pianella e Quare; inoltre, sono presenti numerosi alpeggi. Dal punto di vista della viabilità, Campertogno è attraversato dalla Strada Provinciale 299

¹ Popolazione residente al 1° gennaio 2021 [<https://demo.istat.it/popres/index.php?anno=2021&lingua=ita>].

di Alagna, ex Strada Statale, che con i suoi 93 km di lunghezza rappresenta un tracciato fondamentale nel collegare Novara ad Alagna Valsesia.

L'origine del nome non è certa, ma esistono varie supposizioni; ad esempio, la denominazione "*Campo di Bertogno*", o "*Campus Artoniae*" che rimanda all'Artogna, intendendo sia l'affluente del Fiume Sesia sia la valle laterale principale, ma un'altra interpretazione afferma la derivazione da "*arctare*", un termine latino col significato di restringere, rappresentando una strettoia topografica.

È un territorio molto apprezzato dai turisti per le varie attrazioni presenti; difatti, ci sono numerose Chiese ed Oratori, come la Chiesa della Madonna delle Grazie, la Chiesa di San Bernardo, la Chiesa di San Carlo, la Chiesa di Santa Marta, la Chiesa Parrocchiale dedicata a San Giacomo Maggiore, l'Oratorio della Madonna degli Angeli, l'Oratorio della Madonna della Neve, l'Oratorio della Madonna della Posa, l'Oratorio di San Lorenzo, l'Oratorio di San Marco, l'Oratorio di San Pietro, l'Oratorio di San Pietro e Paolo, l'Oratorio di San Rocco, l'Oratorio di Santa Maria Maddalena, l'Oratorio di Sant'Agata ed il Santuario della Madonna del Callone. È possibile anche visitare il Museo della Parrocchia di Campertogno, la Cappella della Madonna del Rosario, la Cappella della Madonna Incoronata, e le quindici cappelle. Inoltre, sono presenti anche altre attrazioni turistiche, quali un centro sportivo per la pratica di sport fluviali, piste da sci e snowboard, strutture per il noleggio di biciclette, ed itinerari per gli appassionati di escursionismo. In ultimo, non si può non menzionare il Monte Rosa, non rientrante nel Comune di Campertogno, ma la cui splendida vista riesce ad emozionare gli spettatori.



Figura 48 – Vista del Monte Rosa da Alagna Valsesia
[<https://www.monterosavalsesia.com/monterosa/it/#>]

Non per niente viene definito come un borgo alpino elegante con residenze di tono e caratterizzato da vivacità propria, attraversato dal Fiume Sesia che dona un carattere poetico al paesaggio.

5.2 Inquadramento morfologico

Trattandosi di un borgo alpino il Comune di Campertogno, pur presentando ampi pianori a fondovalle, è prevalentemente un territorio montano, con quote variabili tra 790 m s.l.m. e 2812 m s.l.m., caratterizzato da un clima alpino temperato che comporta estati miti e inverni rigidi con bassa percentuale di umidità. Tra le montagne si menzionano la Punta Ciciozza, più comunemente nota come Punta Sivella a quota 2526 m s.l.m., ed il Monte della Meja, che con la sua quota di 2812 m s.l.m. rappresenta la punta più alta del territorio. Importando il DTM con risoluzione della griglia di 10 metri su QGIS (Figura 49), si giustifica quanto affermato precedentemente; in particolare, la zona più pianeggiante, ma comunque a quote prossime a 800 m s.l.m., si trova in corrispondenza della Strada Provinciale 299. Tutto attorno, ed in particolare a ovest, il territorio raggiunge quote decisamente più elevate. L'area di studio si colloca in un intervallo compreso tra 800 m s.l.m. e 1920 m s.l.m. circa.

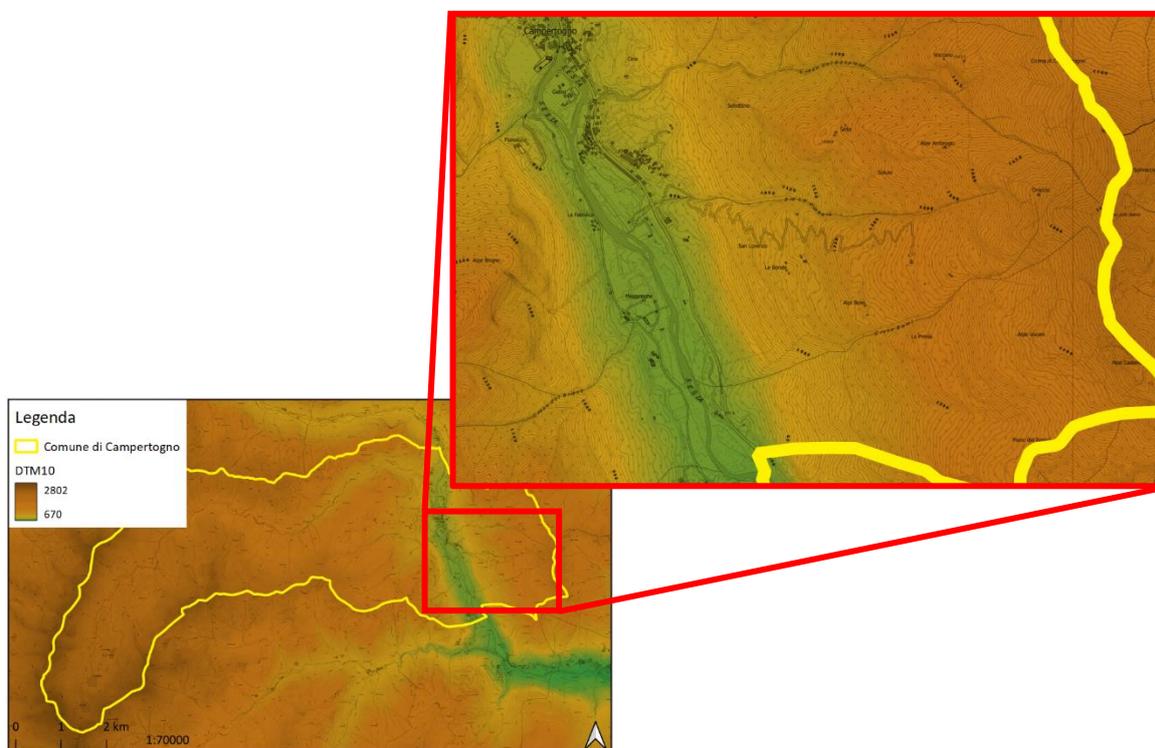


Figura 49 – Inquadramento morfologico con particolare dell'area di studio; scala 1:70000

Osservando, invece, la ripresa aerea con i rilievi ombreggiati (Figura 50) risulta evidente la sua morfologia prevalentemente montuosa, ma soprattutto il modellamento avvenuto durante l'ultima epoca glaciale; difatti, l'intera Valsesia era occupata da un ghiacciaio caratterizzato da una lunghezza di ben 50 km, con una larghezza di 3 km circa. A est si vede chiaramente il tratto in cui è presente la Strada Provinciale 299, situata nel fondo della valle glaciale dove si estende il centro abitato, in corrispondenza del quale il fondo roccioso assume una forma a U tipica delle valli glaciali; mentre a ovest, alla destra orografica del Fiume Sesia, è presente la Valle Artogna, una valle di origine glaciale caratterizzata anch'essa dalla tipica forma a U che si estende lateralmente per circa 14 km.

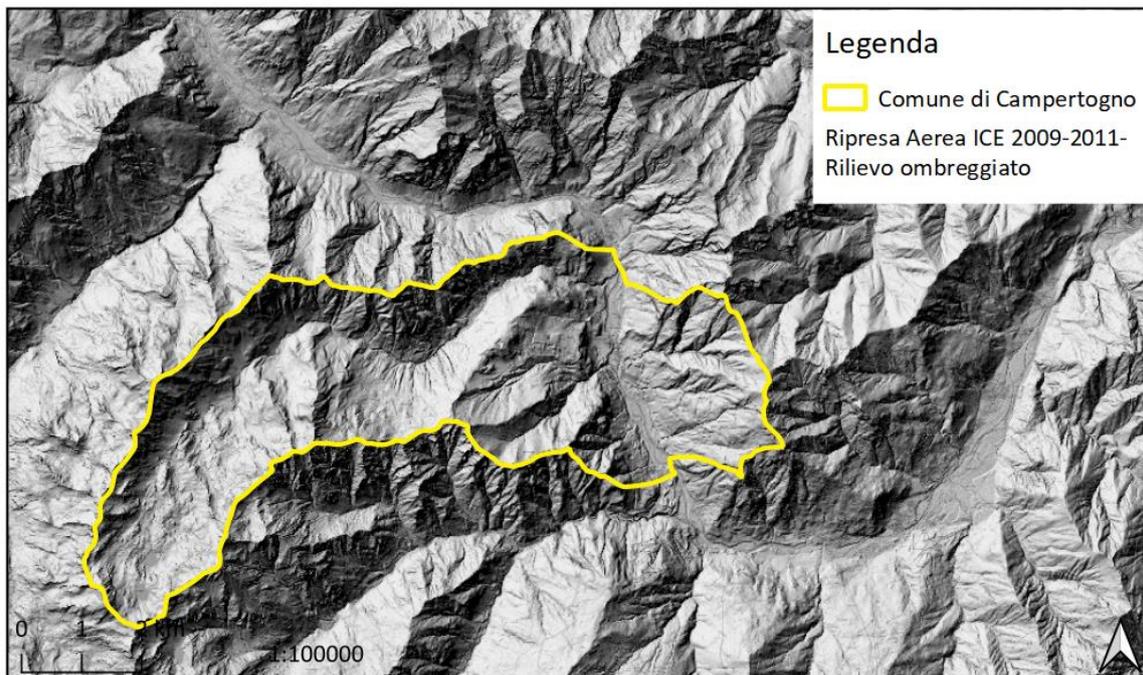


Figura 50 – Rilievo ombreggiato; scala 1:100000

Analizzando la copertura del suolo (Figura 51), ancora una volta si evince come il centro abitato sia sviluppato a est nel fondo della valle glaciale, e come il territorio circostante sia costituito prevalentemente da boschi e pascoli, con qualche zona residenziale isolata.

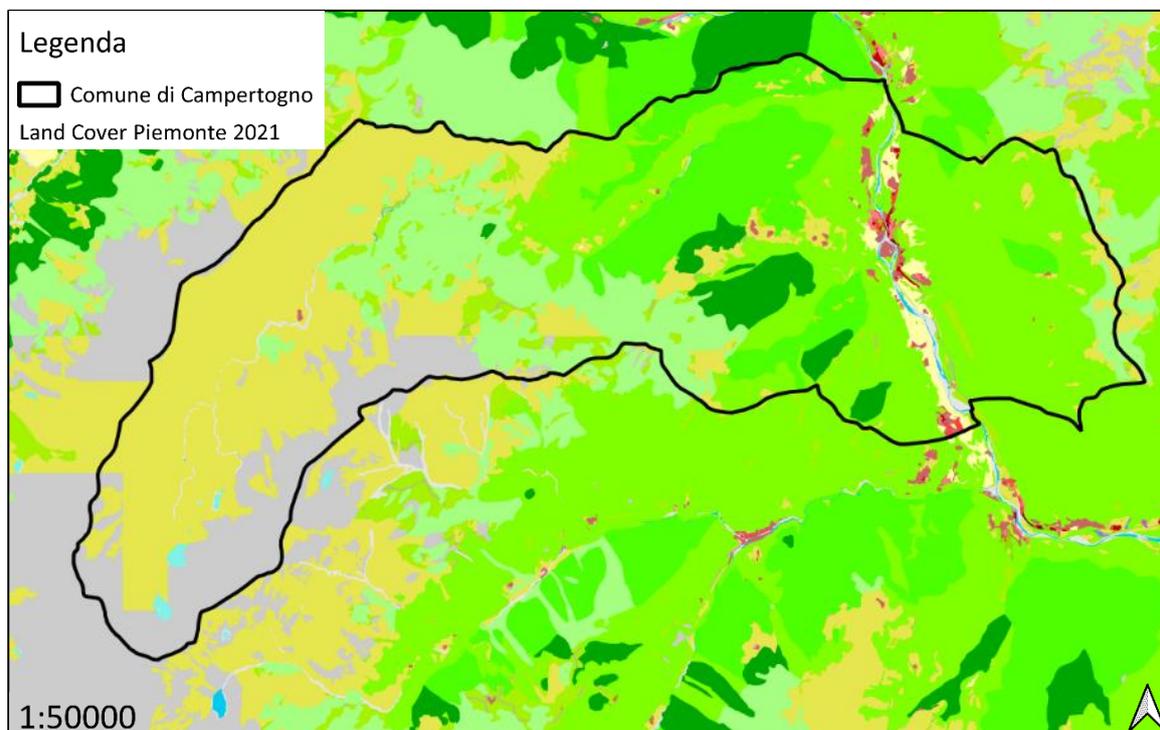


Figura 51 – Land Cover Piemonte 2021; scala 1:50000

5.3 Inquadramento geo-litologico

Sulla base del Foglio 30 della Carta Geologica d'Italia, di cui è presente un estratto nella Figura 52, si evince come l'area di studio rientri nell'*Elemento Inferiore* della *Zona Sesia-Lanzo* del *Dominio Austroalpino*, costituito dal punto di vista litologico da *micascisti* e *gneiss minuti eclogitici*. Più in generale, in corrispondenza del paese il substrato roccioso a forma di U per la sua origine glaciale è ricoperto di detriti glaciali antichi erosi dall'azione del Fiume Sesia, il quale ha permesso la deposizione di detriti più recenti costituenti le piane alluvionali di fondovalle. Sempre per l'azione del ghiacciaio, si riscontrano rocce levigate e striate, e dei terrazzamenti costituiti da morene dovuti all'alternarsi di periodi caldi e di periodi freddi. La Valle Artogna, invece, risulta incisa non solo nell'*Elemento Inferiore* della *Zona Sesia-Lanzo*, ma anche nell'*Elemento Superiore*, costituito da *paragneiss a biotite-granato-sillimanite*; sono evidenti degli affioramenti di *eclogiti*, *calcescisti* e *peridotiti*. I fianchi della valle risultano coperti da depositi morenici, mentre a ovest sono tuttora visibili gli antichi circhi glaciali, ora sedi di vari laghi.

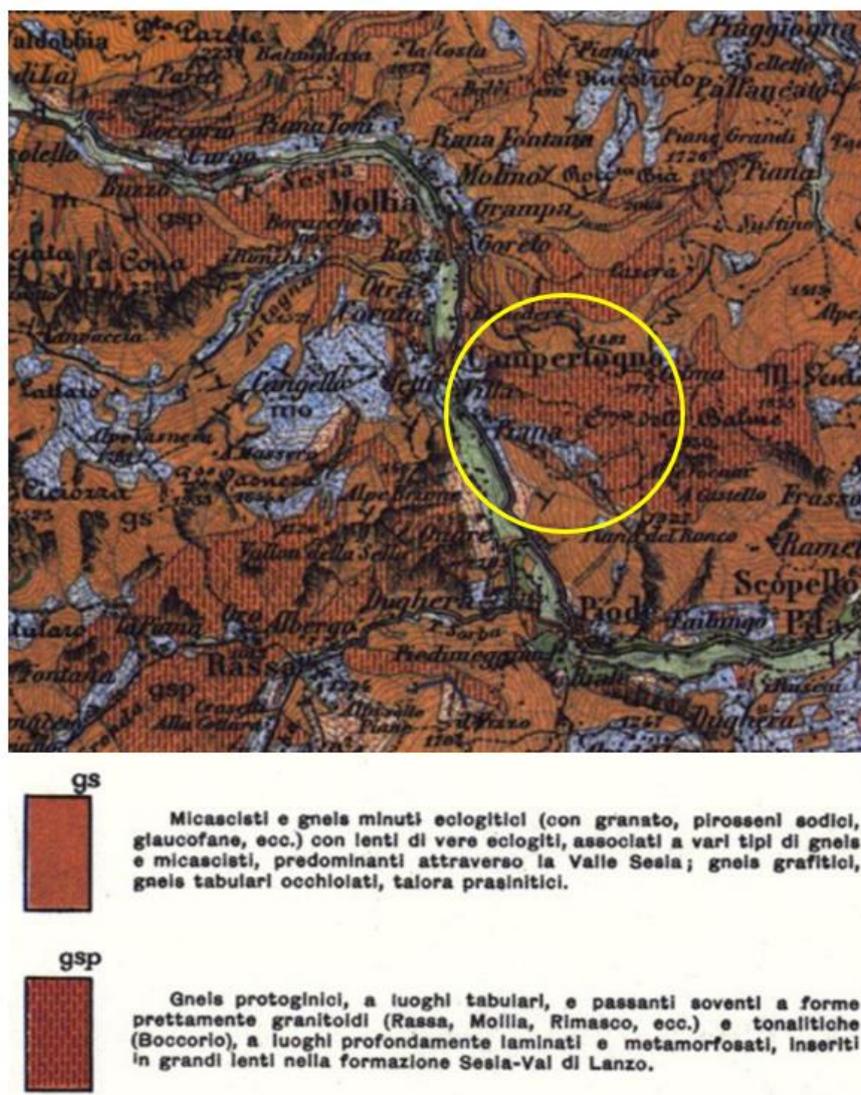


Figura 52 – Estratto dalla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000 con associato estratto dalla legenda. Il cerchio giallo individua l'area di studio [https://sgi.isprambiente.it/geologia100k/mostra_foglio.aspx?numero_fogli=30]

Sulla base, invece, di alcuni dati reperiti dal Geoportale della Regione Piemonte relativi alle unità litologico-giacimentologiche (Figura 53), si riscontra come l'intero territorio comunale sia costituito da:

- marmi saccaroidi talvolta a silicati, marmi dolomitici calciferi;
- kinzigiti e gneiss anfibolici e occhiadini associati;
- alluvioni ghiaiose talora sabbiose e limose, antiche e terrazzate;
- calcescisti, micascisti, gneiss minuti, argilloscisti;
- gneiss occhiadini, gneiss granitoidi massicci e con giunti di fratturazione radi, porfiroidi;
- detrito di falda, con detritici e conoidi di deiezione;
- depositi morenici generalmente non alterati;
- alluvioni ghiaiose recenti ed attuali degli alvei fluviali.

In particolare, gli ultimi cinque punti rappresentano i costituenti della zona di interesse, a conferma di quanto individuato dalla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000.

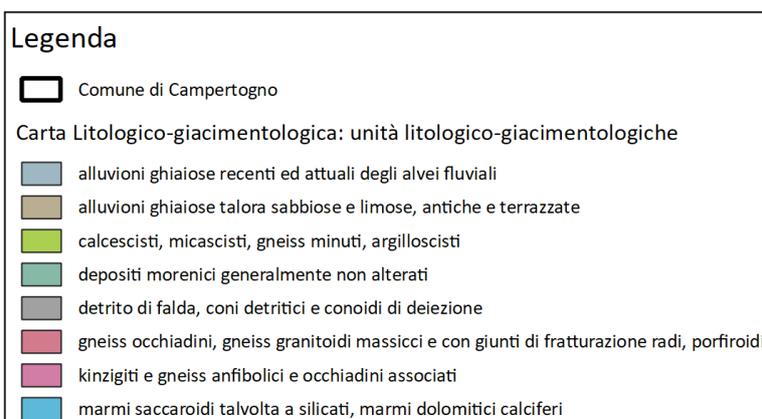
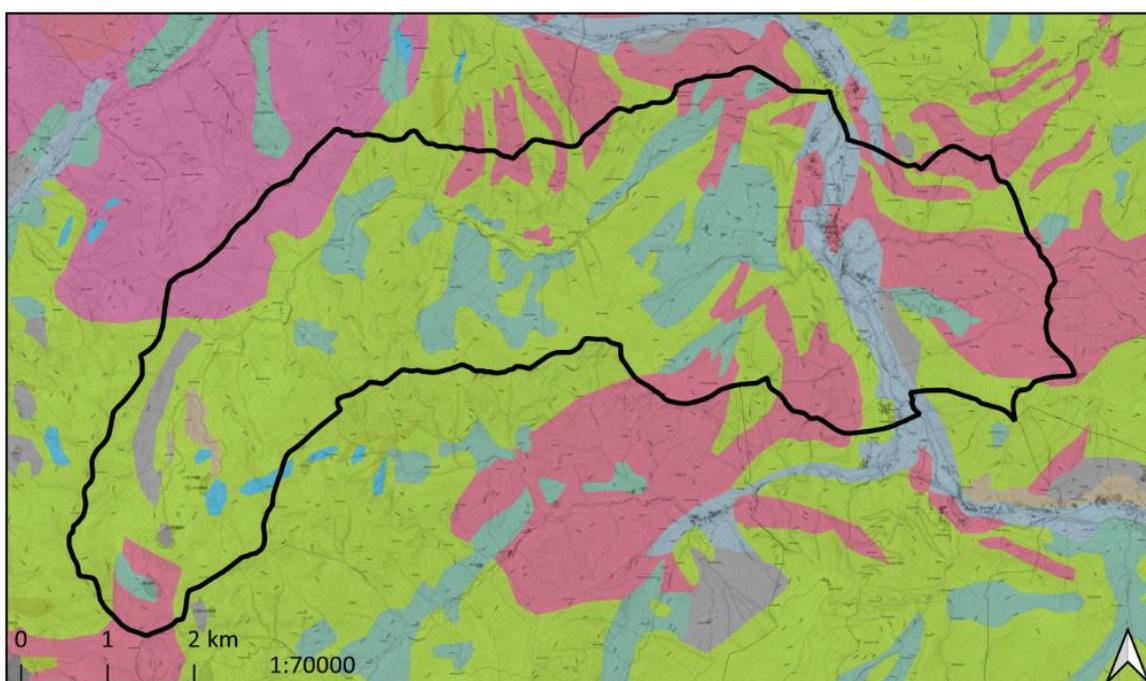


Figura 53 – Inquadramento geo-litologico con relativa legenda; scala 1:70000

5.4 Inquadramento idrologico/idrogeologico

Dal punto di vista idrologico, il Comune di Campertogno possiede numerosi corpi idrici superficiali (Figura 54), tra cui i più importanti sono il Fiume Sesia, affluente sinistro del Fiume Po con sorgente ad Alagna Valsesia e di lunghezza pari a 140 km, ed il Torrente Artogna, un affluente del Fiume Sesia con origine dal Lago di Cima. Altri corsi d'acqua sono la Crosa del Diavolo, il Croso del Basaleta, il Croso del Brione, il Croso dell'Era, il Croso Grande, il Croso Massero, il Croso Passallo, il Laghetto del Vallone, il Rio Gula di Grampa che, nonostante appartenga al Comune di Mollia, entra per un tratto brevissimo nel Comune di Campertogno per sfociare nel Fiume Sesia, ed infine il Rio La Pichera e il Croso Bolei, laddove il primo scorre a nord e il secondo nella parte centrale dell'area di studio. Inoltre, sono presenti altri numerosi corsi d'acqua privi di denominazione.

Ulteriori corpi idrici superficiali sono rappresentati dai diversi laghetti, situati per lo più nella Valle Artogna, ed in particolare a ovest del territorio comunale. I laghi maggiori sono tre, ovvero il Lago di Cima, ad una quota di 2424 m s.l.m., il Lago di Mezzo, a quota 2279 m s.l.m., ed infine il Lago di Fondo, il più piccolo dei tre e situato a quota 2225 m s.l.m. Si tratta di laghi formatisi nelle depressioni che rappresentano gli antichi circhi glaciali.

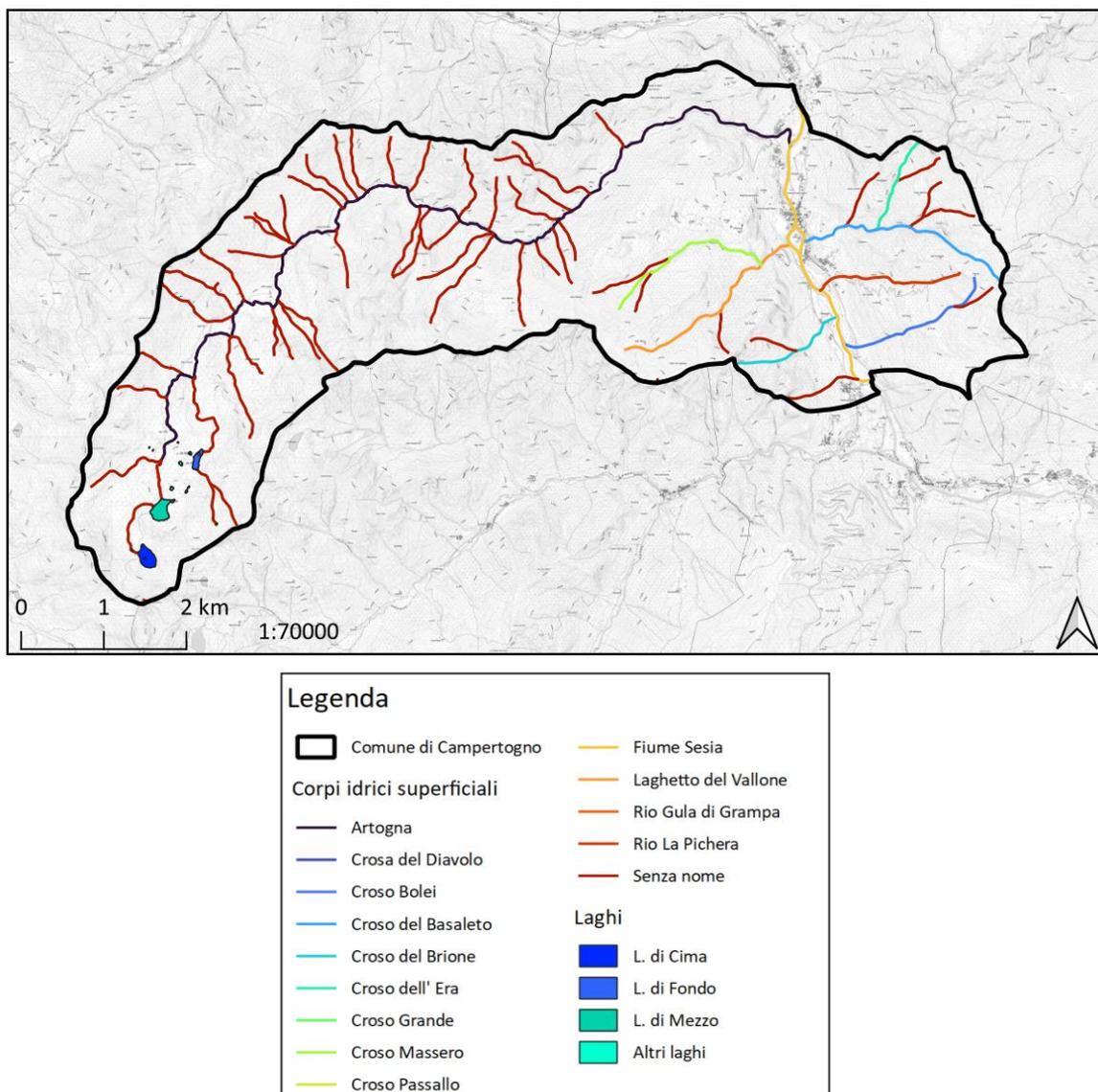


Figura 54 – Corpi idrici superficiali con relativa legenda; scala 1:70000

Dal punto di vista idrogeologico, sulla base di dati reperiti dal Geoportale di Arpa Piemonte (Figura 55) si individuano:

- Depositi fluviali wurmiiani e recenti poco o per nulla alterati, presenti in corrispondenza ed in prossimità del Fiume Sesia;
- Rocce calcaree, presenti in minoranza a ovest del territorio;
- Rocce cristalline silicatiche, che prevalgono sui precedenti e che interessano l'area di studio.

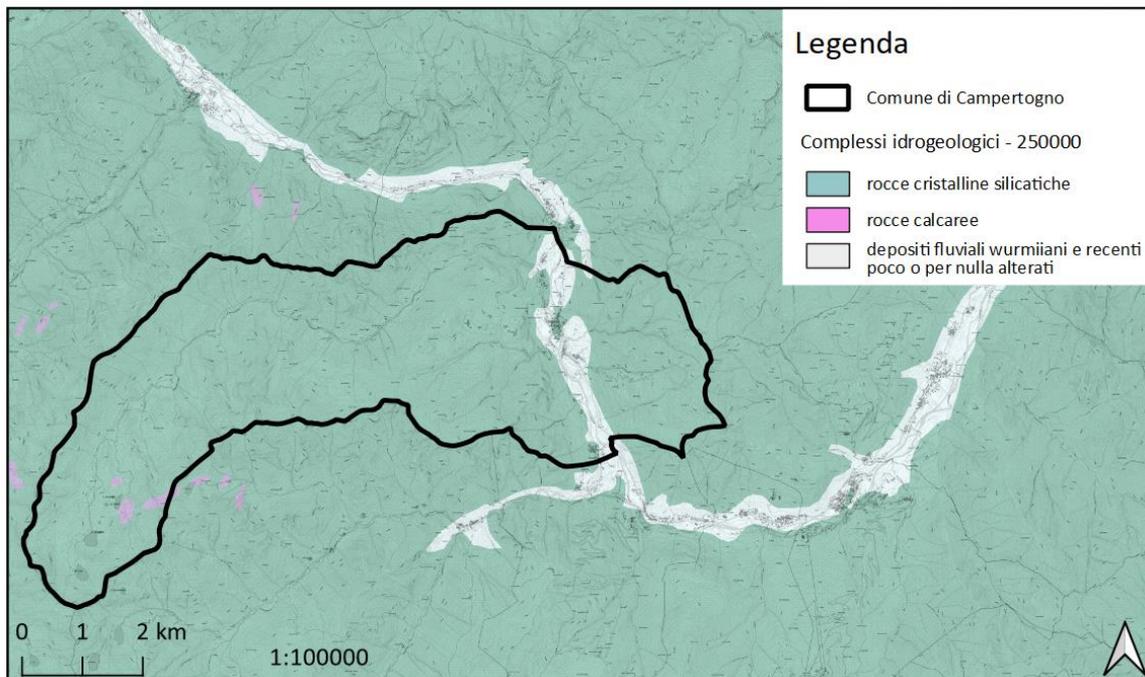


Figura 55 – Complessi idrogeologici; scala 1:100000

5.5 Inquadramento sismico

Dal momento che i terremoti possono essere causa scatenante eventi franosi, è importante avere un inquadramento anche da questo punto di vista. Secondo la classificazione sismica, il Comune di Campertogno ricade nella Zona 4², ovvero la zona meno pericolosa in quanto la probabilità che capiti un terremoto è molto bassa. Tuttavia, per la costruzione di opere, compresi gli interventi strutturali di protezione, ad esempio da eventi franosi, è necessario seguire quanto indicato dalle NTC 2018 al fine di tenere conto dell'azione sismica che agisce sulle strutture comportando uno stato tensionale aggiuntivo.

5.6 Inquadramento valanghivo

Secondo quanto fornito dal SIVA, il Sistema Informativo Valanghe sviluppatosi a partire dalla fine degli anni Novanta, non sono state registrate delle valanghe all'interno del territorio di Campertogno, anche se nelle zone circostanti si sono verificati dei fenomeni valanghivi, in particolare a sud-est del Comune. Tuttavia, utilizzando il modello AFRA messo a punto dall'Università di Pavia al fine di individuare e delimitare le aree

² Classificazione sismica aggiornata al 31 marzo 2022.

potenzialmente soggette al distacco di valanghe, e le immagini da aerofotointerpretazione, è stata possibile la redazione di cartografia tematica valanghe. Da queste analisi risulta che il territorio di Campertogno è potenzialmente soggetto al verificarsi di fenomeni valanghivi, come mostrato nella Figura 56, soprattutto in prossimità ed in corrispondenza dell'area di analisi. Si tratta di un aspetto da tenere in considerazione per il fatto che un fenomeno valanghivo, oltre ad essere minaccioso e dannoso per gli elementi a rischio presenti sul territorio, quali persone, edifici ed infrastrutture, può comportare dei danni anche ad eventuali opere di difesa da fenomeni franosi, come barriere paramassi o reti paramassi, minandone la funzionalità; inoltre, una valanga, anche se di ridotte dimensioni, potrebbe danneggiare il substrato roccioso già alterato portando a successivi crolli.

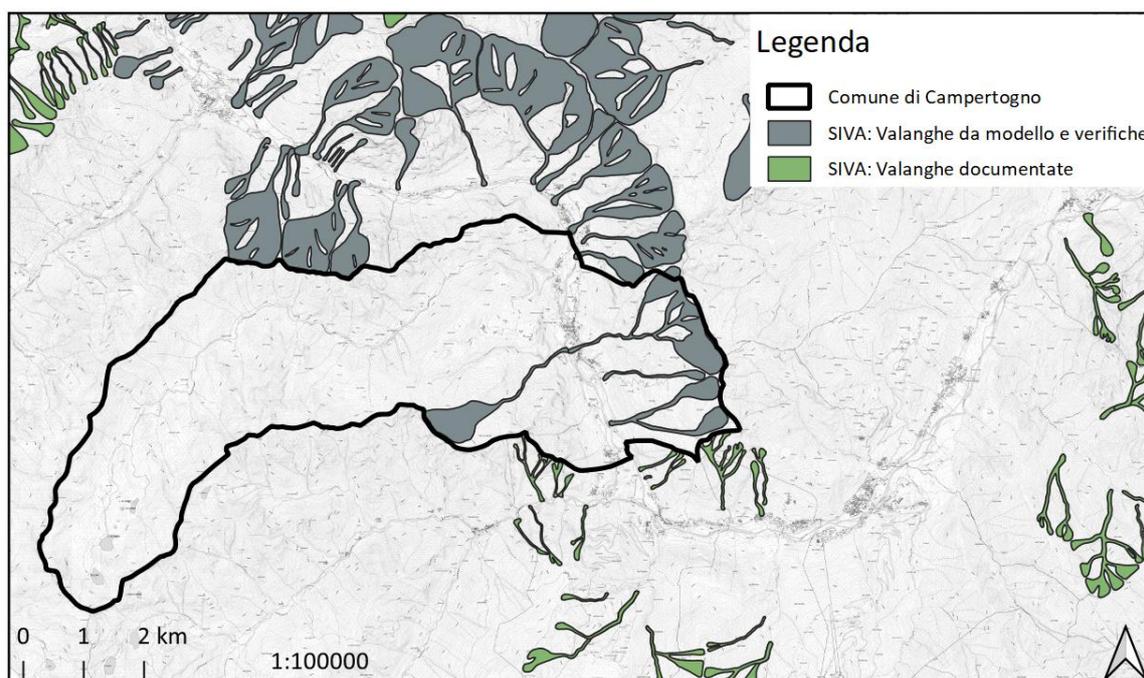


Figura 56 – Inquadramento valanghivo; scala 1:100000

Sulla base di alcuni dati reperiti dal Geoportale di Arpa Piemonte, non risultano essere presenti delle opere di difesa da fenomeni valanghivi all'interno del territorio comunale, come anche nel territorio circostante; tuttavia, durante il rilevamento di campagna avvenuto il 14 luglio 2022 è stata rilevata una barriera fermaneve in prossimità della zona Alpe Castello, come si può notare dalla Figura 57.



Figura 57 – Barriera fermaneve in prossimità della zona Alpe Castello, Campertogno (VC); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.7 Inquadramento franoso

Per l'inquadramento dell'area di studio dal punto di vista dei fenomeni franosi, si è fatto riferimento ai dati forniti da SIFraP, ovvero il Sistema Informativo Frane in Piemonte, implementato dal Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali di Arpa Piemonte che integra e aggiorna in modo costante la banca dati relativa ai fenomeni franosi in Piemonte. Tale banca dati viene implementata mediante il rilievo diretto sul terreno in seguito al verificarsi di eventi alluvionali, e l'analisi di immagini acquisite da aerofotointerpretazione. In particolare, in base alle informazioni e alle conoscenze a disposizione, i fenomeni franosi sono approfonditi su tre livelli:

- I livello – informazioni di base: è obbligatorio per ogni frana e contiene le informazioni basilari quali l'ubicazione, la geometria, la tipologia di movimento, lo stato di attività e il censimento di eventuali danni;
- II livello – informazioni dettagliate: risulta più approfondito del livello precedente, definendo la morfometria, la geologia, la litologia, l'uso del suolo, le date di attivazione, le cause predisponenti ed innescanti;
- III livello – monografie approfondite: contiene informazioni dettagliate sui danni, sulle indagini, sugli interventi di sistemazione, ed è facoltativo.

Dalla Figura 58 si evince come l'intero territorio comunale sia influenzato da fenomeni franosi; in particolare, si individuano:

- Aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi;
- Colamento rapido;
- Complesso;
- Crollo/Ribaltamento;
- DGPV.

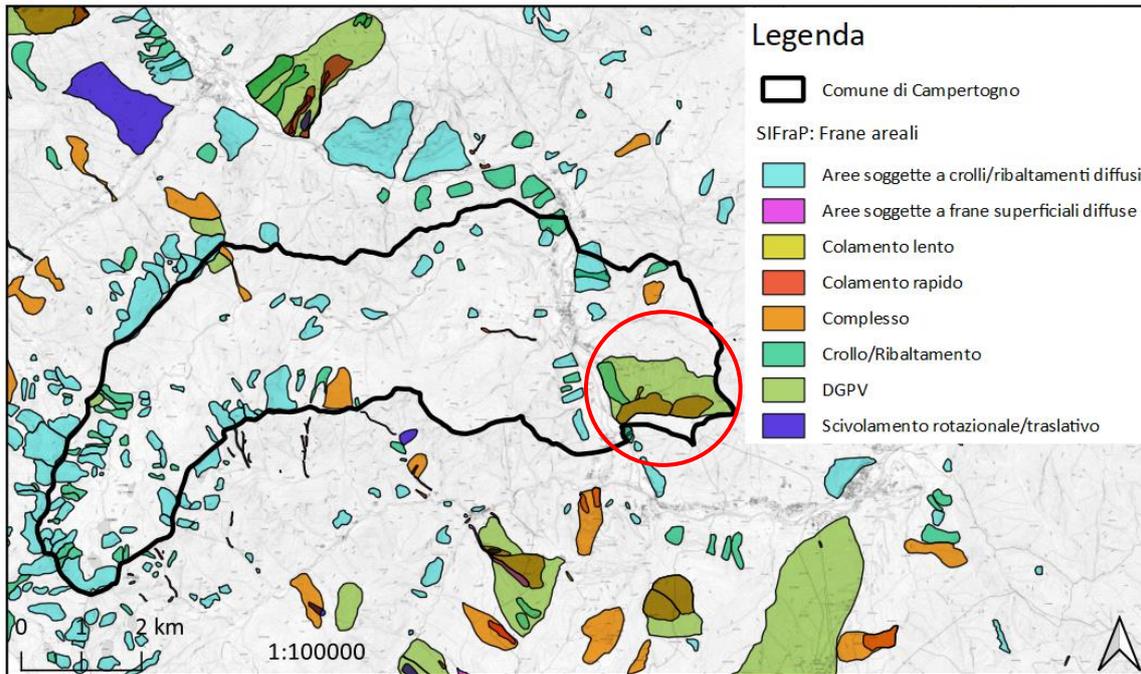


Figura 58 – Inquadramento franoso: il cerchio rosso individua l’area di studio; scala 1:100000

Per quanto riguarda l’area di studio, si segnala la presenza di aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi, DGPV e, poco più a sud, un complesso. Più nel dettaglio, si tratta di una DGPV con codice identificativo n.° 002-00632-01, e di un’area caratterizzata da crolli e ribaltamenti diffusi identificata dal codice n.° 002-00632-04. Dalla Figura 59, si nota come la DGPV sia di grosse dimensioni, estendendosi dalla Strada Provinciale 299, ad una quota di circa 800 m s.l.m., sino alla quota di 1850 m s.l.m. circa, in corrispondenza di Alpe Castello. Secondo la Scheda Frana di 1° livello reperita sul sito di ISPRA, è caratterizzata da una superficie di 1697216 m².

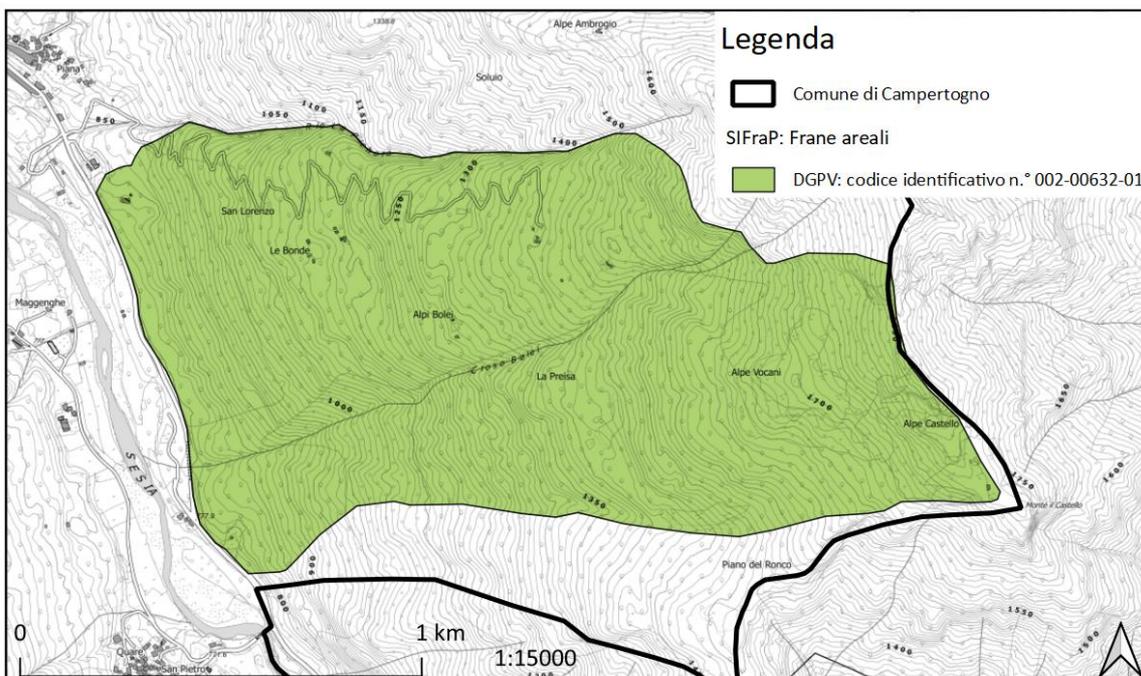


Figura 59 – Deformazione gravitativa profonda di versante con codice identificativo n.° 002-00632-01; scala 1:15000

Considerando la seconda tipologia di frana (Figura 60), ovvero crolli e ribaltamenti diffusi, le dimensioni sono decisamente più ristrette con un'estensione prevalentemente orizzontale in direzione nord-sud, e con uno sviluppo verticale dalla Strada Provinciale 299 fino alla quota di 970 m s.l.m. circa. Secondo la Scheda Frana di 1° livello reperita sul sito di ISPRA, è caratterizzata da una superficie di 166882 m².

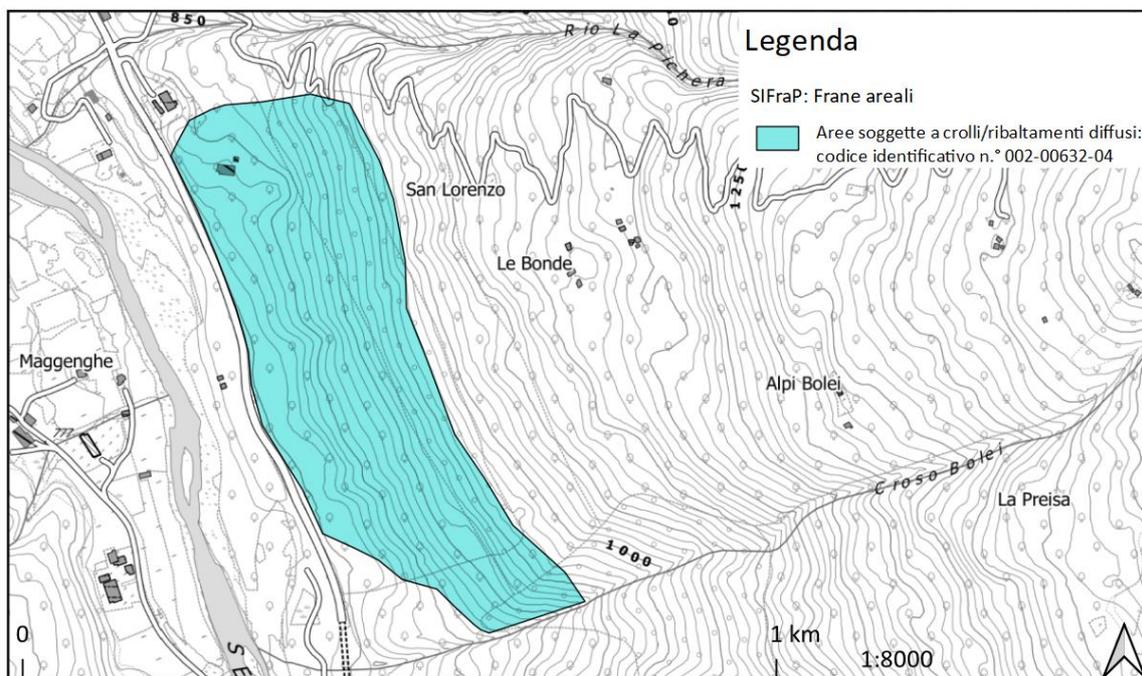


Figura 60 – Area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi con codice identificativo n.° 002-00632-04; scala 1:8000

5.8 Evento franoso del novembre 2021

5.8.1 Generalità

Come accennato all'inizio del presente capitolo, il caso studio è inerente all'evento franoso avvenuto sabato 13 novembre 2021 nel Comune di Campertogno; si è trattato di una frana da crollo che ha interessato un versante prossimo alla Strada Provinciale 299, in particolare il tratto ubicato tra il Croso Bolei ed il Rio La Pichera. In data 13 e 16 novembre 2021 sono stati effettuati dei sopralluoghi d'urgenza a cura del Dott. Geol. Giovanni Cavagnino e della Dott.ssa Geol. Chiara Minella dello Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC), a cui sono seguite delle indagini preliminari balistiche al fine di determinare gli opportuni interventi di somma urgenza. Oltre ad aver evidenziato i segni distintivi propri delle DGPV descritti nel paragrafo 3.1, le prime analisi hanno fornito la posizione della nicchia di distacco attiva, situata a valle della frazione Alpe Le Bonde ad una quota di 1070 m s.l.m. circa; in più, è stata identificata un'altra nicchia situata ad una quota più elevata della precedente ed in prossimità dell'Oratorio di San Lorenzo, anche se il corpo frana non ha minacciato il fondovalle. Più nel dettaglio, la nicchia di distacco individuata, relativa alla caduta di blocchi che ha coinvolto la S.P. 299, risulta ampia 20 metri circa, estesa verticalmente di 8 metri circa, e con uno spessore medio coinvolto di 3 metri circa, stimando così un volume di 480 m³.

La presenza di opere di protezione preesistenti non ha impedito il coinvolgimento della Strada Provinciale 299; difatti, era già stato costruito un rilevato paramassi in terra rinforzata alto 6 metri, preceduto da un vallo, ovvero una vasca di contenimento e accumulo dei blocchi realizzata al fine di favorire il rallentamento

dei blocchi stessi. La loro presenza è servita ad arrestare buona parte del corpo frana che ha raggiunto il fondovalle, senza impedire, però, il superamento di un singolo blocco avente dimensioni inferiori rispetto agli altri, probabilmente a causa degli effetti di rimbalzo e frantumazione contro altri massi. Spostandosi più a sud, laddove termina il rilevato preesistente, la S.P. 299 è stata interessata in misura maggiore da alcuni blocchi, rimossi tempestivamente in seguito all'evento franoso. Inoltre, sono stati individuati altri massi che, pur non avendo incontrato la strada, si sono propagati in lontananza arrestandosi a circa 60 metri più a sud-est del rilevato. Infine, è stato segnalato come alcuni blocchi di dimensioni più ristrette abbiano raggiunto altezze anche di 10 metri circa dal piano campagna, come testimoniato da alcune piante da essi tranciate.

5.8.2 Simulazioni

Durante il rilevamento datato 16 novembre 2021, avvenuto a cura dei già menzionati geologi, sono state effettuate delle misure sui blocchi rilevati in situ al fine di calcolare il volume di progetto e simulare le traiettorie più probabili. In particolare, le misure hanno interessato più punti ubicati a est della S.P. 299 lungo il rilevato paramassi, indicato dalla linea rossa nella Figura 61, in cui sono stati presi in considerazione sia alcuni blocchi associati all'evento franoso del novembre 2021 sia alcuni blocchi relativi a crolli precedenti. Complessivamente, dalla somma dei dati è stato ottenuto un valore medio pari a $8,63 \text{ m}^3$; perciò, ai fini della modellazione con il codice di calcolo Rockyfor3D è stato assunto un volume di progetto di 8 m^3 . I risultati così ottenuti, e gentilmente resi disponibili, sono stati utilizzati nello svolgimento del presente elaborato.



Figura 61 – WayPoint delle aree di saggio dei blocchi rilevati in situ [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

5.8.3 Interventi con carattere di somma urgenza

A partire dai risultati ottenuti con varie simulazioni, che hanno dimostrato la permanenza del rischio elevato di cadute di massi dai versanti a monte e la non trascurabile estensione del fenomeno franoso, con carattere di somma urgenza è stato suggerito di:

- Svuotare il vallo per il rallentamento e l'accumulo dei blocchi in modo tale da garantire nuovo spazio a disposizione per eventuali ulteriori crolli e, per quanto possibile, impedire la creazione di schegge in seguito all'impatto tra i vari blocchi;

- Realizzare un prolungamento del vallo preesistente in direzione sud-est a causa dell'estensione in orizzontale del corpo frana, avendo cura di rimuovere i massi di grosse dimensioni relativi a crolli precedenti;
- Realizzare un prolungamento del rilevato paramassi in terra rinforzata preesistente in direzione sud-est in modo tale da intercettare anche le traiettorie divergenti ottenute dalle simulazioni.

Per quanto riguarda quest'ultimo punto, si segnala come ci sia una differenza in altezza di un metro e mezzo tra i due rilevati; difatti quello preesistente è alto 6 metri, mentre il prolungamento è alto 7,5 metri. Inoltre, mentre il primo raggiunge una lunghezza di 100 metri circa, il secondo ha una lunghezza di circa 50 metri.



Figura 62 – Differenza di altezza tra il rilevato preesistente (a destra) ed il prolungamento (a sinistra), vista da monte; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9 Rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

In data 14 luglio 2022, nell'ambito delle attività di Tesi, è avvenuto il rilevamento di campagna nell'area di studio al fine di identificare eventuali nuove criticità e di acquisire i dati necessari all'elaborazione delle simulazioni tramite il software Rockyfor3D, che sono trattate nel seguito. Nei paragrafi seguenti viene proposta l'analisi dell'intero percorso, che è stato suddiviso in più parti per descrivere ed approfondire quanto osservato in situ in ogni singola tratta, con relative criticità.

5.9.1 Descrizione del tracciato

Giunti sull'area di studio, è stata inizialmente consultata la carta delle pendenze per definire gli obiettivi del sopralluogo e, di conseguenza, il percorso da seguire. In particolare, sulla base della suddetta carta (Figura 63), si sono evidenziate delle zone colorate in azzurro con estensione parallela al fondovalle identificate da una pendenza inferiore a 15°; essendo queste aree pianeggianti situate in prossimità di zone con pendenze

anche superiori a 45°, si è ipotizzato alla presenza di trenches formatesi dal movimento indotto dalla deformazione gravitativa profonda di versante che grava sull'area in esame.

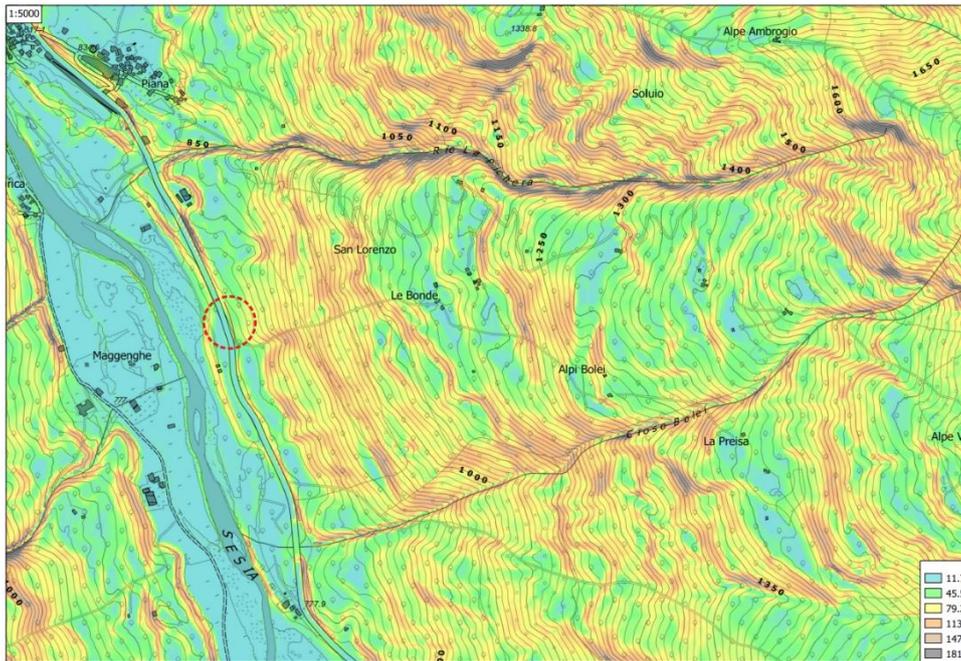


Figura 63 – Estratto dalla carta delle pendenze in scala 1:5000. Il cerchio rosso individua l'area di ubicazione del rilevato paramassi sulla S.P. 299 [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

Nella Figura 64 è riportato l'estratto della carta speditiva di campagna con sopra indicato il sistema di trenches delle DGPV nel settore di sopralluogo. In particolare, le linee rosse mostrano l'estensione delle trenches, disposte parallelamente al fondovalle, mentre le barbette indicano le scarpate, ovvero dove le trenches stesse immergono.

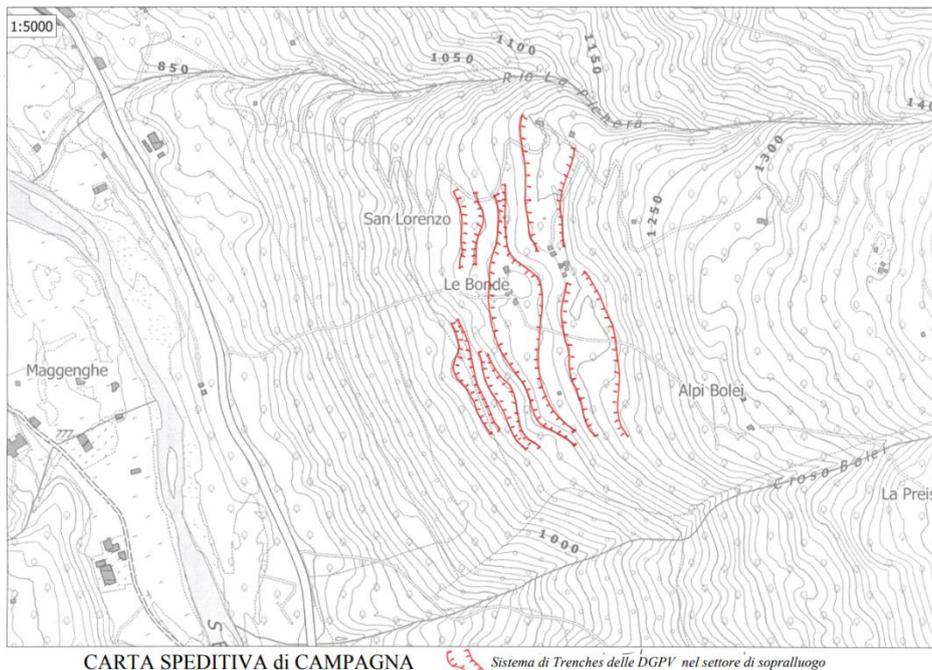


Figura 64 – Estratto della carta speditiva di campagna in scala 1:5000 con indicazione del sistema di Trenches delle DGPV nel settore di sopralluogo [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

In Figura 65 è rappresentato il percorso seguito durante il rilevamento, suddiviso nelle cinque tappe effettuate laddove si è deciso di approfondire maggiormente le condizioni presenti.

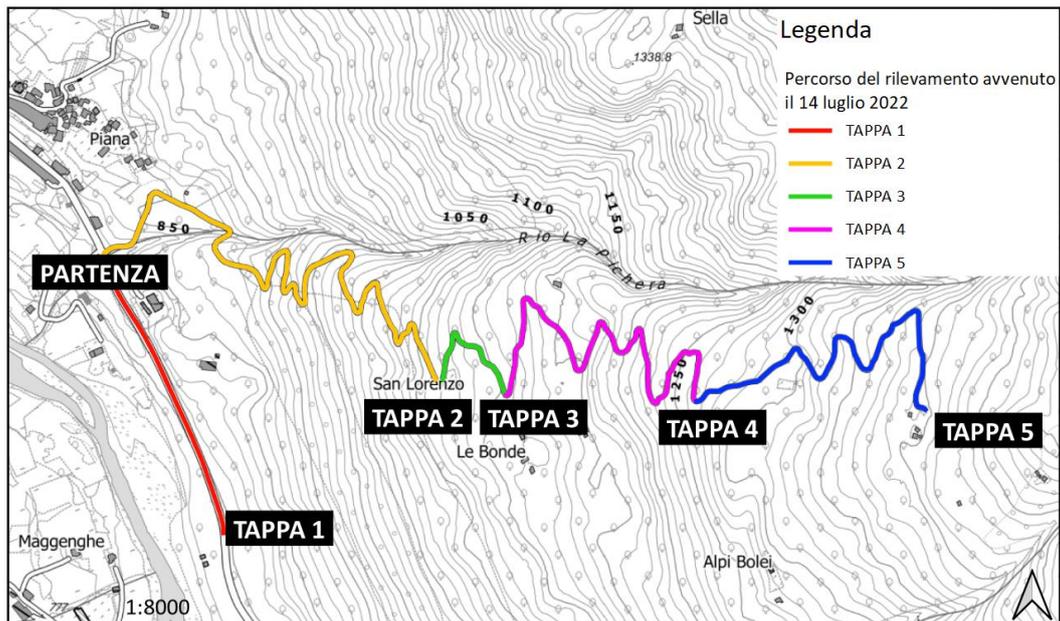


Figura 65 – Rappresentazione del percorso seguito durante il rilevamento di campagna avvenuto il 14 luglio 2022; scala 1:8000

5.9.2 Tappa 1: Strada Provinciale 299

La prima tappa effettuata è situata lungo la Strada Provinciale 299; in particolare, si tratta della zona interessata dalla caduta di blocchi avvenuta durante l’evento del novembre 2021 (Figura 66). Il pallino verde individua il primo waypoint nominato 003 ottenuto tramite GPS, il quale indica il punto di partenza del rilevamento. Si è proceduto lungo la S.P. 299 verso sud in direzione Varallo per circa 400 metri, dopo i quali si è raggiunta l’area sul bordo strada (est) in cui sono ubicati i due rilevati paramassi ed il vallo.

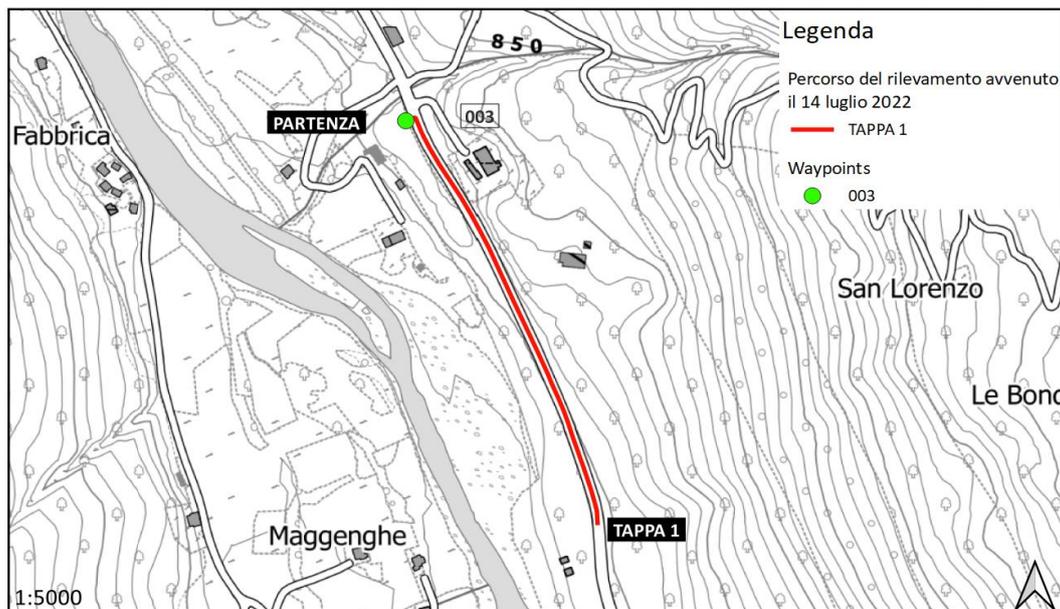


Figura 66 – Rappresentazione del percorso verso la prima tappa: Strada Provinciale 299; scala 1:5000

Da questa posizione è stato possibile avere un'ampia visuale del corpo frana, a partire dalla zona di distacco, passando alla zona di scorrimento, per poi finire nella zona di accumulo. In particolare, dalla Figura 67 si nota perfettamente il canale seguito dai blocchi rocciosi che si estende verso valle confinato lateralmente dagli alberi. Inoltre, si intravede la tipica forma a ventaglio che caratterizza questi fenomeni gravitativi, ovvero un primo tratto incanalato che si espande più a valle formando una conoide costituita non solo da blocchi rocciosi di varia pezzatura, ma anche da alberi dalle dimensioni ridotte che si trovavano nella traiettoria prima dell'evento.



Figura 67 – Corpo frana della caduta di blocchi relativa all'evento del novembre 2021, vista verso monte; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

In seguito ad alcune analisi effettuate a cura dello Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC), è stato dimostrato come le altezze raggiunte dai blocchi si siano aggirate anche sui 10 metri, basandosi sull'osservazione dei segni lasciati dall'impatto dei blocchi contro gli alberi (Figura 68).

Passando alla zona di accumulo, in seguito all'evento si è proceduto alla rimozione dei blocchi in modo da svuotare il vallo posto a tergo del rilevato paramassi preesistente, creando così dello spazio disponibile ad altri possibili eventi franosi. Difatti, dalla Figura 69 si osservano bene il vallo destinato al rallentamento e alla raccolta dei blocchi rocciosi in caduta, ed entrambi i rilevati paramassi in terra rinforzata: quello preesistente e quello di nuova realizzazione per somma urgenza, quest'ultimo dimensionato per sostenere energie cinetiche di circa 5000-8000 kJ. Dalla medesima immagine si può osservare la differenza nell'aspetto tra i due rilevati: quello preesistente è ricoperto dalla vegetazione la quale ne permette un buon inserimento nel territorio, mentre quello nuovo risulta ancora nudo con le geogriglie di rinforzo ben visibili. Nonostante la crescita della vegetazione, sul rilevato preesistente risultano tuttora visibili i crateri lasciati in seguito all'urto dei blocchi rocciosi provenienti da monte. Inoltre, in lontananza si scorge un rilevato meno imponente dei

due precedenti realizzato in materiale sciolto al fine di cucire lo spazio libero più a sud; nel dettaglio, è alto circa 2-2,5 metri con una lunghezza di circa 60 metri, e il materiale di cui è costituito è terreno sabbioso.

In ultimo è da menzionare come il suolo sia attualmente costituito da materiale a granulometria fine che risulta particolarmente morbido e soffice. In base a quanto esposto nel capitolo 4 relativo alla caduta massi, questo aspetto è fondamentale nella dinamica dei blocchi che si muovono verso valle; difatti, qualora il materiale costituente il versante sia caratterizzato da dimensioni inferiori a quelle dei blocchi rocciosi, allora viene favorita la dissipazione di parte dell'energia cinetica posseduta da questi ultimi, i quali tenderanno non più a rimbalzare, bensì a rotolare lungo il versante stesso. Dunque, il materiale identificato in situ risulta favorevole per il rallentamento dei blocchi a sostegno dei rilevati paramassi.



Figura 68 – Segni degli impatti dei blocchi rocciosi contro gli alberi [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]



Figura 69 – Rilevati paramassi in terra rinforzata, rilevato in materiale sciolto e vallo; foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9.3 Tappa 2: San Lorenzo

Nella Figura 70, oltre alla rappresentazione del tragitto, sono visibili due waypoints: il 004 e il 005; essi identificano rispettivamente il punto laddove è ubicata la nicchia di distacco dei blocchi che non hanno raggiunto il fondo valle, e la nicchia di distacco dei blocchi che durante l'evento franoso hanno interessato la S.P. 299.

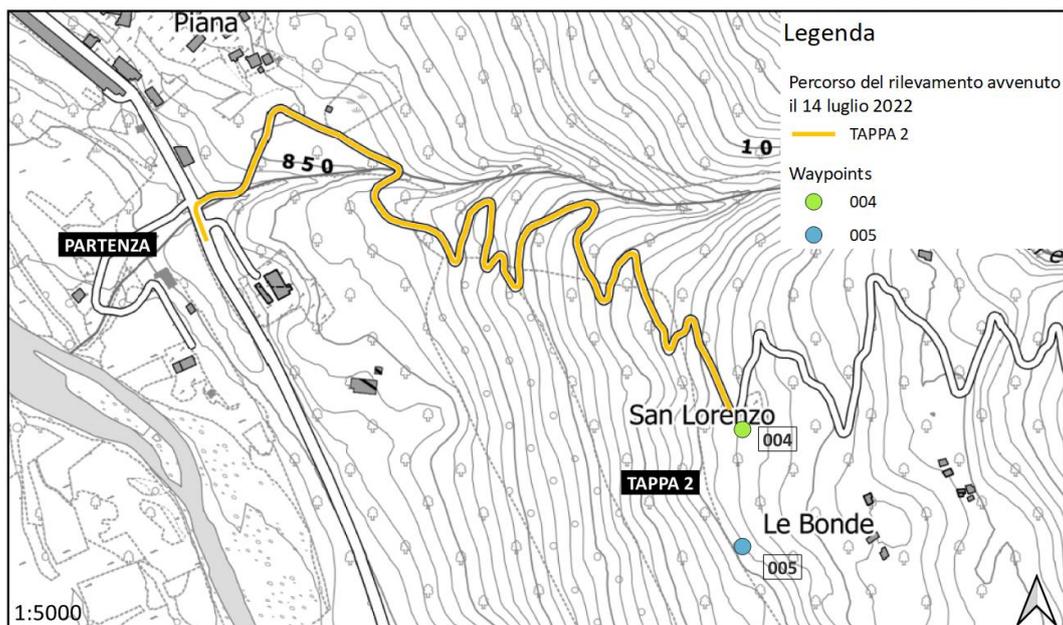


Figura 70 – Rappresentazione del percorso verso la seconda tappa: San Lorenzo; scala 1:5000

Durante il percorso sono stati notati vari dettagli. Inizialmente, nei primi metri della strada di montagna percorsa si è potuto osservare un altro evento franoso di recente sviluppo e dalla dinamica associabile ad una colata detritica. Nel dettaglio, questa colata è avvenuta lungo il Rio La Pichera, che scorre a nord dell'area di studio.



Figura 71 – Colata detritica di recente sviluppo, vista verso monte (a sinistra) e vista verso valle (a destra); foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Successivamente, man mano che si avanzava, ai lati della strada erano ben visibili dei segni distintivi che hanno rimandato subito alla presenza di una deformazione gravitativa profonda di versante, quali trenches e scarpate. Inoltre, girandosi attorno si è potuta osservare la vegetazione in termini sia di specie che di dimensioni; la foresta è risultata composta da alberi ad alto fusto, prevalentemente faggio, con diametri variabili anche di parecchi centimetri: da circa 30 centimetri ad oltre 60 centimetri. Essi non si sono rivelati disposti in modo regolare, ma piuttosto sparsi sul terreno ad una distanza di circa due o tre metri tra loro.



Figura 72 – Trench identificata nella seconda tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Giunti nella zona prossima a San Lorenzo si è momentaneamente abbandonata la strada per dirigersi, a qualche metro di distanza, alla nicchia di distacco della caduta di blocchi avvenuta nel novembre 2021. L'ampia visuale da questa posizione ha permesso di osservare il canale formatosi in seguito alla caduta dei blocchi verso valle, che era stato precedentemente analizzato dalla Strada Provinciale 299; i blocchi sono apparsi di diametri differenti: da piccoli volumi a veri e propri massi rocciosi.



Figura 73 – Caduta di blocchi relativa all'evento del novembre 2021, vista verso valle; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

In base ai rilevamenti avvenuti subito dopo l'evento e le relative foto a disposizione si è visto come la colorazione dei blocchi caduti a valle sia più scura rispetto a quella dei blocchi distaccatisi e tuttora giacenti al di sotto della nicchia e lungo il versante; in particolare, questi ultimi blocchi possiedono una colorazione tendente al bianco indicante la presenza di minerali silicatici, costituenti la componente acida. Inoltre, al tatto la roccia è risultata particolarmente alterata, in contrapposizione con quanto emerso dai rilevamenti post-evento. Difatti, le misure effettuate sui blocchi che hanno raggiunto il fondovalle hanno fornito delle dimensioni estremamente variabili con dei volumi anche molto grandi. Tuttavia, questo risultato apparirebbe inverosimile se confrontato con la roccia alterata osservata in prossimità della nicchia di distacco dal momento che, durante la caduta, le numerose interazioni avvenute tra i blocchi ed il versante avrebbero dovuto favorire la disgregazione dei blocchi stessi impedendo il raggiungimento di certi volumi. Considerando questi due aspetti e l'assetto geologico dell'area indagata, sussistono più strati con litologie diverse, ovvero sono presenti delle intrusioni di rocce con colorazione chiara, indicante i granitoidi, e di rocce a colorazione più scura dovuta alla componente basica, indicante gli gneiss eclogitici.



Figura 74 – Zona di accumulo della caduta di blocchi relativa all'evento del novembre 2021 [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

Rivolgendo lo sguardo verso la parete in cui è avvenuto il distacco, si è notato come anch'essa abbia una colorazione non troppo scura e come sia tuttora presente della roccia in posto (Figura 75). Sono ancora perfettamente visibili i punti in cui è avvenuta la separazione tra la roccia in posto e i blocchi. La causa del distacco, come dimostrato durante il rilevamento, è imputabile alla vegetazione, i cui apparati radicali si sono infiltrati nella frattura di detensionamento allargandola con il tempo fino a provocarne il distacco stesso, tutto ciò accompagnato e favorito dal lento movimento indotto dalla deformazione gravitativa profonda di versante.



Figura 75 – Nicchia di distacco della caduta di blocchi relativa all'evento del novembre 2021; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9.4 Tappa 3: Le Bonde

Una volta analizzata la nicchia di distacco in prossimità dell'Oratorio di San Lorenzo, si è ritornati sulla strada sterrata per proseguire il cammino in salita al fine di verificare la presenza di eventuali ulteriori nicchie di distacco e di eventuali segni distintivi propri delle deformazioni gravitative profonde di versante.

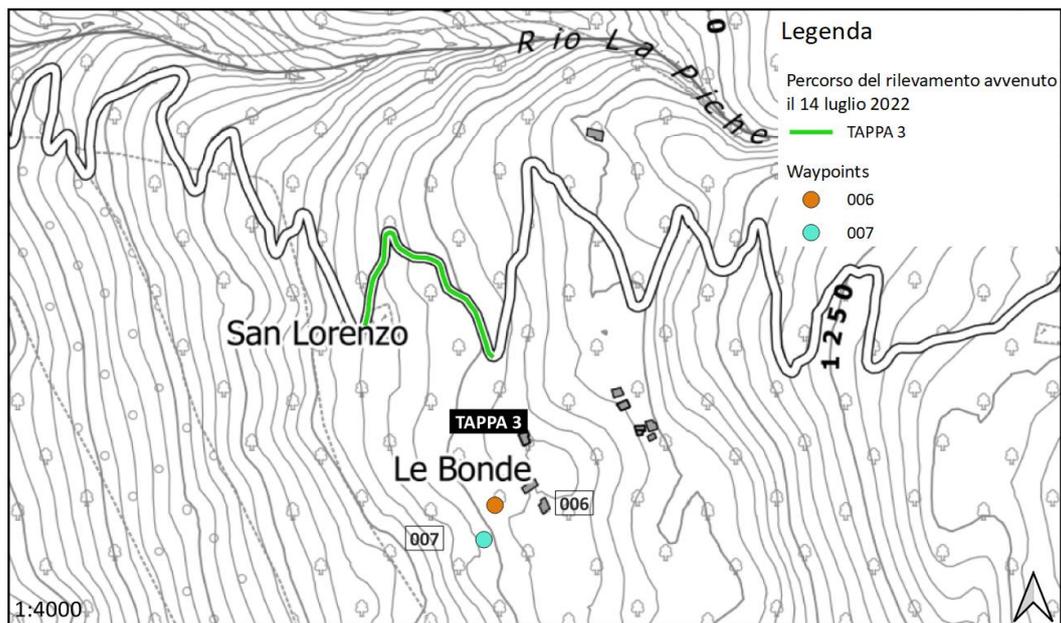


Figura 76 – Rappresentazione del percorso verso la terza tappa: Le Bonde; scala 1:4000

Durante il tragitto ci si è trovati di fronte ad una trench di notevole entità, elemento significativo che identifica la presenza della deformazione gravitativa profonda di versante (Figura 77). Questa trench possiede delle dimensioni tali da poter essere considerata un vallo naturale in grado di arrestare, o quantomeno rallentare, eventuali blocchi in caduta da nicchie sovrastanti.



Figura 77 – Trench identificata nella terza tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022



Figura 78 – Orlo di scarpata identificato nella terza tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Sul lato destro della strada sterrata è stata fotografata una scarpata parallela al fondovalle formata a seguito del lento movimento nel tempo del corpo frana; dalla Figura 78, in cui si scorge l'orlo della scarpata stessa, si osserva come questa zona sia ricoperta da alberi ad alto fusto, principalmente latifoglie, con diametri variabili tra loro anche di una decina di centimetri circa.

Più in alto è presente un alpeggio, situato in zona Alpe Le Bonde al di sopra della nicchia di distacco dell'evento del novembre 2021; nella Figura 76 quest'area è identificata dal waypoint 006. Il territorio attraversato si è manifestato più aperto per quanto riguarda la vegetazione, dal momento che gli alberi sono apparsi sempre più radi e a distanze maggiori tra loro. In quest'area sono stati notati ulteriori elementi morfologici quali dei rigonfiamenti, delle piccole scarpate e dei gradini morfologici, i quali danno un'indicazione sul fatto che la zona non è ferma, bensì in un continuo lento movimento che trasforma nel tempo il paesaggio geologico modificandone la morfologia (Figura 79).



Figura 79 – Prato in pendenza con rigonfiamenti e gradini morfologici; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Infine, è stata notata la presenza di blocchi rocciosi anche di grandi dimensioni (Figura 80); tuttavia, a differenza della nicchia di distacco ubicata al di sotto di alcuni metri che risulta attiva, in questo caso la zona, identificata nella Figura 76 dal waypoint 007, non ha suscitato particolari preoccupazioni in termini di instabilità, dal momento che i blocchi sono apparsi fermi e la parete non ha presentato segni di movimento. Dunque, l'area ad Alpe Le Bonde è risultata stabile senza segnali di movimenti franosi recenti.



Figura 80 – Blocchi rocciosi non associabili ad una potenziale nicchia di distacco; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9.5 Tappa 4: Alpi Bolei

Il percorso seguito è riportato in Figura 81.

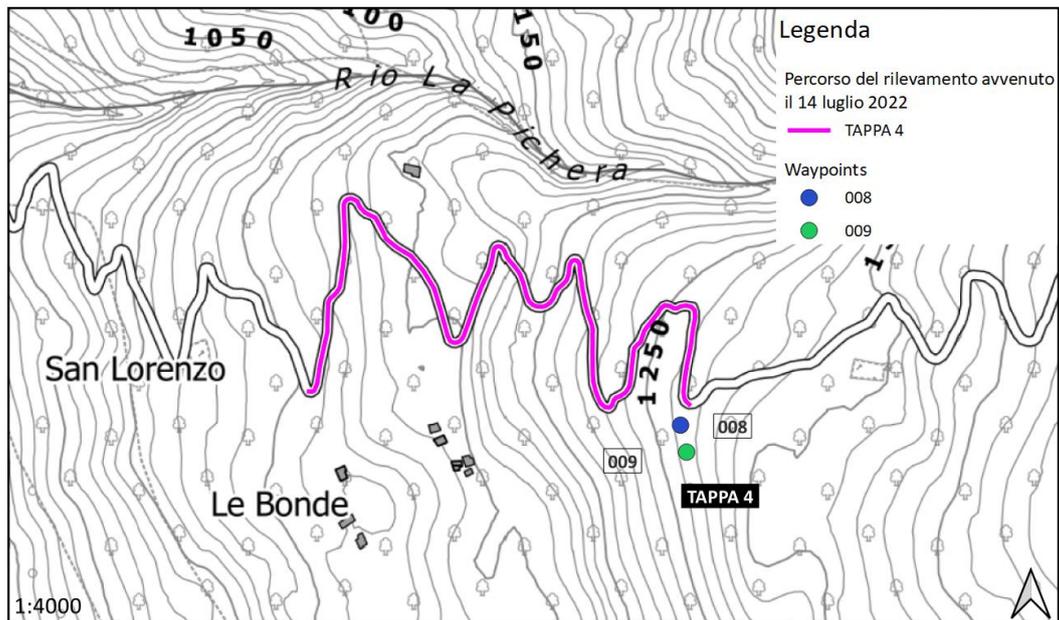


Figura 81 – Rappresentazione del percorso verso la quarta tappa: Alpi Bolei; scala 1:4000

Il paesaggio ha mostrato ulteriori elementi morfologici significativi propri delle deformazioni gravitative profonde di versante, a partire da un prato sviluppato in pendenza costituito da gradini morfologici e rigonfiamenti, anche se meno pronunciati rispetto al caso analizzato in precedenza, che ha suscitato un senso di spanciamento verso l'osservatore, a dimostrare ancora una volta la presenza di una deformazione gravitativa profonda di versante (Figura 82).



Figura 82 – Prato in pendenza con rigonfiamenti e gradini morfologici che rivela un senso di spanciamento verso l'osservatore; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Successivamente, sul lato destro della strada sterrata ci si è trovati di fronte ad una trench, meno profonda della precedente, ma pur sempre vasta e molto sviluppata in lunghezza. La vegetazione cresciuta al di sopra è apparsa meno fitta rispetto ad altre zone esaminate, con piante ad alto fusto dai diametri molto diversi tra loro e distanti, talvolta, anche più di due metri (Figura 83).



Figura 83 – Identificazione di una trench nella quarta tappa; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

Giunti ad uno dei tanti tornanti che caratterizzano la strada sterrata, si è nuovamente abbandonato il percorso principale per addentrarsi nel bosco ed osservare altri elementi importanti, come indicato dai waypoints 008 e 009 nella Figura 81. Tra la vegetazione, che nel frattempo si è rivelata nuovamente più fitta, sono stati identificati dei blocchi rocciosi, anche di notevole entità, giacenti sul pendio. Spostandosi ulteriormente di qualche metro è stata avvistata una parete rocciosa che ha subito destato preoccupazione a causa della presenza di fratture e della sua posizione in condizioni di forte instabilità; al di sotto sono stati osservati altri blocchi, dalle dimensioni più ridotte di quelli visti in precedenza, distaccatisi dalla parete rocciosa (Figura 84, Figura 85). Dunque, la quarta tappa si è rivelata problematica dal punto di vista della stabilità, tanto da essere stata necessariamente presa in considerazione nella successiva analisi numerica effettuata con il software Rockyfor3D, inserendola nei dati di input come area sorgente. Anche se la lunga distanza dal fondovalle e la presenza di una fitta foresta rendono improbabile il raggiungimento dei blocchi sulla Strada Provinciale 299, non vanno dimenticati i numerosi alpeggi che prendono posto nelle zone sottostanti, un'interazione con i quali potrebbe portare allo sviluppo di possibili gravi conseguenze. Tuttavia, sussiste la possibilità che avvenga un disboscamento, ad esempio a causa di un incendio, diminuendo così la probabilità che i blocchi rocciosi in movimento vengano fermati prima di raggiungere il fondovalle. Inoltre, una tale condizione fortemente instabile è bene che venga segnalata adeguatamente facendola presente anche a chi decide di addentrarsi nei boschi per evitare che una semplice escursione si trasformi in un grave incidente.



Figura 84 – Blocchi rocciosi distaccati e accumulati sotto la parete rocciosa instabile; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022



Figura 85 – Identificazione di una potenziale nicchia di distacco nella quarta tappa (a sinistra) con un particolare delle fratture che caratterizzano l'ammasso roccioso (a destra); foto scattate durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9.6 Tappa 5: Alpe Selva

La quinta ed ultima tappa effettuata durante il rilevamento è avvenuta in zona Alpe Selva; nella Figura 86 è rappresentato il tragitto.

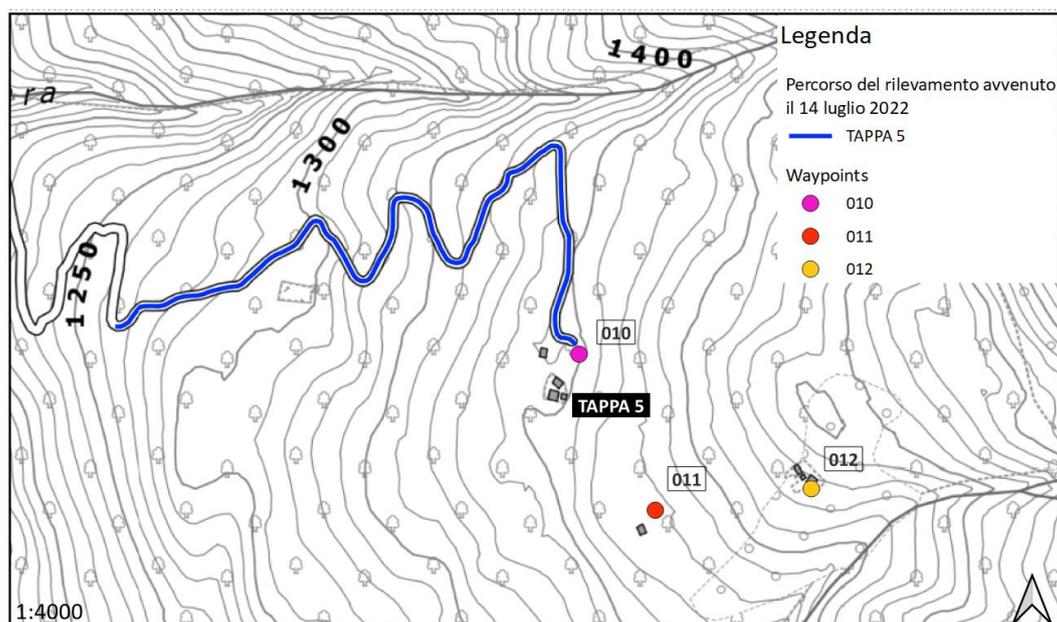


Figura 86 – Rappresentazione del percorso verso la quinta tappa: Alpe Selva; scala 1:4000

In questa zona la strada sterrata termina per lasciare spazio ad un ampio ripiano, identificato dal waypoint 010 (Figura 86); da qui in poi è possibile proseguire il cammino fino a quote superiori seguendo un sentiero immerso nella vegetazione, presente questa volta sia come alberi ad alto fusto che come cespugli di tipologia varia. Proseguendo lungo il sentiero ci si è ritrovati su un ripiano con delle case diroccate, ad una quota di quasi 1500 m s.l.m. e identificato dal waypoint 012 (Figura 86). Da questa posizione si è avuta un'ampia visuale della parte sommitale della deformazione gravitativa profonda di versante, in cui sono stati notati più

elementi, tra i quali una parete particolarmente aggettante costituita da roccia fratturata, posizionata in condizioni di forte instabilità segnata non solo dalle numerose fratture, ma anche dalla vegetazione che giace al di sopra; gli apparati radicali potrebbero insediarsi all'interno delle fratture stesse portando ad una loro espansione fino al distacco vero e proprio dei blocchi rocciosi (Figura 87). Sulla base di tali considerazioni, anche questa parete potrebbe rivelarsi una potenziale nicchia di distacco con la stessa dinamica di quella che ha generato la caduta di massi avvenuta nel novembre 2021, portando gravi conseguenze agli elementi a rischio situati al di sotto.

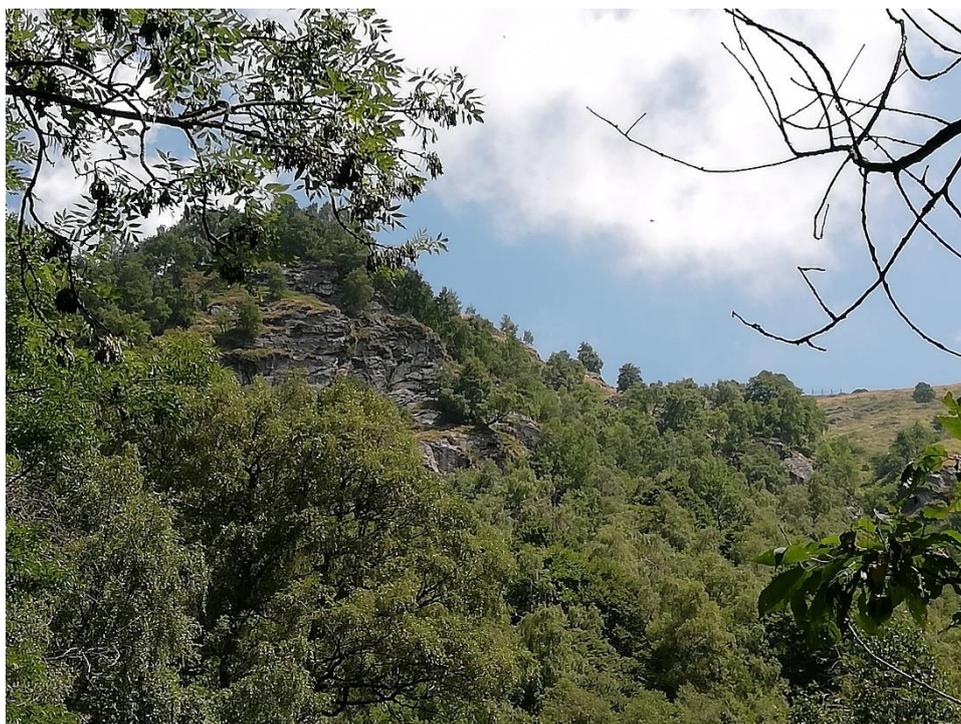


Figura 87 – Identificazione di una parete rocciosa in condizioni instabili; foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

In direzione sud-est in prossimità della zona Alpe Castello, laddove è ubicata una barriera fermaneve, sono stati notati dei blocchi rocciosi di grosse dimensioni disposti sulla sommità del versante; a prima vista sono sembrati in posizione instabile tanto da potersi mettere in moto a causa del lento movimento a cui è sottoposto il versante (Figura 88). Un sopralluogo avvenuto successivamente proprio in corrispondenza della sommità a cura del Dott. Geol. Giovanni Cavagnino e della Dott.ssa Geol. Chiara Minella ha confermato questa osservazione; dal momento che si tratta della parte del versante posta a quota più elevata, quest'ultima area è stata considerata come la nicchia più alta presente sulla deformazione gravitativa profonda di versante.



Figura 88 – Parete rocciosa in condizioni instabili (a sinistra) e nicchia più alta della DGPV (al centro); foto scattata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022

5.9.7 Conclusioni sul rilevamento

A conclusione di questa descrizione sul rilevamento di campagna, si può affermare come esso sia stato molto fruttuoso e soddisfacente per quanto riguarda gli obiettivi predisposti all'inizio della camminata; difatti, è stata dimostrata la precedentemente ipotizzata presenza di trenches laddove la carta delle pendenze forniva delle zone pianeggianti confinate lateralmente da tratti con pendenze decisamente più marcate, ed è stata confermata la presenza di ulteriori potenziali nicchie di distacco a quote superiori a quella da cui si è generata la caduta di massi relativa all'evento del novembre 2021, segnate sulla carta delle pendenze come zone caratterizzate da pareti molto acclivi. Durante il rilevamento si è anche proceduto ad un'analisi qualitativa delle conseguenze dovute ai possibili eventi di crollo.

Le aree di possibile distacco individuate, ubicate in zone Alpi Bolei, Alpe Selva e Alpe Castello, sono apparse così preoccupanti in termini di fratturazione e stabilità tanto da essere state prese in considerazione nella successiva analisi numerica. Per ciò che riguarda la nicchia propria dell'evento franoso del novembre 2021, per evitare di creare confusione tra i nomi si sono unite in un'unica nicchia di distacco quella i cui blocchi hanno raggiunto il fondovalle, appena sotto l'alpeggio Le Bonde, e quella i cui blocchi si sono fermati prima, in zona San Lorenzo, e la si è associata alla zona di San Lorenzo.

6 Dati satellitari

Oltre ai dati forniti dallo Studio Tecnico Associato di Geologia TecnoSesia di Borgosesia (VC) e a quelli ottenuti durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022, sono stati analizzati alcuni dati ottenuti tramite interferometria SAR di Arpa Piemonte. Come affermato nel paragrafo 3.4 relativo alle tecniche di monitoraggio dei corpi franosi, il sistema di telerilevamento SAR (*Synthetic Aperture Radar*) si presta in maniera ottima per l'osservazione dei processi di deformazione che avvengono sulla superficie, facendo uso di particolari sensori installati su piattaforme satellitari o terrestri. Questi sensori hanno la capacità di rivisitare la medesima area ad intervalli temporali regolari, di cui forniscono delle informazioni con elevata risoluzione spaziale. Nel dettaglio, la misura della distanza è possibile contando il numero di picchi, o creste, che definiscono le onde elettromagnetiche, distanziati di una lunghezza nota come lunghezza d'onda; uno spostamento anche di piccola entità comporterà un diverso numero di picchi, permettendo di ottenere dei valori con accuratezza dell'ordine dei centimetri. Una tecnica appartenente a questo sistema di monitoraggio è l'interferometria differenziale (*DInSAR*), in cui si confrontano due immagini acquisite da posizioni lievemente variabili e in istanti temporali differenti, ottenendo una visione tridimensionale della superficie terrestre. In presenza di variazioni nella topografia si osserverà una serie di strisce colorate, denominate anche frange interferometriche, costituenti l'interferogramma; una concentrazione più fitta di queste frange indica un movimento di maggiore entità tra le due immagini confrontate. Più recentemente sono state sviluppate delle tecniche multi-interferometriche che consentono di ottenere delle misure con accuratezza millimetrica, come le tecniche *PSInSAR* e *SqueeSAR*. Per rendere possibile il confronto e la misura degli spostamenti, si scelgono dei bersagli posti sulla superficie il più possibile stabili in termini di riflettività; questi elementi sono generalmente già esistenti sulla superficie, quali ad esempio strade, monumenti, linee ferroviarie, tralicci, ma anche elementi naturali come affioramenti rocciosi o accumuli di detrito. Prendono il nome di *Permanent Scatterers* (PS), e rappresentano dati puntuali; tuttavia, con l'innovazione tecnologica sono stati identificati altri elementi facilmente monitorabili tramite satelliti chiamati *Distributed Scatterers* (DS) che, a differenza dei precedenti i quali caratterizzano un pixel soltanto o al più pochi di essi, caratterizzano un gruppo di pixel. Essi sono bersagli distribuiti come ad esempio campi non coltivati o aree detritiche. Nei PS l'energia che viene riflessa verso il sensore risulta più elevata essendo concentrata in un'area di dimensioni ridotte; nei DS, invece, questa energia è minore per l'assenza di un bersaglio dominante, ma viene permessa la diminuzione del rumore che costituisce i dati acquisiti migliorandone la qualità.

In ultimo, è bene sottolineare il risultato dovuto alla combinazione del moto del satellite che orbita attorno alla Terra e la rotazione di quest'ultima, che si esplica nella possibilità di rilevare la medesima area geografica in due distinte geometrie:

- *Ascendente*: il satellite percorre l'orbita nella direzione sud-nord illuminando l'area da ovest a est;
- *Discendente*: il satellite percorre l'orbita nella direzione nord-sud illuminando l'area da est a ovest.

In conseguenza a ciò, è possibile osservare delle deformazioni aventi segno opposto; in caso di deformazioni che avvengono per lo più verticalmente si avranno segni uguali e intensità simili per entrambe le geometrie, in particolare gli spostamenti saranno negativi per fenomeni di subsidenza, e quindi allontanamenti, e positivi per fenomeni di sollevamento, e quindi avvicinamenti. Discorso analogo non può essere fatto per fenomeni caratterizzati da una componente orizzontale del movimento non trascurabile, come avviene proprio per i fenomeni franosi; in tal caso le velocità avranno segno opposto nelle due geometrie. Al fine di determinare l'entità del moto verticale ed orizzontale nella direzione est-ovest è necessaria la combinazione dei dati ascendenti con quelli discendenti.

Va menzionato come i valori degli spostamenti non siano assoluti, bensì relativi in quanto riferiti alla lettura zero di riferimento, che potrebbe coincidere, ad esempio, con la prima acquisizione disponibile nell'arco temporale analizzato.

Ritornando ai dati satellitari, sono stati scaricati dal Geoportale di Arpa Piemonte più file nel formato *.shp* nominati:

- *domodossola_rsar_s3_d_t97_arpa_piemonte_tsr*;
- *pst_ers_t22_f2673_cl001_chamois*;
- *pst_ers_t29_f913_cl001_bard*;
- *pst_ers_t251_f2673_cl002_orta_san_giulio*;
- *pst2013_csk_f_72_varallo_d_cl001_varallo*;
- *varallo_rsar_s3_a_t290_arpa_piemonte_tsr*.

Ogni file fa riferimento ad una zona e ad un periodo diverso. Nel dettaglio, i dati sono stati acquisiti in traiettoria discendente e, per ognuno di essi, vengono definiti i valori di più parametri, tra cui:

- *Code*: ad ogni Permanent Scatter identificato sulla superficie terrestre è associato un codice alfanumerico identificativo;
- *Height*: in alcuni casi viene definita la quota del punto estratta mediante l'uso di un DTM al fine di elaborare le immagini ottenute dai radar;
- *H_stdev*: per i punti a cui è stata definita la quota viene associata anche la relativa deviazione standard, ovvero la stima dell'errore riferita alla stima della quota dei punti stessi;
- *Vel*: è la velocità media annua di spostamento dei punti misurata lungo la linea di vista del sensore (*LOS*), espressa in millimetri all'anno [mm/y];
- *Vel_stdev*: ai valori di velocità media annua di spostamento è associata la rispettiva deviazione standard, anch'essa espressa in millimetri all'anno;
- *Eff_area*: questo parametro fornisce la superficie dell'oggetto osservato, che è puntuale se assume valore nullo (Permanent Scatter) o areale se assume un valore diverso da zero (Distributed Scatter), ed è espresso in metri quadrati [m²];
- *Coherence*: è un indice della qualità della serie temporale propria di ciascun punto osservato, ovvero quanto sono affini tra loro i dati acquisiti ed il modello utilizzato per la loro caratterizzazione. Questo indice varia tra 0 e 1, ma si considera stabile ed affidabile se si attesta sopra 0,75.

6.1 Analisi dei dati satellitari

6.1.1 Classificazione in base alla velocità

Inizialmente i punti osservati mediante interferometria satellitare sono stati classificati in base alla velocità media annua di spostamento. Come si può notare dalla Figura 89, la velocità è stata suddivisa in otto classi, ad ognuna delle quali è stato associato un colore; in particolare:

- Il colore verde indica i punti per i quali la velocità media annua di spostamento è molto bassa, rientrando nell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica compreso tra -2 mm/y e +2 mm/y;
- I colori compresi tra il giallo ed il violetto identificano i punti per i quali la velocità media annua di spostamento assume un valore negativo indicante un allontanamento del bersaglio dal satellite;
- I colori compresi tra l'azzurro ed il blu identificano, invece, i punti per i quali la velocità media annua di spostamento è positiva indicante un avvicinamento del bersaglio al satellite.

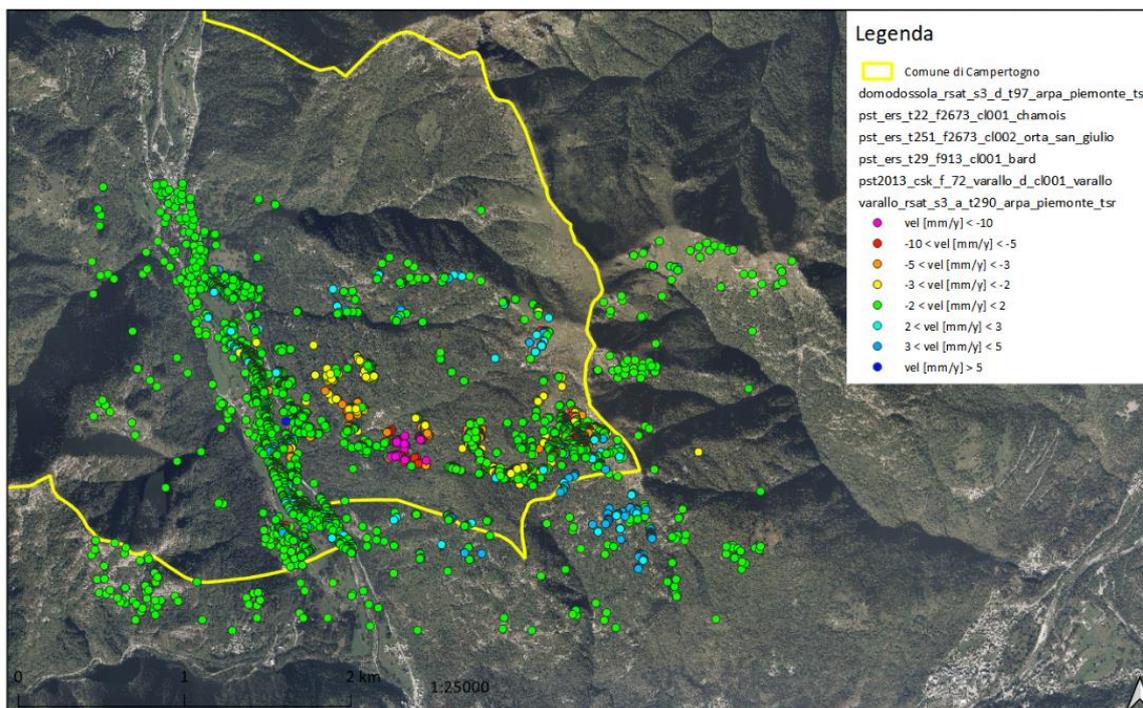


Figura 89 – Classificazione in base alla velocità media annua di spostamento dei punti osservati tramite tecnica interferometrica; scala 1:25000

Per avere un'idea migliore sull'entità del movimento che interessa il territorio è stato effettuato un conteggio del numero di punti, con relativa percentuale, che rientrano in determinate categorie di velocità; in particolare, sono stati contati i punti con velocità inferiore a -2 mm/y, con velocità superiore a +2 mm/y ed i punti con velocità compresa tra questi due estremi. Si sono ottenuti i valori riportati nella Tabella 7, i quali sono stati schematizzati nella Figura 90 per averne anche una visione grafica.

Tabella 7 – Suddivisione della velocità media annua di spostamento

Nome del file	Vel [mm/y] < -2 mm/y		-2 mm/y < vel [mm/y] < +2 mm/y		Vel [mm/y] > +2 mm/y	
	N° punti	[%]	N° punti	[%]	N° punti	[%]
pst_ers_t29_f913_cl001_bard	1	4	24	96	0	0
pst_ers_t22_f2673_cl001_chamois	33	33,67	65	66,33	0	0
domodossola_rsats3_d_t97_arpapiemonte_tsr	53	18,09	239	81,57	1	0,34
pst_ers_t251_f2673_cl002_ortasan_giulio	8	22,86	27	77,14	0	0
pst2013_csk_f_72_varallo_d_cl001_varallo	705	17,29	2805	68,80	567	13,91
varallo_rsats3_a_t290_arpapiemonte_tsr	1	0,32	312	99,36	1	0,32
Totale	801	16,54	3472	71,71	569	11,75

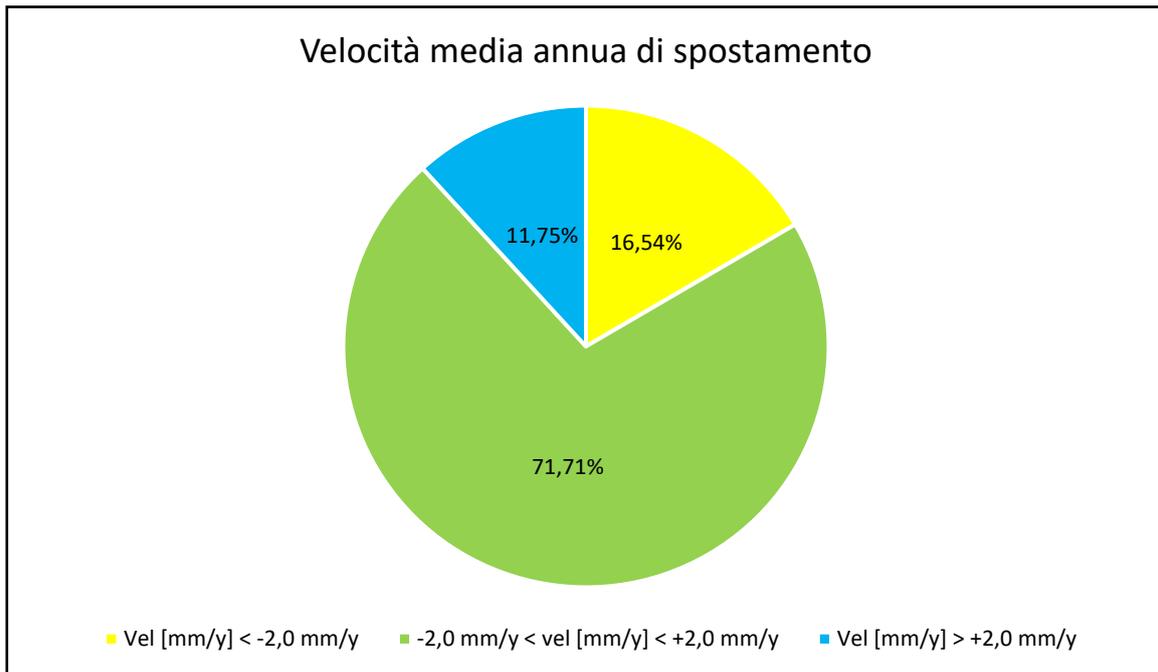


Figura 90 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale della velocità media annua di spostamento

Sulla base di questa analisi si evince come la maggior parte dei punti presenti una velocità media annua di spostamento compresa tra -2 mm/y e +2 mm/y attestandosi, dunque, come punti tutto sommato stabili. La restante percentuale è suddivisa quasi a pari merito tra i punti che hanno mostrato un generale allontanamento dal satellite (16,54%) e coloro che, invece, gli si sono avvicinati (11,75%).

Utilizzando QGIS e con l'ausilio di ortofoto, si è notato come i punti verdi, ovvero con velocità di spostamento molto bassa, siano distribuiti prevalentemente in corrispondenza ed in prossimità del centro abitato, anche se una buona parte è distribuita in zone più periferiche ed in corrispondenza di aree detritiche o rocce affioranti. Analizzando solo i punti con velocità al di sopra di questo intervallo, rappresentanti la percentuale minore, si nota come anch'essi siano distribuiti per lo più in corrispondenza ed in prossimità del centro abitato, con delle presenze anche su rocce affioranti. Per quanto riguarda, invece, i punti corrispondenti a velocità negative e al di sotto dell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica, si nota come, a differenza dei precedenti, siano distribuiti prevalentemente lungo il versante piuttosto che in prossimità del centro abitato, e come siano rappresentati maggiormente da rocce affioranti e da aree detritiche.

Concentrandosi maggiormente sull'intensità della velocità di spostamento piuttosto che sul segno da essa assunto, sono stati riscontrati dei valori prossimi a 30 mm/y, nonostante i movimenti che caratterizzano le deformazioni gravitative profonde di versante siano molto lenti e dell'ordine di 16 mm/y e anche meno. Questi valori decisamente alti sono situati in corrispondenza di aree detritiche, costituite da blocchi di varia pezzatura disposti sul versante anche in zone non particolarmente acclivi; anche grazie alla loro disposizione casuale e alla mancanza di connessione tra i blocchi stessi, questa particolarità può essere giustificata dal fatto che lievi movimenti che avvengono a profondità anche elevate possono provocare movimenti con intensità decisamente superiori in superficie. Per avere un confronto tra osservazioni satellitari e deformazione gravitativa profonda di versante sarebbe più sensato prendere dei riferimenti differenti dai depositi detritici con blocchi già instabili e soggetti a movimenti di per sé, magari in corrispondenza di oggetti

più stabili quali le abitazioni. Nonostante la maggior parte dei punti distribuiti sul versante sia identificata da detriti, si è riusciti a trovare dei punti gialli e arancioni, rappresentanti delle velocità comprese tra -5 e -2 mm/y, in corrispondenza di alcune abitazioni ubicate su un alpeggio in zona Alpe Le Bonde; questo esempio, riportato nella Figura 91, potrebbe essere interpretato come una dimostrazione del movimento indotto dalla deformazione gravitativa profonda che caratterizza questo versante.



Figura 91 – Esempio di movimento associabile alla deformazione gravitativa profonda di versante; scala 1:350

In ultima analisi, osservando contemporaneamente tutti i punti sono state rilevate delle particolarità, quali stessi oggetti presentanti delle velocità di spostamento di segno contrario e con intensità non trascurabili; nonostante questo aspetto possa essere considerato realistico quando i punti sono rappresentati da aree detritiche che, quindi, possono essere soggette a spostamenti differenti per la loro caratteristica di essere costituite da più blocchi non connessi tra loro, appare, però, inconsueto se riscontrato su una medesima abitazione.

Seguendo lo stesso procedimento effettuato per la velocità media annua di spostamento, si è suddivisa la coerenza in tre classi a seconda del valore da essa assunto, con fattore discriminante 0,75 indicante per l'appunto il limite inferiore di qualità dei dati. Si sono ottenuti i risultati riportati nella Tabella 8, con una visione grafica nella Figura 92.

Tabella 8 – Suddivisione della coerenza

Nome del file	Coherence < 0,75		Coherence = 0,75		Coherence > 0,75	
	N° punti	[%]	N° punti	[%]	N° punti	[%]
pst_ers_t29_f913_cl001_bard	9	36	0	0	16	64
pst_ers_t22_f2673_cl001_chamois	76	77,55	2	2,04	20	20,41
domodossola_rsat_s3_d_t97_arpa_piemonte_tsr	186	63,48	7	2,39	100	34,13
pst_ers_t251_f2673_cl002_orta_san_giulio	27	77,14	2	5,72	6	17,14
pst2013_csk_f_72_varallo_d_cl001_varallo	3194	78,34	165	4,05	718	17,61
varallo_rsat_s3_a_t290_arpa_piemonte_tsr	235	74,84	5	1,59	74	23,57
Totale	3727	76,97	181	3,74	934	19,29

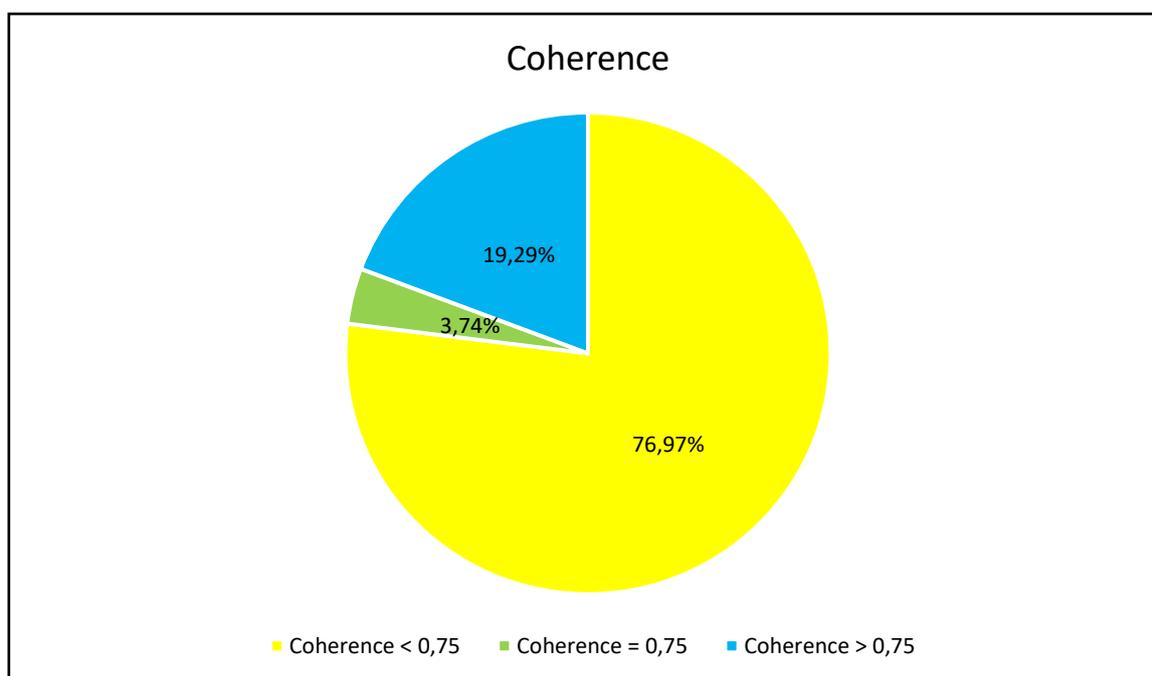


Figura 92 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale della coerenza

Sulla base di quanto effettuato, emerge come una percentuale significativa sia rappresentata da punti con una coerenza bassa, al di sotto di 0,75; mentre delle percentuali più discrete sono rappresentate da punti con una coerenza uguale o superiore a questo valore. Ciò significa che le serie temporali ricostruite dai dati acquisiti mediante tecnica interferometrica non sono del tutto affidabili, e che alcune misurazioni potrebbero essere affette da errori, come già rilevato nella precedente analisi sulla velocità media annua di spostamento.

Un'ulteriore analisi è stata condotta confrontando mediante l'utilizzo di QGIS la velocità media annua di spostamento con la coerenza. Da questo confronto, come mostrato nelle figure seguenti (Figura 93, Figura 94, Figura 95, Figura 96), si evince come nelle aree caratterizzate da punti con colori indicanti velocità di segno contrario sia stata riscontrata una coerenza minore di 0,75, a suggerire la non buona qualità delle

serie temporali. Tale aspetto giustifica ancora di più questa particolarità osservata, anche se non alla perfezione dal momento che non risponde a tutte le situazioni indagate; difatti, come intuibile dalla Figura 97, talvolta laddove ci sono velocità discordi tra loro ci sono delle coherence tutto sommato alte e non giustificanti quanto riscontrato.

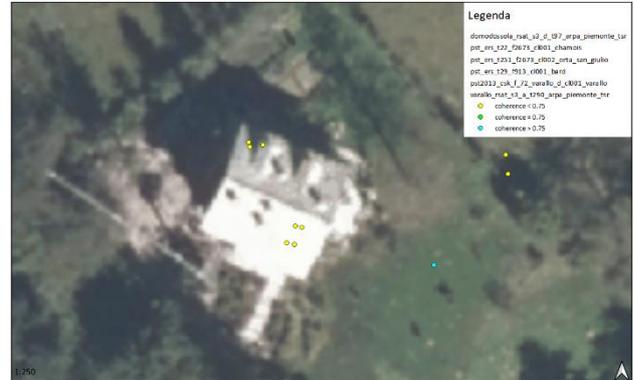
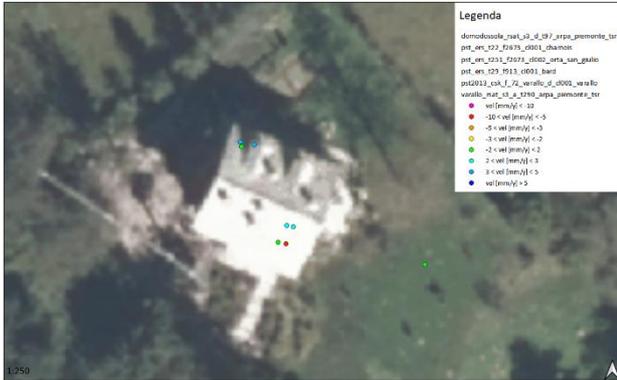


Figura 93 – Esempio 1 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:250

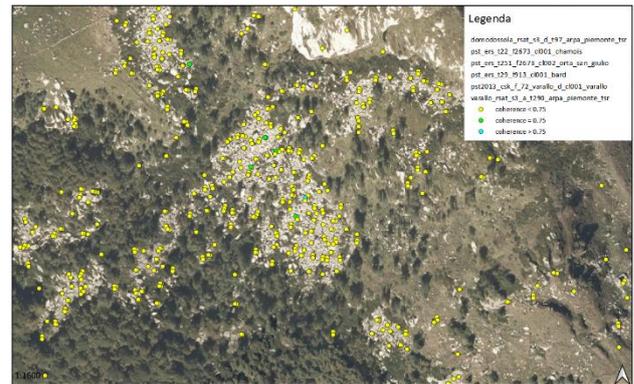
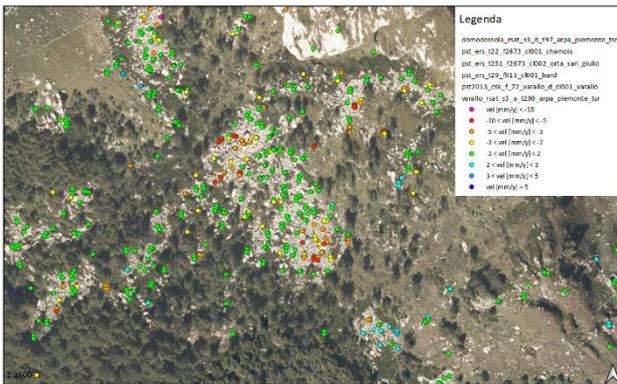


Figura 94 – Esempio 2 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:1600



Figura 95 – Esempio 3 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coherence dei punti; scala 1:800



Figura 96 – Esempio 4 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coerenza dei punti; scala 1:700

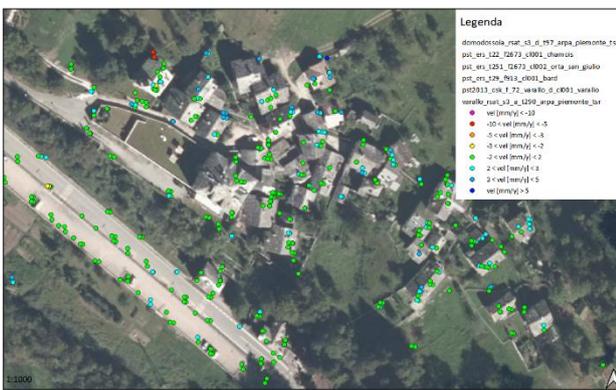


Figura 97 – Esempio 5 di confronto tra velocità media annua di spostamento e coerenza dei punti; scala 1:1000

6.1.2 Trend analysis

Avendo a disposizione delle serie temporali per più punti distribuiti sul territorio, si è deciso di analizzarle individuando un *trend* in modo da capire l'andamento degli spostamenti della superficie e stimare le direzioni principali in cui essi avvengono. Per fare ciò è stato utilizzato il codice di calcolo Matlab; l'analisi delle tendenze delle serie temporali è stata condotta mediante una funzione di interpolazione polinomiale di primo grado, e quindi lineare. Tramite alcune funzioni del codice di calcolo, sono stati calcolati i valori di intercetta e pendenza per tutte le serie temporali associate ai punti identificati sulla superficie; i valori così calcolati sono stati salvati in una tabella Excel.

Nel seguito è stato utilizzato QGIS per calcolare le coordinate di tutti i punti presi come Permanent Scatterers nella rilevazione satellitare mediante la funzione *Open Field Calculator*, le quali sono state inserite nella tabella degli attributi successivamente salvata come file in formato .csv, in quanto apribile con qualsiasi editor di testo. Nei file .csv creati sono stati inseriti i valori di intercetta e pendenza dei vari trend delle serie temporali calcolati attraverso l'uso di Matlab, sono poi stati importati nuovamente su QGIS e, per comodità, sono stati salvati nel formato .shp. Infine, è stata modificata la simbologia dei vari punti, che sono stati suddivisi in colori differenti non più sulla base della velocità media annua di spostamento, ma sulla base della pendenza dei trend. In particolare, sono state definite due classi: una per le pendenze negative, a cui è stato assegnato il colore verde, e l'altra per le pendenze positive, identificata dal colore rosso. In questo modo, è

risultato più semplice distinguere i trend positivi (rossi) da quelli negativi (verdi). Nella Tabella 9 e nella Figura 98 è fornita la suddivisione dei trend in base alla pendenza.

Tabella 9 – Suddivisione dei trend

Nome del file	Trend negativo		Trend positivo	
	N° punti	[%]	N° punti	[%]
pst_ers_t29_f913_cl001_bard	8	32	17	68
pst_ers_t22_f2673_cl001_chamois	71	72,45	27	27,55
domodossola_rsas_s3_d_t97_arpa_piemonte_tsr	153	52,22	140	47,48
pst_ers_t251_f2673_cl002_orta_san_giulio	31	88,57	4	11,43
pst2013_csk_f_72_varallo_d_cl001_varallo	1976	48,47	2101	51,53
varallo_rsas_s3_a_t290_arpa_piemonte_tsr	72	22,93	242	77,07
Totale	2311	47,73	2531	52,27

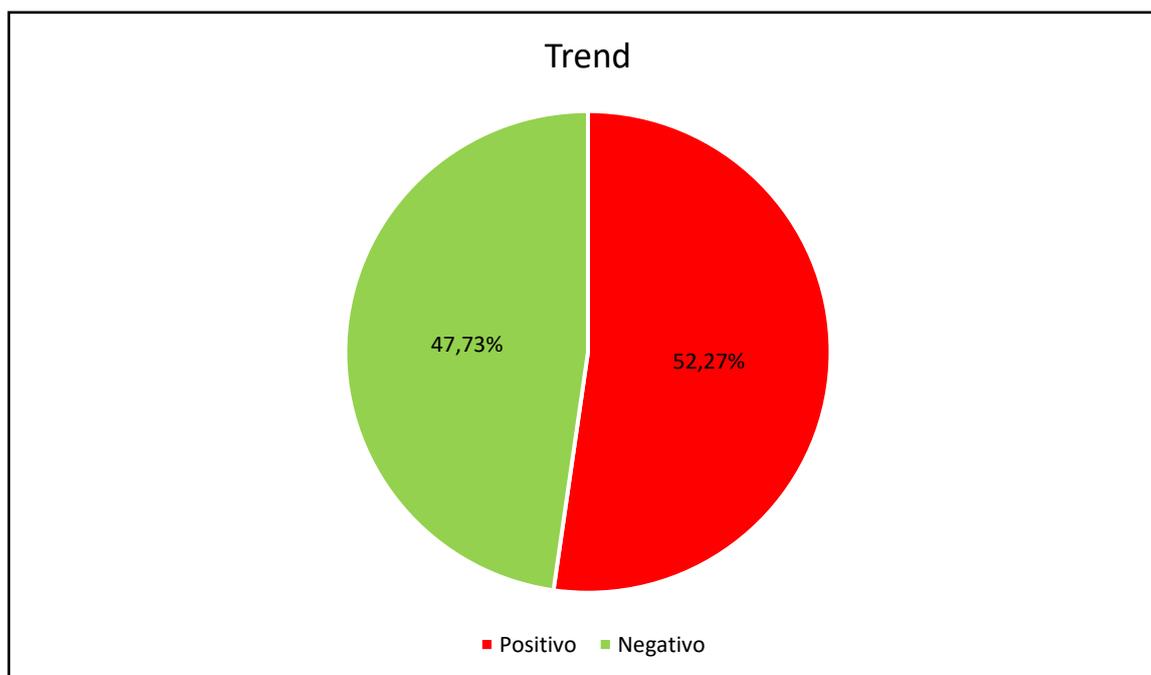


Figura 98 – Rappresentazione grafica della suddivisione percentuale dei trend

Questa distinzione si è resa necessaria per capire l'andamento degli spostamenti nel tempo, ed infatti è emerso come molti punti abbiano subito uno spostamento preferenzialmente verso l'alto piuttosto che verso il basso, come ci si aspetterebbe in realtà da un corpo franoso su un pendio acclive.

Da questa analisi è inoltre emerso come i trend positivi e negativi siano presenti in una percentuale simile, ovvero all'incirca metà e metà. Anche in questo caso si è deciso di indagare più a fondo, osservando non solo il numero dei trend con una certa pendenza, ma anche la loro distribuzione sul territorio. Difatti, osservando la Figura 99 e la Figura 100, si nota come la maggior parte dei trend negativi, e quindi le serie temporali con andamento verso il fondovalle, sia distribuita lungo il versante, coerentemente con quanto ci si potrebbe

aspettare, anche se una buona percentuale è localizzata in corrispondenza del centro abitato; mentre i trend positivi, e perciò le serie temporali con andamento discorde alle precedenti, sono concentrati per lo più sul fondovalle in corrispondenza ed in prossimità del centro abitato, e sulle creste.

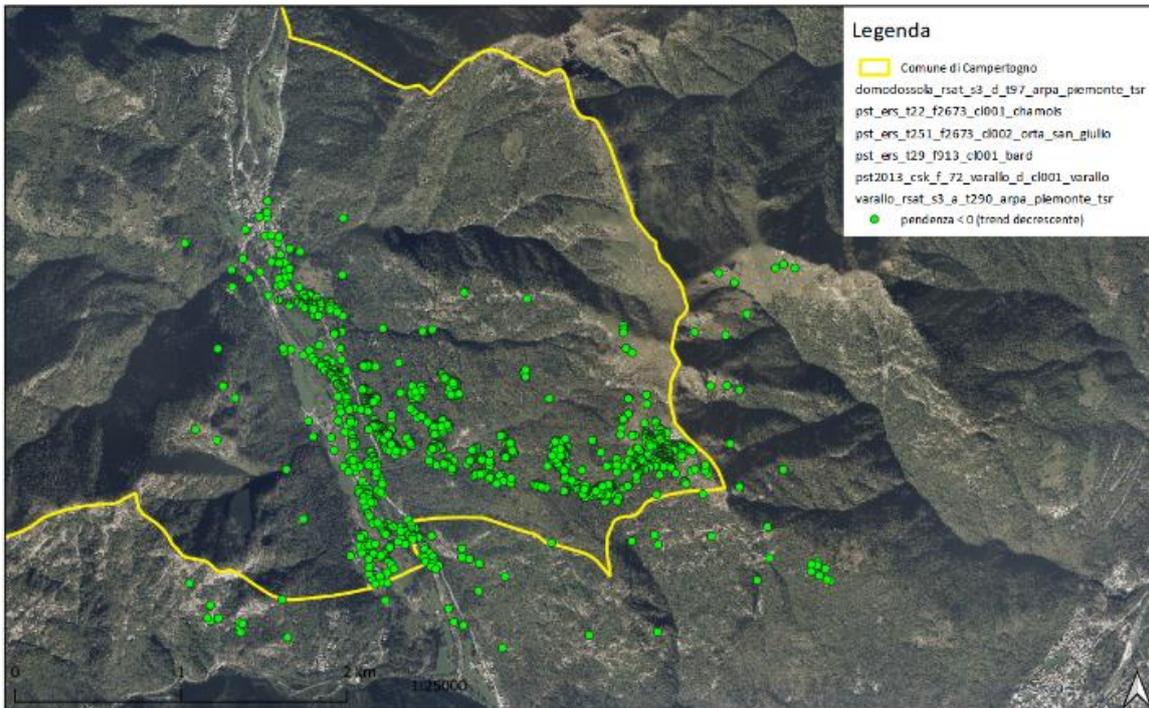


Figura 99 – Distribuzione dei trend decrescenti sul territorio; scala 1:25000

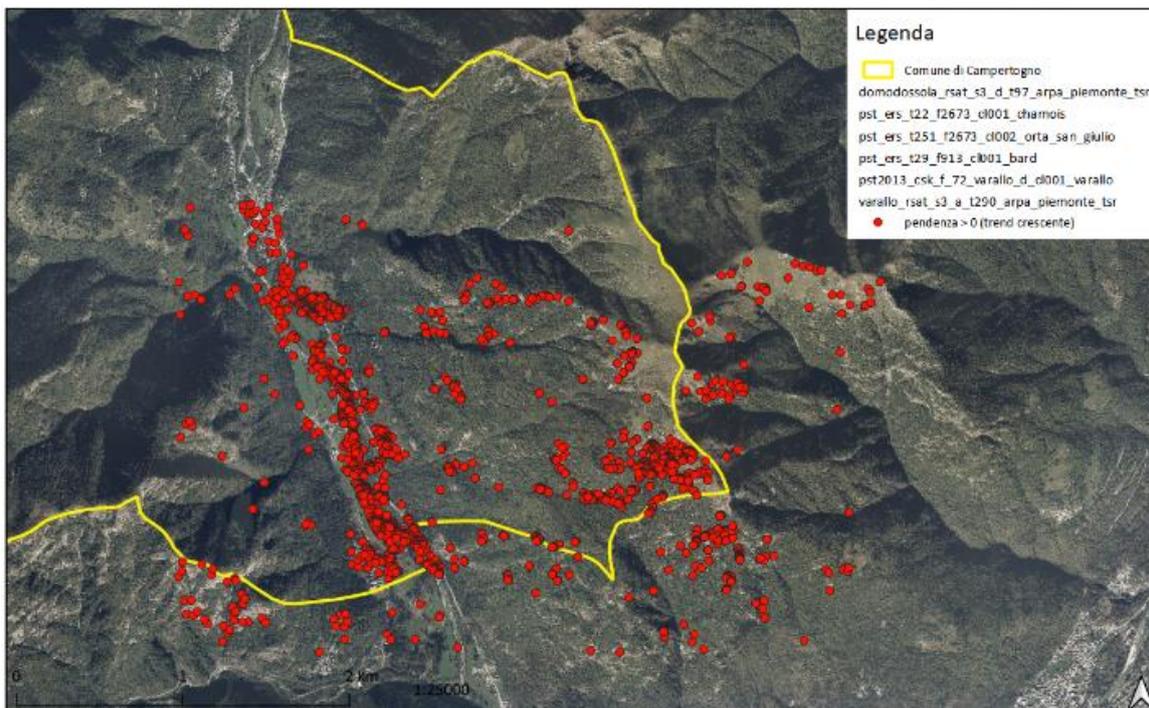


Figura 100 – Distribuzione dei trend crescenti sul territorio; scala 1:25000

Successivamente è stata confrontata l'entità dei trend con l'entità della velocità media annua di spostamento, dimostrando come i trend positivi appartengano ai punti con velocità positiva e come i trend negativi appartengano, invece, ai punti con velocità negativa; in particolare, le velocità di piccola intensità sono associate a quei punti per i quali la pendenza dei trend è molto bassa, mentre i punti per i quali la velocità assume un valore non trascurabile presentano dei trend con pendenze più marcate.

In ultimo, si è voluto fare un confronto tra la velocità media annua di spostamento dei punti osservati e la carta delle pendenze realizzata su QGIS; è emerso come la velocità non sia troppo connessa all'acclività del territorio. Difatti, si è visto come i punti verdi, e quindi con velocità molto bassa, siano presenti per lo più in aree pianeggianti, ma anche in zone particolarmente acclivi; mentre i punti con velocità di maggiore intensità, sia essa positiva che negativa, sono presenti in aree con pendenze modeste, pur presentando qualche eccezione. Questo aspetto lo si osserva dalla Figura 101, laddove il cerchio giallo rappresenta alcuni punti con velocità media annua di spostamento abbastanza elevata situati in aree acclivi, il cerchio verde rappresenta alcuni punti con velocità media annua di spostamento bassa situati in aree tutto sommato pianeggianti, il cerchio nero rappresenta alcuni punti con velocità media annua di spostamento bassa situati in aree acclivi, e il cerchio blu rappresenta alcuni punti con velocità media annua di spostamento abbastanza elevata situati in aree non particolarmente acclivi. Tuttavia, sono stati osservati anche dei *cluster* di punti aventi velocità non omogenea, e quindi con velocità media annua di spostamento differente, situati prevalentemente in zone non particolarmente acclivi e che potrebbero indicare movimenti franosi incipienti; si tratta per lo più di aree detritiche (cerchi rossi nella Figura 101).

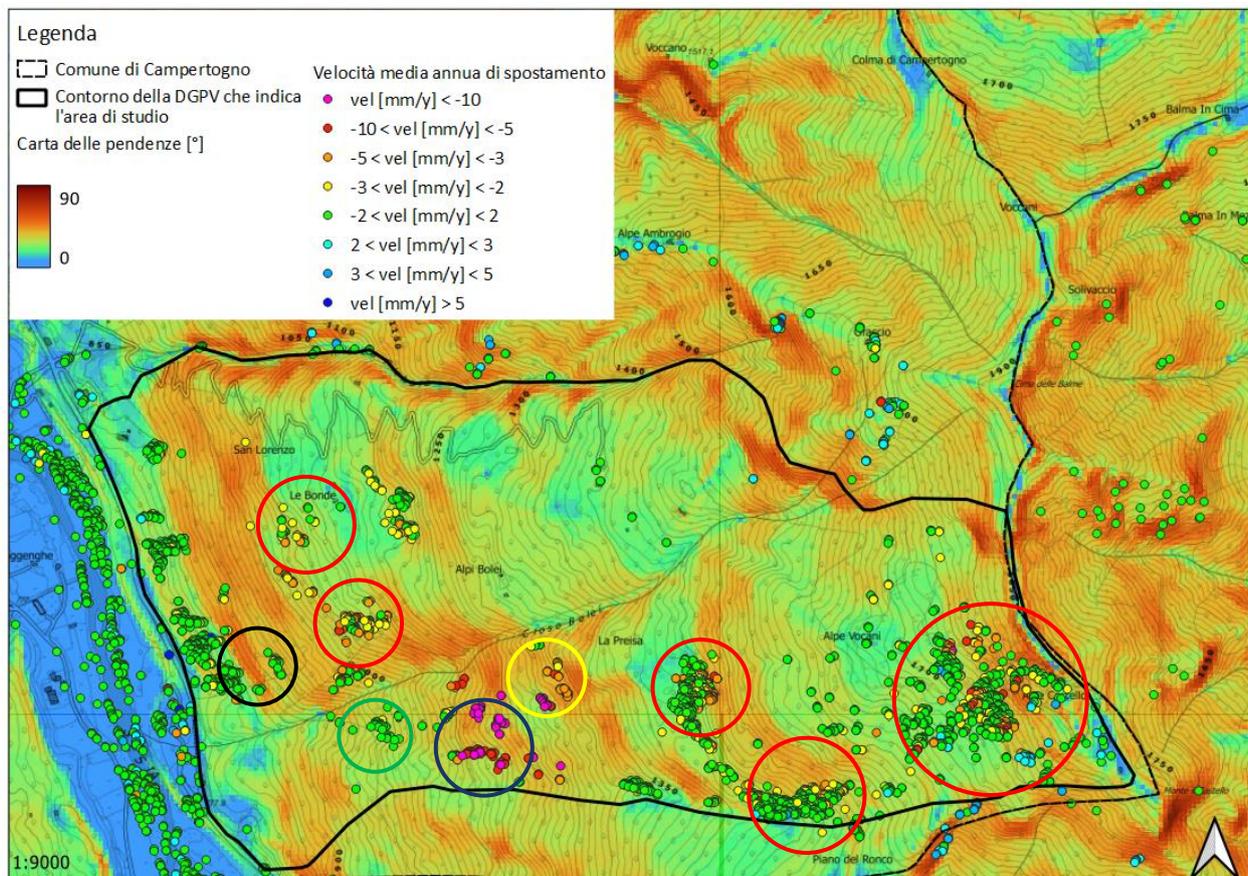


Figura 101 – Distribuzione dei punti classificati in base alla velocità media annua di spostamento sulla carta delle pendenze [°]; scala 1:9000

6.2 Controverifiche

Una controverifica è stata portata avanti utilizzando un *plugin* di QGIS chiamato *PS Time Series Viewer*; questa funzione permette di calcolare e visualizzare le serie temporali di velocità per Permanent Scatterers derivanti dall'interferometria satellitare. Una volta installato il plugin su QGIS, è stato selezionato il file da analizzare e successivamente si è cliccato sull'icona di suddetta funzione; cliccando su uno qualsiasi dei punti osservati tramite sensori satellitari è comparso automaticamente un grafico con le date sulle ascisse e gli spostamenti sulle ordinate. Con tale funzione si possono apportare delle modifiche ai grafici ottenuti ad esempio scegliendo le date minima e massima e gli spostamenti minimo e massimo da visualizzare; è possibile inserire una griglia per localizzare più facilmente i punti sul grafico, che possono anche essere connessi tra loro da una linea. Per l'analisi delle serie temporali c'è la possibilità di tracciare un trend lineare o polinomiale, e di visualizzare graficamente la distribuzione dei punti in assenza di un trend (*detrending*).

Dunque, sono stati scelti vari punti per ognuno dei sei file iniziali e con diverse tendenze, ovvero alcuni punti con trend positivo (rossi) ed altri con trend negativo (verdi). Utilizzando questo plugin e generando i grafici delle serie temporali si è verificato come i calcoli effettuati con Matlab ed Excel siano stati svolti correttamente, ottenendo delle rappresentazioni grafiche molto simili.

6.3 Anomalie riscontrate e possibili motivazioni

Come già accennato, sono state rilevate alcune anomalie durante lo studio dei dati satellitari di Arpa Piemonte, ovvero la presenza di punti molto prossimi tra loro e talvolta interessanti lo stesso oggetto, come una singola abitazione, che assumono delle velocità medie annue di spostamento anche di una certa entità, ma di segno contrario; inoltre, va menzionata anche la presenza di trend positivi indicanti un indirizzamento contrario a quanto ci si attenderebbe, ovvero alcuni dei punti osservati mostrano una tendenza nel tempo a spostarsi verso l'alto. Ciò lo si può affermare osservando le serie temporali dei punti, che subiscono delle variazioni repentine manifestando in alcuni casi andamenti tipici sinusoidali, accompagnate talvolta da spostamenti di notevole entità; difatti, sono stati osservati alcuni punti che hanno subito nel tempo degli spostamenti verso il basso di 20 mm per poi dirigersi in senso contrario anche di 30 mm. Nelle figure seguenti sono riportati alcuni grafici a dimostrare questa particolarità (Figura 102, Figura 103, Figura 104, Figura 105, Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109).

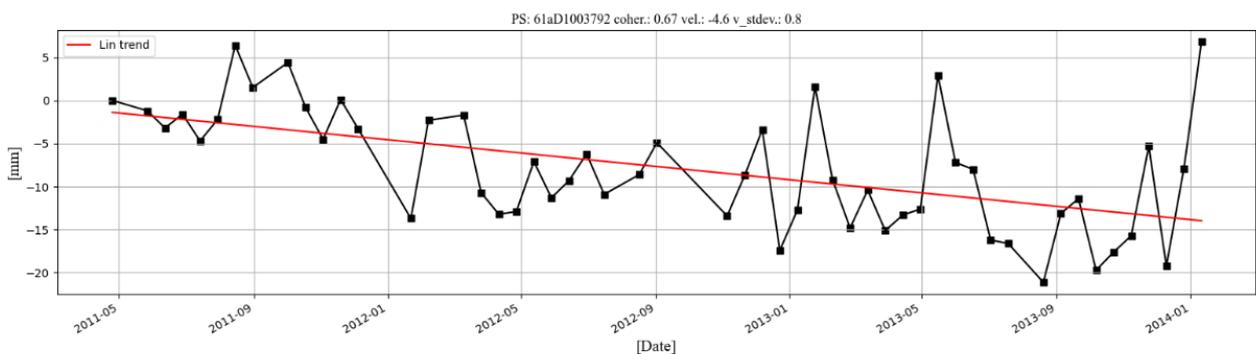


Figura 102 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD1003792 (coordinate x = 427263,60; y = 5070561)

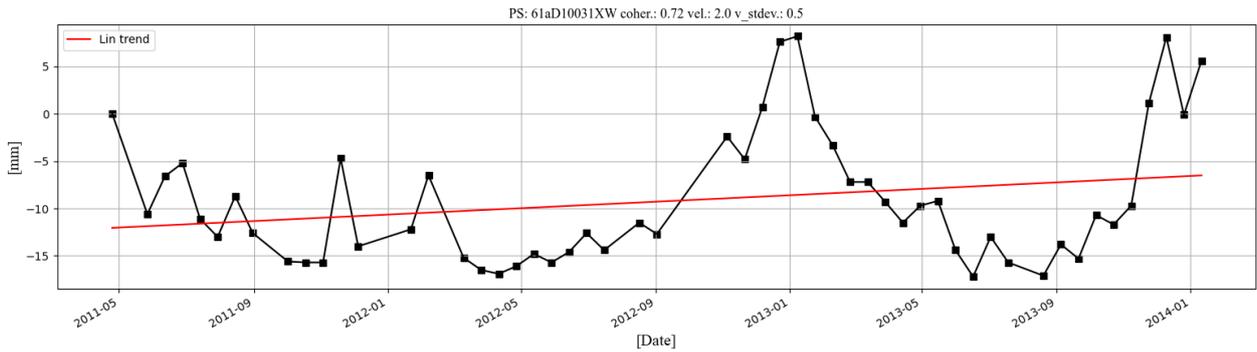


Figura 103 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10031XW rappresentato dalla Strada Provinciale 299 (coordinate x = 425076,20; y = 5071541)

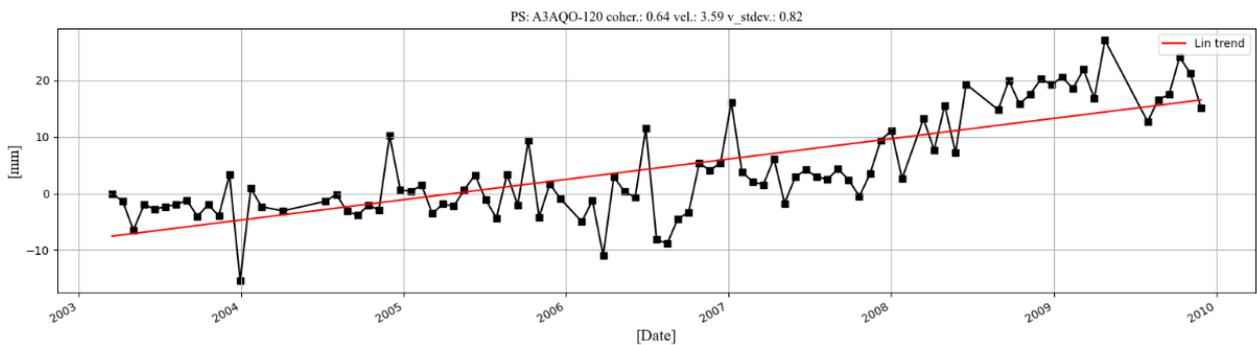


Figura 104 – Serie temporale e trend relativi al PS: A3AQO-120 (coordinate x = 425121,50; y = 5071197)

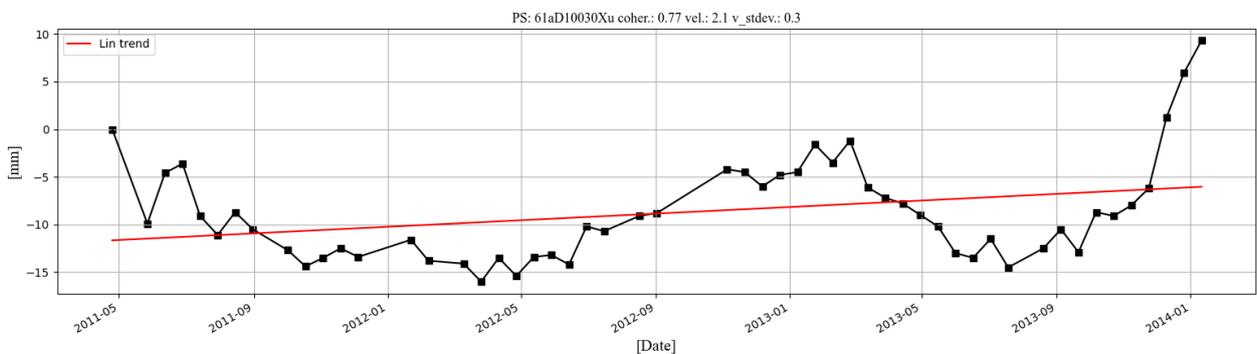


Figura 105 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030Xu (coordinate x = 425111,30; y = 5071641)

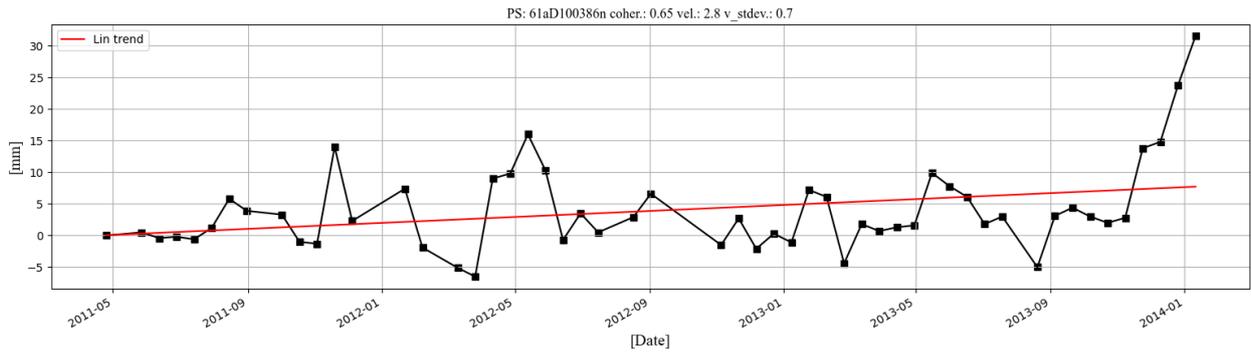


Figura 106 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD100386n (coordinate $x = 427168,20$; $y = 5070453$)

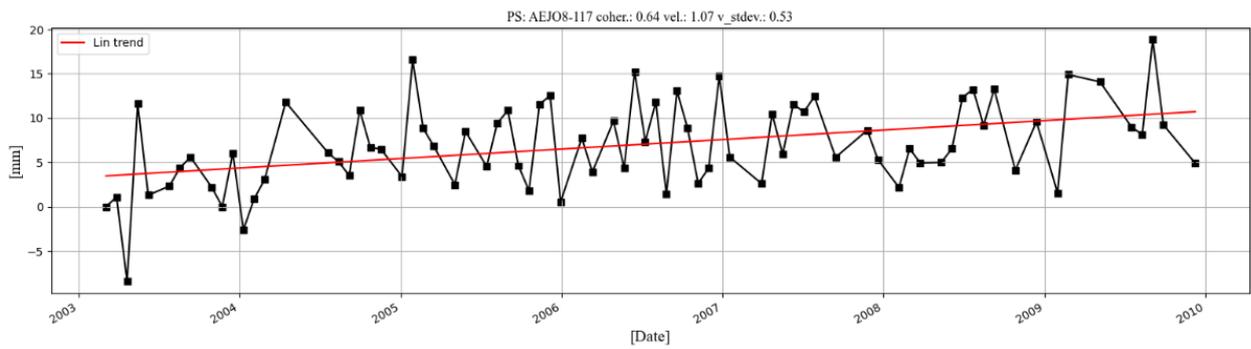


Figura 107 – Serie temporale e trend relativi al PS: AEJ08-117 (coordinate $x = 426968,20$; $y = 5071226$)

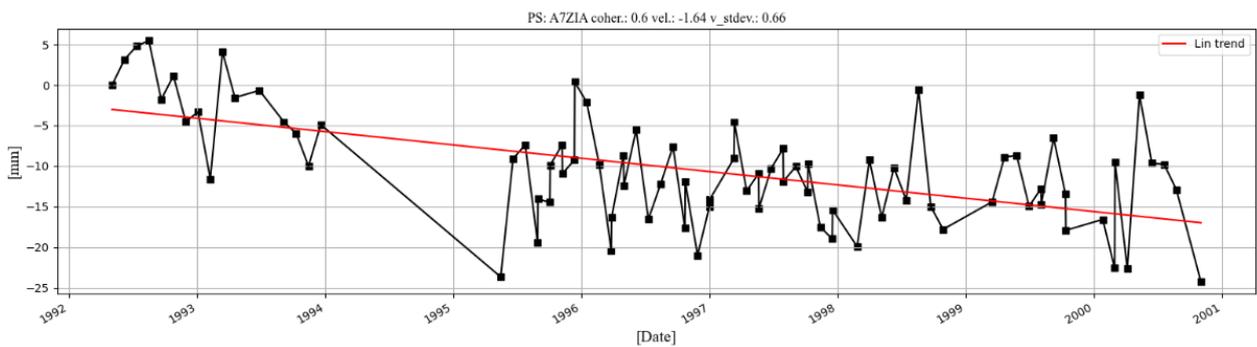


Figura 108 – Serie temporale e trend relativi al PS: A7ZIA (coordinate $x = 425884,50$; $y = 5070858$)

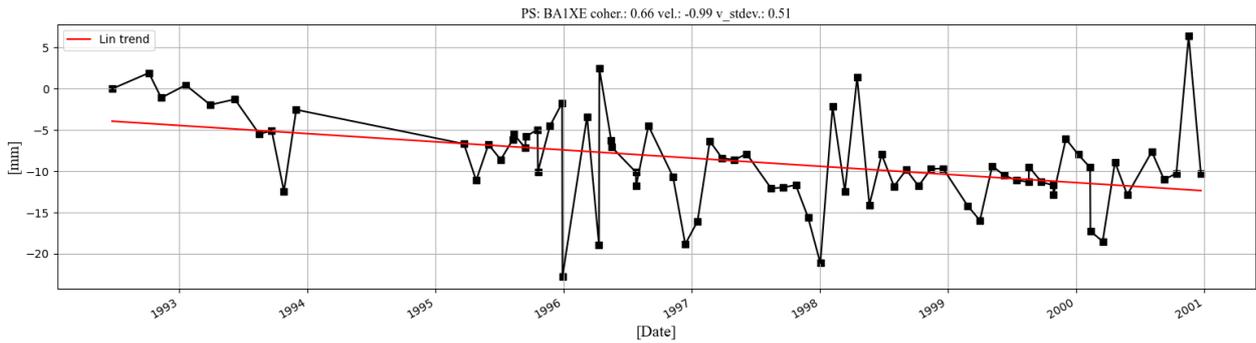


Figura 109 – Serie temporale e trend relativi al PS: BA1XE (coordinate $x = 426562,20$; $y = 5070605$)

In Figura 110, Figura 111, Figura 112 e Figura 113 è riportato il caso di un'abitazione, la medesima presa in considerazione precedentemente trattando il parametro coherence; per i punti indicati dal cerchio blu si hanno andamenti completamente diversi pur rappresentando lo stesso oggetto, ad eccezione dei due punti azzurri che mostrano un comportamento analogo tra loro. Difatti, i punti azzurri hanno raggiunto uno spostamento molto prossimo a 30 mm nel 2011 diretto verso il basso, per poi manifestare nel 2013 una risalita di quasi 10 mm al di sopra della lettura zero di riferimento. Per il punto verde in basso a sinistra il discorso è leggermente diverso, dal momento che nel 2011 si è assistito ad un allontanamento del bersaglio dal satellite di poco più di 25 mm, con una risalita nel 2013 e 2014 fino a raggiungere le condizioni iniziali rappresentate dalla lettura zero di riferimento, dopo aver segnato un tratto dall'andamento sinusoidale. Caso ancora diverso dai precedenti è quello relativo al punto rosso in basso a destra, caratterizzato da una velocità media annua di spostamento pari a $-6,8 \text{ mm/y}$. Mentre si ha una conferma dei comportamenti manifestati dai tre punti precedenti, i due azzurri e quello verde, ovvero il raggiungimento di uno spostamento di circa 25 mm nel 2011, non si può dire la stessa cosa per ciò che è avvenuto negli anni a seguire; difatti, non si è osservato un ritorno alla condizione iniziale o, addirittura, un suo superamento verso valori positivi, ma si è assistito ad un ulteriore allontanamento dal satellite fino a quasi 40 mm nel 2013 dopo un tratto quasi costante. Ancora più in là con gli anni, in particolare nel 2014, il bersaglio ha mostrato un avvicinamento al satellite, pur rimanendo al di sotto di oltre 15 mm rispetto alla lettura zero di riferimento.

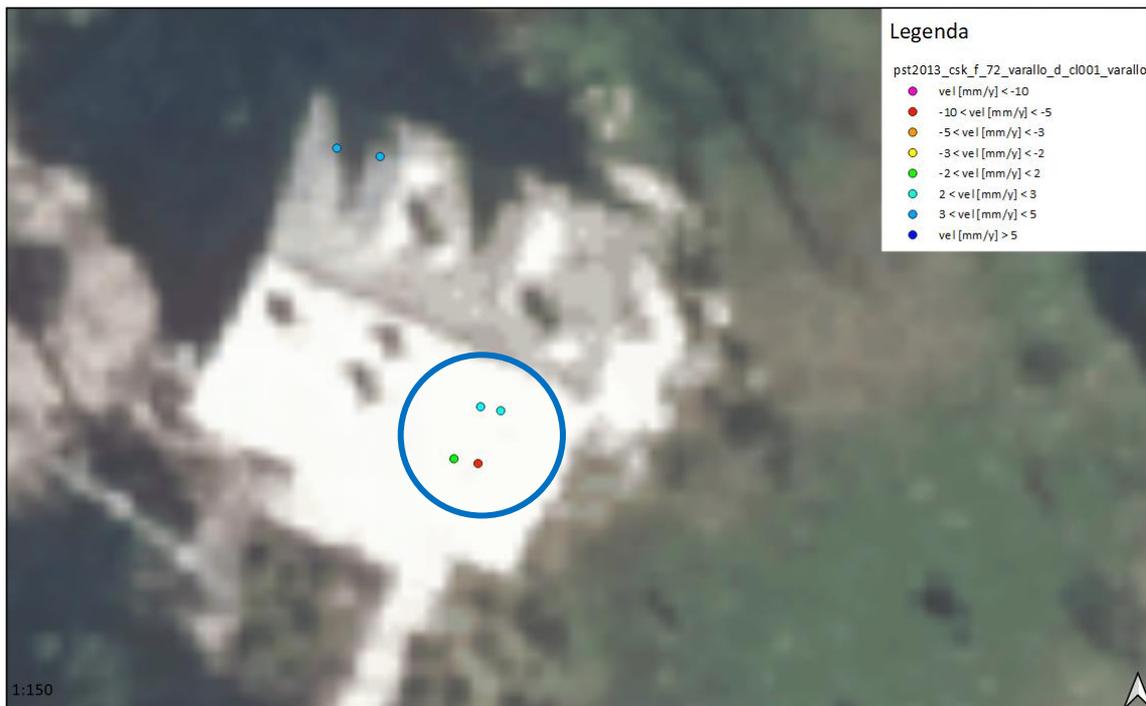


Figura 110 – Rappresentazione di un'abitazione con quattro PS aventi velocità differenti (indicate dal cerchio blu); scala 1:150

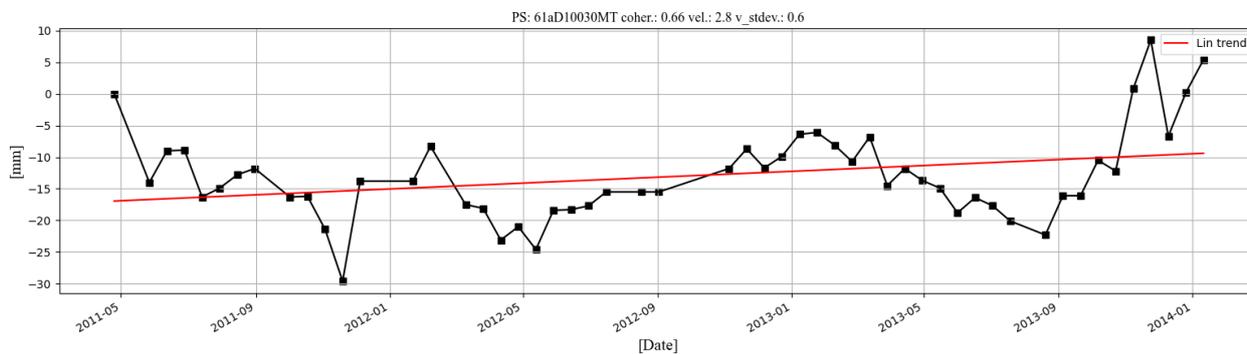


Figura 111 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030MT (coordinate $x = 424998,60$; $y = 5071684$) dell'abitazione (punto azzurro in alto a destra)

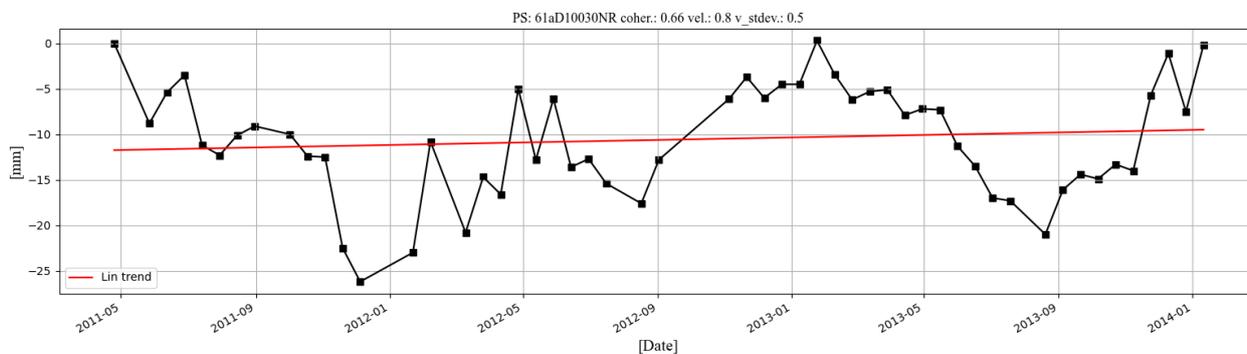


Figura 112 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030NR (coordinate $x = 424996,90$; $y = 5071683$) dell'abitazione (punto verde in basso a sinistra)

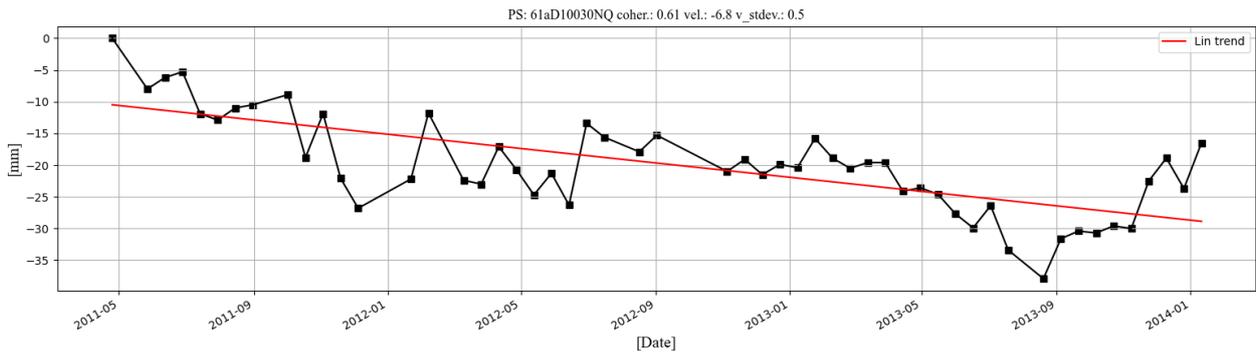


Figura 113 – Serie temporale e trend relativi al PS: 61aD10030NQ (coordinate $x = 424997,80$; $y = 5071682$) dell'abitazione (punto rosso in basso a destra)

Trattandosi di valori non trascurabili, si è deciso di approfondire maggiormente tali anomalie. Una prima ipotesi emersa è la possibilità che le anomalie siano correlate ad *errori durante l'acquisizione* ed in generale ai limiti del metodo di acquisizione stesso. Difatti, la fase interferometrica, o differenza di fase, può venire influenzata dalla variazione delle condizioni atmosferiche tra più acquisizioni delle immagini; questo contributo di fase aggiuntivo costituisce uno dei limiti principali, un disturbo di difficile determinazione e, di conseguenza, eliminazione. Parlando di qualità dei risultati satellitari si menziona anche la decorrelazione temporale, ovvero la variazione della riflettività degli oggetti rappresentanti i bersagli dei radar nel tempo, con la possibilità che alcuni di essi impediscano la riflessione del segnale a favore del suo assorbimento; questa fenomenologia è maggiormente riscontrabile nelle aree ricoperte dalla vegetazione, in quanto più suscettibili a cambiamenti stagionali e ad influenze da parte di agenti atmosferici quali vento e precipitazioni, mentre le abitazioni e le rocce mostrano un carattere tutto sommato stabile nel tempo. La decorrelazione geometrica è un altro degli aspetti da tenere in considerazione dal momento che la distanza tra le due orbite percorse dal sensore in fase di acquisizione delle immagini, anche nominata *baseline*, può divenire fonte di disturbo, soprattutto quando assume dei valori così elevati da determinare una minore banda comune tra i due segnali e, di conseguenza, un minore rapporto segnale-rumore associato all'interferogramma che viene generato. Nonostante questi limiti siano propri dell'interferometria differenziale, potrebbero comunque influenzare le acquisizioni mediante tecniche multi-interferometriche, anche se in maniera più contenuta. Questa prima ipotesi è nata anche analizzando i dati riguardanti la coerenza; difatti, secondo la Tabella 8 e la Figura 92, risulta che per buona parte dei punti osservati tale valore si attesti sotto 0,75, ovvero il limite inferiore di un intervallo che indica una buona qualità delle serie temporali. Perciò, la possibilità che durante l'acquisizione ci siano stati degli errori risulta giustificata. Una seconda ipotesi è emersa spostando gli occhi dai colori associati ai punti agli oggetti che rappresentano i punti stessi; difatti, è possibile che questi oggetti siano costituiti da materiali particolarmente suscettibili a *fenomeni di dilatazione/contrazione* a causa della variazione di temperatura. Tuttavia, ciò potrebbe essere una ragione che giustifica degli spostamenti di piccola entità e non degli spostamenti anche di 30 millimetri, come è stato osservato analizzando i grafici delle serie temporali. Una terza ipotesi è legata alle *deformazioni prospettiche* nelle immagini a causa dell'acquisizione dei dati in maniera non perpendicolare al suolo ma con un certo angolo di vista; difatti, a causa della topografia del terreno e/o dell'esposizione dei versanti, si possono avere problemi nell'utilizzare le tecniche interferometriche, dal momento che alcune aree risultano non visibili ai satelliti.

Una quarta ipotesi, relativa per lo più alla variazione del segno della velocità media annua di spostamento, è associata alle *due geometrie di acquisizione dei dati* tramite sensori satellitari, vale a dire geometria ascendente e geometria discendente. In base a quanto esposto all'inizio di questo capitolo, alcune velocità che per una data geometria risultano positive, con l'altra geometria risultano negative; avendo a disposizione dei dati acquisiti con il secondo tipo di geometria, ovvero discendente, è possibile che alcuni punti si stiano avvicinando mentre altri si allontanano a causa dell'esposizione del versante, nel senso che tali punti potrebbero tutti muoversi verso il fondovalle, ma da vallate diverse. Connessa a questa ipotesi, va menzionata la possibilità di individuare le deformazioni lungo la linea di vista del sensore, fornendo in tal modo soltanto una componente del vettore reale dello spostamento. In più, il valore di questa componente dipende dall'orientazione della reale direzione dello spostamento; ciò significa che maggiore è l'angolo tra la linea di vista del satellite ed il vettore di spostamento reale, variabile fino a massimo 90° , minore è la componente misurabile, ovvero maggiore è la sottostima del movimento reale.

Un'ultima ipotesi è la possibilità che gli spostamenti diretti verso l'alto siano causati da alcuni elementi morfologici tipici delle deformazioni gravitative profonde di versante, come i rigonfiamenti che provocano dei sollevamenti della superficie. Questa ipotesi è realistica perché una DGPV è censita nel database SIFraP (Arpa Piemonte) e può essere validata con uno studio geomeccanico del comportamento della DGPV. A tale scopo, i dati satellitari qui analizzati nel loro complesso possono fornire un importante contributo, ad esempio, nella calibrazione dei modelli.

7 Introduzione a Rockyfor3D

Nell'elaborazione della presente Tesi è stato utilizzato il codice di calcolo Rockyfor3D di proprietà di EcorisQ, l'associazione internazionale per la gestione dei pericoli e rischi naturali. Si è reso fondamentale nel calcolo delle traiettorie di caduta dei blocchi rocciosi in tre dimensioni. In questo capitolo viene spiegato in maniera dettagliata questo software, basandosi sulla versione italiana della guida redatta da *Dorren* e *Simoni* nel 2014 reperibile sul sito di EcorisQ.

7.1 Generalità

Rockyfor3D è un modello di simulazione fisicamente basato in relazione alla descrizione dei processi di caduta massi, ma anche probabilistico per il fatto che prende in considerazione il concetto di *incertezza* associata alla determinazione dei parametri in input al programma, i quali vengono definiti stocasticamente tramite una distribuzione di probabilità dei valori più plausibili per ogni parametro; difatti, Rockyfor3D combina algoritmi deterministici con approcci probabilistici. Inoltre, è possibile l'esecuzione di simulazioni di caduta massi sia su scala regionale che su scala locale e di versante. Al fine di ottenere dei risultati realistici e con un certo grado di attendibilità, è necessario che i dati forniti in input al programma rispecchino accuratamente la realtà sul terreno. Sinteticamente, il processo seguito da Rockyfor3D per eseguire le simulazioni è rappresentato nella Figura 114.

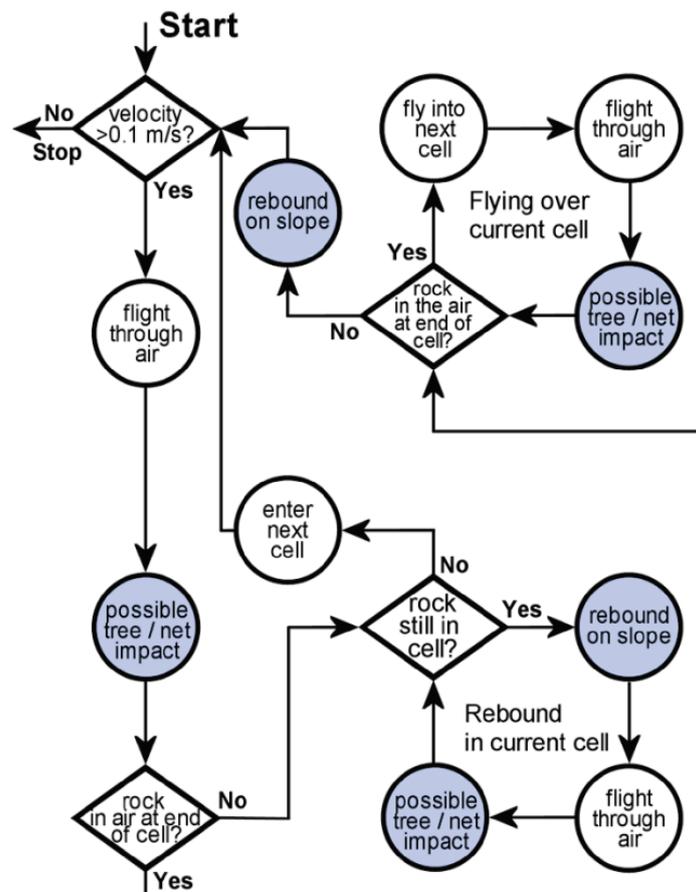


Figura 114 – Diagramma di flusso di Rockyfor3D. I cerchi colorati in blu indicano i punti del modello in cui possono avvenire variazioni della direzione simulata di caduta del blocco [Dorren e Simoni, 2014]

Dunque, Rockyfor3D permette la simulazione delle traiettorie facendo uso di un vettore in cui memorizza i valori tridimensionali di posizione e velocità, ottenuti dal calcolo di una serie di cadute libere del blocco; tali sequenze sono definite dalla combinazione della legge parabolica rappresentante la caduta libera, dei rimbalzi che avvengono sulla superficie del versante, ed eventualmente dell'interazione con la vegetazione. Tuttavia, mentre il rotolamento viene analizzato come se fosse costituito da una serie di rimbalzi ravvicinati, lo scivolamento non è soggetto a modellazione.

7.2 Dati raster di input

Al fine di procedere con le simulazioni, è necessario fornire dei dati in input a Rockyfor3D consistenti in dieci mappe raster, le quali devono avere le stesse dimensione e risoluzione, ovvero le celle devono avere tutte la stessa dimensione; maggiore è la risoluzione, e quindi minore è la dimensione delle celle, e tanto maggiore saranno la precisione e l'accuratezza dei risultati ottenibili. Inoltre, il formato delle mappe raster deve essere *ESRI ASCII Grid*, in quanto leggibile da tutti gli editor di testo. Ogni file raster contiene un'intestazione indicante varie informazioni, tra cui il numero di righe (*nrows*), il numero di colonne (*ncols*), la dimensione delle celle (*cellsize*), o risoluzione del raster, espressa in metri, le coordinate *x* e *y* del centro, o dell'angolo in basso a sinistra, della cella posizionata in basso a sinistra (*xllcenter/xllcorner*, *yllcenter/yllcorner*), ed infine il valore che indica l'assenza di dati nella cella (*NODATA_value; default = -9999*). Va segnalato il fatto che le cifre in posizione decimale vanno precedute da un punto (.) e non da una virgola (,).

Le dieci mappe raster da fornire in input a Rockyfor3D sono (Figura 115):

- *dem.asc*: relativa alla topografia;
- *rockdensity.asc*: relativa alla densità dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco;
- *d1.asc*: relativa alla definizione delle dimensioni del blocco assieme alle mappe *d2.asc* e *d3.asc*;
- *d2.asc*: relativa alla definizione delle dimensioni del blocco assieme alle mappe *d1.asc* e *d3.asc*;
- *d3.asc*: relativa alla definizione delle dimensioni del blocco assieme alle mappe *d1.asc* e *d2.asc*;
- *bshape.asc*: relativa alla definizione della forma del blocco in caduta per ogni cella sorgente;
- *rg70.asc*: relativa alla scabrezza della superficie del versante definita in termini probabilistici. In particolare, questa mappa rappresenta la dimensione che copre il 70% della superficie delle celle;
- *rg20.asc*: relativa alla scabrezza della superficie del versante definita in termini probabilistici. In particolare, questa mappa rappresenta la dimensione che copre il 20% della superficie delle celle;
- *rg10.asc*: relativa alla scabrezza della superficie del versante definita in termini probabilistici. In particolare, questa mappa rappresenta la dimensione che copre il 10% della superficie delle celle;
- *soiltype.asc*: relativa alla definizione della tipologia di suolo.

Nr.	Raster	Descrizione
1	dem.asc	<p>mappa raster del DEM (Digital Elevation Model), che descrive la topografia (double type raster; [values 0-8850.00 m or NODATA_value]). I voli Laserscan (LiDAR) generalmente forniscono dei DEM accurati. Dal DEM, Rockyfor3D calcola una mappa delle pendenze (slope) e una mappa dell'esposizione (aspect) seguendo l'approccio proposto da Zevenbergen e Thorne (1987); si veda anche Burrough e altri (1998). Un breve esempio di file <i>dem.asc</i> è mostrato di seguito:</p> <pre> 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 </pre>
2	rockdensity.asc	<p>mappa raster che descrive la densità dei massi in ogni cella sorgente o punto di distacco (integer type raster, 2 or 4 byte; [values 0 o 2000 - 3300 kg.m⁻³]). Questa mappa caratterizza le celle che corrispondono ai punti di distacco (valore > 0) attribuendo un valore di densità ai blocchi (kg m⁻³) che saranno simulati staccarsi da ogni cella sorgente (punto di distacco). Perciò le celle raster con un valore pari a 0 non saranno considerate come delle celle sorgente. Invece dalle celle con valore maggiore di zero, per esempio 2500 o 3000, verrà simulata la caduta di un blocco con densità rispettivamente di 2500 kg m⁻³ o 3000 kg m⁻³.</p> <p>Per evitare effetti ai bordi, le celle sorgenti non devono essere nelle due righe o colonne più esterne del raster, poichè queste celle non vengono prese in considerazione!</p>
3	d1.asc	<p>mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce le dimensioni del blocco: altezza, larghezza e lunghezza in ogni cella sorgente (double type raster; [values 0 - 20.00 m]). Queste mappe raster devono contenere i valori in metri. Se il valore di dimensione definito in una delle tre celle raster equivale a 0, quella cella raster non sarà</p>

4	d2.asc	<p>considerata come cella sorgente. Le tre dimensioni del blocco definite in ogni cella sorgente vengono variate in modo casuale e uniforme con una predefinita % (basata sulla variazione di volume definito tra) prima di ogni simulazione. Questa variazione random è identica per tutti e tre i valori di dimensione del blocco per ogni singola simulazione. Questo significa che se la variazione di volume è fissata a 5%, allora tutte e tre le dimensioni del blocco saranno incrementate o diminuite in modo casuale con un valore compreso tra 0 e 1.639%.</p> <p>mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco (vedi spiegazione d1.asc);</p>
5	d3.asc	<p>mappa raster che definisce una delle tre dimensioni del blocco (vedi spiegazione d1.asc);</p>
6	bshape.asc	<p>mappa raster che definisce, per ogni cella sorgente, la forma del blocco in caduta (integer type raster; [values 0-4]). La forma del blocco raster può contenere i seguenti valori:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 blocco senza forma/ assenza di celle sorgenti definite 1 blocco parallelepipedo (le tre dimensioni possono essere differenti tra loro) 2 blocco ellissoidale (i tre diametri possono essere differenti tra loro) 3 blocco sferico (i tre diametri sono identici) 4 blocco discoidale (il diametro più piccolo del blocco è massimo 1/3 degli altri due, che sono comparabili in termini di grandezza) <p>Se non viene definita la forma del blocco in una cella sorgente (valore 0), Rockyfor3D simulerà un blocco ellissoide o sferico a seconda delle dimensioni del blocco assegnate in precedenza (d1, d2, d3, densità dei massi).</p>
7	rg70.asc	<p>mappa raster che, assieme alle due mappe seguenti, definisce la scabrezza della superficie inclinata (double type raster; [values 0 - 100.00 m]). Questa scabrezza non rappresenta la micro topografia (per esempio salti del terreno) ma i massi situati lungo il pendio che vanno ad ostacolare la caduta del blocco. La scabrezza deve essere determinata in campo individuando zone omogenee nell'area di studio che vengono rappresentate sulla mappa come dei poligoni. Ogni poligono definisce la scabrezza della superficie, espressa come dimensione del materiale che ricopre la superficie del pendio, percepita guardando il pendio verso valle, lungo la direzione di caduta di un ipotetico masso. Tale scabrezza viene espressa in termini probabilistici da tre classi di probabilità, chiamate rg70, rg20, rg10. Queste classi descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza lungo il suo percorso. Ognuna di queste classi è rappresentata da una mappa raster e corrisponde all'altezza in metri di un ostacolo rappresentativo (MOH) che un masso che cade incontra nel 70%, 20% e 10% dei casi, durante un rimbalzo nel poligono definito (Figura 2).</p> <p>La scabrezza varia tra 0 e 100 metri (vedasi Allegato A). Se la superficie del pendio è liscia deve essere usato un valore di scabrezza pari a 0. Il valore 100 può essere usato per forzare i blocchi simulati a fermarsi, per esempio in un fiume. La scelta del valore da attribuire al parametro MOH richiede molta attenzione, perché Rockyfor3D è sensibile a questo parametro. La scabrezza della superficie viene utilizzata per calcolare il coefficiente tangenziale di restituzione. E' quindi il parametro che determina l'energia persa durante il rimbalzo sulla superficie e non una scabrezza che viene aggiunta alla topografia rappresentata dal DEM.</p>

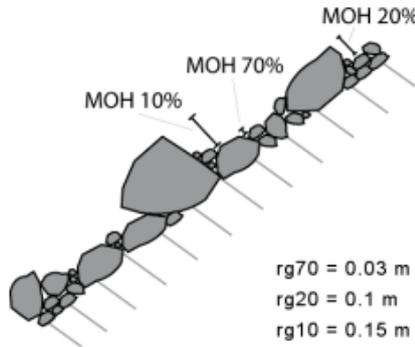
		<p>Pertanto non comporta effetti sull'altezza del terreno o sull'angolo di pendenza locale in una cella raster.</p>  <p>Figura 2. Rappresentazione dell'altezza di un ostacolo (MOH) rappresentativa per il 70%, 20% e 10% della superficie senza una zona omogenea sul pendio. Il parametro MOH deve essere misurato guardando il pendio verso valle, nella direzione di discesa del masso.</p> <p>rg70 = 0.03 m rg20 = 0.1 m rg10 = 0.15 m</p>
8	rg20.asc	<p>mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 20% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);</p>
9	rg10.asc	<p>mappa raster che definisce la scabrezza del versante incontrata con una probabilità del 10% da un blocco in caduta (vedi spiegazione rg70.asc);</p>
10	soiltype.asc	<p>mappa raster che definisce la tipologia del suolo (integer type raster; [values 0 - 7]). Questa mappa rappresenta l'elasticità del terreno e deve essere mappata in campo utilizzando poligoni (che rappresentano aree omogenee); successivamente deve essere convertita in una mappa raster denominata soiltype.asc, usando un Geographical Information System (GIS). Rockyfor3D prevede 8 tipi di suolo che sono elencati in Tabella 1 e 2. Nel modello questi tipi di suolo sono collegati direttamente al valore di R_n (coefficiente di restituzione normale). Per descrivere correttamente il tipo di suolo, si consiglia di scavare un piccolo buco con un martello geologico e osservare come si presenta sotto il muschio o la copertura vegetale del suolo.</p> <p>Osservazione sul soiltype 7 (strada asfaltata) Fino ad ora non è disponibile alcun dato sperimentale riguardo l'energia assorbita dal manto stradale durante un impatto dinamico. Il valore di R_n, che varia tra 0.32 e 0.39, è leggermente inferiore al valore di 0.4 assunto da Hoek et. al. (1987). Tuttavia il modello può sottostimare la perdita di energia durante gli impatti su tali strade. Se l'utente ritiene che i massi percorrano distanze troppo elevate, può utilizzare valori di 3, 2 o 1 per le strade asfaltate che assorbono più energia. Si apprezza un riscontro da parte degli utilizzatori che hanno acquisito esperienza nello sperimentare valori di soiltype per le strade asfaltate al fine di poter migliorare il modello</p>

Figura 115 – Le dieci mappe raster da fornire in input a Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]

Inoltre, per avere un'idea della percentuale di superficie coperta da una certa scabrezza in modo da definire le mappe raster *rg70.asc*, *rg20.asc* e *rg10.asc*, è fornita un'immagine di supporto raffigurata in Figura 116.

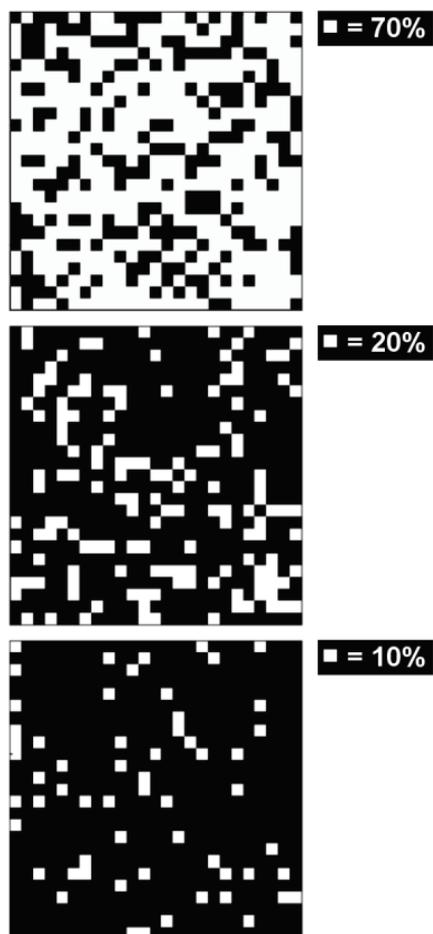


Figura 116 – Immagine di supporto per la stima in campo della percentuale di superficie coperta da una certa scabrezza [Dorren e Simoni, 2014]

Per quanto riguarda il suolo, la tipologia viene indicata sulla base di un codice numerico variabile da 0 a 7, ad ognuno dei quali corrispondono i valori del coefficiente di restituzione R_n , sia l'intervallo che il valore medio (Tabella 10).

Tabella 10 – Tipi di suolo da Rockyfor3D e relativi valori di R_n [Dorren e Simoni, 2014]

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

7.3 Simulazione con foresta

Nel caso in cui il territorio a cui vanno riferite le simulazioni sia interessato da una superficie forestale, si può procedere secondo due diverse modalità:

1. Utilizzare un file contenente le coordinate e il diametro del fusto misurato all'altezza del petto (*DBH* – *diametro medio a petto d'uomo* in centimetri) di ogni singolo albero; tale file deve essere necessariamente nominato *treefile.txt* e salvato nella *directory* in cui si sta lavorando. Queste informazioni possono essere ricavate tramite misure in campo o l'analisi di un *DSM (Digital Surface Model)* ottenuto da tecnica Laser Scanning. Il formato del file, privo di intestazione, deve essere:

```
136578.55 2236789.45 43
136554.89 2236793.22 27
136531.39 2236801.37 34
...
```

Sempre nella medesima *directory*, va riportato un ulteriore file nominato *confif_percent.asc (integer type raster; [valori 0 – 100 %])*, in cui i valori associati ad ogni cella rappresentano la percentuale

media di conifere; la dimensione e la risoluzione di questa mappa devono necessariamente essere le stesse del file raster *dem.asc*.

2. Utilizzare quattro mappe raster rappresentanti la vegetazione, ovvero:
 - 1) *nrtrees.asc* (*integer type raster; [valori 0 - 10000 ha⁻¹]*): associa ad ogni cella il numero di alberi per ettaro presenti al suo interno;
 - 2) *dbhmean.asc* (*integer type raster; [valori 0 - 250 cm]*): associa ad ogni cella il valore di DBH media;
 - 3) *dbhstd.asc* (*integer type raster; [valori 0 - 250 cm]*): associa ad ogni cella il valore della deviazione standard di DBH;
 - 4) *conif_percent.asc* (*integer type raster; [valori 0 - 100 %]*): associa ad ogni cella la percentuale media di alberi di conifere presenti al suo interno.

Tramite queste quattro mappe raster, che devono avere necessariamente le stesse dimensione e risoluzione del file raster *dem.asc*, ad ogni cella viene casualmente assegnato un determinato numero di alberi con un determinato diametro; successivamente, si crea il file *treefile.txt* con le coordinate degli alberi e relative DBH. Quest'ultimo parametro viene assegnato per mezzo della *Distribuzione Gamma*, basata sul valore medio e sulla deviazione standard caratteristiche di ogni cella.

Questa opzione è più vantaggiosa per il fatto che la vegetazione ricoperta dagli alberi più grandi è rappresentata meglio; difatti, tramite Laser Scanning si possono avere degli errori per la funzione di protezione al passaggio delle radiazioni elettromagnetiche operata dagli alberi di dimensioni maggiori.

Nella Figura 117 è schematizzato il procedimento da seguire in caso di presenza di superfici forestali.

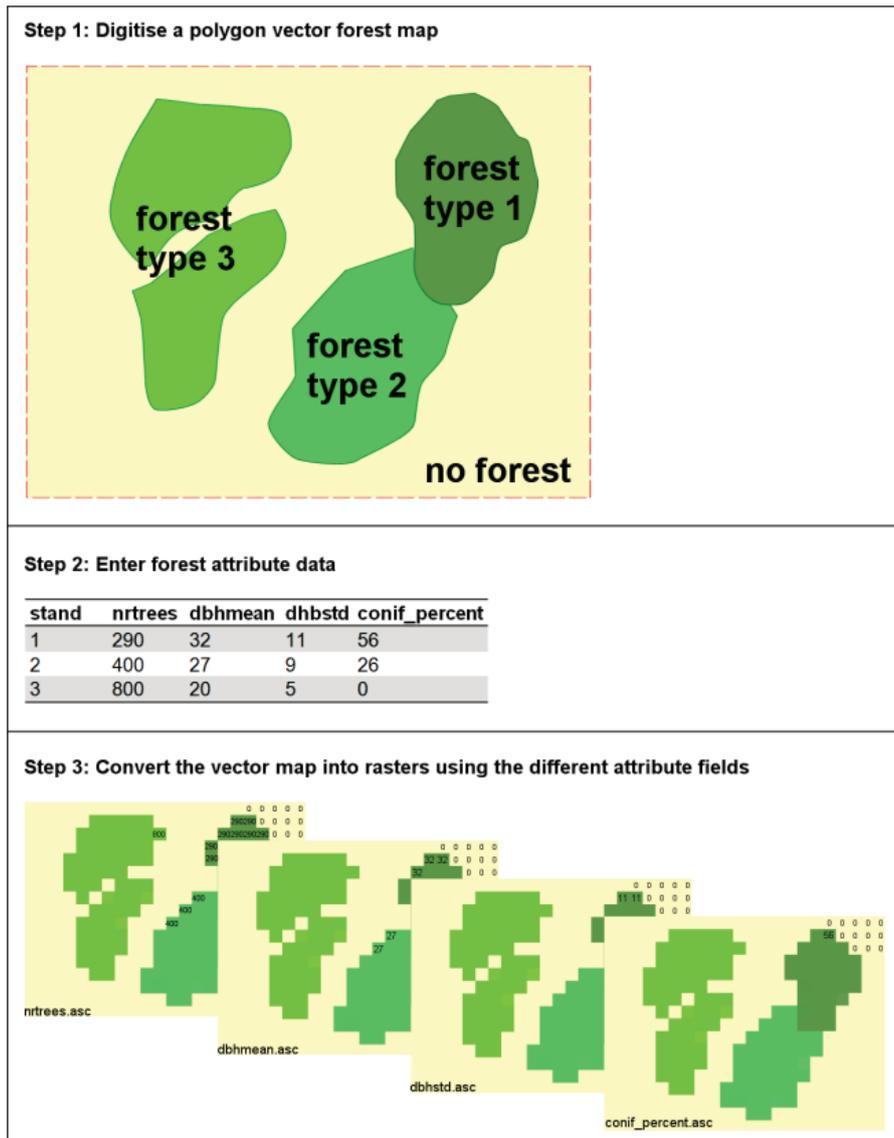


Figura 117 – Simulazione della vegetazione con Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]

7.4 Simulazione con reti paramassi

L'effettuazione di simulazioni con reti paramassi necessita la costruzione di tre mappe raster, anche in tal caso con le stesse dimensione e risoluzione del file raster *dem.asc.*, da salvare nella directory di lavoro. Queste mappe sono:

1. *net_number.asc* (*integer type raster*; [valori 0 - 999]): relativa al numero di identificazione delle reti paramassi. Questo numero deve essere unico per ciascuna linea che rappresenta una rete paramassi;
2. *net_energy.asc* (*integer type raster*; [valori 0 - 20000 kJ]): relativa all'energia, o capacità di assorbimento delle reti paramassi;
3. *net_height.asc* (*integer or double type raster*; [valori 0 - 10 m]): relativa all'altezza delle reti paramassi misurata perpendicolarmente al versante.

In particolare, la loro creazione richiede la rasterizzazione dei file vettoriali contenenti gli attributi relativi alle reti paramassi. Non esiste un numero massimo di reti paramassi da inserire, purché non siano sovrapposte nella mappa raster.

Una volta effettuata la simulazione con reti paramassi, i risultati vengono salvati in un file di testo nominato *Rockyfor3D_v50_CalC_SCR_dd-mm-yy_HHhMM.txt*.

Assegnando un valore nullo sia per l'altezza che per la capacità di assorbimento delle barriere, si ottiene una mappatura dei valori calcolati in corrispondenza delle barriere senza che esse influenzino l'esecuzione delle simulazioni.

Per ciascun masso che raggiunge la rete vengono calcolati:

- $E [kJ]$: energia cinetica traslazionale e rotazionale;
- $Ph [m]$: altezza del passaggio perpendicolarmente alla superficie del pendio;
- $V [m/s]$: velocità;
- $V_{rot} [rad/s]$: velocità rotazionale;
- Imp_a : angolo di impatto. Corrisponde all'angolo tra il piano orizzontale e la traiettoria del masso all'istante in cui arriva nella rete; se assume dei valori negativi, allora significa che un masso sta cadendo, mentre se assume dei valori positivi, allora si è in presenza di un masso che si allontana dalla rete, verso l'alto, verosimilmente dopo un rimbalzo.

Inoltre, per ogni barriera viene definito il numero di blocchi che la impattano ad ogni simulazione.

7.5 Impostazioni per le simulazioni

Mediante l'interfaccia grafica di Rockyfor3D si possono definire alcuni parametri quali:

- *Il numero di simulazioni per ciascuna cella sorgente*: corrisponde al numero di traiettorie indipendenti dei singoli massi simulate per ogni cella sorgente;
- *La variazione del volume del blocco [%]*: la percentuale con cui varieranno casualmente le dimensioni del masso durante la simulazione di ogni traiettoria;
- *L'altezza di caduta iniziale (facoltativa)*: altezza in metri sopra la superficie del DEM da cui verrà rilasciato il blocco nell'istante iniziale, che provocherà un aumento della velocità verticale iniziale del blocco simulato. Di default è pari a zero;
- *La simulazione in presenza o assenza di bosco*;
- *La simulazione in presenza o assenza di reti paramassi*.

Inoltre, il programma di calcolo fissa i parametri di velocità iniziale:

- *Orizzontale*: posta pari a 0,5 m/s;
- *Verticale*: posta pari a -0,5 m/s; tuttavia, questa componente può venire incrementata aumentando l'altezza iniziale di caduta.

7.6 Componenti principali del modello

Successivamente, sono elencati i parametri fondamentali nell'utilizzo di Rockyfor3D.

La forma dei blocchi

La scelta di questo parametro è importante in quanto da esso dipende il metodo di calcolo del volume del blocco, e perciò della sua massa, e del momento d'inerzia, basandosi sulle tre dimensioni stabilite d1, d2 e d3. In particolare, le tipologie di forma dei blocchi sono:

- Parallelepipedo;
- Ellissoide;
- Sfera;

- Disco.

Forme del blocco più complesse non vengono considerate per il fatto che si dovrebbero calcolare molte traiettorie tenendo presente gli effetti che tali forme comportano sui rimbalzi, ma ad oggi non esiste un algoritmo capace di svolgere una tale tipologia di operazione.

Per quanto riguarda la determinazione della posizione del blocco, il rimbalzo sulla superficie del versante e l'impatto contro gli alberi, Rockyfor3D utilizza la forma sferica, alla quale associa un certo tipo di diametro in base alla situazione:

- In caso di urto contro un albero si assume il diametro più piccolo tra quelli definiti per determinare se l'urto avviene o meno;
- In caso di calcolo delle perdite di energia durante l'impatto con il terreno si assume un diametro più grande ottenuto dalla media tra i due diametri maggiori.

Caduta libera

Come già accennato precedentemente, la caduta libera è descritta da un moto parabolico uniformemente accelerato, dal quale è possibile determinare la posizione e la velocità all'intersezione con la topografia in tre dimensioni descritta da un DEM. Il software simula una traiettoria in tre dimensioni valutando l'evoluzione della posizione lungo i tre assi x , y e z , che rappresentano rispettivamente le direzioni est-ovest, nord-sud e la direzione verticale.

Rimbalzi sulla superficie

In seguito ad un rimbalzo il software calcola la velocità del blocco facendo uso di dieci funzioni; inoltre, la velocità in ingresso sui piani orizzontale xy (V_{hor}) e verticale z (V_{vert}) viene convertita rispettivamente in velocità in ingresso normale (V_n) e velocità in ingresso tangenziale (V_t), in relazione alla pendenza locale del versante (Figura 118).

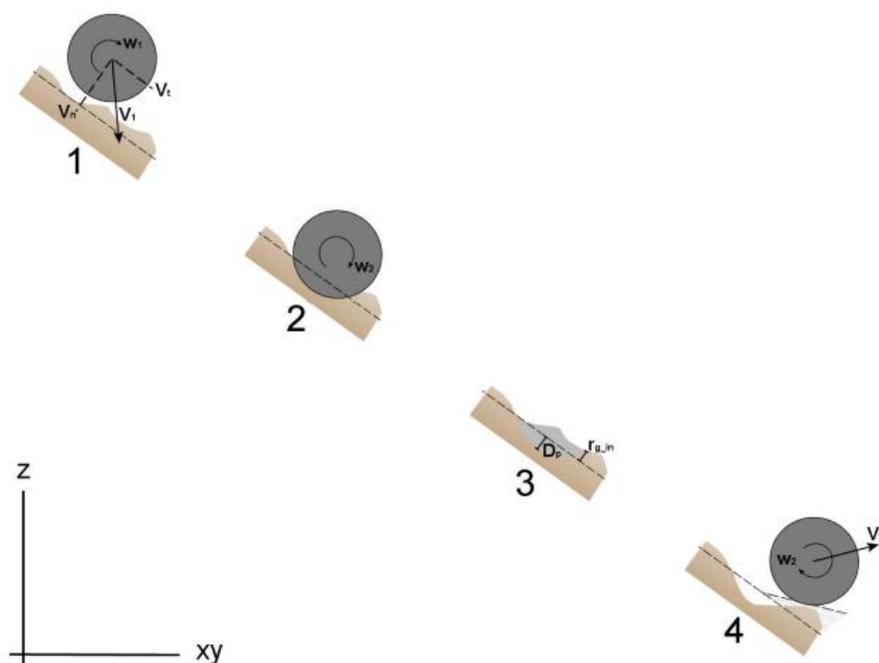


Figura 118 – Rappresentazione del meccanismo di rimbalzo secondo gli algoritmi utilizzati da Rockyfor3D [Dorren e Simoni, 2014]

L'algoritmo che permette di svolgere questa funzione richiede dei parametri e delle costanti in input, ovvero:

- *Coefficiente di restituzione normale (R_n):* corrisponde al rapporto tra la componente normale della velocità in uscita (dopo il rimbalzo) e la componente normale della velocità in ingresso (prima del rimbalzo);
- *Diametro del blocco (d):* espresso in metri;
- *Massa del blocco ($RockMass$):* espressa in kg;
- *Velocità di impatto del blocco (V):* espressa in m/s;
- k : corrisponde alla costante adimensionale per il calcolo della forma del blocco sferico, definita pari a 1,207;
- B : corrisponde alla costante adimensionale che esprime la compressibilità del materiale su cui avviene l'impatto, ed è fissata pari a 1,2. Tuttavia, questo valore varia lievemente in base al materiale considerato (Pichler et al., 2005).

Lo spessore di penetrazione (D_p), come rappresentato nella Figura 118, lo si valuta mediante alcune funzioni, tra cui le principali sono:

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left[\frac{1 + \frac{I_e}{N}}{1 + \frac{k\pi}{4N}} \right] + k \quad \text{per } \frac{D_p}{d} > k \quad (9)$$

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

dove si definiscono:

- *Il momento di inerzia I_e :*

$$I_e = \frac{RockMass \cdot V^2}{R_i \cdot d^3} \quad (10)$$

- *La resistenza alla penetrazione del terreno R_i [MPa]:* con questa espressione si ottengono dei valori compresi tra 1 e 5 MPa nel caso di materiale a granulometria fine, e tra 200 e 250 MPa per il substrato roccioso.

$$R_i = 55 \cdot 10^9 \cdot R_n^7 \quad (11)$$

- *Il parametro N :*

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} \cdot d^3 \cdot B \cdot 0,5} \quad (12)$$

- La densità del terreno ρ_{soil} [kg/m^3]: con la seguente espressione si ottengono dei valori compresi tra $1500 kg/m^3$, in caso di materiale a granulometria fine, e $2500 kg/m^3$, in caso di substrato roccioso.

$$\rho_{soil} = 1200 \cdot \ln(R_n) + 3300 \quad (13)$$

La massima profondità di penetrazione del blocco D_p corrisponde al raggio del blocco simulato. Da questo valore si può calcolare la velocità del blocco dopo il rimbalzo, dipendente anche dal coefficiente di restituzione tangenziale R_t . Quest'ultimo parametro lo si può valutare secondo la composizione e la dimensione del materiale presente sulla superficie del versante, ed il raggio del blocco. In particolare, *Dorren et al.* (2006) suggeriscono di calcolare tale coefficiente come:

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p)/R)} \quad (14)$$

dove:

- MOH è l'altezza che rappresenta l'ostacolo sulla superficie del versante, espressa in metri;
- D_p è la profondità di penetrazione, espressa in metri;
- R è il raggio del blocco caduto, espresso in metri.

Per quanto riguarda il valore di MOH , è difficile stabilirlo localmente su di un versante soggetto a caduta massi. Tuttavia, è possibile mapparli in tre classi ritenute rappresentative dell'altezza media degli ostacoli che incontrano i blocchi durante il 70%, 20% e 10% dei rimbalzi all'interno del poligono mappato; dunque, l'algoritmo di calcolo sceglie MOH in base a tali classi di copertura del poligono, in modo casuale. In conclusione, i valori forniti dalle tre classi di probabilità, nominate come $rg70$, $rg20$ e $rg10$, sono rappresentativi dei valori usati per i calcoli relativi al 70%, 20% e 10% dei rimbalzi.

Una volta noto il coefficiente di restituzione tangenziale R_t , è possibile calcolare la componente tangenziale della velocità del blocco in seguito al rimbalzo V_{t2} secondo l'espressione suggerita da *Pfiffer e Bowen* (1989):

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot V_{rot1}^2 + RockMass \cdot V_{t1}^2) \cdot R_t}{I + RockMass \cdot R^2}} \quad (15)$$

dove:

- V_{t1} è la componente tangenziale della velocità del blocco prima del rimbalzo;
- V_{rot1} è la velocità rotazionale del blocco prima del rimbalzo;
- I è il momento di inerzia relativo alla forma del blocco definita.

Tuttavia, prima del calcolo vero e proprio della componente tangenziale della velocità del blocco a rimbalzo avvenuto V_{t2} , l'algoritmo fa variare in modo casuale il valore calcolato del coefficiente di restituzione tangenziale di $\pm 10\%$ al fine di prendere in considerazione la varianza della scabrezza osservata in natura. Procedimento analogo viene svolto per il coefficiente di restituzione normale R_n , necessario ai fini del calcolo della componente normale della velocità a rimbalzo avvenuto V_{n2} , secondo l'equazione (*Pfiffer e Bowen, 1989*):

$$V_{n2} = \frac{-V_{n1} \cdot R_n}{1 + \left(\frac{abs(V_{n1})}{9}\right)^2} \quad (16)$$

dove:

- V_{n1} è la componente normale della velocità del blocco prima del rimbalzo;
- $\frac{abs(V_{n1})}{9}$ è un fattore che prende in considerazione la diminuzione del coefficiente di restituzione normale all'aumentare della velocità di impatto. Inoltre, rappresenta il passaggio da rimbalzi elastici con velocità normali basse, a rimbalzi meno elastici a velocità normali maggiori dovuti all'incremento della generazione di fratture nel blocco e di depressioni sulla superficie del versante (*Habib, 1977*). In tal modo, si tiene conto in maniera indiretta degli effetti dell'angolo di impatto sulla tipologia di rimbalzo (*Wu, 1985*).

La velocità rotazionale a rimbalzo avvenuto la si determina come:

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) \cdot 2}{5 \cdot R} \right] \quad (17)$$

Alcune considerazioni: l'angolo di inclinazione del versante nel punto in cui avviene il rimbalzo viene diminuito casualmente ed uniformemente durante ogni rimbalzo, con il vincolo di 4° come massimo decremento. Inoltre, il rotolamento viene modellato da Rockyfor3D come una serie di piccoli rimbalzi distanti quanto il raggio del blocco, e in ogni caso di almeno 0,2 metri. Ciò è valido in presenza di versanti con pendenze comprese tra 0° e 30°.

Impatto contro un albero

Durante l'impatto è possibile calcolare sia la posizione dell'impatto stesso contro gli alberi sia i suoi effetti sulla dissipazione di energia; questo grazie all'uso di soluzioni analitiche da parte del modello che permettono di avere l'esatta posizione del blocco simulato in continuo.

In particolare, il modello fa uso di:

- *Posizione dell'impatto contro un albero;*
- *Diametro dell'albero impattato;*
- *Tipologia di albero;*
- *Energia del blocco.*

Le posizioni e i diametri degli alberi presenti sul versante in prossimità del blocco simulato sono reperibili da una lista.

A seguito dell'impatto contro un albero parte dell'energia cinetica del blocco viene dissipata secondo le quattro funzioni schematizzate nella Figura 119.

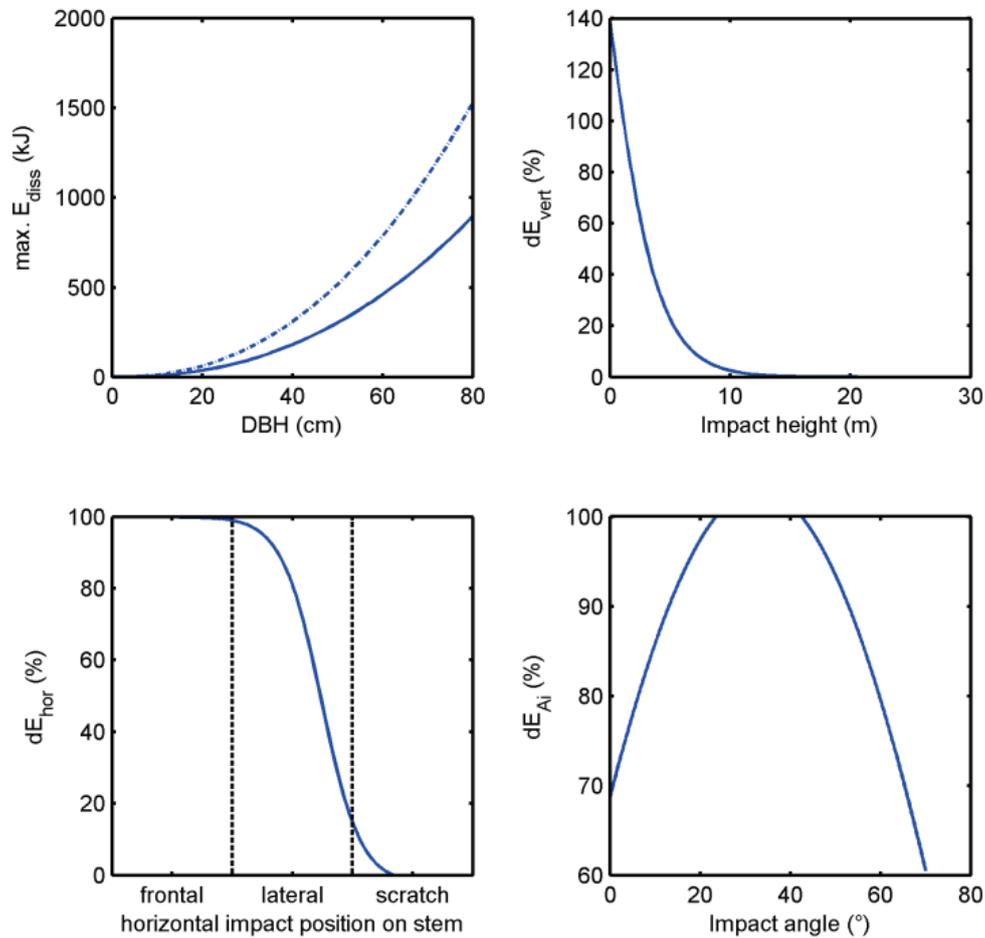


Figura 119 – Rappresentazione delle quattro funzioni per calcolare la dissipazione di energia cinetica durante l'impatto con un albero. Per il grafico in alto a destra si è utilizzata un'altezza dell'albero di circa 13 m e una DBH di 20 cm [Dorren e Simoni, 2014]

La massima quantità di energia cinetica E_{dissM} che può essere assorbita, e quindi dissipata in seguito ad un urto, viene determinata in funzione della tipologia di albero come (Dorren e Berger, 2006):

$$E_{dissM} = FE_{ratio} \cdot 38,7 \cdot DBH^{2,31} \quad (18)$$

dove:

- E_{dissM} [J] è la massima energia cinetica che può essere dissipata durante l'urto con un albero;
- FE_{ratio} è il rapporto energia-rottura assunto pari a 0,93 per le conifere e 1,59 per le latifoglie;
- DBH [cm] è il diametro del tronco dell'albero misurato all'altezza del petto.

La totale o parziale dissipazione dell'energia dipende dalle posizioni orizzontale e verticale dell'impatto sull'albero, come mostrato nella Figura 120.

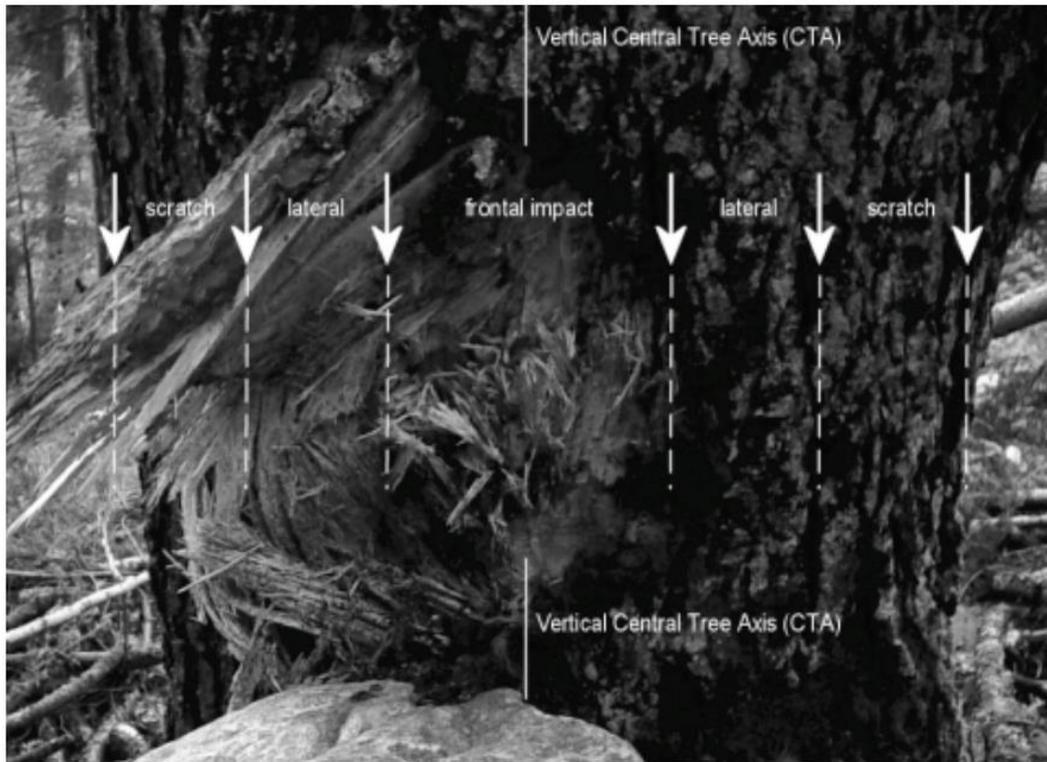


Figura 120 – Tre tipologie principali di impatto in base alla distanza orizzontale tra centro dell'impatto e asse verticale passante per il centro dell'albero (CTA) [Dorren e Simoni, 2014]

Per quanto riguarda la posizione orizzontale, la massima quantità di energia che può essere dissipata dall'albero relativamente alla posizione orizzontale dell'impatto dE_{hor} [-] è determinata come (Dorren e Berger, 2006):

$$dE_{hor} = -0,046 + \frac{0,98 + 0,046}{1 + 10^{(0,58 - ((P_i - CTA)/0,5 \cdot DBH)) \cdot (-8)}} \quad (19)$$

dove $P_i - CTA$ [m] esprime la distanza orizzontale tra la posizione dell'impatto e l'asse verticale passante per il centro dell'albero.

Per quanto riguarda la posizione verticale, anche nota come altezza dell'impatto, il calcolo richiede inizialmente la determinazione dell'altezza teorica dell'albero H_{tree} [m] a partire dal valore di DBH secondo una funzione derivante dall'analisi di migliaia di misure di alberi in tutto l'arco alpino:

$$H_{tree} = 1,22 \cdot DBH^{0,8} \quad (20)$$

Noto questo valore, si procede con il calcolo della percentuale della massima quantità di energia che può essere dissipata dall'albero dE_{vert} [-] in funzione della posizione verticale dell'impatto Z_i [m]:

$$dE_{vert} = 1,62 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{18,04 \cdot (Z_i/H_{tree}) + 0,02 \cdot DBH - 2,35}} - \frac{1}{1 + e^{15,69 + 0,02 \cdot DBH}} \right) \quad (21)$$

È inoltre possibile calcolare la percentuale della massima quantità di energia $dE_{\alpha_{imp}}$ [-] che può essere dissipata da un albero in funzione dell'angolo di impatto del blocco α_{imp} [°] rispetto alla posizione verticale dell'albero:

$$dE_{\alpha_{imp}} = \min \left(1; \left(1,03 \cdot \sin \left(1,46 \cdot \frac{\min(\alpha_{imp}; 70)}{180^\circ} \cdot \pi + 0,73 \right) \right) \right) \quad (22)$$

Relativamente alle espressioni (21) e (22), esse si basano sui dati provenienti da analisi pubblicate da *Dorren e Berger* (2006), *Jonsson* (2007) e *Lundström et al.* (2009).

Noti tutti questi parametri è possibile calcolare la quantità totale di energia dissipata dall'albero espressa in kJ:

$$E_{dtree} = E_{dissM} \cdot dE_{vert} \cdot dE_{hor} \cdot dE_{\alpha_{imp}} / 1000 \quad (23)$$

Calcolo della direzione di caduta

La direzione di caduta di un blocco può variare a causa di più condizioni, come un rimbalzo sulla superficie del versante o l'impatto contro un albero.

Cambiamento di direzione dovuto al rimbalzo sulla superficie del pendio

La direzione iniziale di caduta del blocco simulato si può determinare dall'esposizione della cella sorgente. Successivamente, tale direzione subisce delle variazioni dovute ai rimbalzi sul terreno o agli impatti contro gli alberi. In particolare, l'angolo di deviazione a seguito di un rimbalzo sulla superficie dipende dalla topografia, dalla direzione di caduta del blocco prima del rimbalzo e dalla velocità del blocco che cade. In base alla Figura 121, in seguito ad ogni rimbalzo del blocco il modello ne varia la direzione secondo l'esposizione della cella in cui il blocco rimbalza.

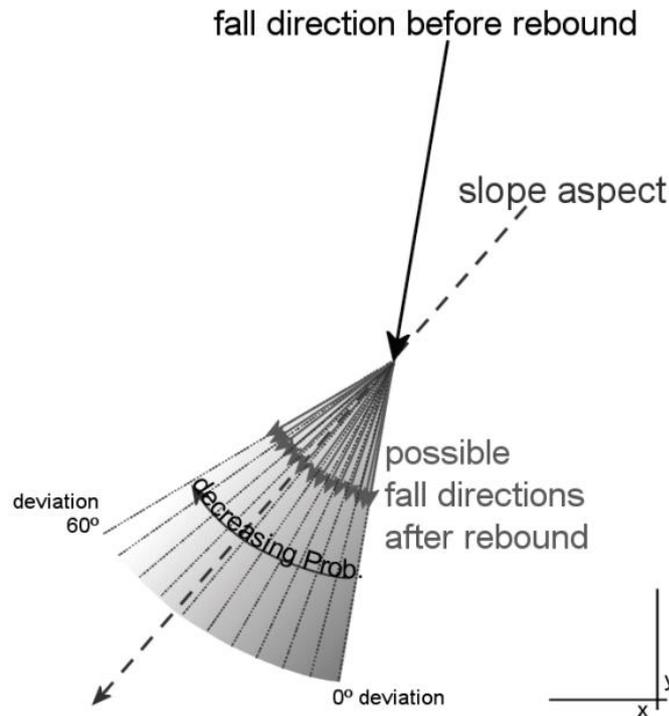


Figura 121 – Principio dell’algoritmo di calcolo della direzione di caduta dopo un rimbalzo sulla superficie del pendio [Dorren e Simoni, 2014]

Lo *slope aspect* rappresenta la direzione, osservando verso valle, che corrisponde alla massima variazione del gradiente valutato tra ogni cella e le quattro celle più vicine, ovvero sopra, sotto, a destra e a sinistra; rappresenta, dunque, la direzione di massima pendenza per ogni cella, definibile utilizzando l’algoritmo suggerito da *Zevenbergen e Thorne* (1987). A seguito della deviazione della direzione causata dal rimbalzo, viene determinato un numero casuale che definisce quanto il blocco viene deviato rispetto alla condizione iniziale; le varie casistiche indicate nella Tabella 11 si riferiscono ad una probabilità di accadimento, funzione della velocità del blocco precedentemente al rimbalzo. Questi valori sono stati desunti dall’analisi statistica delle traiettorie dei massi caduti e delle velocità osservate negli esperimenti presentati da *Dorren et al.* (2006). I valori sono validi anche se il blocco si muove verso monte, mentre se esso entra in una buca o depressione le direzioni prima e dopo il rimbalzo rimangono invariate.

Tabella 11 – Probabilità (in %) degli intervalli dell’angolo di deviazione del blocco dopo il rimbalzo, per tre classi di velocità usate da *Rockyfor3D* [Dorren e Simoni, 2014]

Angolo di deviazione [°]	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10 \text{ m/s}$	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

Cambiamento di direzione dovuto all'impatto con gli alberi

In seguito ad alcuni esperimenti condotti da *Dorren et al.* (2005), è stato dimostrato che la traiettoria del blocco nel caso di impatto contro un albero può subire una variazione laterale massima di 76° rispetto alla direzione originale di caduta. Tali esperimenti si riferiscono alle direzioni entrante ed uscente in un cerchio di raggio pari a 5 metri attorno all'albero impattato; mentre vicino al tronco dell'albero lo scostamento tra le direzioni di caduta prima e dopo l'urto può raggiungere anche i 180°. La deviazione del blocco in seguito all'urto contro un albero è funzione della posizione del baricentro del blocco simulato rispetto al tronco dell'albero durante l'impatto. Da ciò, sono state individuate tre tipologie principali di impatto, ad ognuna delle quali sono assegnate le probabilità di subire una determinata deviazione a causa dell'urto contro un albero (Tabella 12).

Tabella 12 – Probabilità (in %) della deviazione di caduta dovuta all'impatto contro un albero [Dorren e Simoni, 2014]

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

7.7 Dati di output del modello

In accordo con la Figura 122, ad ogni istante temporale il blocco simulato supera o rimbalza in una determinata cella raster, ed i massimi delle diverse variabili simulate nella medesima cella vengono memorizzati in file raster aventi necessariamente le stesse dimensioni e risoluzione dei raster forniti in ingresso.

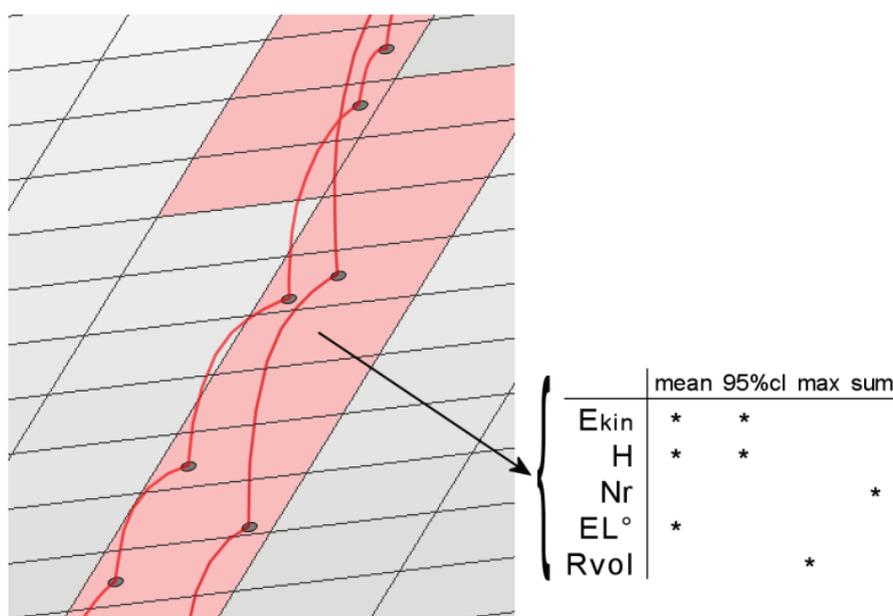


Figura 122 – Rappresentazione del passaggio da traiettoria 3D ai dati raster di output [Dorren e Simoni, 2014]

Dunque, i dati che Rockyfor3D restituisce in output sono:

- *E_mean.asc*: media dei massimi valori di energia cinetica (rotazionale e traslazionale) di tutti i blocchi simulati in una determinata cella;
- *E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc*: percentili di energia cinetica registrati in ogni cella, rispettivamente pari a 50, 90, 95, 98 e 99. L'output è in formato intero e corrisponde ai seguenti confini di classe energetica: ≤3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 270, 285, 300, 500, 1000, 1500, 3000, 5000, 10000, >10000 [kJ];
- *E_95CI.asc*: intervallo di confidenza pari al 95% (CI) di tutti i massimi di energia cinetica registrati in ciascuna cella, dove:
 - 95%CI = $E_mean + 2 * \text{deviazione standard del massimo valore in una cella}$, assumendo una distribuzione normale.

95%CI non rappresenta il 95° percentile; questo valore può essere considerato come il massimo valore di energia registrato in una data cella.

Inoltre, in Rockyfor3D la deviazione standard la si determina nel modo seguente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)} \quad (24)$$

- *Ph_mean.asc*: media della massima altezza di passaggio perpendicolarmente al versante di tutti i blocchi che attraversano la cella, espressa in metri;
- *Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc*: percentili di altezza di passaggio registrata in ciascuna cella, rispettivamente pari a 50, 90, 95, 98 e 99. L'output è in formato intero e corrisponde ai seguenti confini di classe d'altezza: ≤0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, >20, espressa in metri;
- *Ph_95CI.asc*: intervallo di confidenza pari al 95% (CI) di tutti i valori massimi di altezza di passaggio, perpendicolarmente alla superficie, registrata in ciascuna cella ed espressa in metri. Può essere considerato come la massima altezza di passaggio in ogni cella;
- *Nr_passages.asc*: numero di blocchi che hanno attraversato le celle;
- *Nr_sourcecells.asc*: numero di celle sorgenti da cui i blocchi che si distaccano raggiungono una determinata cella, ovvero il numero di celle sorgenti che alimentano una determinata cella;
- *Reach_probability.asc*: mappa che mostra la probabilità che un masso raggiunga una data cella, i valori alti indicano probabilità elevata, i valori bassi indicano che tale condizione è improbabile. Ad ogni cella viene attribuito un valore percentuale ottenuto come:
($Nr_passages * 100$) / ($Nr_simulations_per_source_cell * Nr_sourcecells$) [%];
- *Nr_deposited.asc*: mappa che permette di delineare le aree di arresto di una caduta massi, ad esempio per la mappatura della pericolosità. Corrisponde, dunque, al numero di blocchi fermati in ogni cella;
- *Rvol_deposit.asc*: massimo volume del blocco arrestato in ogni cella, espresso in m³;
- *EL_angles.asc*: raster con gli angoli minimi sottesi dalla linea dell'energia ricalcolata per cella, espressi in gradi [°]. Secondo quanto affermato da Heim (1932), Scheidegger (1973), Toppe (1987), Gerber (1998), Jaboyedoff e Labiouse (2003), l'angolo della linea dell'energia è definito come l'angolo di inclinazione di una linea virtuale diretta tra la posizione di arresto e la posizione di origine del blocco caduto;

- *Traj_time.asc*: tempo minimo necessario per raggiungere una cella raster dalle aree sorgenti definite, espresso in secondi;
- *V_max.asc*: velocità massima simulata per ciascuna cella, espressa come valore assoluto in m/s. Tuttavia, questi dati devono essere utilizzati prestando attenzione, in quanto privi di ulteriori informazioni sulla distribuzione statistica delle velocità del blocco;
- *Tree_impact_heights.asc*: massima altezza di impatto sull'albero per cella raster, espressa in metri;
- *Nr_tree_impacts.asc*: numero di impatti sull'albero per ciascuna cella.

Questi ultimi due file raster sono forniti in output solo qualora venga eseguita una simulazione in presenza di vegetazione.

Infine, in seguito a ciascuna simulazione, Rockyfor3D crea un *log file* nominato *Rockyfor3D_v50_logfile_dd-mm-yyyy_HHMM.txt*, un esempio del quale è riportato nella Figura 123.

```

Rockyfor3D v5.0 - Simulations completed on Tue Jan 24 15:12:39 2012

simulation started on Tue Jan 24 15:12:33 2012

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 0
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2382
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and with nets

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

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 323.900000 kj
- maximum energy value = 462.100000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:
EL_angle[°]  frequency[-]  frequency[%]
    24.00      1.00      0.04

List with output rasters

REMARKS

```

Figura 123 – Esempio di un log file [Dorren e Simoni, 2014]

7.8 Precisione dei valori di scabrezza della superficie

La scabrezza della superficie viene determinata facendo riferimento alla granulometria del materiale che ricopre la superficie stessa, agli eventuali ostacoli che un blocco può incrociare nel suo tragitto, come ad esempio un grosso masso caduto precedentemente, ma non viene presa in considerazione la microtopografia del terreno, come ad esempio dei solchi generatisi dal passaggio di animali. In base, dunque, alle dimensioni dei massi/materiale che ricoprono la superficie ed alla presenza di eventuali ostacoli per la caduta dei massi, la scabrezza può variare notevolmente, in accordo con la Tabella 13 in cui sono elencati i valori possibili da assegnare ai parametri *rg70*, *rg20* e *rg10*.

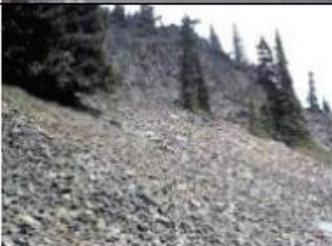
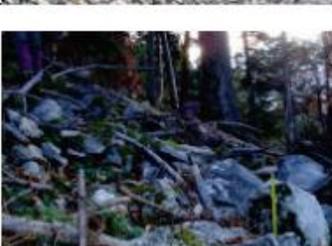
Tabella 13 – Precisione dei valori di scabrezza della superficie [Dorren e Simoni, 2014]

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

7.9 Valori assunti dai parametri al variare del tipo di superficie del pendio

Nella Figura 124 sono elencati i possibili valori da associare alla scabrezza superficiale in funzione del tipo di suolo del versante.

Photo	rg70	rg20	rg10	Soiltype
	0	0	0,05	6
	0	0,05	0,1	5
	0,25	0,5	0,9	4
	0,03	0,05	0,05	3
	0,05	0,05	0,1	4

	0,05	0,1	0,2	4
	0,03	0,03	0,03	3
	0	0	0,05	3
	0	0	0	7
	0,15	0,15	0,25	4
	0,1	0,35	0,15	4

	0	0	0	1
	100	100	100	0

Figura 124 – Valori assunti dai parametri relativi alla scabrezza superficiale al variare del tipo di superficie del pendio [Dorren e Simoni, 2014]

8 Analisi numerica

Il presente capitolo è dedicato all'analisi numerica effettuata mediante l'uso del codice di calcolo Rockyfor3D. Nel dettaglio, si descrivono tutti i passaggi necessari alla definizione dei dati da fornire in input al programma, le fonti su cui ci si è basati per la scelta dei parametri di prima approssimazione, la Back Analysis eseguita sulla base dell'evento franoso del novembre 2021 per effettuare una corretta calibrazione dei parametri stessi, ed i risultati ottenuti per la vera e propria analisi previsionale. Inoltre, vengono proposte due analisi relative alla scelta del DTM e alla densità di alberi per ettaro.

8.1 Dati di input

La procedura iniziale che prevede la definizione delle 14 mappe raster definite nel capitolo 7 è stata eseguita tramite l'utilizzo di QGIS 3.20.3. È stato creato un nuovo progetto impostando come sistema di riferimento WGS84/UTM32N. Successivamente, sul Geoportale della Regione Piemonte sono stati reperiti sia l'ortofoto sia il DTM. In particolare, per quanto riguarda l'ortofoto, è stata utilizzata quella fornita da AGEA (Agenzia per le erogazioni in agricoltura) ottenuta durante il volo eseguito nell'estate del 2018. Mentre per quanto riguarda il DTM, è stato utilizzato il DTM 10m x 10m (Modello digitale del terreno da CTRN 1:10000 (passo 10 m) - STORICO).

Le 14 mappe raster da creare sono, come definito precedentemente:

1. *dem.asc*;
2. *rockdensity.asc*;
3. *d1.asc*;
4. *d2.asc*;
5. *d3.asc*;
6. *blshape.asc*;
7. *rg70.asc*;
8. *rg20.asc*;
9. *rg10.asc*;
10. *soiltype.asc*;
11. *nrtrees.asc*;
12. *dbhmean.asc*;
13. *dbhstd.asc*;
14. *conif_percent.asc*.

Si è proceduto nella realizzazione dei dati di input distinguendo *area sorgente* e *area di propagazione*.

Area sorgente

L'area sorgente corrisponde alla zona in cui è presente la nicchia di distacco, ovvero laddove i blocchi in seguito all'innesco si distaccano e cominciano il loro moto lungo il pendio. Per definire la o le aree sorgenti, su QGIS sono stati importati l'ortofoto, il DTM10 ed il rilievo ombreggiato con risoluzione di 5 metri (RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 – Rilievo ombreggiato). Il DTM10, coprendo tutta l'area nord del Piemonte, è stato ritagliato mediante una funzione di QGIS per alleggerire il file, scegliendo il territorio a est di Campertogno comprendente l'intera area di studio, ma anche alcune zone prossime al fine di coprire un areale abbastanza ampio su cui effettuare le simulazioni (Figura 125).

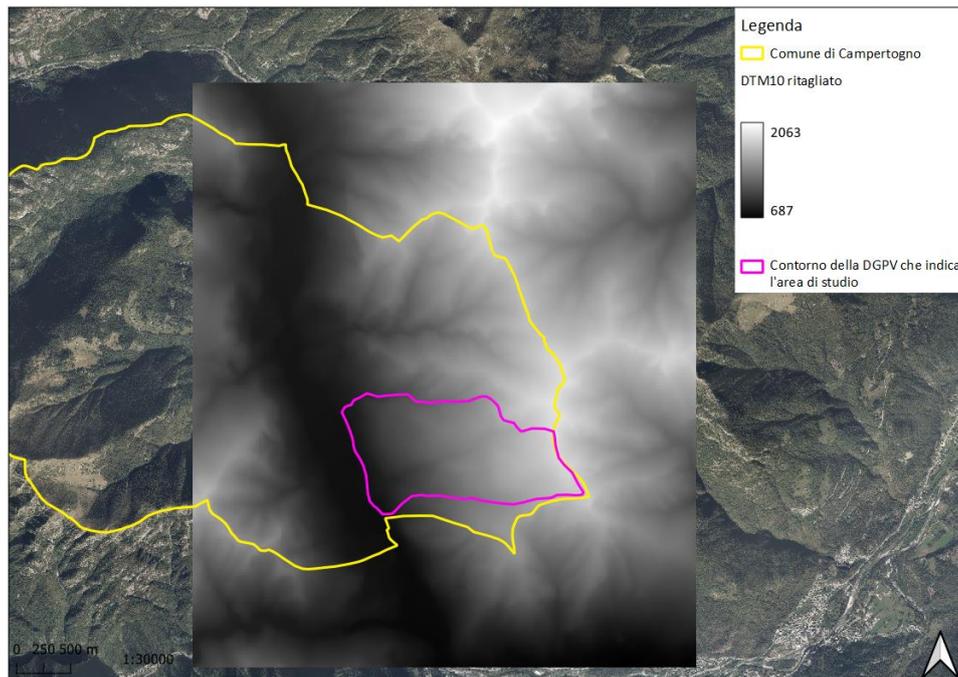


Figura 125 – Rappresentazione del DTM10 [m s.l.m.] ritagliato sulla zona di interesse su cui svolgere le simulazioni; scala 1:30000

Il DTM10, intendendo d’ora in avanti quello ritagliato, è stato utilizzato per la creazione della carta delle pendenze; tramite l’opzione *Raster* si è cliccato su *Analysis* ed infine su *Slope*. Una volta aperta la finestra *Slope*, si è scelto come *Input layer* il DTM10, e come metodo di calcolo la formula di *Zevenbergen and Thorne* (1987), basata sul calcolo della derivata seconda della superficie polinomiale di quarto ordine su una finestra 3x3. Ottenuta la carta delle pendenze, si è proceduto ad una sua modifica tramite l’opzione *Symbology* sulle proprietà del file; al fine di facilitare la scelta delle possibili nicchie di distacco, sono stati associati dei colori molto diversi tra loro per avere una separazione netta tra gli intervalli di pendenza. Come osservabile nella Figura 126, sono state considerate solo le pendenze al di sopra di 40° come prima scrematura, rendendo trasparenti quelle al di sotto di tale valore in modo da non visualizzarle nella mappa. Le pendenze superiori sono state suddivise in quattro classi a cui sono stati associati i seguenti colori:

- *Giallo*: pendenze superiori a 40° e inferiori, o uguali, a 44°;
- *Arancione*: pendenze superiori a 44° e inferiori, o uguali, a 45°;
- *Verde*: pendenze superiori a 45° e inferiori, o uguali, a 50°;
- *Nero*: pendenze superiori a 50°.

In tal modo è stato possibile identificare facilmente le aree più critiche.

Anche il rilievo ombreggiato è stato di aiuto nella scelta delle aree sorgenti, evidenziando sia i rilievi che l’esposizione dei versanti in modo da avere una prima idea sull’eventuale direzione di caduta dei blocchi rocciosi (Figura 127).

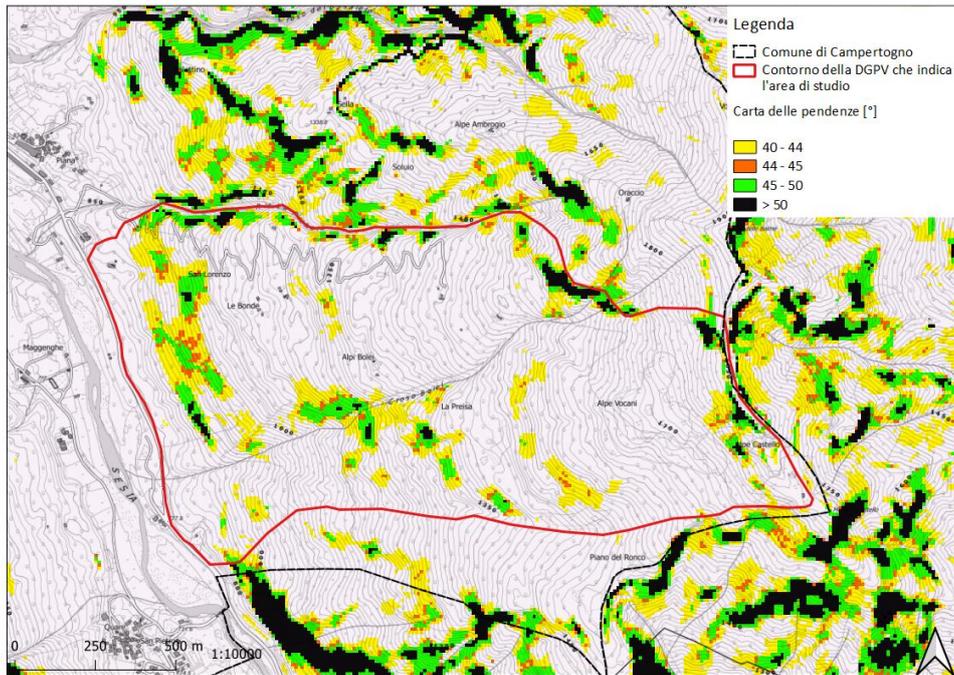


Figura 126 – Carta delle pendenze; scala 1:10000

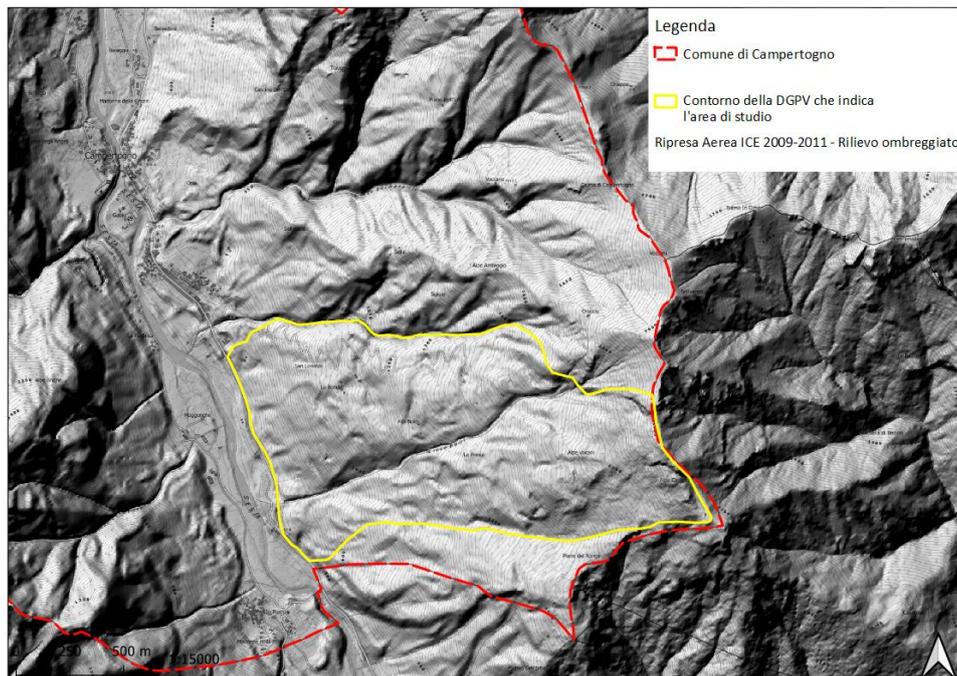


Figura 127 – Rappresentazione del rilievo ombreggiato; scala 1:15000

La carta delle pendenze ed il rilievo ombreggiato hanno fornito un aiuto significativo nella ricerca delle aree sorgenti, ma questa scelta è stata accompagnata anche da quanto osservato in situ durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022, che ha permesso di identificare oltre alla nicchia di distacco relativa all'evento del novembre 2021 anche altre potenziali nicchie situate a quote più elevate, e dai dati satellitari di Arpa Piemonte, da cui sono stati presi in considerazione i punti situati sul versante caratterizzati da movimenti

maggiori diretti verso il fondovalle che non sono emersi nella carta delle pendenze in quanto trattasi di aree detritiche poste in zone non particolarmente acclivi. Alcune aree segnalate dalle precedenti fonti come possibili nicchie di distacco non sono state prese in considerazione in seguito ad un'analisi visiva durante i vari sopralluoghi effettuati che le ha, in realtà, definite come zone tranquille e non destanti preoccupazione; difatti, le zone ubicate sul confine nord della deformazione gravitativa profonda si riferiscono alle sponde del Rio La Pichera.

In totale sono state identificate 13 aree sorgenti. Dal rilevamento di campagna del 14 luglio 2022 sono state individuate:

- A San Lorenzo, dove è presente la nicchia di distacco relativa all'evento del novembre 2021 e corrispondente alla seconda tappa del rilevamento (id 1 in Figura 128);
- In zona Alpi Bolei, corrispondente alla quarta tappa del rilevamento di campagna (id 2 in Figura 128);
- In zona Alpe Castello, emersa dall'ultima tappa effettuata durante il sopralluogo corrispondente ad Alpe Selva e laddove è stata identificata la nicchia più alta (id 3 in Figura 128).

Dalla carta delle pendenze realizzata sono state individuate 6 possibili nicchie di distacco in corrispondenza delle zone caratterizzate da pendenze più elevate, situate prevalentemente nella parte centrale del versante e verso il fondovalle (id 4, 5, 6, 7, 8 e 9 in Figura 128), di cui una (id 4) individuata durante il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022 (sottoparagrafo 5.9.6). Infine, dall'analisi dei dati satellitari sono state scelte altre possibili nicchie in corrispondenza delle aree detritiche identificate da velocità medie annue di spostamento inferiori a -3 mm/y (id 10, 11, 12 e 13 in Figura 128).

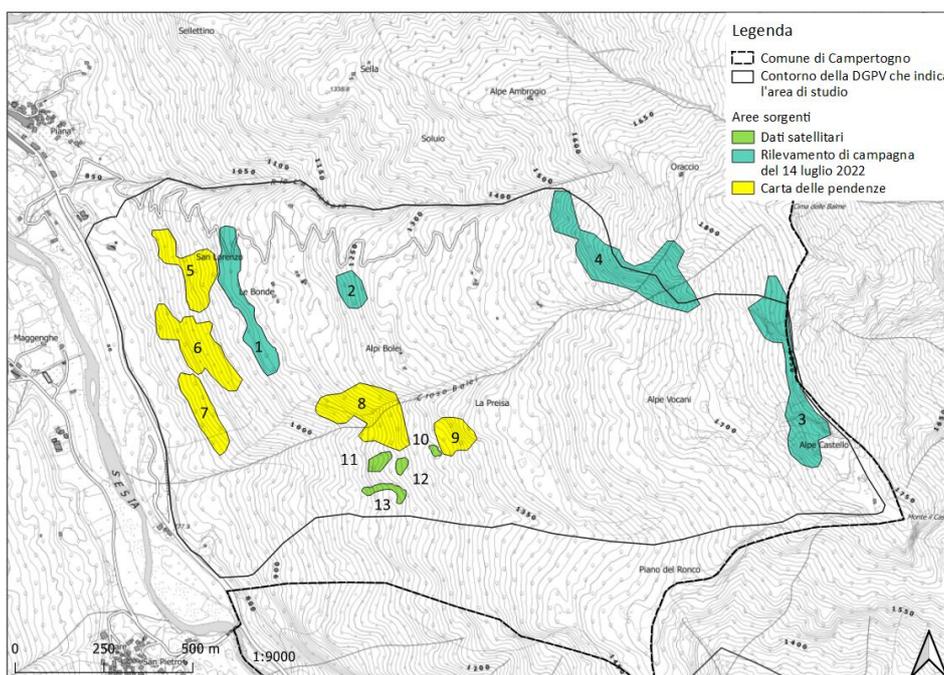


Figura 128 – Rappresentazione delle aree sorgenti; scala 1:9000

Una volta identificate le nicchie di distacco si è proceduto a evidenziarle come poligoni, come mostrato nella Figura 128, creando un nuovo shapefile layer con lo stesso sistema di riferimento del progetto e con una tabella degli attributi costituita da tante colonne quanti sono i parametri di interesse, in questo caso sei:

1. *id*: identificativo del poligono-sorgente;
2. *d1.asc*;
3. *d2.asc*;
4. *d3.asc*;
5. *rockdensity.asc*;
6. *blshape.asc*.

Area di propagazione

L'area di propagazione è la zona che viene interessata dai blocchi, intendendo sia le aree che contengono le traiettorie dei blocchi in movimento sia le aree in cui i blocchi si arrestano definitivamente. Per la sua definizione si è proceduto in modo analogo alle aree sorgenti, ovvero creando un nuovo shapefile layer con una tabella degli attributi costituita, questa volta, da nove colonne:

1. *id*: identificativo del poligono-propagazione;
2. *rg70.asc*;
3. *rg20.asc*;
4. *rg10.asc*;
5. *soiltype.asc*;
6. *nrtrees.asc*;
7. *dbhmean.asc*;
8. *dbhstd.asc*;
9. *conif_percent.asc*.

Per assegnare dei valori corretti a questi parametri si è fatto uso di più strumenti:

- *Ortofoto*;
- *LCP*: il *Land Cover Piemonte 2021*, in cui è rappresentata la copertura del territorio in termini di elementi antropici e naturali;
- *Carta Forestale 2016*: in cui è rappresentata la suddivisione della copertura forestale del territorio in base alle specie maggiormente presenti.

In quest'ultimo caso, relativo alla Carta Forestale 2016, essendo una fonte non recente e pertanto non più realistica e coerente con la situazione attuale, si è deciso di confermarne la validità mediante il confronto con Google Maps. Tuttavia, si sono rivelati di fondamentale importanza nella scelta dei valori da assegnare a tali parametri anche il rilevamento di campagna e le informazioni rese note dallo Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC).

Tramite Google Maps è stato possibile osservare dall'alto la situazione del territorio ed effettuare un confronto con quanto indicato dal Land Cover Piemonte 2021. In particolare, l'area considerata è stata suddivisa in sei classi:

- *Classe 0*: corrisponde a "fiume, o palude, o materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente", associata al Fiume Sesia;
- *Classe 1*: corrisponde a "materiale fine (spessore > ~100 cm)", associata al centro abitato e alle aree ad esso vicine, in quanto approssimabili a delle pianure alluvionali;
- *Classe 3*: corrisponde a "detrito di falda ($\emptyset < \sim 10$ cm); o suolo compatto medio con piccoli massi; o strade forestali", associata ad alcuni alpeggi presenti sul versante in cui non sono stati riscontrati massi di grandi dimensioni;

- *Classe 4*: corrisponde a "detrito di versante ($\varnothing > \sim 10$ cm); o suolo compatto con grandi massi", associata alla foresta nella quale sono stati osservati dei blocchi rocciosi di dimensioni variabili;
- *Classe 5*: corrisponde a "substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica", associata alle creste e alle zone poste a quote più elevate in cui sono presenti rocce affioranti ma non nude, bensì ricoperte da vegetazione, sia piante ad alto fusto, anche se in maniera meno fitta rispetto alla foresta, che cespugli;
- *Classe 7*: corrisponde a "strade asfaltate", associata alla Strada Provinciale 299.

Dunque, in totale sono stati tracciati 16 poligoni corrispondenti a diversi tipi di suolo (Figura 129). Talvolta, la scelta di creare più poligoni l'uno accanto all'altro indicanti il medesimo tipo di suolo è ricaduta sul fatto di agevolare la loro definizione su QGIS, spezzettando un vasto territorio in aree più ristrette, o di associare dei valori diversi ad alcuni parametri in relazione al territorio, come alla densità di alberi e al loro diametro medio.

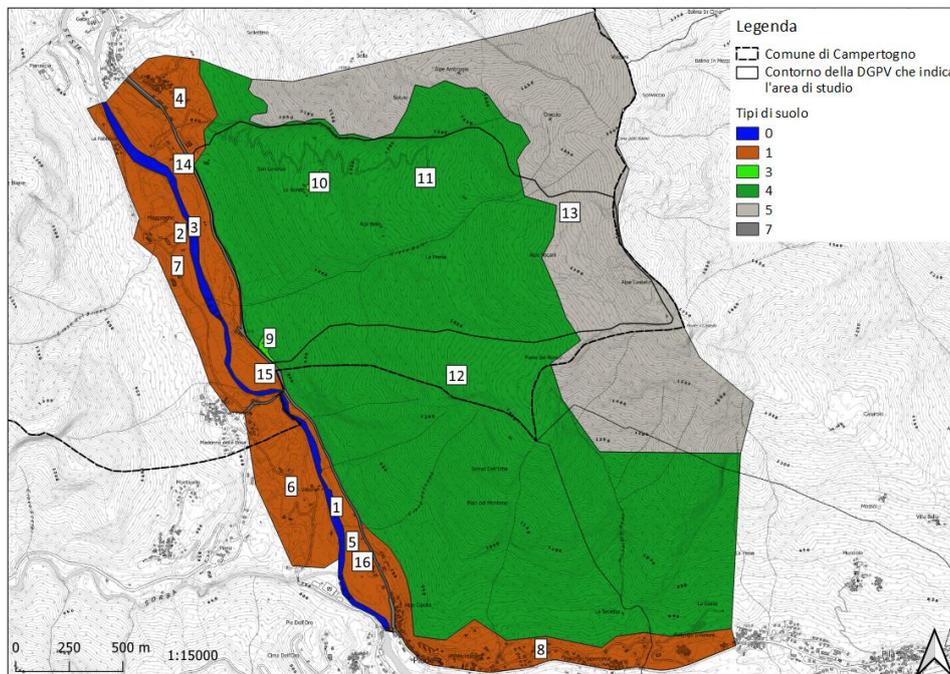


Figura 129 – Rappresentazione dei diversi tipi di suolo; scala 1:15000

Per quanto riguarda la scabrezza, e quindi i parametri rg_{70} , rg_{20} e rg_{10} , sono state consultate le tabelle fornite dal manuale di Rockyfor3D (Tabella 13, Figura 124) accompagnate da quanto osservato in campo durante il rilevamento e da Google Maps, quest'ultimo soprattutto per le aree non percorse durante il sopralluogo. La scabrezza non è un parametro di facile identificazione; tuttavia, la sua determinazione va effettuata con cura visto che da essa ne deriva il calcolo del coefficiente di restituzione tangenziale e, di conseguenza, dell'energia persa durante il rimbalzo sulla superficie del pendio.

Per le ultime quattro mappe, relative alla vegetazione, la scelta è stata più complessa in quanto risulta improbabile avere la certezza del numero di alberi per ettaro di superficie, che tuttavia può variare spostandosi lungo il versante; il medesimo discorso è valido anche per i diametri e per la percentuale di conifere. Perciò, si è proceduto facendo delle stime unendo i dati reperiti da più fonti.

Per la stima del parametro *nrtrees* è stata utilizzata una formula basata sulla distanza tra gli alberi e sulla distanza tra le file, ovvero:

$$n = \frac{10000}{D \cdot N} \quad (25)$$

dove:

- *n* è il numero di piante per ettaro;
- *D* è la distanza tra le file [m];
- *N* è la distanza tra gli alberi disposti su ogni fila [m];
- 10000 [m²] equivale a 1 ettaro [ha].

I valori delle due distanze non li si possono conoscere con precisione trattandosi di una foresta naturale in cui gli alberi sono distribuiti in maniera più o meno fitta a seconda delle varie aree che si stanno prendendo in considerazione e, perciò, non omogeneamente. Questa problematica è emersa anche durante il sopralluogo, in cui si è notato proprio questo passaggio tra aree più o meno boscate; tuttavia, si sono provate a calcolare approssimativamente alcune distanze su ortofoto tramite la funzione *Measure Line* di QGIS. In particolare, questo calcolo è stato effettuato per ciascun poligono creato in modo da tenere in considerazione questa variabilità.

Il DBH, ovvero il diametro del tronco dell'albero misurato a petto d'uomo, è stato stimato per i diversi poligoni sempre sulla base del sopralluogo effettuato e su alcuni dati di letteratura. La specie maggiormente presente è rappresentata da faggi, ma si può riscontrare anche la presenza di castagni, querce, abeti, betulle, salici e larici. A seconda delle specie i diametri possono subire delle variazioni non trascurabili; alcuni esempi di diametri sono stati reperiti dal *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare* di Giovanni Rondelet di cui si riporta una tabella (Figura 130). Dal sopralluogo si è visto come nella stessa area e a distanza ravvicinata coesistano alberi con diametri variabili da 25-30 cm a circa 60-65 cm. Unendo le informazioni reperite da entrambe le fonti, sono stati assegnati dei valori accompagnati da una deviazione standard piuttosto alta per tenere in conto tale variabilità.

L'ultimo parametro da definire è la percentuale di conifere. Anche in questo caso sono state unite le informazioni ricavate da più fonti, come la Carta Forestale 2016 verificata con Google Maps ed il sopralluogo. Per associare dei valori si è fatto un ragionamento sull'effettivo significato della percentuale di conifere; innanzitutto, il motivo per cui si vuole conoscere questo parametro proviene dal fatto che le conifere sono delle piante meno resistenti rispetto alle latifoglie, e perciò a seguito di un impatto i blocchi rocciosi hanno meno possibilità di frantumarsi e/o arrestarsi. Allora, la scelta di percentuali di conifere più alte risulta a favore di sicurezza, indicando la presenza di molti alberi non in grado di sopportare degli impatti con blocchi di grosse dimensioni. Inoltre, si è pensato di assegnare dei valori più alti in corrispondenza delle rocce affioranti che sono poste a quote più elevate, in quanto si tratta dell'ambiente in cui le conifere si sviluppano maggiormente rispetto alle latifoglie, le quali si ritrovano più facilmente a quote inferiori.

TAVOLA delle altezze medie alle quali possono elevarsi alcune specie di alberi, quella del loro tronco, il peso specifico del legno d'ognuno e quello di un piede cubico.

NOME DEGLI ALBERI	ALTEZZA MEDIA				DIAMETRI DEI TRONCHI		PESO SPECIFICO	PESO d'un piede cu- bico in libbre
	DEGLI ALBERI		DEI TRONCHI		In centim.	In pollici		
	In metri	In piedi	In metri	In piedi				
Albicocco	9	27	4	12	27	10	789	55 1/4
Acacia a tre spine o Gledistia	12	36	6	18	49	18	676	47 1/5
Loto comune	24	72	13	39	72	26	829	61 1/2
Allier	20	60	12	36	60	22	759	51 3/4
Amandorlo	12	36	7	21	36	14	1102	77 1/4
Albero di Giudea	10	30	6	18	32	12	686	48
Alno comune	25	75	14	42	75	28	655	46
Legno di Santa Lucia	9	27	5	15	27	10	865	60 1/2
Betulla comune	27	81	15	45	81	30	792	49 1/4
Betulla bianca a visciole	24	72	15	39	72	26	570	40
Bosso di Maone	9	27	5	15	27	10	919	64 1/5
Catalpa	14	42	8	24	42	16	467	32 2/5
Cedro del Libano	50	90	16	48	100	37	605	42 1/4
Carpino comune	18	54	10	30	54	20	760	55 1/4
Castagno	24	72	14	42	72	26	685	48
Quercia comune	27	81	14	42	81	30	905	65 1/5
Quercia bianca del Canada	30	90	18	54	90	35	842	59
Quercia di Borgogna	25	75	14	42	75	28	764	55 1/2
Quercia rossa di Virginia	27	81	15	45	81	30	587	41
Sorbo comune	21	63	12	36	63	25	994	69 1/2
Cipresso piramidale	15	45	8	24	45	17	911	65 3/4
Cipresso spiegato	24	72	12	36	72	26	655	46
Ebano delle Alpi	10	30	6	18	30	11	572	40
Acerò della Virginia	24	72	12	36	72	27	629	44
Acerò diasprato	12	36	7	21	36	14	554	38 3/4
Falsa Acacia	20	60	10	30	60	22	791	55 1/5
Gledistia senza spine	18	54	9	27	54	20	780	54 1/2
Frassino	20	60	12	36	60	22	787	55
Faggio	24	72	14	42	72	26	720	50 1/2
Tasso	9	27	5	15	27	10	728	54 1/2
Castagno d'India	24	72	14	42	72	26	657	46
Larice	25	75	15	45	90	35	656	46
Noce	18	54	9	27	92	34	680	47 1/2
Noce di America	20	60	10	30	96	36	735	51 1/2
Olmo	24	72	14	42	80	30	758	51 2/5
Pioppo d'Italia	25	75	15	45	81	30	415	29
Pino del Nord	27	81	15	45	87	35	612	45
Platano comune	25	75	14	42	75	28	622	45 1/2
Platano d'Oriente	27	81	14	42	96	36	538	37 2/5
Platano d'Occidente	25	75	15	45	90	35	704	49 1/2
Pero selvatico	12	36	6	18	36	14	715	50
Pomo id.	10	30	5	15	33	12	755	51 1/2
Pruno id.	9	27	5	15	30	11	762	55 1/5
Abete	32	96	18	54	120	44	542	38
Salice	18	54	9	27	30	22	462	32 1/2
Sicomoro	20	60	10	30	72	27	645	45
Sorbo	12	36	6	18	42	16	742	52
Tiglio	18	54	10	30	66	25	564	39 1/2
Tulipier	20	60	10	30	70	26	477	35 1/5
Tuja della Cina	18	54	10	30	56	21	560	39 1/2
Vernice del Giappone	10	30	6	18	36	14	820	57 1/2

Figura 130 – Misure relative alle diverse specie di alberi [Giovanni Rondelet (1834)]

8.1.1 Conversione da shapefile layer a raster

Il passaggio successivo è stata la conversione degli shapefile layer precedentemente creati con i vari attributi a raster. La rasterizzazione è possibile utilizzando alcune funzioni nell'ambiente QGIS; cliccando su *Raster* e successivamente su *Conversion* e *Rasterize (Vector to Raster)*, compare una finestra che richiede alcuni parametri. Come *Input layer* va inserito lo shapefile layer che si vuole convertire in formato raster; come *Field to use for a burn-in value* va inserito lo specifico attributo considerato e che si vuole convertire. In seguito, viene richiesta l'unità di misura in cui deve essere fornito il file raster in uscita (*Output raster size units*), assieme alla larghezza/risoluzione orizzontale (*Width/Horizontal resolution*) e all'altezza/risoluzione verticale (*Height/Vertical resolution*); ci sono due possibili opzioni: una prima opzione è quella di scegliere *Pixels*, che permette di ottenere un file raster alto un numero di pixel pari a quello selezionato in *Width* e *Height*. La seconda opzione è la scelta di *Georeferenced units*, che permette di ottenere, invece, un file raster in uscita

con pixel di altezza e larghezza pari ai valori selezionati, ed espressi nel medesimo sistema di riferimento del progetto. Nel caso analizzato è stata scelta questa seconda opzione, impostando come *Width* e *Height* un valore pari a 10 in modo tale da ottenere un file raster in uscita caratterizzato da un pixel alto 10 metri e largo 10 metri. Come *Output extent* occorre definire l'estensione del file in uscita, che in tal caso è stata selezionata pari a quella del DTM10 ritagliato dal momento che i file in input a Rockyfor3D devono possedere tutti la stessa dimensione. Questa operazione è stata ripetuta per tutti gli attributi dei file in formato *.shp* precedentemente creati, ad eccezione del DTM10 in quanto reperito già in formato raster, per poi venire salvati nel formato *.sdatt*.

8.1.2 Conversione da raster a ESRI ASCII Grid

L'ultimo passaggio è stata la conversione dei raster creati nel formato ESRI ASCII Grid in quanto leggibile da tutti gli editor di testo. In ambiente QGIS per fare ciò è sufficiente cliccare su *Raster, Conversion* ed infine scegliere l'opzione *Translate (Convert format)*; così facendo compare una finestra che richiede, inizialmente, l'*Input layer* in cui selezionare, uno alla volta, i file raster precedentemente creati. Importante è la scelta del corretto sistema di riferimento in *Override the projection for the output file*, in tal caso pari a quello del progetto. Infine, si salvano i file scegliendo il formato *.asc*, avendo cura di nominarli come definito nelle linee guida del software Rockyfor3D fornite da *Dorren e Simoni (2014)*; essi devono necessariamente essere salvati nella stessa cartella in modo che il codice di calcolo possa accedervi automaticamente e prendervi tutti i dati di cui ha bisogno. Questo procedimento è stato ripetuto per tutti i file raster creati, compreso il DTM10.

8.1.3 Input a Rockyfor3D

Una volta create tutte le mappe necessarie, il passo successivo ha previsto l'utilizzo di Rockyfor3D. Aprendo il codice di calcolo compare una finestra in cui immettere le informazioni richieste per poter procedere con le simulazioni. Innanzitutto, occorre definire la *Working directory*, ovvero il percorso che permette a Rockyfor3D di accedere alla cartella in cui sono state salvate tutte le mappe in formato *.asc* di cui ha bisogno. Successivamente, occorre definire le impostazioni di simulazione. Il primo parametro da inizializzare è *Number of simulations*, che consiste nel numero di lanci che il software provvederà ad analizzare per ciascuna area sorgente definita precedentemente. Nel seguito si richiedono *Variation of rock volume (%)* e *Additional initial fallheight (m)*, dove nel primo caso si può indicare la percentuale con cui il codice di calcolo può variare casualmente durante ogni singola traiettoria il volume dei blocchi rocciosi, che è stata assunta pari a zero, mentre nel secondo caso è possibile inizializzare l'altezza di caduta dei blocchi per aumentare la velocità iniziale in direzione verticale dei blocchi stessi, che è stata impostata pari a zero. La richiesta finale delle impostazioni relative alla simulazione riguarda la scelta tra *Using input rasters*, opzione utilizzata nel caso in esame, e *Rapid automatic simulation*.

Le impostazioni successive riguardano la definizione dei blocchi (*Block definition*); il codice di calcolo deve prendere in input le mappe che sono state create mediante l'uso di QGIS, e perciò in *Rock density (kg/m³)* si sceglie il file *rockdensity.asc*, in *Block dimensions (m)* c'è la possibilità di assegnare dei valori sul momento o, come è stato fatto, di scegliere le mappe già create nominate *d1.asc*, *d2.asc* e *d3.asc*. Cosa analoga è stata fatta per *Block shape*.

Le ultime impostazioni da definire riguardano le *Protective measures* in termini di *Simulation using forest*, in cui va selezionato *Forest raster* indicando così le apposite mappe create, e di *Simulation using nets*, opzione da considerare qualora siano state definite delle barriere paramassi. Una volta indicati i dati di input, si può procedere con la simulazione cliccando su *Run Simulation*.

8.2 DTM10 e DTM5: confronto

Prima delle simulazioni vere e proprie si è deciso di confrontare i risultati ottenuti utilizzando due DTM con diversa risoluzione; questo per verificare eventuali differenze tra i DTM in modo da proseguire l'analisi utilizzando quello con cui i dati di output possano essere considerati più attendibili. Oltre al DTM10, è stato utilizzato il DTM 5m x 5m (RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 - DTM 5). In particolare, esso è stato ritagliato secondo una griglia circa corrispondente al taglio dei Fogli IGM 1:50000, comportando la suddivisione del Comune di Campertogno in quattro DTM; perciò, si è resa necessaria un'operazione preliminare di unione di due DTM al fine di garantire una completa copertura dell'area di studio (Figura 131). Si sottolinea come entrambi i DTM rappresentino la situazione precedente all'evento franoso avvenuto nel novembre 2021.

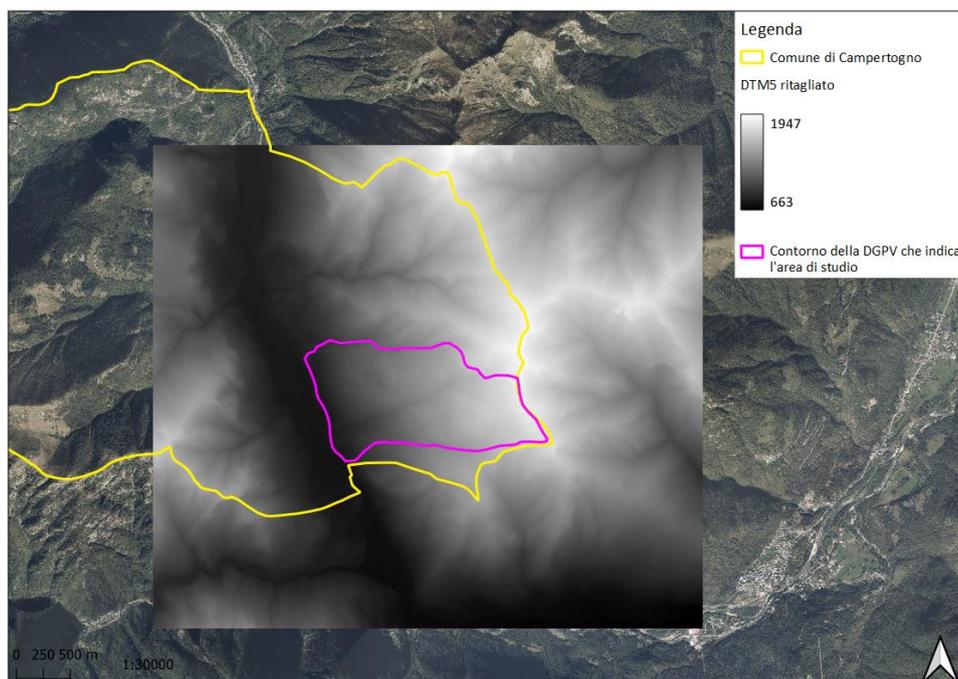


Figura 131 – Rappresentazione del DTM5 [m s.l.m.] ritagliato sulla zona di interesse su cui svolgere le simulazioni; scala 1:30000

La procedura per la creazione delle mappe è stata la medesima seguita utilizzando il DTM10 e descritta precedentemente.

Come nicchia di distacco è stata considerata quella ubicata a San Lorenzo corrispondente alla nicchia dell'evento del novembre 2021 (Figura 132), e come parametri di input sono stati scelti dei valori provvisori di prima approssimazione per individuare la presenza di eventuali differenze nei dati di output, assumendo un volume dei blocchi di 8 m^3 come ottenuto nelle analisi speditive dallo Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnosesia di Borgosesia (VC) a seguito di un'elaborazione statistica (sottoparagrafo 5.8.2); essi sono riportati in Tabella 14 (con riferimento alla Figura 129) e in Tabella 15.

Va menzionato come l'area sorgente disegnata su QGIS sia molto più grande della reale nicchia di distacco osservata durante il rilevamento di campagna; questo per porsi a favore di sicurezza ed essere certi di aver considerato l'intera zona interessata dall'evento franoso, ma anche perché, come già menzionato precedentemente, sono state unite in un solo areale sia la nicchia i cui blocchi hanno raggiunto il fondovalle sia la nicchia i cui blocchi si sono fermati pochi metri al di sotto (sottoparagrafo 5.9.7).

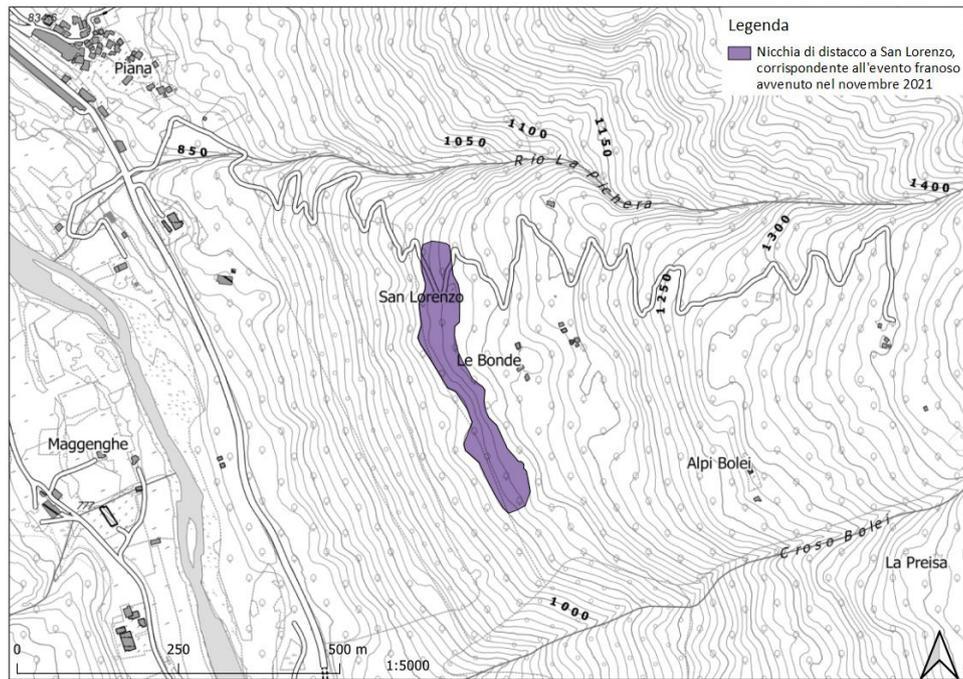


Figura 132 – Rappresentazione della nicchia di distacco scelta per effettuare le simulazioni; scala 1:5000

Tabella 14 – Valori di prima approssimazione dei parametri di input relativi al tipo di suolo

id poligoni	rg70 [m]	rg20 [m]	rg10 [m]	soiltype	nrtrees [n° alberi/ha]	dbhmean [cm]	dbhstd [cm]	conif_percent [%]
1	100	100	100	0	0	0	0	0
2	100	100	100	0	0	0	0	0
3	0.01	0.01	0.01	1	500	30	15	20
4	0.01	0.01	0.01	1	35	40	15	20
5	0.01	0.01	0.01	1	10	40	15	20
6	0.01	0.01	0.01	1	35	40	15	20
7	0.01	0.01	0.01	1	10	40	15	20
8	0.01	0.01	0.01	1	35	40	15	20
9	0.01	0.01	0.05	3	10	40	20	20
10	0.01	0.01	0.05	3	10	40	20	20
11	0.01	0.01	0.05	3	10	40	20	20
12	0.1	0.35	0.15	4	1111	50	20	40
13	0.1	0.15	0.15	5	83	40	15	60
14	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0
15	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0
16	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0

Tabella 15 – Valori di prima approssimazione dei parametri di input relativi alle aree sorgenti

d1 [m]	d2 [m]	d3 [m]	densità [kg/m ³]	forma
3	1.1	2.4	2600	1

Alcune considerazioni: per quanto riguarda la densità della roccia la scelta è stata ragionata sulla base della carta litologica e su quanto rilevato in campo. Secondo la prima fonte il territorio in analisi è eterogeneo e costituito da rocce di diversa tipologia; perciò, si è deciso di prendere un valore intermedio fra le litologie riscontrate, ma più orientato verso gli gneiss essendo quelli osservati maggiormente tra i blocchi caduti in prossimità della S.P. 299 e sulla nicchia di distacco. In definitiva, si è scelta una densità di 2600 kg/m³.

In relazione alla forma da assegnare ai blocchi rocciosi, dai sopralluoghi effettuati subito dopo l'evento del novembre 2021 e dal rilevamento di campagna avvenuto il 14 luglio 2022 sono state osservate delle forme per lo più parallelepipedo; perciò, è stato considerato valido assegnare alla forma il codice 1, che identifica per l'appunto un parallelepipedo.

Per quanto riguarda le strade asfaltate, ricadenti nella classe 7, nonostante nel manuale di Rockyfor3D venga suggerito un valore nullo per tutti e tre i parametri relativi alla scabrezza, si è scelto di assegnare un valore diverso anche se molto piccolo; questo per tenere in considerazione la non perfetta condizione dell'asfalto, che potrebbe non presentarsi liscio in tutta la lunghezza della strada.

8.2.1 Output con DTM10

Procedendo con la simulazione utilizzando il DTM10, si è ottenuto il risultato riportato nella Figura 133, in cui è rappresentata l'energia cinetica media derivante dalla media dei massimi delle energie cinetiche ottenute dai vari lanci in una stessa cella; tale energia varia in un range con valore massimo prossimo a 12578 kJ.

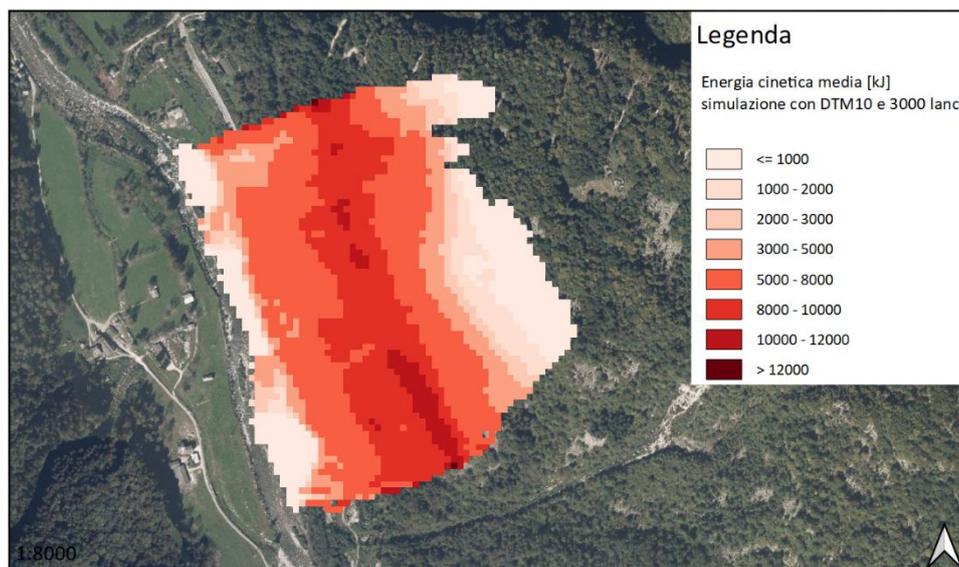


Figura 133 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10; scala 1:8000

8.2.2 Output con DTM5

Analogamente è stata condotta una simulazione con il DTM5, senza variare i parametri di input utilizzati per la simulazione effettuata con il DTM10.

Come output si è ottenuto quanto rappresentato nella Figura 134, in cui si può notare la distribuzione dell'energia cinetica media variabile fino ad un valore massimo di circa 11149 kJ, ovvero leggermente inferiore rispetto a quanto ottenuto nelle stesse condizioni con il DTM10; si tratta, tuttavia, di una differenza lieve di circa 1500 kJ, e quindi trascurabile.

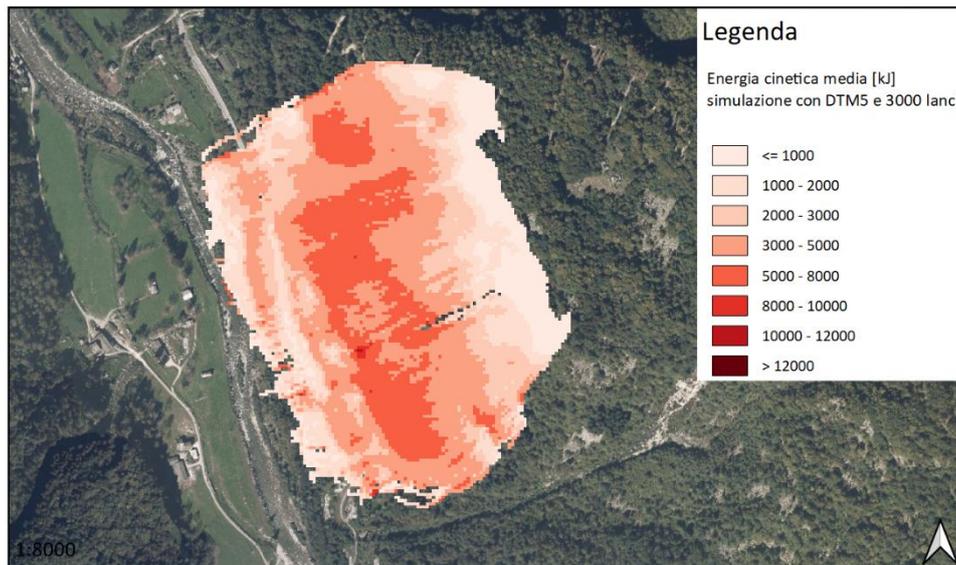


Figura 134 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM5; scala 1:8000

8.2.3 Conclusioni sul confronto

Dal confronto si evince come la scelta del DTM sia fondamentale in quanto influenza significativamente i risultati dell'analisi traiettografica, il che comporta la necessità di calibrare i parametri di input con lo stesso DTM con cui verranno eseguite le simulazioni future. Osservando i valori di energia cinetica media non si può dire che sussistano variazioni significative tra i due DTM, ma se si va a considerare la sua distribuzione sul territorio il discorso cambia; difatti, mentre nella prima casistica le variazioni di energia cinetica media presentano dei passaggi netti tra una classe energetica all'altra, nel secondo caso si osservano delle transizioni graduali, in particolar modo nel corpo centrale dell'area coinvolta. Perciò, nonostante l'andamento generale dell'energia cinetica media rimanga invariato, ovvero con energie molto basse in corrispondenza ed in prossimità della nicchia di distacco e della zona di arresto dei blocchi sul fondovalle e con energie più alte nella zona di scorrimento come ci si attenderebbe, scendendo nei particolari se ne osserva una migliore definizione e rappresentazione. Anche se si tratta di simulazioni probabilistiche, il che comporta una inevitabile lieve variazione tra i vari scenari con gli stessi parametri di input, una singola cella del DTM10 che possiede una determinata energia cinetica media potrebbe presentare energie diverse ed appartenenti a classi energetiche differenti se la valutazione avviene con il DTM5.

Per concludere tale confronto, si può affermare come il DTM5 risulti più preciso sia per la risoluzione migliore sia perché ottenuto in tempi più recenti rispetto al DTM10, e con misure più affidabili. Dunque, a patto di eseguire una corretta calibrazione dei parametri di input alle simulazioni, il DTM5 produce risultati più attendibili ed è più consigliato a scopo di analisi traiettografica per la caduta massi.

8.3 Densità di alberi per ettaro

Un ulteriore studio condotto preliminarmente è associato alla densità di alberi per ettaro di superficie, ovvero al parametro *nrtrees* da fornire in input a Rockyfor3D. Difatti, nella scelta dei valori da assegnare a tale parametro ci si è domandati se esista un limite oltre al quale i risultati non sono più da esso influenzati. Questa domanda è sorta dal fatto che il codice di calcolo lavora con delle celle, ovvero i pixel, e perciò la presenza di un albero o più alberi all'interno della stessa cella non dovrebbe comportare delle differenze; se questa affermazione fosse corretta, allora sussisterebbe un limite di 100 alberi a ettaro nel caso del DTM10, ovvero un albero per ciascuna cella avente una superficie di 100 m², ed un limite di 400 alberi a ettaro nel caso del DTM5, ovvero un albero per ogni cella avente una superficie di 25 m². Dunque, si è scelto di verificare questa condizione attraverso delle simulazioni per il caso studio. I parametri in ingresso sono rimasti invariati rispetto a quelli utilizzati per effettuare il confronto tra il DTM10 e il DTM5, modificando soltanto la densità di alberi per ettaro. Anche in questo caso come nicchia di distacco è stata considerata quella ubicata a San Lorenzo.

8.3.1 Output con DTM10

Inizialmente, è stata condotta l'analisi utilizzando il DTM10. Fornendo in input a Rockyfor3D le mappe con *nrtrees* scelto in base ad una stima sulle distanze tra alberi e filari, e quindi senza ipotizzare alcun limite (Tabella 16), si è ottenuto il risultato rappresentato nella Figura 135; in particolare, è raffigurata l'energia cinetica media.

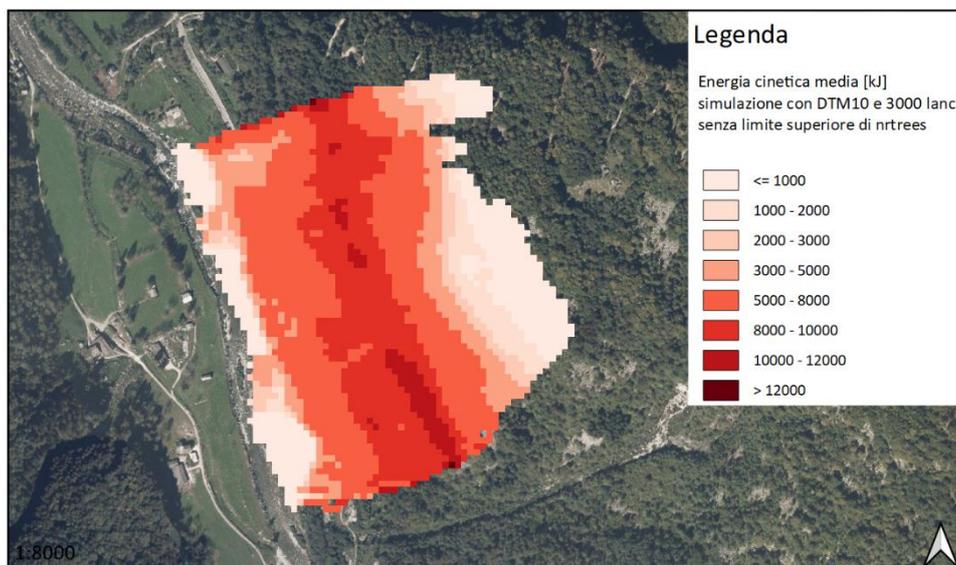


Figura 135 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro *nrtrees*; scala 1:8000

Tabella 16 – Valori del parametro *nrtrees* sia con limite che senza limite superiore (DTM10)

id poligoni	<i>nrtrees</i> [n° alberi/ha]	<i>nrtrees</i> (limite) [n° alberi/ha]	id poligoni	<i>nrtrees</i> [n° alberi/ha]	<i>nrtrees</i> (limite) [n° alberi/ha]
1	0	0	9	10	10
2	0	0	10	10	10
3	500	100	11	10	10
4	35	35	12	1111	100
5	10	10	13	83	83
6	35	35	14	0	0
7	10	10	15	0	0
8	35	35	16	0	0

La seconda simulazione effettuata ha previsto la modifica del parametro *nrtrees* (Tabella 16). Considerando un limite superiore di 100 alberi/ha, si è ottenuto il risultato riportato nella Figura 136.

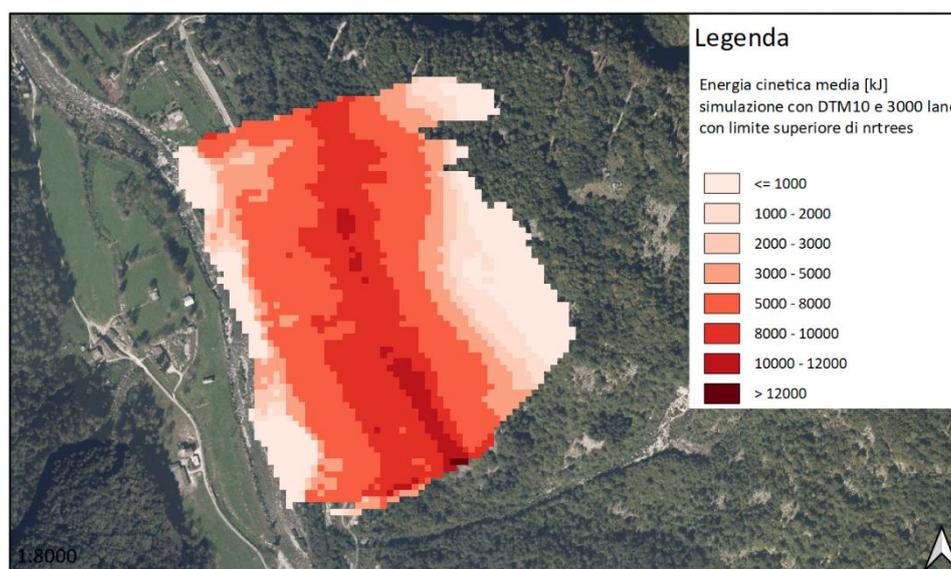


Figura 136 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 3000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro *nrtrees*; scala 1:8000

Confrontando i risultati delle varie simulazioni si osserva come le differenze siano minime, dovute per lo più alla variabilità della simulazione probabilistica. Difatti, ad ogni lancio la traiettoria risulta differente a seconda della variabilità statistica dei dati di input; in altre parole, ad ogni lancio il software varia casualmente i parametri forniti in ingresso, e perciò due simulazioni identiche in termini di dati di input restituiranno dei risultati identici unicamente se il numero di lanci effettuato è sufficiente a coprire l'intera variabilità statistica dei dati di input stessi. In base a questa affermazione, aumentando il numero di lanci i risultati tenderanno ad assomigliarsi sempre di più minimizzando le differenze; perciò, è stata condotta un'ulteriore simulazione aumentando questo parametro a 4000 (Figura 137, Figura 138).

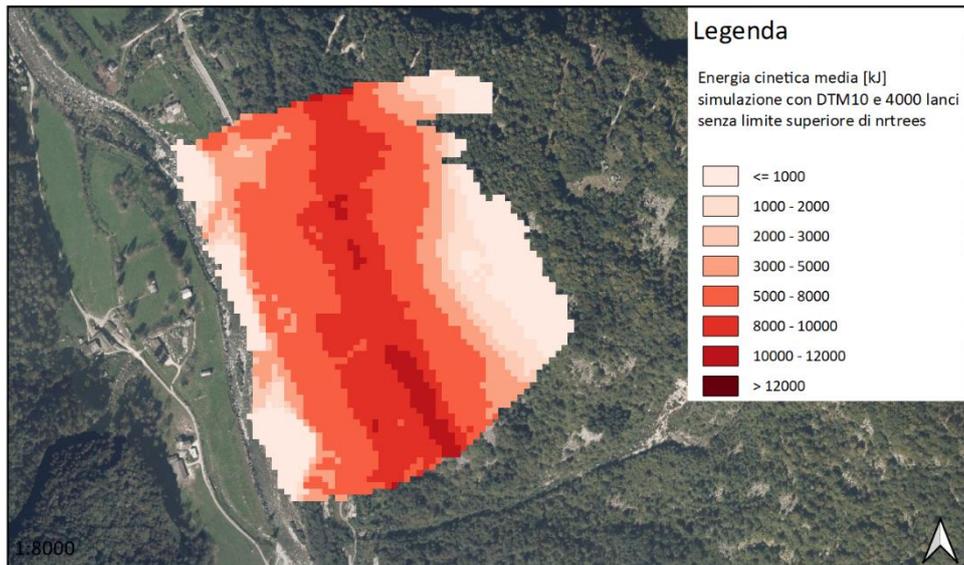


Figura 137 – Rappresentazione della distribuzione dell’energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 4000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000

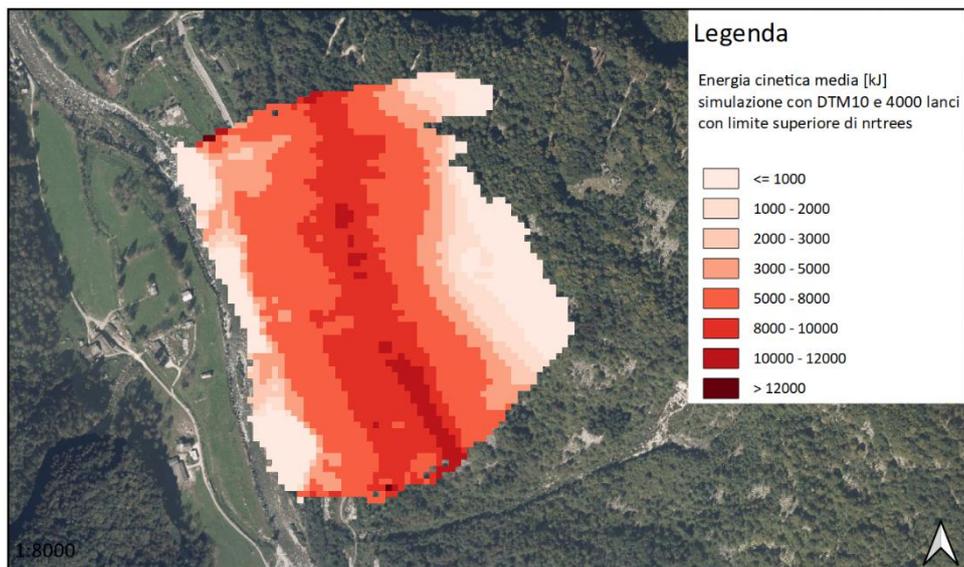


Figura 138 – Rappresentazione della distribuzione dell’energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 4000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000

Nonostante i risultati siano più simili tra loro, come atteso, si è deciso di procedere con ulteriori simulazioni portando il numero di lanci a 6000. Si sono ottenuti gli scenari rappresentati nelle figure seguenti (Figura 139, Figura 140), i quali mostrano una maggiore somiglianza.

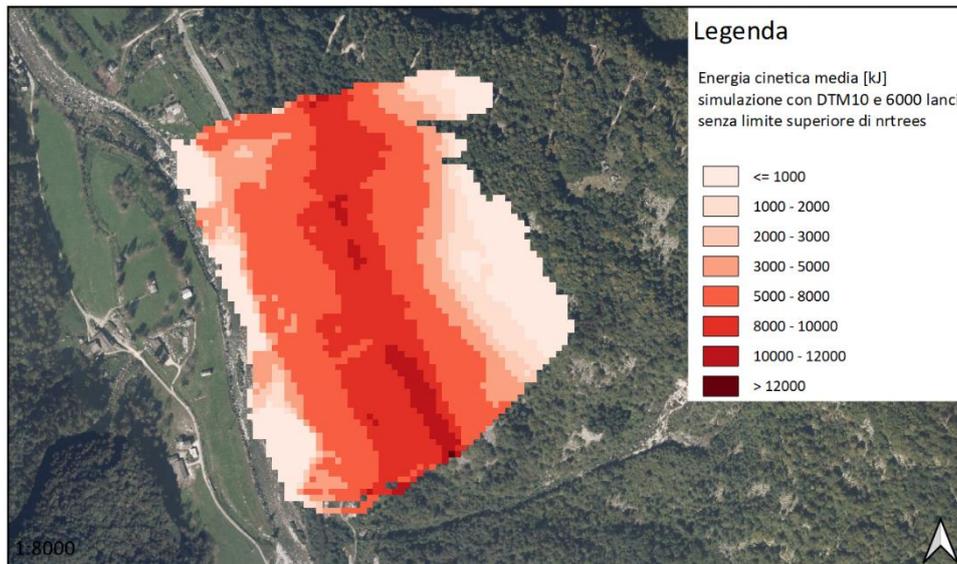


Figura 139 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 senza imporre un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000

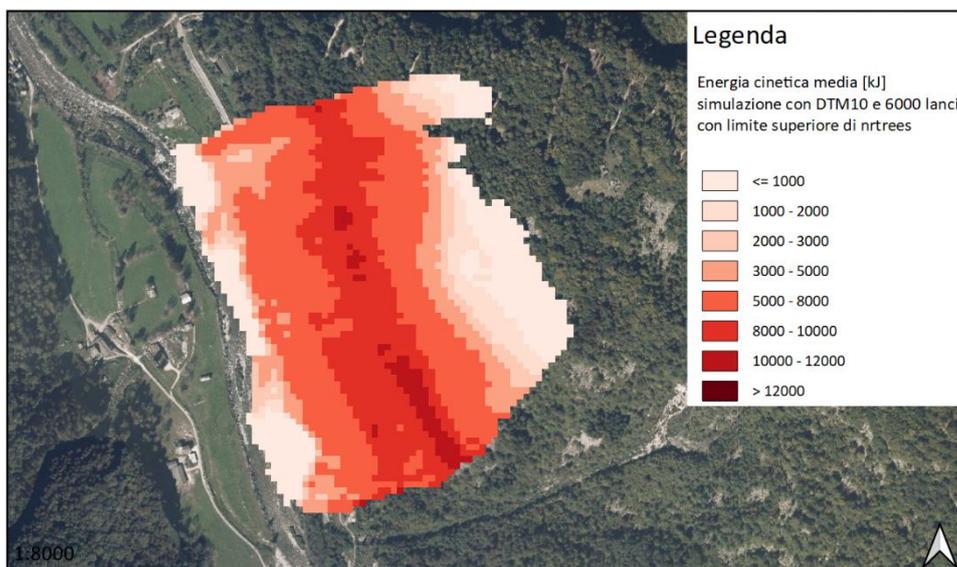


Figura 140 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM10 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000

8.3.2 Output con DTM5

In un secondo momento è stato condotto lo stesso esperimento utilizzando il DTM5 mantenendo inalterati i parametri forniti in input al programma per il caso del DTM10, ad eccezione di *nrtrees* quando è stato assunto un limite superiore (Tabella 17). Nel seguito sono riportati i risultati per 6000 lanci (Figura 141, Figura 142).

Tabella 17 – Valori del parametro *nrtrees* sia con limite che senza limite superiore (DTM5)

id poligoni	<i>nrtrees</i> [n° alberi/ha]	<i>nrtrees</i> (limite) [n° alberi/ha]	id poligoni	<i>nrtrees</i> [n° alberi/ha]	<i>nrtrees</i> (limite) [n° alberi/ha]
1	0	0	9	10	10
2	0	0	10	10	10
3	500	400	11	10	10
4	35	35	12	1111	400
5	10	10	13	83	83
6	35	35	14	0	0
7	10	10	15	0	0
8	35	35	16	0	0

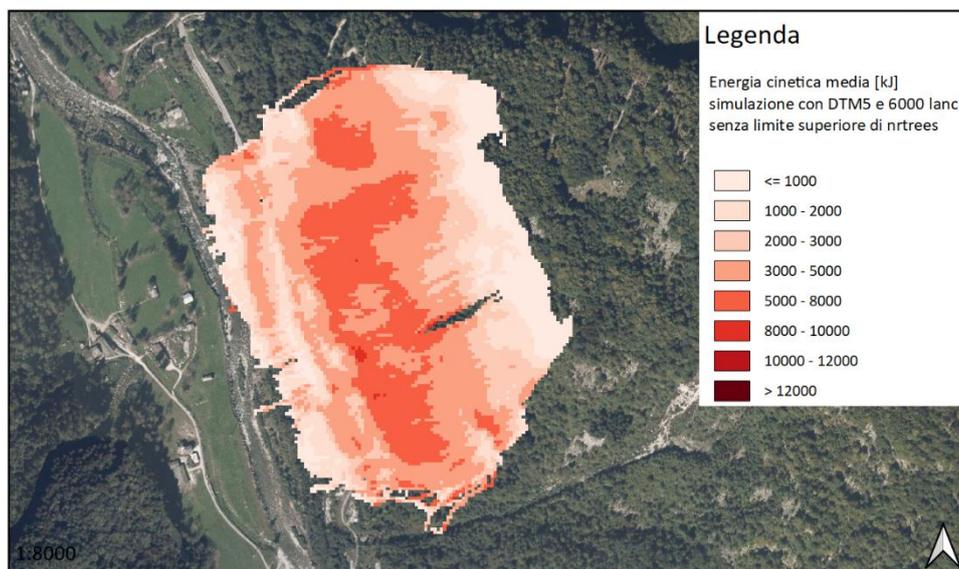


Figura 141 – Rappresentazione della distribuzione dell'energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM5 senza imporre un limite superiore al parametro *nrtrees*; scala 1:8000

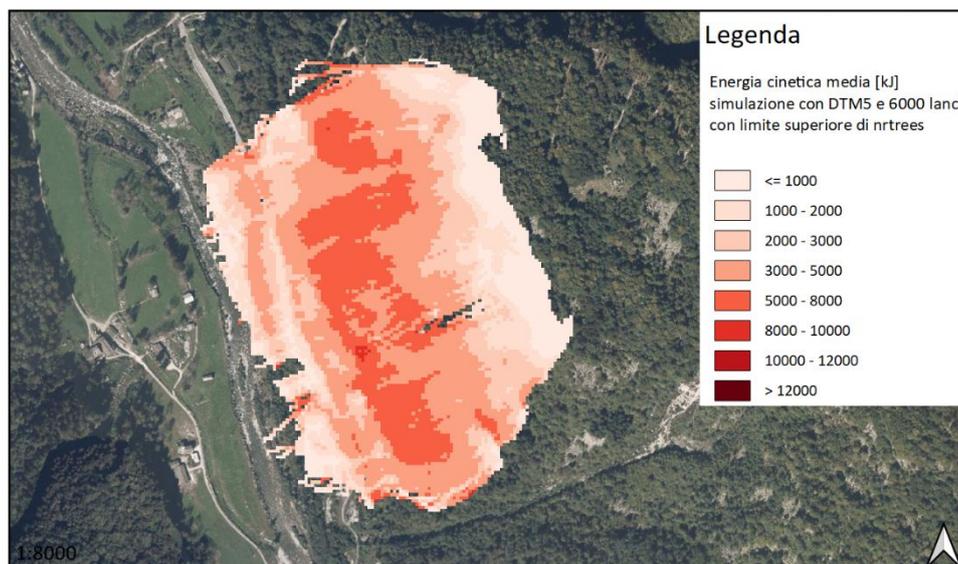


Figura 142 – Rappresentazione della distribuzione dell’energia cinetica media ottenuta dalla simulazione con 6000 lanci e volume di 8 m³ utilizzando il DTM5 imponendo un limite superiore al parametro nrtrees; scala 1:8000

L’unica differenza sostanziale che si riscontra rispetto al caso precedente è quella dovuta al cambio di DTM, che mostra come quello avente passo di 5 metri fornisca uno scenario più dettagliato.

8.3.3 Conclusioni sulla densità di alberi

Le variazioni che continuano ad esserci tra i vari scenari in realtà sono minime e, perciò, trascurabili in quanto si tratta di energie molto prossime tra loro che però ricadono in classi differenti. Una giustificazione della presenza di un limite superiore della densità di alberi per ettaro è data dall’analisi delle energie cinetiche medie, o meglio dei massimi delle energie cinetiche medie simulate; difatti, dalla Tabella 18 si nota come aumentando il numero di lanci per cella sorgente la differenza tra i massimi delle energie cinetiche medie diminuisca, indicando come essi siano sempre più simili tra loro. Questa particolarità è osservabile in maggior misura utilizzando il DTM5, dimostrando ancora una volta le sue maggiori precisione ed affidabilità nel fornire i risultati di analisi traiettografiche.

Tabella 18 – Valori massimi dell’energia cinetica media e differenze in valore assoluto per DTM10 e DTM5

DTM10			
Numero di lanci	Limite	Senza limite	Differenza (valore assoluto)
3000	14460.20 kJ	12577.00 kJ	1883.20 kJ
4000	12925.50 kJ	11885.00 kJ	1040.50 kJ
6000	11907.20 kJ	12156.50 kJ	249.30 kJ
DTM5			
Numero di lanci	Limite	Senza limite	Differenza (valore assoluto)
3000	10226.20 kJ	11148.70 kJ	922.50 kJ
4000	11640.40 kJ	12503.50 kJ	863.10 kJ
6000	9951.60 kJ	9766.10 kJ	185.50 kJ

Dunque, a conclusione di questa analisi, si può affermare come sia plausibile assumere un limite superiore nella densità di alberi oltre il quale le differenze nei risultati sono trascurabili. Come già supposto, questo limite risulta essere di un albero per cella del DTM, ovvero 100 alberi/ettaro per il DTM10 e 400 alberi/ettaro per il DTM5. Si precisa che queste osservazioni sono limitate al software utilizzato per l'analisi traiettografica (Rockyfor3D) e alle risoluzioni del DTM adatte al suo utilizzo (1-10 metri).

8.4 Calibrazione dei parametri di input

I parametri definiti sono stati sottoposti ad una verifica, ovvero sono stati calibrati mediante una Back Analysis considerando l'evento franoso avvenuto nel novembre 2021. A tale scopo, in base a quanto dimostrato precedentemente, l'analisi è proseguita utilizzando il DTM5 e prendendo in considerazione solo la nicchia di distacco corrispondente a San Lorenzo, associata all'evento sopra menzionato.

Sono state eseguite più simulazioni variando principalmente i parametri relativi alla scabrezza del suolo (*rg70*, *rg20*, *rg10*) e alla dimensione degli alberi (*dbhmean*, *dbhstd*); i primi sono stati modificati sulla base degli intervalli indicati dal manuale di Rockyfor3D. Tuttavia, questi parametri sono stati variati per i tipi di suolo 1, 3, 4 e 7 per la maggiore disponibilità di misure e osservazioni post-evento con cui effettuare dei confronti:

- La distanza raggiunta dai blocchi e dove essi si sono fermati per verificare che le traiettorie ottenute fossero il più realistiche possibili;
- Eventuali segni di impatto contro gli alberi in modo tale da verificarne la corrispondenza con le altezze di passaggio calcolate dal software;
- Le indicazioni fornite dallo Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC).

Principalmente sono stati variati i parametri associati al tipo di suolo 4 trattandosi di quello più esteso e interessato dalle traiettorie provenienti dalla nicchia di distacco corrispondente a San Lorenzo. Si è deciso di agire proprio su di essi perché dalla scabrezza è possibile variare sia le energie cinetiche sia i rimbalzi a causa della maggiore o minore dissipazione determinata dalla differenza di dimensioni tra i blocchi ed il materiale costituente il versante; relativamente alla vegetazione, variando il diametro del tronco degli alberi e la deviazione standard se ne determina un'estensione, o riduzione, che permette di aumentare, o diminuire, la probabilità che i blocchi impattino gli alberi e che vengano fermati da essi. Inoltre, nonostante precedentemente sia stato dimostrato come il parametro relativo alla densità di alberi per ettaro, ovvero *nrtrees*, abbia un limite superiore variabile in funzione del DTM utilizzato, per la calibrazione, così come anche per l'analisi previsionale, si è deciso di non fare semplificazioni, ma di fornire in input i valori che secondo alcuni ragionamenti sono risultati più appropriati e prossimi alle condizioni reali. Nella Tabella 19 sono riportati i valori associati ai parametri propri delle aree sorgenti considerando un volume dei blocchi sia di 1 m³ che di 8 m³, mentre nella Tabella 20 sono riportati sinteticamente i risultati delle 16 simulazioni effettuate al fine di calibrare al meglio i parametri di input necessari per l'analisi previsionale vera e propria. In particolare, è stato assegnato un colore a ciascuna simulazione per evidenziarne la realistica; alle simulazioni i cui risultati si sono rivelati coerenti con quanto osservato in campo è stato associato il colore verde, a quelle che hanno fornito risultati molto prossimi alla realtà è stato assegnato il colore giallo, le simulazioni con risultati realistici ma non soddisfacenti sono state evidenziate in arancione, mentre il colore rosso identifica le simulazioni che hanno fornito risultati non realistici, e quindi da escludere. La colorazione è avvenuta dando la priorità ai dati di output relativi al volume di 8 m³ dal momento che si tratta della volumetria di riferimento con cui sono state condotte le analisi speditive immediatamente post-evento; inoltre, la presenza di blocchi dal volume unitario osservati sul fondovalle è dovuta principalmente alla frantumazione di blocchi più grandi a causa di successivi impatti, e perciò non è stata considerata come una prova utile alla calibrazione dei parametri, bensì come controllo preliminare. La tabella è strutturata in modo

tale da evidenziare principalmente le modifiche subite dalla scabrezza associata al tipo di suolo 4, con relativa variazione rispetto alla simulazione precedente in parentesi, a cui segue una colonna con eventuali altri parametri che hanno subito cambiamenti ed un'ultima colonna con delle osservazioni relative ai dati di output. Infine, mentre nel confronto tra il DTM10 e il DTM5 e nella dimostrazione dell'esistenza di un limite superiore della densità di alberi per ettaro sono state utilizzate le energie cinetiche medie per effettuare un'analisi in termini generali, per determinare la realistica dei risultati delle simulazioni di calibrazione sono state utilizzate le energie cinetiche e le altezze di passaggio al novantacinquesimo percentile (rispettivamente E95 e Ph95), in quanto valori consigliati dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 ed utilizzati nel dimensionamento delle opere di protezione.

Tabella 19 – Valori dei parametri di input relativi alle aree sorgenti

volume [m ³]	d1 [m]	d2 [m]	d3 [m]	densità [kg/m ³]	forma
1	1	1	1	2600	1
8	3	1.1	2.4	2600	1

Tabella 20 – Risultati delle simulazioni effettuate per la calibrazione dei parametri di input

Scenari	Tipo di suolo: 4			Altre variazioni	Osservazioni
	rg70 [m]	rg20 [m]	rg10 [m]		
1	0.1	0.35	0.15		<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 e Ph95 risultano un po' troppo alte in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299
2	0.25 (+ 0.15)	0.5 (+ 0.15)	0.9 (+ 0.75)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono realistici, non ci sono distacchi <u>8 m³</u> : i risultati non sono realistici, i blocchi non raggiungono il fondovalle
3	0.1 (- 0.15)	0.3 (- 0.2)	0.7 (- 0.2)		<u>1 m³</u> : i risultati sembrano realistici <u>8 m³</u> : E95 e Ph95 risultano un po' alte in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299
4	0.15 (+ 0.05)	0.4 (+ 0.1)	0.25 (- 0.45)		<u>1 m³</u> : i risultati sembrano coerenti con la realtà <u>8 m³</u> : i risultati sono molto prossimi alla realtà, in particolare per quanto riguarda le traiettorie, ma E95 e Ph95 risultano un po' alte

5	0.1 (- 0.05)	0.3 (- 0.1)	0.2 (- 0.05)	È stato diminuito il parametro <i>dbhstd</i> per i tipi di suolo 1, 3 e 4	<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 e Ph95 risultano un po' alte in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299
6	0.1 (-)	0.3 (-)	0.2 (-)	- È stato variato il parametro <i>dbhmean</i> per i tipi di suolo 1 e 4 - È stato diminuito il parametro <i>dbhstd</i> per il tipo di suolo 3 - È stato aumentato <i>rg10</i> per il tipo di suolo 7	<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 e Ph95 risultano eccessive in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299
7	0.05 (- 0.05)	0.1 (- 0.2)	0.2 (-)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono realistici a causa della lunga distanza raggiunta dai blocchi <u>8 m³</u> : i risultati non sono realistici in termini sia di traiettorie e distanze raggiunte sia di valori assunti da E95 e Ph95
8	0.05 (-)	0.1 (-)	0.6 (+ 0.4)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono realistici a causa della lunga distanza raggiunta dai blocchi <u>8 m³</u> : i risultati non sono realistici in termini sia di traiettorie e distanze raggiunte sia di valori assunti da E95 e Ph95
9	0.05 (-)	0.5 (+ 0.4)	1 (+ 0.4)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 e Ph95 risultano un po' alte in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299
10	0.05 (-)	0.65 (+ 0.15)	1 (-)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 risulta un po' alta in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, mentre Ph95 assume alcuni valori anomali
11	0.05 (-)	0.6 (- 0.05)	1 (-)		<u>1 m³</u> : i risultati non sono soddisfacenti <u>8 m³</u> : E95 risulta troppo alta in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, mentre Ph95 assume alcuni valori anomali

12	0.08 (+ 0.03)	0.6 (-)	1 (-)		<p><u>1 m³</u>: i risultati sembrano coerenti con la realtà</p> <p><u>8 m³</u>: i risultati sono molto prossimi alla realtà, in particolare per quanto riguarda le traiettorie, ma E95 risulta un po' alta in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, mentre Ph95 assume alcuni valori anomali</p>
13	0.08 (-)	0.6 (-)	0.9 (- 0.1)		<p><u>1 m³</u>: i risultati sembrano coerenti con la realtà</p> <p><u>8 m³</u>: i risultati sono molto prossimi alla realtà, in particolare per quanto riguarda le traiettorie, ma E95 risulta un po' alta in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, mentre Ph95 assume alcuni valori anomali</p>
14	0.05 (- 0.03)	0.55 (- 0.05)	0.9 (-)		<p><u>1 m³</u>: i risultati non sono soddisfacenti</p> <p><u>8 m³</u>: E95 e Ph95 risultano un po' troppo alte in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, in particolare Ph95</p>
15	0.15 (+ 0.10)	0.4 (- 0.15)	0.25 (- 0.65)	<p>- È stato aumentato il parametro <i>dbhmean</i> per il tipo di suolo 4</p> <p>- È stato aumentato il parametro <i>dbhstd</i> per i tipi di suolo 1, 3 e 4</p> <p>- È stato diminuito <i>rg10</i> per il tipo di suolo 7</p>	<p><u>1 m³</u>: i risultati sembrano coerenti con la realtà</p> <p><u>8 m³</u>: i risultati sono molto prossimi alla realtà, in particolare per quanto riguarda le traiettorie, ma Ph95 risulta leggermente alta</p>
16	0.15 (-)	0.4 (-)	0.25 (-)	<p>- È stato diminuito il parametro <i>dbhmean</i> per il tipo di suolo 1</p> <p>- È stato diminuito il parametro <i>dbhstd</i> per i tipi di suolo 1 e 4</p>	<p><u>1 m³</u>: i risultati sembrano coerenti con la realtà</p> <p><u>8 m³</u>: i risultati sono soddisfacenti e i parametri appaiono ben calibrati</p>

Come ultima considerazione relativa alle simulazioni, i parametri sono stati inizialmente variati in modo casuale, ma comunque basandosi sulla tabella provvista dal manuale del codice di calcolo (Figura 124), per osservare come i risultati venissero da essi influenzati e per cercare di restringere gli intervalli di variazione dei parametri stessi; nel seguito, dopo aver verificato questi aspetti, sono stati considerati dei valori prossimi a quelli utilizzati nelle simulazioni che hanno fornito i risultati più realistici come base da cui proseguire con la calibrazione.

8.4.1 Scenario rosso

Come esempio di scenario rosso viene proposto quello ottenuto dalla simulazione 8; questo colore è stato assegnato per il fatto che con un volume di 1 m^3 le traiettorie dei blocchi si avvicinano molto alla S.P. 299, situazione non realistica e, pertanto, non accettabile. Analogamente, con volume di 8 m^3 le traiettorie raggiungono notevoli distanze tanto da oltrepassare il Fiume Sesia e fermarsi nel fondovalle opposto; inoltre, le energie cinetiche relative al novantacinquesimo percentile risultano eccessivamente elevate, con valori di 15000-20000 kJ in corrispondenza della S.P. 299 laddove è ubicato il rilevato preesistente. Analizzando l'altezza di passaggio al novantacinquesimo percentile si riscontrano dei valori anomali sia sulla S.P. 299, con altezze di 20 metri, sia al di sotto di essa e in prossimità del Fiume Sesia, con altezze superiori a 20 metri. In Figura 143, Figura 144 e Figura 145 emerge quanto affermato.

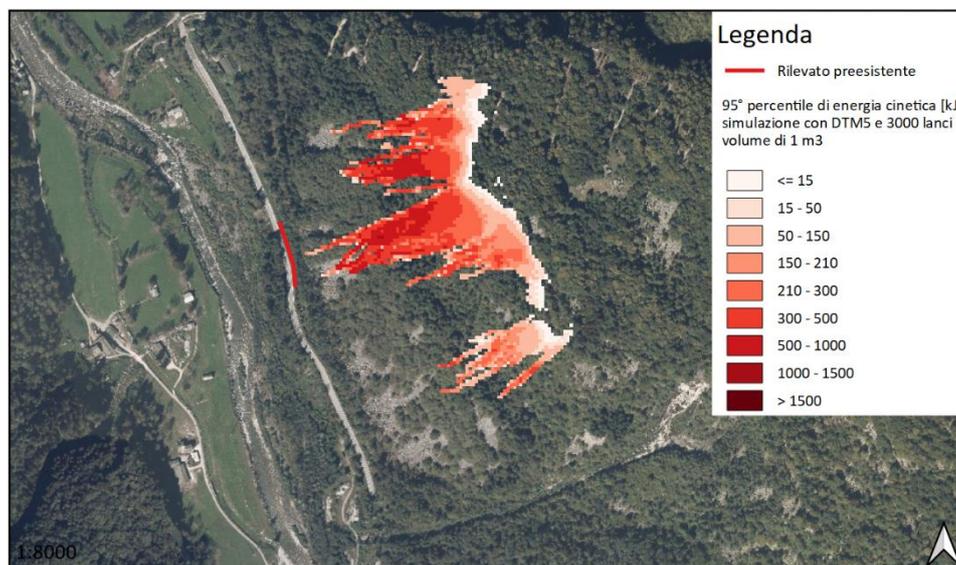


Figura 143 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 1 m^3 ; scala 1:8000

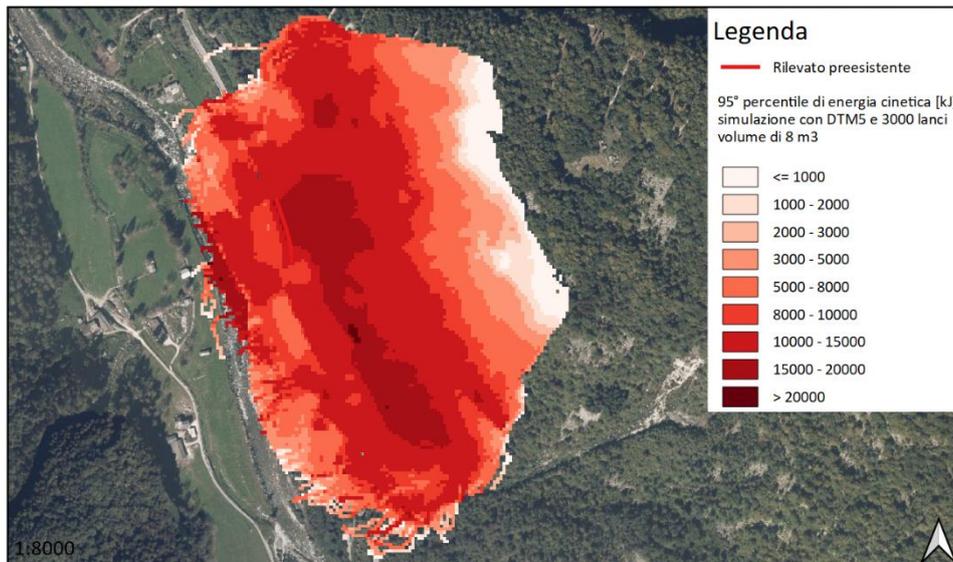


Figura 144 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

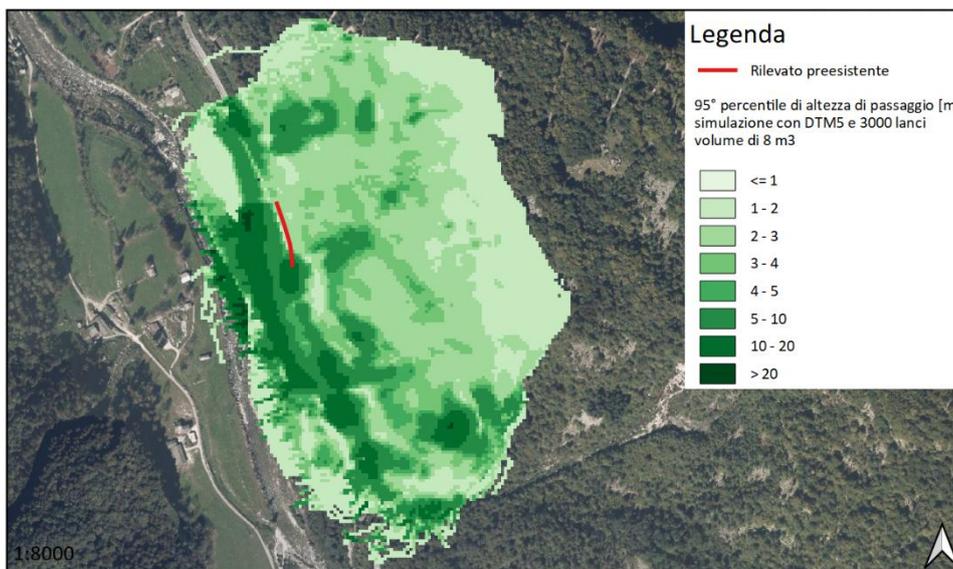


Figura 145 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 8 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

8.4.2 Scenario arancione

Lo scenario arancione preso come esempio è associato alla simulazione 5. Per quanto riguarda un volume unitario dei blocchi, lo scenario non risulta coerente con quanto osservato in situ, dal momento che i distacchi sembrano interessare anche delle zone dimostrate tranquille durante i vari sopralluoghi effettuati e il rilevamento di campagna del 14 luglio 2022 (Figura 146). Per un volume di 8 m³ le distanze raggiunte sembrano un po' troppo lunghe e le traiettorie non sono troppo realistiche in base a quanto osservato in situ

immediatamente post-evento. Inoltre, le energie cinetiche al novantacinquesimo percentile, le quali si attestano a dei valori decisamente più realistici rispetto alla casistica precedente, sono ancora un po' alte e dell'ordine di 8000-10000 kJ in prossimità e in corrispondenza della S.P. 299, in particolare laddove è situato il rilevato preesistente (Figura 147). Per quanto riguarda le altezze di passaggio relative al novantacinquesimo percentile, i valori si avvicinano di più alla realtà, anche se ci sono dei picchi anomali pari a 20 metri sulla S.P. 299 (Figura 148).

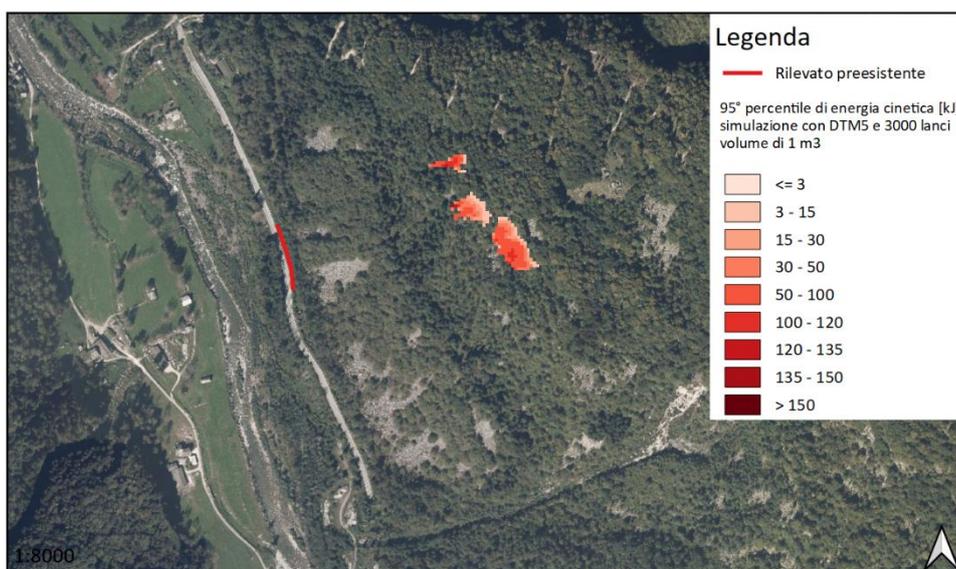


Figura 146 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 1 m³; scala 1:8000

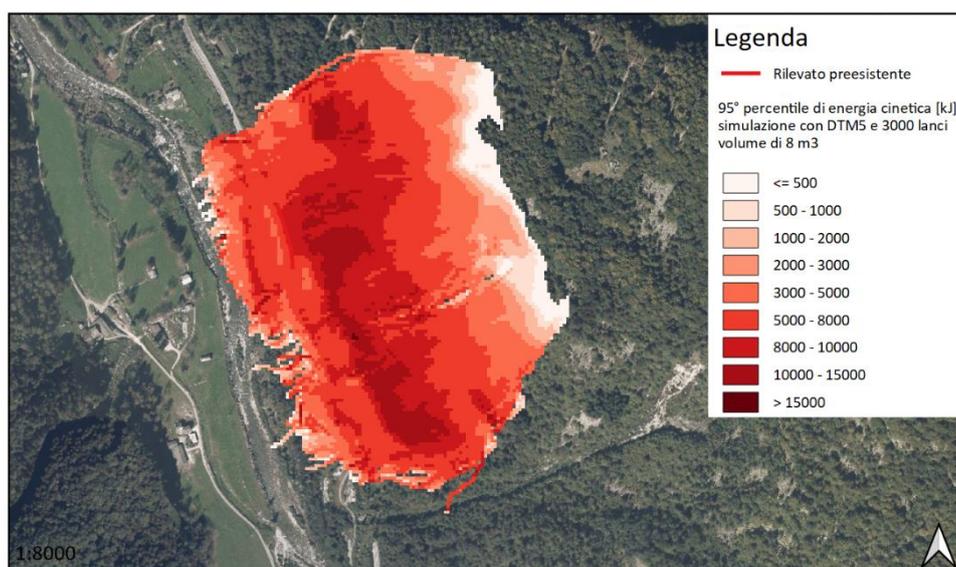


Figura 147 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

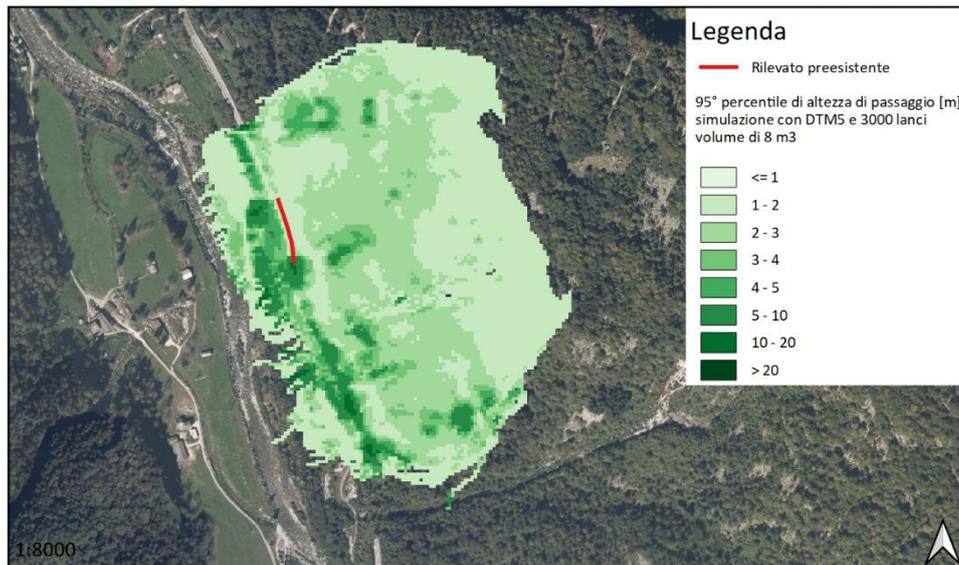


Figura 148 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 5 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

8.4.3 Scenario giallo

La simulazione presa come esempio per uno scenario giallo è la numero 13. Per un volume di 1 m³ i risultati sembrano realistici in base a quanto osservato durante i sopralluoghi; difatti, i distacchi sono segnalati proprio laddove è avvenuto l'evento datato novembre 2021 (Figura 149).

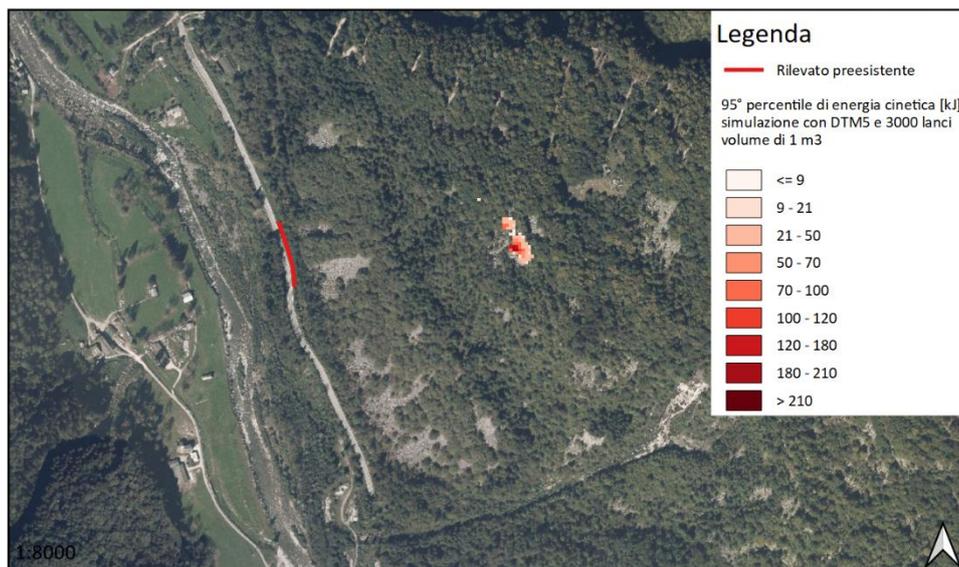


Figura 149 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 1 m³; scala 1:8000

Per un volume di 8 m^3 le distanze simulate sono ragionevoli e coerenti con quanto osservato in situ immediatamente post-evento; tuttavia, le energie cinetiche al novantacinquesimo percentile risultano un po' troppo elevate in corrispondenza della S.P. 299 verso l'estremità nord del rilevato preesistente, anche se più realistiche rispetto alle simulazioni analizzate in precedenza dal momento che non sono stati registrati valori superiori a 10000-15000 kJ (Figura 150). Infine, l'altezza di passaggio al novantacinquesimo percentile, nonostante possa essere assunta realistica lungo il versante, mostra un insieme di celle con valore di 20 metri in corrispondenza della S.P. 299, il che rende tale simulazione non soddisfacente da questo punto di vista (Figura 151).

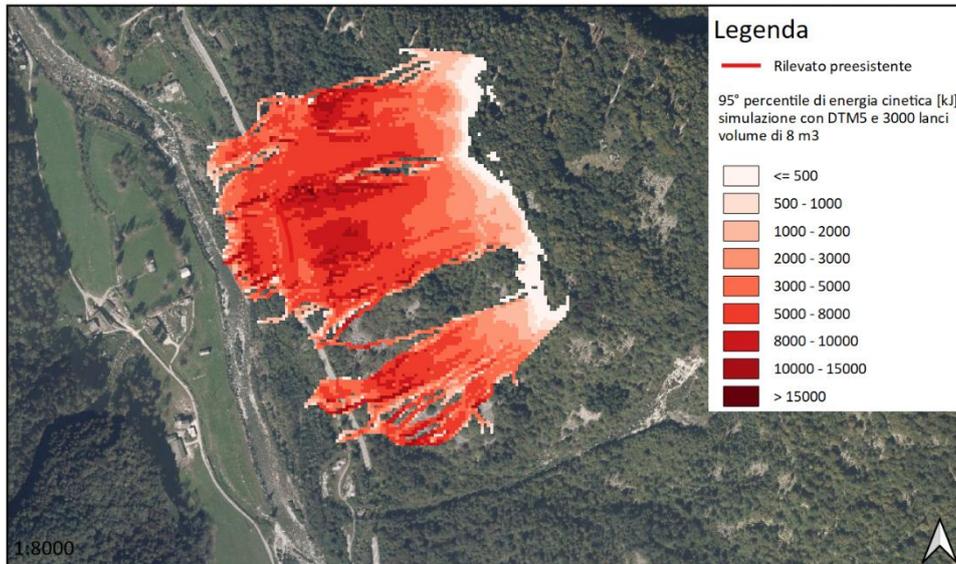


Figura 150 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 8 m^3 ; scala 1:8000

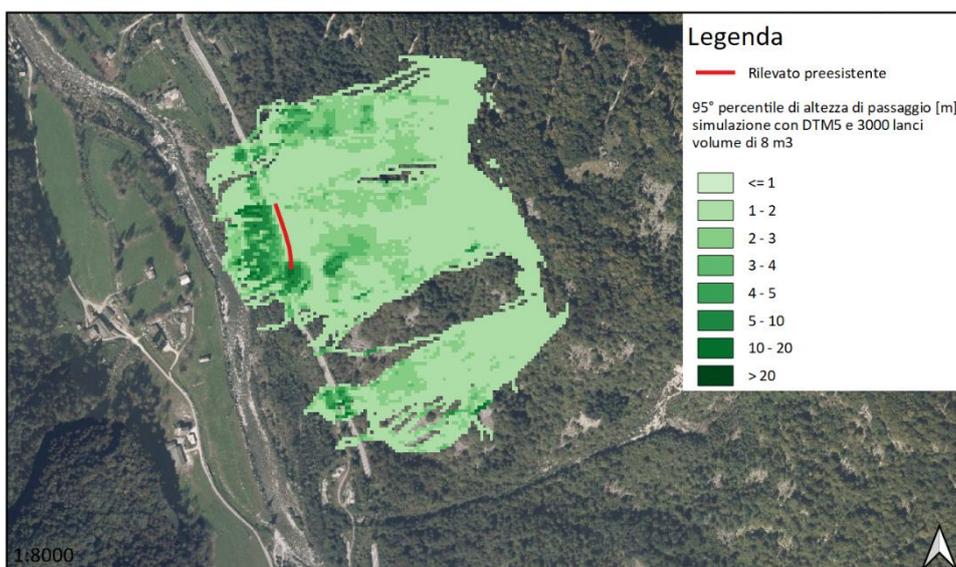


Figura 151 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 13 per un volume di 8 m^3 ; scala 1:8000

8.4.4 Scenario verde: parametri calibrati

Dopo aver svolto 14 simulazioni si è deciso di assumere dei valori molto simili a quelli utilizzati nelle simulazioni che hanno portato a risultati più realistici, svolgendo così la simulazione 15 laddove i valori relativi alla scabrezza sono rimasti invariati rispetto alla simulazione 4, così come anche *dbhmean*, mentre *dbhstd* è stato variato leggermente pur restando simile alla medesima simulazione. Nonostante il risultato sia apparso come il migliore tra tutti quelli ottenuti precedentemente, si è deciso di perfezionare ulteriormente i dati di input diminuendo il diametro medio del tronco degli alberi per il tipo di suolo 1 e diminuendo anche la relativa deviazione standard per i tipi di suolo 1 e 4, portandola a valori molto prossimi a quelli propri della simulazione 13. I risultati ottenuti con questi parametri, relativi alla simulazione 16, si sono rivelati coerenti con quanto osservato in situ; difatti, per un volume unitario anche se il distacco dei blocchi interessa una minima parte dell'intera area sorgente, si tratta comunque dell'areale in cui è situata la nicchia di distacco dell'evento franoso avvenuto nel novembre 2021. Ed inoltre, trattandosi di blocchi di piccole dimensioni è realistico che le energie cinetiche al novantacinquesimo percentile siano molto basse e dell'ordine di 30-40 kJ, e che le distanze raggiunte siano molto corte (Figura 152). Per quanto riguarda un volume di 8 m³, i dati di output appaiono realistici sia dal punto di vista delle energie cinetiche al novantacinquesimo percentile, i cui valori e distribuzioni sul territorio interessato dalle traiettorie si attestano a circa 5000-8000 kJ in corrispondenza del rilevato preesistente (Figura 153), sia dal punto di vista delle altezze di passaggio al novantacinquesimo percentile (Figura 154), in cui si registrano valori compresi tra 2 e 5 metri lungo il rilevato preesistente e anche dei valori pari a 10 metri come realmente osservato in campo grazie ai segni lasciati sugli alberi dagli impatti dei blocchi. Inoltre, anche le altezze di passaggio che assumono un valore di 20 metri sono considerate realistiche, in quanto presenti laddove ci sono dei dislivelli non trascurabili. Infine, le distanze raggiunte dai blocchi sono molto prossime a quanto osservato in situ e a quanto ottenuto nelle analisi speditive.

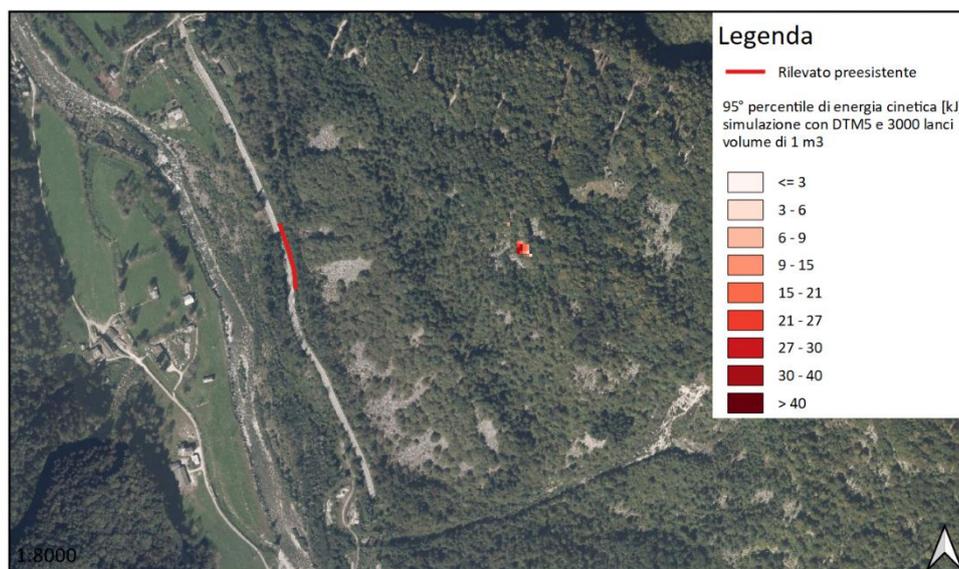


Figura 152 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 1 m³; scala 1:8000

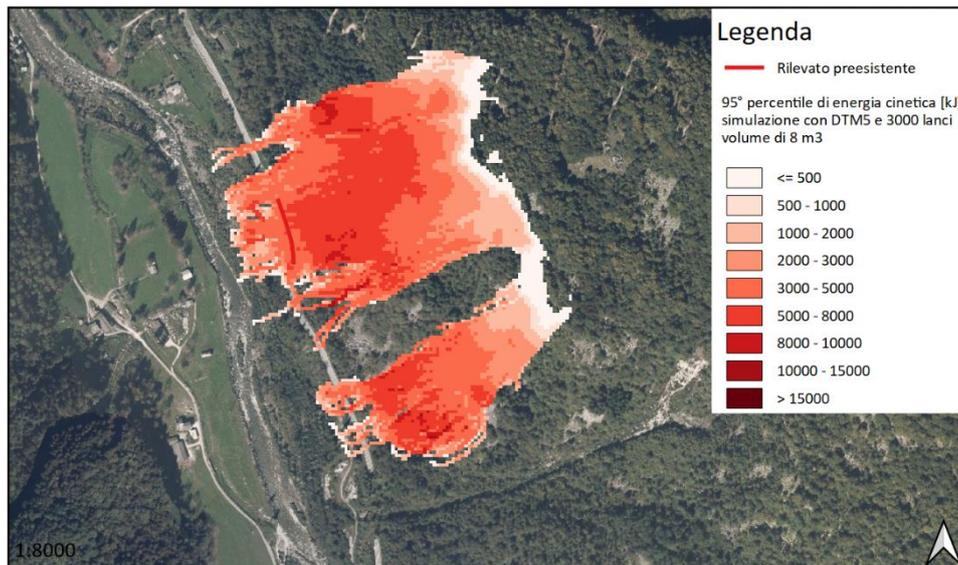


Figura 153 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

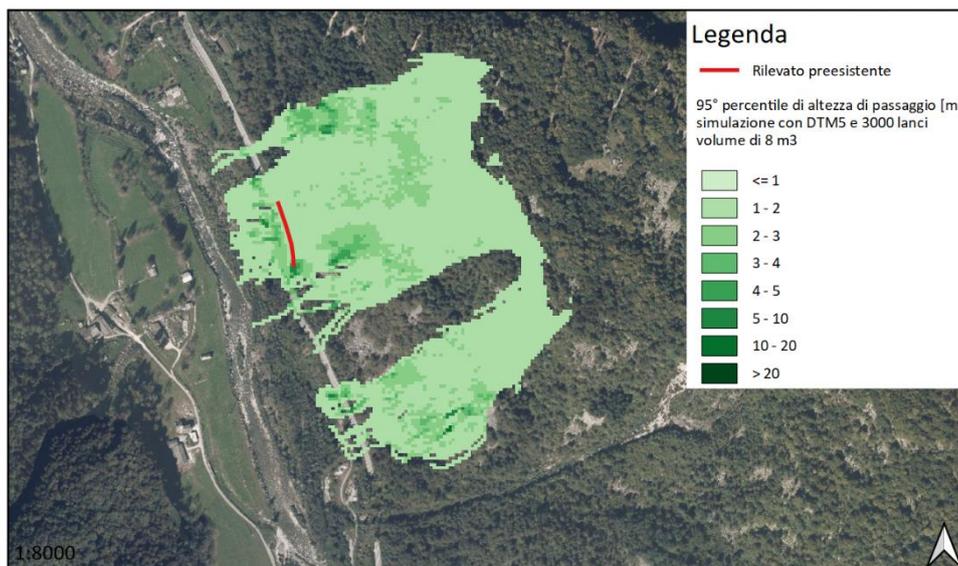


Figura 154 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m³; scala 1:8000

Una possibile anomalia che potrebbe emergere osservando le traiettorie è rappresentata dalla divergenza presente nella parte più a sud della nicchia di distacco; difatti, si nota come i blocchi che si distaccano dall'area sorgente ubicata a San Lorenzo scendano a destra e a sinistra lasciando un ampio spazio libero e non interessato dalla caduta massi. Questo comportamento è giustificabile tracciando dei profili in corrispondenza della divergenza stessa, come indicato nella Figura 155.

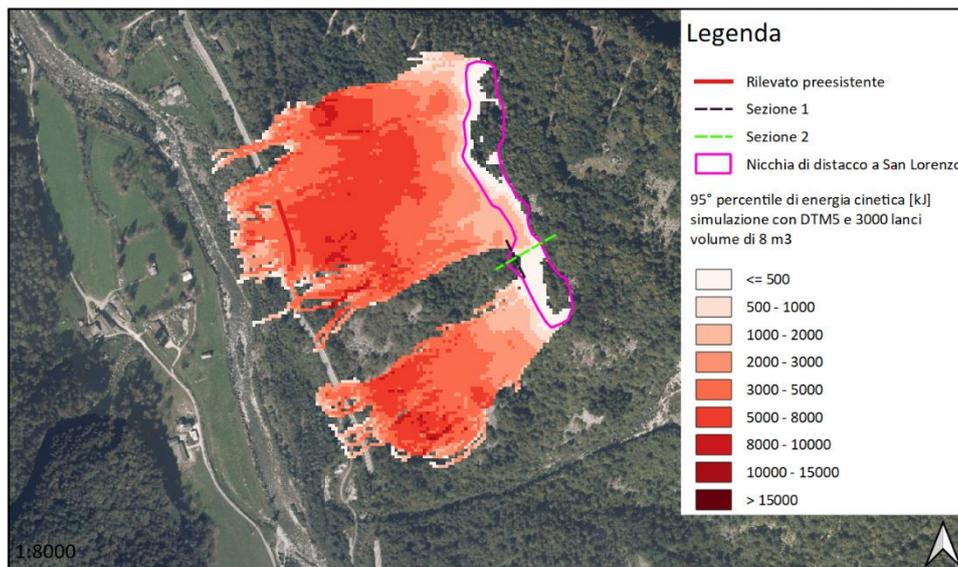


Figura 155 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dalla simulazione 16 per un volume di 8 m³, della nicchia di distacco a San Lorenzo, e delle due sezioni di cui sono stati tracciati i profili; scala 1:8000

Tracciando i profili delle due sezioni indicate nella Figura 155 sono state ottenute le figure seguenti, in cui si osserva proprio la presenza di una gobba, un rilievo che giustifica il risultato ottenuto dalla simulazione; in particolare, nella Figura 156 si nota un andamento del terreno molto prossimo ad una campana, mentre nella Figura 157 si osserva a circa 60 metri dall'estremo nord-est della sezione 2 un ripiano che in qualche modo opera quasi da vallo permettendo l'accumulo di blocchi, o da ostacolo ad una loro possibile movimentazione. Questa caratteristica del versante è stata osservata anche in campo durante un sopralluogo avvenuto a cura del Dott. Geol. Giovanni Cavagnino e della Dott.ssa Geol. Chiara Minella (Figura 158).

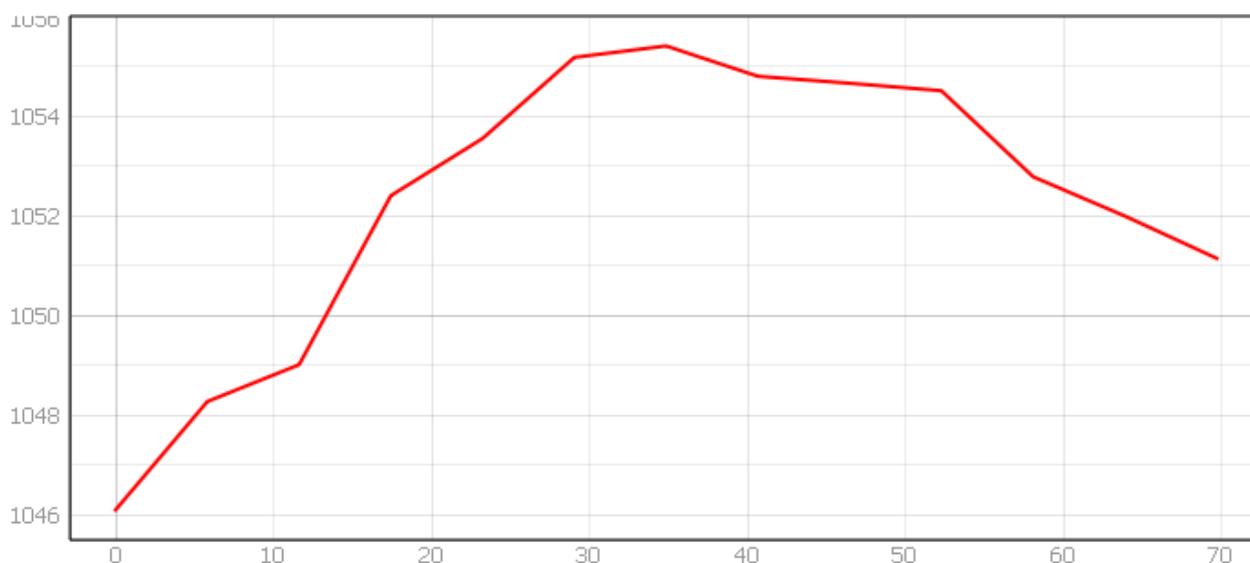


Figura 156 – Profilo bidimensionale della sezione 1 tracciato sulla base del DTMS; lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quota in m s.l.m. sulle ordinate (orientamento NW-SE)

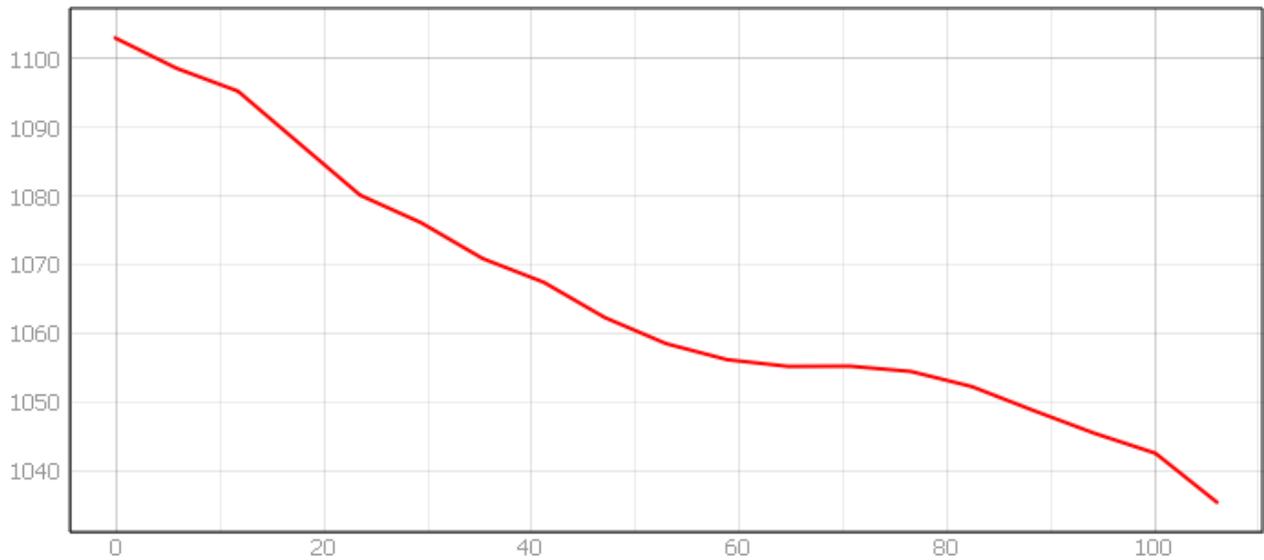


Figura 157 – Profilo bidimensionale della sezione 2 tracciato sulla base del DTM5; lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quota in m s.l.m. sulle ordinate (orientamento NE-SW)



Figura 158 – Rilievo (evidenziato con la linea rossa) che comporta la divergenza delle traiettorie simulate da Rockyfor3D a partire dalla nicchia di San Lorenzo e con un volume dei blocchi di 8 m³ [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

In conclusione, i parametri calibrati, e utilizzati nell'analisi previsionale vera e propria con tutte le aree sorgenti identificate, sono riportati nella Tabella 21 (riferimento alla Figura 128 e alla Figura 129).

Tabella 21 – Valori calibrati dei parametri di input relativi alle diverse tipologie di suolo e alle aree sorgenti

Tipi di suolo								
id poligoni	rg70 [m]	rg20 [m]	rg10 [m]	soiltype	nrtrees [n° alberi/ha]	dbhmean [cm]	dbhstd [cm]	conif_percent [%]
1	100	100	100	0	0	0	0	0
2	100	100	100	0	0	0	0	0
3	0.01	0.01	0.01	1	500	35	10	20
4	0.01	0.01	0.01	1	35	35	10	20
5	0.01	0.01	0.01	1	10	35	10	20
6	0.01	0.01	0.01	1	35	35	10	20
7	0.01	0.01	0.01	1	10	35	10	20
8	0.01	0.01	0.01	1	35	35	10	20
9	0.03	0.03	0.05	3	10	40	15	20
10	0.03	0.03	0.05	3	10	40	15	20
11	0.03	0.03	0.05	3	10	40	15	20
12	0.15	0.4	0.25	4	1111	50	15	40
13	0.1	0.15	0.15	5	83	40	15	60
14	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0
15	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0
16	0.005	0.005	0.005	7	0	0	0	0
Aree sorgenti								
volume [m ³]	d1 [m]	d2 [m]	d3 [m]	densità [kg/m ³]	forma			
8	3	1.1	2.4	2600	1			

8.5 Analisi previsionale

Una volta calibrati i parametri di input tramite la Back Analysis, riportati nella Tabella 21, è stato possibile proseguire lo studio con la simulazione finale per determinare i distacchi, le traiettorie, le energie cinetiche e le altezze di passaggio dei blocchi al fine di verificare le zone più esposte al rischio e di scegliere gli interventi più adeguati. Perciò, fornendo in input a Rockyfor3D le mappe relative alle tredici aree sorgenti identificate e al tipo di suolo con i parametri calibrati, e imponendo un numero di lanci pari a 3000, si sono ottenuti gli scenari riportati in Figura 159 e Figura 160, rappresentanti rispettivamente la distribuzione dell'energia cinetica al novantacinquesimo percentile e la distribuzione dell'altezza di passaggio al novantacinquesimo percentile. Nel primo caso si osserva come l'energia cinetica si attesti a massimo 5000 kJ lungo il paramento di monte del rilevato preesistente, a massimo 10000 kJ lungo il tratto non protetto della S.P. 299 a nord del rilevato preesistente, e a massimo 8000 kJ lungo il tratto non protetto della S.P. 299 a sud del rilevato

preesistente. Spostandosi verso la parte centrale del versante, invece, l'energia cinetica raggiunge dei valori superiori, ma comunque non oltre i 15000 kJ. Situazione diversa si riscontra sulla sommità del versante, laddove si osservano delle energie cinetiche decisamente maggiori, oltre i 20000 kJ, ma comunque coerenti con la topografia del versante stesso; difatti, nel tratto più a sud oltre il confine del Comune di Campertogno è presente una scarpata particolarmente acclive che rende realistico il risultato ottenuto.

Nel secondo caso, relativo alle altezze di passaggio al novantacinquesimo percentile, si osserva un'altezza massima di 3 metri lungo il rilevato preesistente, un massimo di 4 metri lungo il tratto non protetto della S.P. 299 a nord del rilevato preesistente, e un massimo di 10 metri lungo il tratto non protetto della S.P. 299 a sud del rilevato preesistente. Nella parte centrale del versante si osservano delle altezze superiori a 10 metri, ma comunque non oltre i 20 metri, coerentemente con la topografia del territorio. Infine, verso la sommità si osservano delle altezze superiori a 20 metri, soprattutto oltre il confine comunale meridionale; per tale situazione vale quanto già affermato per l'energia cinetica, ovvero il fatto che la scarpata aggettante rende realistico lo scenario ottenuto.

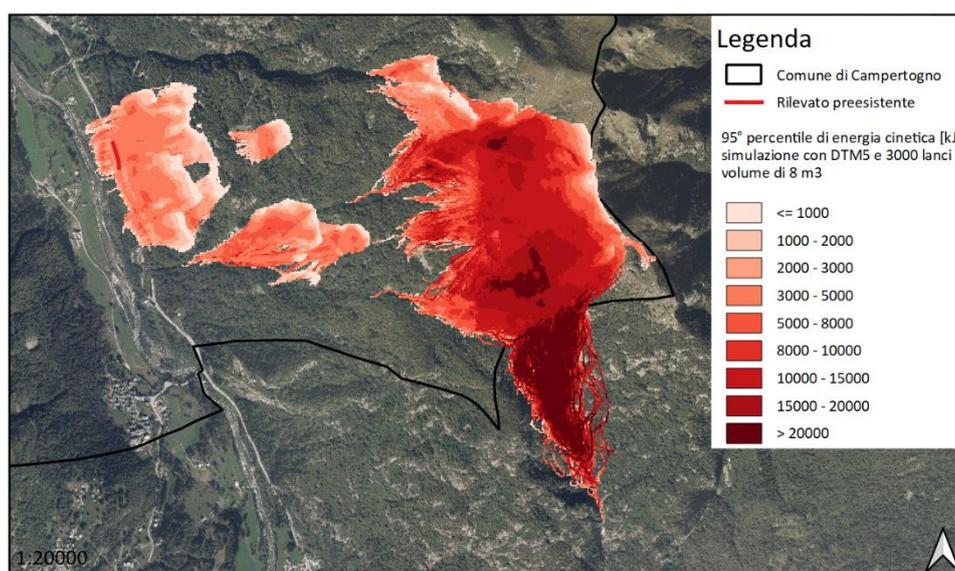


Figura 159 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta dall'analisi previsionale per un volume di 8 m³; scala 1:20000

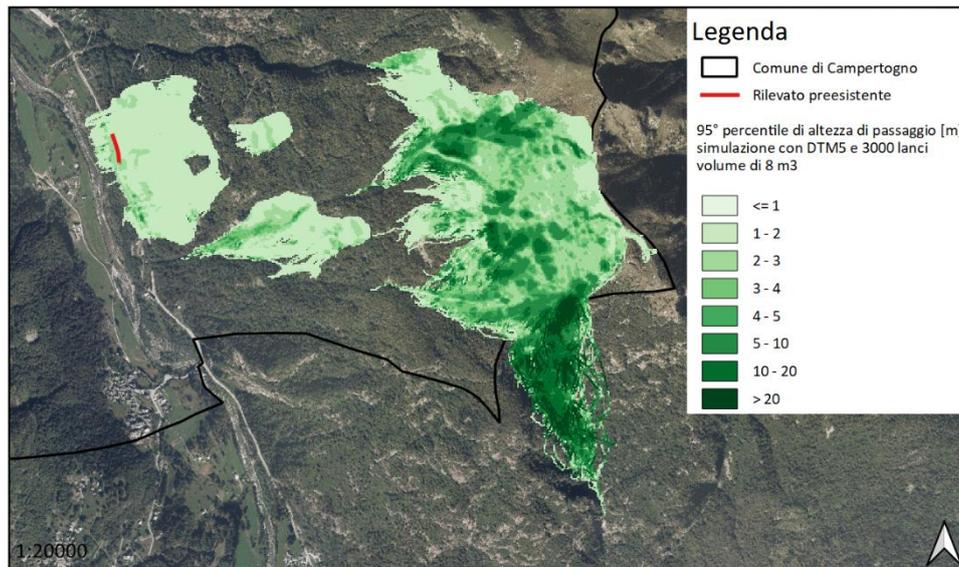


Figura 160 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta dall’analisi previsionale per un volume di 8 m³; scala 1:20000

Per quanto riguarda le traiettorie, dalle figure precedenti (Figura 159, Figura 160) emerge come unicamente i blocchi provenienti dalle nicchie 1 (San Lorenzo), 5, 6 e 7 interessino la S.P. 299 per un tratto lungo all’incirca 550 metri, maggior parte del quale non protetto dal rilevato preesistente. Dalle nicchie 8, 9, 10, 11, 12 e 13 i blocchi si avvicinano alla S.P. 299 pur senza interferire direttamente. Per le restanti nicchie, invece, non sussistono delle minacce al fondovalle, in quanto i blocchi arrestano il loro moto precocemente.

Come ultima considerazione sull’analisi previsionale, nonostante i valori delle energie cinetiche e delle altezze di passaggio in corrispondenza della sommità, a sud del versante ed oltre il confine comunale siano realistici, va menzionato come buona parte di questa area sia identificata dal tipo di suolo 5, ovvero “substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica”, il quale non è presente al di sotto della nicchia di San Lorenzo; questo vuol dire che non è stato possibile calibrare i parametri di tale tipologia di suolo mediante una Back Analysis per la mancanza di informazioni e osservazioni non essendo stata interessata dall’evento franoso del novembre 2021, anche se si è cercato di assegnare dei valori tali da ottenere uno scenario accettabile e senza anomalie nei parametri di output. Concludendo, si può affermare come in suddetta parte del versante le traiettorie, così come le energie cinetiche e le altezze di passaggio, siano più incerte.

9 Considerazioni sugli elementi a rischio

Nel presente capitolo vengono descritte le problematiche riscontrate osservando lo scenario ottenuto dall'analisi previsionale in relazione agli elementi presenti sull'area di studio ed eventualmente esposti alle traiettorie percorse dai blocchi. Queste considerazioni hanno costituito il punto di partenza per un'analisi qualitativa degli elementi a rischio, della loro vulnerabilità ed esposizione con una stima, anch'essa qualitativa, dei costi dovuti al danno causato dai blocchi stessi.

9.1 Criticità conseguenti all'analisi previsionale

Sovrapponendo lo scenario ottenuto dall'analisi previsionale alla Base Cartografica di Riferimento Annuale 2022 su QGIS, è stato possibile identificare la presenza di alcuni elementi soggetti al rischio di subire danni in seguito all'impatto con dei blocchi rocciosi. In particolare, osservando la Figura 161 si nota come le traiettorie seguite dai blocchi interessino alcuni elementi quali la S.P. 299 sul fondovalle e degli alpeggi situati vicino la strada, in zona Alpe Le Bonde e in prossimità di Alpe Selva.

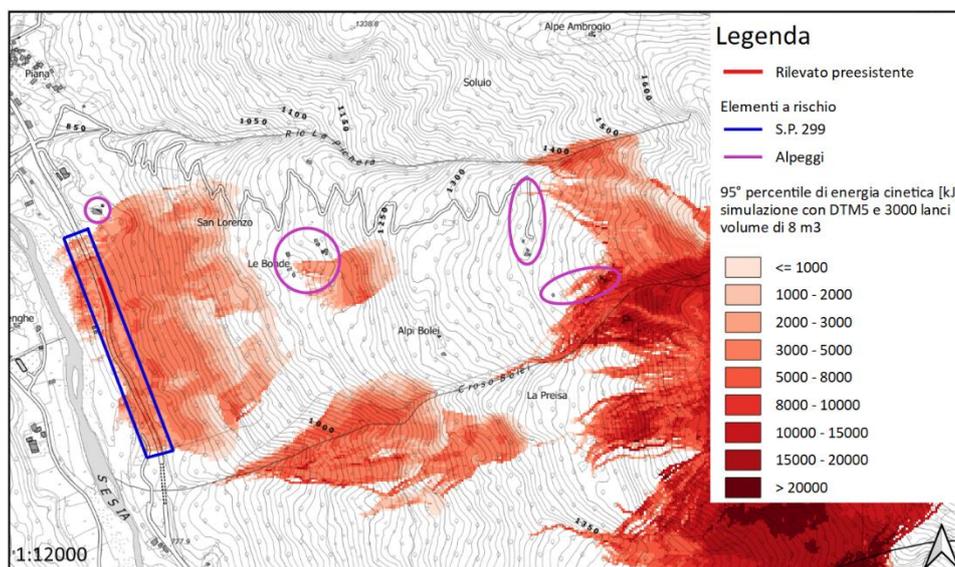


Figura 161 – Identificazione degli elementi a rischio a seguito dell'analisi previsionale; scala 1:12000

9.2 Analisi qualitativa degli elementi a rischio

In generale gli elementi a rischio, quali persone, edifici, infrastrutture, attività economiche e l'ambiente stesso, sono quegli elementi presenti in un'area influenzata da un evento pericoloso. Per questi elementi il rischio viene definito come la totalità dei danni attesi a seguito di un evento caratterizzato da una certa intensità e da una data probabilità di verificarsi; in termini matematici, il rischio è quindi definito dalla seguente formula:

$$R = H \cdot E \cdot V \cdot Val = pi \cdot V \cdot Val = pi \cdot D \quad (26)$$

dove:

- H è la pericolosità (*hazard*), ovvero la probabilità che un fenomeno potenzialmente dannoso caratterizzato da una certa intensità, in termini geometrici e/o meccanici (velocità, volume), si verifichi in un determinato periodo di tempo e in una determinata area;
- E è l'esposizione (*exposure*), ovvero la probabilità che gli elementi a rischio si trovino esposti a delle potenziali perdite al verificarsi di un fenomeno con date intensità e probabilità spaziale e temporale. In altre parole, consiste nella probabilità degli elementi a rischio di trovarsi esposti ad un pericolo;
- V è la vulnerabilità (*vulnerability*), ovvero il grado di perdita degli elementi a rischio esposti ad un certo pericolo. È connessa all'intensità del fenomeno potenzialmente dannoso e alle caratteristiche degli elementi a rischio stessi;
- Val è il valore degli elementi a rischio (*value*), ovvero quel valore ad essi associato in termini di costi, pubblica utilità o importanza ambientale. Generalmente si considerano i valori fisico (legato ai costi degli elementi a rischio), economico (legato alle attività commerciali), sociale (legato alla presenza di persone) e ambientale (legato a flora e fauna);
- pi è la probabilità d'impatto (*impact probability*), data dal prodotto tra la pericolosità e l'esposizione. In particolare, nel caso di elementi statici essa coincide con la pericolosità, essendo l'esposizione unitaria per questi ultimi;
- D è il danno (*damage*), ovvero la perdita potenziale causata dal verificarsi di un fenomeno potenzialmente dannoso. È definito dal prodotto tra vulnerabilità e valore degli elementi a rischio.

Ritornando al caso studio, precedentemente sono stati rilevati degli elementi a rischio sull'area di interesse, ovvero la S.P. 299 e degli alpeggi. Inoltre, tra questi elementi a rischio vanno intesi anche i veicoli che transitano sulla S.P. 299 e le persone che camminano sulla medesima strada e sui sentieri che attraversano il versante.

Non trattandosi dello scopo principale di questo elaborato, si è scelto di non portare avanti una vera e propria analisi di rischio, ma di condurre un'analisi qualitativa; questa elaborazione ha la funzione di coadiuvare nella scelta degli interventi più appropriati e con ordine di priorità. Nel seguito vengono analizzati individualmente gli elementi a rischio.

S.P. 299

La Strada Provinciale 299 è un'infrastruttura di fondamentale importanza per la sua funzione di collegamento tra le province piemontesi di Vercelli e Novara. Essendo un elemento statico la sua esposizione è alta in quanto in caso di raggiungimento dei blocchi rocciosi sul fondovalle, in assenza di protezioni adeguate, essa verrebbe sicuramente impattata. Dai punti di vista sociale ed economico la sua vulnerabilità, ovvero il grado di perdita, è alta dal momento che la mancanza di strade alternative di collegamento percorribili anche da mezzi pesanti causerebbe dei disagi in caso di un evento tale da interrompere il traffico su questa arteria stradale. Dal punto di vista fisico, invece, essa è media trattandosi di una strada ben realizzata e mantenuta in buone condizioni. Tuttavia, alla stima della vulnerabilità concorrono anche le caratteristiche del fenomeno stesso, e in questo caso le energie cinetiche al novantacinquesimo percentile simulate da Rockyfor3D sono risultate dell'ordine di 5000-8000 kJ; anche per una strada in buone condizioni queste energie non lascerebbero effetti trascurabili, senza dimenticare i disagi conseguenti a possibili blocchi rocciosi che si arrestano proprio sulla strada. Considerando questi aspetti, la vulnerabilità può essere considerata alta. Per quanto riguarda il suo valore, si identificano quelli fisico, per il fatto che un impatto con i blocchi rocciosi porterebbe al danneggiamento del manto stradale con successiva necessità di riparazione, economico, legato al fatto che un'eventuale chiusura della strada avrebbe ripercussioni sia come interruzione del traffico

stradale sia per le attività commerciali e turistiche le quali subirebbero perdite economiche, ed infine sociale, dovuto alla presenza di persone e veicoli che vi transitano.

Alpeggi

Per quanto riguarda gli alpeggi situati sia in prossimità della S.P. 299 sia nelle zone Le Bonde e Alpe Selva, il discorso è analogo al caso precedente in relazione all'esposizione, dal momento che le case presenti sono elementi statici; la vulnerabilità, invece, può essere considerata media per il fatto che l'intensità del fenomeno è minore, essendo le energie cinetiche inferiori, e che le case, anche se in parte disabitate e non in ottime condizioni, sono realizzate prevalentemente in pietra, il che le rende tutto sommato resistenti ad impatti non troppo violenti. Un'eccezione riguarda l'alpeggio ad Alpe Selva: nel ripiano più in basso le case non vengono minacciate in modo diretto, ma i blocchi raggiungono la strada di montagna a pochi metri di distanza, mentre sul ripiano a quote superiori le energie cinetiche dei blocchi che interessano le case, le quali sono in stato di abbandono, sono abbastanza elevate. Infine, a questi elementi possono essere associati i valori fisico, dovuto ai costi necessari alla ristrutturazione, e sociale, legato all'eventuale presenza di persone.

Nella Tabella 22 è riportato in sintesi quanto affermato.

Tabella 22 – Tabella riassuntiva dell'analisi qualitativa degli elementi a rischio

Elementi a rischio	Esposizione	Vulnerabilità	Valore
S.P. 299	Alta (100%)	Alta	Fisico, economico, sociale
Alpeggi	Alta (100%)	Media	Fisico, sociale

La presenza di persone assume un significato diverso a seconda che esse si trovino sulla S.P. 299 (pedoni o automobilisti), o sugli alpeggi e/o in zone limitrofe. Nel primo caso la loro esposizione è superiore perché si tratta di un ambiente maggiormente popolato e per l'intero anno; nel secondo caso, invece, ci sono meno persone esposte in quanto gli alpeggi sono in buona parte disabitati e, in ogni caso, sarebbero abitati per il solo periodo estivo, all'incirca tre mesi all'anno.

Per quanto concerne i costi, anche in questo caso si attestano superiori per la S.P. 299 laddove, oltre ai costi per la ricostruzione del manto stradale, vanno intese le perdite delle attività commerciali e turistiche che subiscono delle interruzioni, e la perdita di vite umane. Nel caso degli alpeggi i costi sono più bassi per la minore esposizione delle persone e per la minore vulnerabilità delle case stesse.

A conclusione di questa analisi qualitativa risulta come il verificarsi di un evento simile a quello simulato nell'analisi previsionale porterebbe danni e disagi non trascurabili, sia per gli elementi materiali che per le persone. Per questo motivo si rende necessaria la progettazione di interventi adeguati al fine di minimizzare gli impatti e le conseguenze.

10 Considerazioni sugli interventi

Nel presente capitolo si affronta il tema relativo ai possibili interventi a protezione degli elementi a rischio. In particolare, si procede alla verifica del rilevato in terra rinforzata costruito con carattere di somma urgenza, considerando lo scenario costituito dalle nicchie identificate al di sotto della zona San Lorenzo in seguito all'evento del 2021 (aree sorgenti 1, 5, 6 e 7 in Figura 128). Infine, si propongono delle soluzioni integrative in termini sia di interventi che di monitoraggio del versante.

10.1 Verifica del nuovo rilevato in terra rinforzata

A seguito dell'evento franoso verificatosi nel novembre 2021, lo Studio Tecnico Associato di Geologia TecnoSesia di Borgosesia (VC) ha condotto delle analisi speditive al fine di simulare l'evento e individuare interventi di messa in sicurezza in somma urgenza (sottoparagrafo 5.8.2). In particolare, come già specificato precedentemente (sottoparagrafo 5.8.3), è stato svuotato il vallo preesistente dai blocchi appartenenti sia a precedenti crolli sia all'evento franoso analizzato, esso è stato prolungato in direzione Varallo (a sud) ed è stato realizzato un nuovo rilevato paramassi in terra rinforzata a sud del rilevato preesistente (Figura 162), riportando del materiale sciolto per cucire lo spazio libero tra il nuovo rilevato e la zona boscata. Tuttavia, il nuovo rilevato paramassi è stato dimensionato considerando le energie cinetiche e le altezze di passaggio simulate da Rockyfor3D unicamente per la nicchia di distacco a San Lorenzo, propria dell'evento franoso avvenuto. Perciò, si è voluta dimostrare la sua efficacia considerando uno scenario più esteso, definito in base a ulteriori sopralluoghi che hanno evidenziato dei punti critici da cui potrebbe innescarsi un evento franoso.

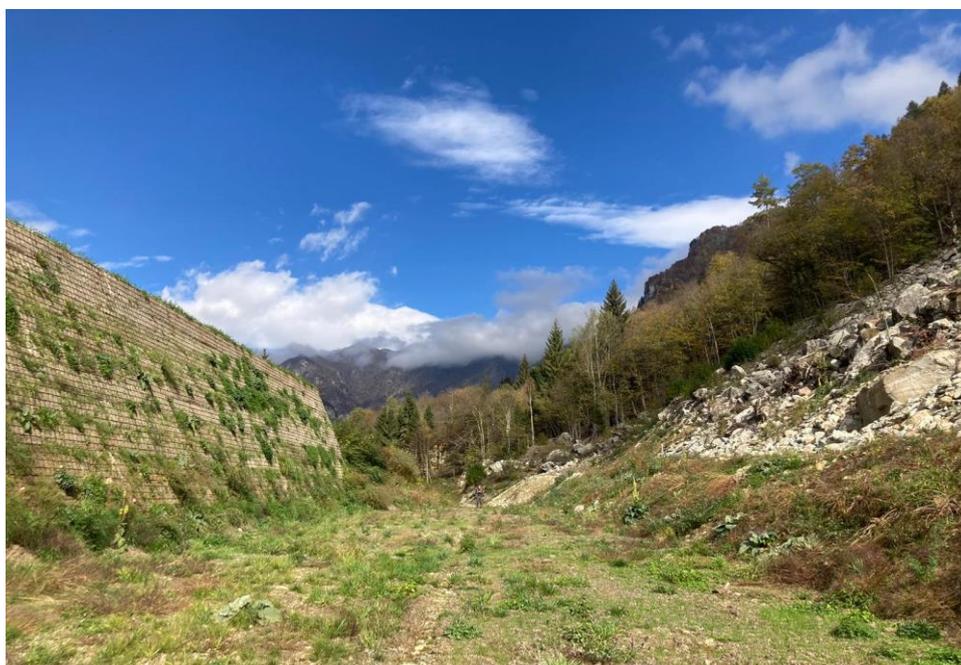


Figura 162 – Rilevato paramassi realizzato in somma urgenza (primo piano a sinistra), rilevato paramassi preesistente (secondo piano a sinistra) e vallo (al centro); vista verso nord [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

10.1.1 Parametri di ingresso per l'analisi di propagazione

Gli interventi di somma urgenza hanno previsto degli scavi per sistemare il vallo preesistente, svuotandolo dai blocchi accumulatisi nel corso dell'evento e di quelli precedenti, e realizzarne il prolungamento; questa operazione ha richiesto una riprofilatura del terreno che ha portato alla modifica della geometria creando un ripiano. Dunque, per procedere con la simulazione mediante il programma Rockyfor3D si è reso necessario modificare il DTM5; in particolare, tramite l'utilizzo del GPS sono state misurate le quote in corrispondenza dell'estremo nord del rilevato preesistente, della giunzione tra i due rilevati, della giunzione tra il nuovo rilevato ed il riporto di materiale sciolto e dell'estremo sud di quest'ultimo. Le quote così ottenute sono risultate rispettivamente pari a 807,63 m s.l.m., 805,22 m s.l.m., 803,30 m s.l.m. e 801,14 m s.l.m., indicando un andamento discendente verso sud. Mediante l'utilizzo di QGIS sono state modificate le quote del DTM5 in modo da poter considerare questa variazione del terreno nella simulazione; dal momento che le quote sono state misurate lungo il paramento di monte dei rilevati, è stata valutata una larghezza media del vallo di 10 metri, definendo l'areale in cui è avvenuta la modifica. Nella Figura 163 è riportato un profilo bidimensionale tracciato con QGIS come esempio.

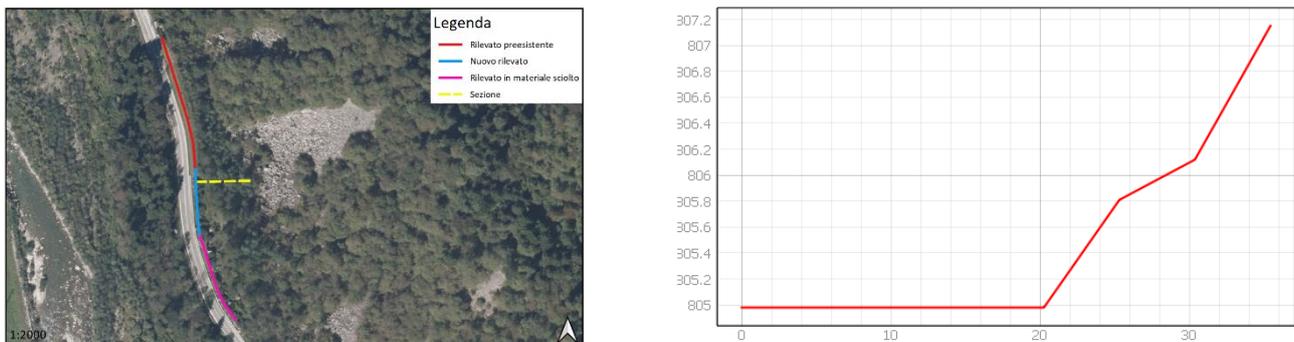


Figura 163 – Esempio di modifica delle quote del DTM5; rilevati paramassi e rilevato in materiale sciolto a sinistra (scala 1:2000), e profilo bidimensionale della sezione a destra (direzione W-E, lunghezza della sezione in metri sulle ascisse e quote in m s.l.m. sulle ordinate)

La seconda operazione ha visto l'aggiornamento delle mappe relative al tipo di suolo; difatti, attualmente questa zona è costituita da materiale soffice ed assorbente in grado di rallentare i blocchi rocciosi in arrivo da monte, dissipando buona parte dell'energia cinetica da loro posseduta. Questa condizione è stata presa in considerazione modificando i poligoni del suolo immediatamente a tergo di entrambi i rilevati e del rilevato in materiale sciolto a sud dei due precedenti. Nel dettaglio, questa zona è stata associata alla tipologia di suolo 1, identificata come "materiale fine (spessore > ~100 cm)"; i parametri relativi alla scabrezza sono rimasti invariati rispetto all'analisi previsionale, i quali sono stati calibrati mediante la Back Analysis, mentre la vegetazione è stata considerata assente, dal momento che con gli scavi essa è stata interamente rimossa e che attualmente sono presenti solamente specie erbacee. In definitiva, la configurazione risultante è rappresentata nella Figura 164.



Figura 164 – Rappresentazione del poligono indicante il vallo realizzato a tergo dei rilevati paramassi e del rilevato in materiale sciolto; scala 1:2000

L’ultima operazione necessaria è stata la creazione delle mappe relative al nuovo rilevato paramassi in terra rinforzata. Come descritto nel capitolo 7 dedicato all’introduzione del software Rockyfor3D, non è possibile effettuare delle simulazioni che tengano conto della presenza di un rilevato paramassi; tuttavia, sussiste la possibilità di inserire il rilevato come se fosse una barriera paramassi. In particolare, su QGIS è stato tracciato il nuovo rilevato in uno shapefile layer di tipo lineare con i tre attributi, i quali sono stati successivamente convertiti nel formato ESRI ASCII Grid. Nella Tabella 23 sono riportati gli attributi assegnati al rilevato paramassi.

Tabella 23 – Valori dei parametri relativi alla barriera paramassi creata per simulare il nuovo rilevato paramassi

Net_number	Net_height [m]	Net_energy [kJ]
1	7,5	8000

Per quanto riguarda il rilevato paramassi preesistente e il rilevato in materiale sciolto va menzionato come essi non siano stati presi in considerazione nella simulazione; questo perché il primo è un’opera realizzata dallo Stato per la quale non si è a conoscenza della sua capacità energetica, mentre il secondo è un riporto di terreno sabbioso con la sola funzione di chiudere il tratto libero tra il nuovo rilevato paramassi in terra rinforzata e il bosco.

10.1.2 Risultati ottenuti

Una volta effettuata la simulazione, si è ottenuto lo scenario riportato in Figura 165 e Figura 166 rappresentanti rispettivamente la distribuzione dell’energia cinetica e la distribuzione dell’altezza di passaggio, entrambe riferite al novantacinquesimo percentile. Nel primo caso si osserva come i valori si attestino a massimo 2000-3000 kJ lungo tutti i rilevati con qualche picco di 5000 kJ lungo il rilevato preesistente, mentre nel secondo caso il valore massimo simulato lungo i rilevati è pari a 2 metri con qualche picco di 3 metri; questo risultato indica come il rilevato paramassi in terra rinforzata di somma urgenza sia idoneo a sostenere il nuovo scenario in termini sia energetici che di altezze di passaggio. Ci sono, però, dei

valori che potrebbero risultare anomali a prima vista, ovvero le altezze di 10 metri lungo la S.P. 299. Questi valori non sono realistici a causa della modifica delle quote del DTMS; difatti, nonostante tale DTM abbia una buona risoluzione e sia affidabile nei risultati, si deve tenere presente che è costituito da celle di 25 m², che per un'analisi così dettagliata risultano troppo ampie. Perciò, mentre si può considerare realistico quanto ottenuto in corrispondenza del vallo, trattandosi di un'opera estesa, non si può fare lo stesso sul bordo della strada. In altre parole, sono presenti delle celle in cui rientrano sia la strada che l'area in cui sono ubicate le opere di protezione; essendoci stato un riporto di materiale sul vallo con innalzamento delle quote, sussistono delle variazioni anche di 10 metri tra le celle in corrispondenza del vallo e quelle in corrispondenza della strada, le quali sono rimaste invariate, da cui derivano le altezze anomale osservate.

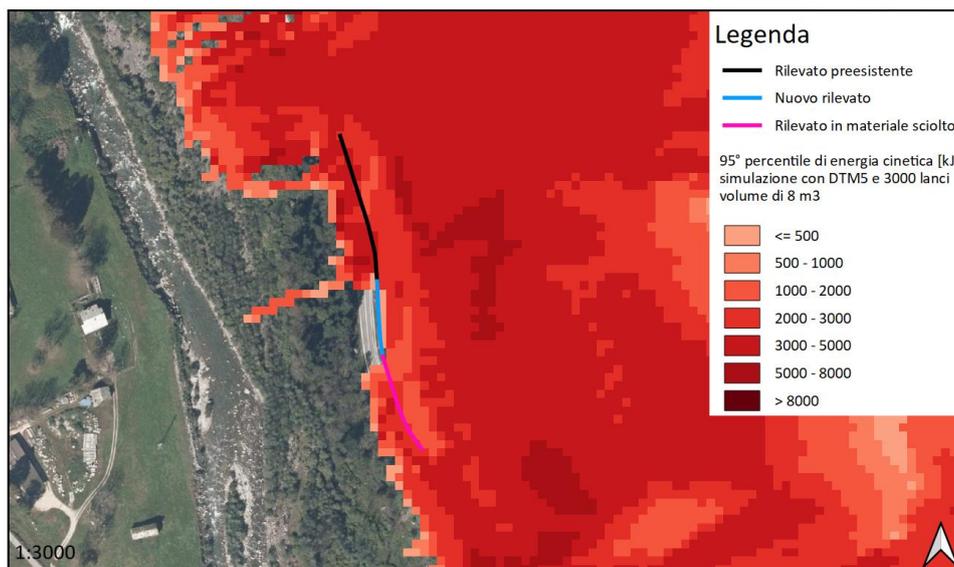


Figura 165 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di energia cinetica ottenuta per un volume di 8 m³ modificando le quote del DTMS in corrispondenza del vallo; scala 1:3000

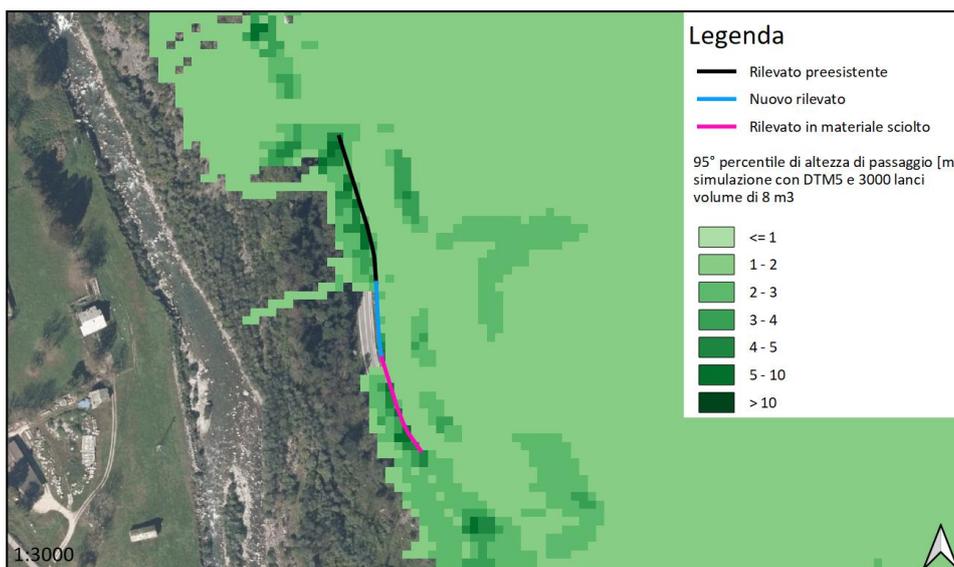


Figura 166 – Rappresentazione della distribuzione del 95° percentile di altezza di passaggio ottenuta per un volume di 8 m³ modificando le quote del DTMS in corrispondenza del vallo; scala 1:3000

Confrontando questo scenario con l'analisi previsionale (Figura 159, Figura 160), si dimostra come la nuova geometria dovuta alla realizzazione del vallo e il materiale che costituisce il vallo stesso siano efficaci nel dissipare parte dell'energia cinetica posseduta dai blocchi in movimento; difatti, essa assume una minore intensità, soprattutto in corrispondenza del vallo, del nuovo rilevato e del rilevato in materiale sciolto laddove non supera i 3000 kJ contro i 5000 kJ ottenuti nell'analisi previsionale. Per quanto riguarda l'altezza di passaggio non si riscontrano differenze significative, ad eccezione di qualche cella a tergo del nuovo rilevato che da valori di 4-5 metri si attesta a massimo 3 metri. Inoltre, le traiettorie relative al nuovo scenario nella parte interessata dal rilevato preesistente si arrestano parecchi metri prima, senza avvicinarsi al Fiume Sesia. In base a questi risultati si può concludere come anche il rilevato preesistente sia efficace in relazione alle sole altezze di passaggio, dal momento che la sua altezza di 6 metri si attesta al di sopra di quelle simulate; discorso analogo non vale dal punto di vista delle energie cinetiche, per le quali non è possibile dimostrarne l'efficacia a causa della mancanza di informazioni riguardanti la sua capacità energetica. Tuttavia, questo rilevato andrebbe ricostruito a causa dell'indebolimento subito dai precedenti impatti. Infine, va menzionato come, in base agli scenari rappresentanti le energie cinetiche e le altezze di passaggio (Figura 165, Figura 166), il rilevato in materiale sciolto andrebbe modificato al fine di soddisfare le nuove esigenze.

10.2 Proposta di soluzioni

Dall'analisi previsionale simulata, dal nuovo scenario descritto poc'anzi e dalle considerazioni effettuate sugli elementi a rischio presentate nel capitolo 9, si evince come sia necessario intervenire per mettere in sicurezza l'intera area analizzata.

Principalmente, sarebbe una buona scelta quella di prediligere degli interventi di protezione attiva che impediscano il distacco dei blocchi in corrispondenza delle nicchie; tuttavia, l'estensione e la complessità del fenomeno franoso non rendono efficace questa tipologia di interventi. Una possibile eccezione è data dalla potenziale nicchia ubicata nella zona prossima ad Alpi Bolei laddove, a seguito del rilevamento di campagna del 14 luglio 2022, è stata identificata una parete non troppo estesa sulla quale si potrebbe intervenire mediante l'installazione di reti rinforzate; in questo modo si garantirebbe la sicurezza agli alpeggi sottostanti, situati in zona Le Bonde, i quali vengono interessati dalle traiettorie simulate nell'analisi previsionale.

Eventualmente, è possibile intervenire con ulteriori opere di protezione, ad esempio, con delle barriere paramassi in zona Alpe Selva per l'alpeggio situato nel primo ripiano al termine della strada di montagna; anche se le case non vengono interessate in maniera diretta dalle traiettorie, non si può affermare che si trovino in una zona sicura dal momento che un'analisi numerica è soggetta ad incertezze, soprattutto in questa parte del versante laddove non si è potuta eseguire una corretta calibrazione dei parametri per l'impossibilità di condurre una Back Analysis al tipo di suolo 5. La strada, invece, risulta interessata anche solo in minima parte, condizione che richiede necessariamente un intervento. Per quanto riguarda l'alpeggio sul secondo ripiano posto a quota di poco superiore al precedente, risulta difficile intervenire per il fatto che le energie cinetiche sono abbastanza elevate, dell'ordine di 10000-15000 kJ; le possibili alternative potrebbero essere la realizzazione di un rilevato paramassi in terra rinforzata in grado di assorbire energie cinetiche anche molto elevate o, trattandosi di case diroccate ed apparentemente disabitate, non intervenire. Tuttavia, il territorio non risulta favorevole alla costruzione di un rilevato paramassi rendendo difficile, se non impossibile, la cantierabilità; perciò, la scelta ricadrebbe sulla seconda opzione. Per l'alpeggio vicino alla S.P. 299, il quale risulta molto prossimo alle traiettorie simulate, sussiste la possibilità di intervenire con una barriera paramassi essendoci energie cinetiche di bassa intensità.

In ultimo, per la S.P. 299 la soluzione apparentemente più plausibile è quella di realizzare dei rilevati paramassi in terra rinforzata a nord e a sud di quelli già presenti a bordo strada; si tratterebbe di un'opera

molto imponente data la sua estensione, che si renderebbe però necessaria per garantire la sicurezza. In particolare, il rilevato a nord si dovrebbe estendere di almeno 120 metri a partire dall'estremità nord del rilevato preesistente, mentre il rilevato a sud si dovrebbe estendere di almeno 300 metri a partire dall'estremità sud del rilevato realizzato in somma urgenza. Inoltre, laddove possibile, si potrebbe realizzare una vasca di accumulo a tergo delle nuove strutture a continuazione degli interventi precedenti (Figura 167). Al fine di rendere questi rilevati meno impattanti sul territorio, trattandosi di strutture imponenti e rinforzate da geogriglie, si potrebbe intervenire con un'operazione di idrosemina, favorendo così la crescita di vegetazione sui paramenti.



Figura 167 – Rappresentazione del rilevato preesistente, del rilevato di somma urgenza e del prolungamento proposto a nord e a sud di essi; scala 1:6000

In conclusione, nella Figura 168 sono riportati i possibili interventi.

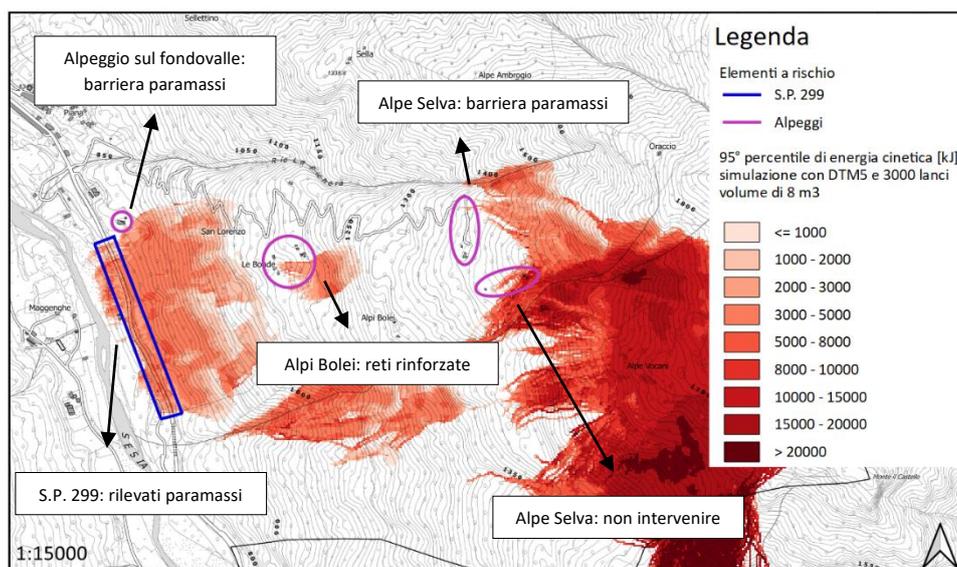


Figura 168 – Possibili interventi per la messa in sicurezza; scala 1:15000

Le opere proposte, che risultano necessarie per garantire maggiore sicurezza in caso di possibili futuri eventi franosi, devono essere accompagnate anche da adeguati interventi di manutenzione ordinaria al fine di verificare le condizioni dei singoli elementi che le costituiscono e garantirne la funzionalità; ad esempio, è bene controllare che gli elementi in acciaio, quali reti e vari sistemi di connessione, non siano arrugginiti o compromessi. In più, nonostante la vegetazione renda meno impattante il vallo favorendone l'inserimento nel paesaggio, è necessario intervenire per evitare la crescita di piante ad alto fusto che comprometterebbero la funzionalità di tale opera costituita da materiale soffice ed assorbente utile a rallentare i blocchi rocciosi in movimento.

Inoltre, a causa della presenza della DGPV sono necessari ulteriori studi al fine di valutarne gli effetti sulla ricorrenza ed entità dei fenomeni di caduta massi; dunque, è raccomandabile mantenere l'intero versante sotto osservazione mediante strumenti di monitoraggio. A partire dai dati satellitari è possibile conoscere l'entità e la direzione degli spostamenti di alcuni punti distribuiti sul versante presi come Permanent Scatterers, così da studiare in modo più approfondito la deformazione gravitativa profonda di versante e analizzare il suo comportamento nel tempo. Questa soluzione permette di effettuare degli studi in maniera globale tenendo sotto controllo l'intero versante su cui grava la frana mediante un'osservazione ad alta quota, la quale potrebbe essere utilizzata per riconoscere nuove nicchie di distacco o segni morfologici premonitori nel caso venissero fornite anche delle immagini satellitari. Una tecnica alternativa è il controllo topografico convenzionale, o automatizzato, da cui ottenere periodicamente delle informazioni; sussiste, però, il vincolo di dover utilizzare questa tecnica in areali non coperti dalla vegetazione, che ne impedirebbe la funzionalità. Inoltre, si potrebbero installare dei sistemi di monitoraggio direttamente al di sopra della frana stessa; ad esempio, in caso di pareti rocciose fratturate è possibile installare dei fessurimetri in modo tale da acquisire l'entità dello spostamento, oltre a degli estensimetri a barra che faciliterebbero il controllo trattandosi di strumenti automatizzabili. In caso di trincee molto estese risulterebbe efficace l'utilizzo di estensimetri a filo per monitorare gli spostamenti tra gli estremi delle trincee stesse, avendo cura di installare delle protezioni per evitare danneggiamenti alla strumentazione. Per esempio, nella Figura 169 è rappresentata una trincea attualmente attiva situata tra gli alpeggi Le Bonde e La Preisa, per la quale una periodica osservazione potrebbe rivelarsi di fondamentale importanza al fine di poter intervenire adeguatamente prevenendo gravi conseguenze.



Figura 169 – Trincea attiva particolarmente aperta con substrato scompaginato ubicata tra gli alpeggi Le Bonde e La Preisa: vista lato sud [cortesia Dott. Geol. Cavagnino e Dott.ssa Geol. Minella]

Conclusioni

La presente Tesi si è focalizzata sullo studio di un evento franoso avvenuto il 13 novembre 2021 nel Comune piemontese di Campertogno, in Valsesia (VC). In particolare, l'area sud-est del territorio comunale grava su una deformazione gravitativa profonda di versante particolarmente estesa, con la presenza di un'area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi dalle dimensioni non trascurabili.

L'evento analizzato è associato ad una caduta di blocchi rocciosi dalla nicchia di distacco ubicata al di sotto dell'alpeggio Le Bonde, ad una quota di circa 1070 m s.l.m. Parte dei blocchi che si sono distaccati ha raggiunto il fondovalle impattando contro il rilevato preesistente ubicato a bordo strada, il quale è riuscito a svolgere la sua funzione di arresto dei blocchi stessi; solo un blocco, o meglio una scheggia derivante dalla frantumazione per successivi impatti, ha superato il rilevato interessando la Strada Provinciale 299. Nel tratto non protetto dal rilevato alcuni blocchi hanno raggiunto il manto stradale provocando delle buche; inoltre, sono stati rilevati dei blocchi circa 60 metri più a sud del rilevato. A seguito di vari sopralluoghi sono state condotte delle analisi speditive dallo Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia di Borgosesia (VC) al fine di mettere in sicurezza la zona con interventi a carattere di somma urgenza. In particolare, si è proceduto alla rimozione dei blocchi accumulatisi nel vallo a tergo del rilevato preesistente, alla riprofilatura del vallo stesso e al suo prolungamento in direzione sud, alla costruzione di un nuovo rilevato paramassi in terra rinforzata come prolungamento di quello preesistente, e al riporto di materiale sciolto per cucire lo spazio libero sempre in direzione sud. Nel dettaglio, il nuovo rilevato paramassi in terra rinforzata è stato dimensionato a seguito di alcune simulazioni che hanno permesso di ricostruire l'evento tramite una Back Analysis, basandosi su quanto osservato in situ in termini di traiettorie e segni di impatto sugli alberi per le altezze di passaggio.

In questo contesto, la Tesi costituisce un avanzamento dello studio, partito da un'analisi più approfondita della deformazione gravitativa profonda di versante. Il 14 luglio 2022 è stato effettuato un nuovo rilevamento di campagna, che ha consentito di validare alcune assunzioni e di ottenere nuove informazioni e nuovi dati utili per le simulazioni numeriche.

In seguito, grazie alla disponibilità dei dati satellitari di Arpa Piemonte, è stato possibile elaborare delle serie temporali al fine di osservare il comportamento del versante negli anni in termini di spostamento di alcuni punti distribuiti sulla superficie utilizzati come Permanent Scatterers.

Da questi dati si è potuta avere un'idea generale sull'entità dei movimenti che caratterizzano l'area di studio; difatti, elaborando una classificazione a seconda della velocità media annua di spostamento si è visto come essa rientri per lo più nell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica compreso tra -2 mm/y e +2 mm/y, indicando una dinamica del versante molto ridotta. Inoltre, è stato possibile identificare delle zone caratterizzate da velocità di spostamento particolarmente alte che potrebbero rappresentare delle potenziali nicchie di distacco.

In seguito all'inquadramento generale della deformazione gravitativa profonda di versante, è stata condotta l'analisi numerica mediante l'utilizzo del software Rockyfor3D; in particolare, è stato seguito un metodo costituito dalla Back Analysis per la calibrazione dei parametri di input, a cui è seguita la previsione delle possibili traiettorie dei blocchi rocciosi provenienti dalle potenziali nicchie di distacco. Inizialmente sono state identificate le aree sorgenti, sia quella associata all'evento franoso del novembre 2021 sia quelle potenziali individuate sulla base del rilevamento avvenuto il 14 luglio 2022, della carta delle pendenze e dei dati

satellitari. Successivamente sono stati definiti i parametri relativi alla tipologia suolo: è stata suddivisa la zona di studio in microaree il più possibili omogenee a cui sono stati associati dei valori di scabrezza del suolo e di copertura vegetale in termini di densità di alberi per ettaro, dimensione diametrale del tronco con rispettiva deviazione standard, e percentuale di conifere. Prima dell'analisi numerica vera e propria sono stati condotti due studi finalizzati alla scelta del DTM e alla densità di alberi per ettaro; nel primo caso si è dimostrato come il DTM con passo di 5 metri fornisca dei risultati più precisi e attendibili, che è poi stato utilizzato nelle successive simulazioni. Nel secondo caso, invece, è stata dimostrata la presenza di un limite superiore al numero di alberi per ettaro oltre al quale i risultati non subiscono variazioni significative; in particolare, il limite superiore per il DTM10 è pari a 100 alberi per ettaro, per il DTM5 è pari a 400 alberi per ettaro, ovvero un albero per ogni cella del DTM.

Una volta chiariti questi aspetti, l'analisi è proseguita con la Back Analysis al fine di calibrare al meglio i parametri di input; lo scopo è stato quello di ricostruire lo scenario dell'evento franoso per ottenere dei parametri realistici da usare per l'analisi previsionale. Il migliore scenario ottenuto ha fornito delle distribuzioni di energia cinetica e altezze di passaggio al novantacinquesimo percentile coerenti con quanto avvenuto e osservato in situ. Una volta calibrati i parametri è stata condotta l'analisi previsionale utilizzando tutte le potenziali nicchie di distacco, da cui è emerso come l'area interessata dalle traiettorie dei blocchi rocciosi sia molto estesa.

Si è anche osservato come queste traiettorie intercettino alcuni elementi sull'area di studio quali alpeggi distribuiti a varie quote e la S.P. 299. Perciò, sono state espone brevemente alcune considerazioni sugli elementi a rischio in termini di vulnerabilità, esposizione e valore degli elementi stessi per capire dove e come intervenire e con quale priorità.

A conclusione del lavoro, dal momento che il rilevato paramassi in terra rinforzata di somma urgenza è stato realizzato senza considerare le potenziali nicchie di distacco individuate in tempi successivi, si è deciso di verificarne l'efficacia al nuovo scenario emerso dall'analisi previsionale. A tale scopo è risultato necessario modificare il tipo di suolo a tergo dei rilevati e le quote del DTM5 per tenere in conto gli interventi realizzati, ed è stato inserito il nuovo rilevato paramassi nell'analisi come una barriera paramassi. Dopo queste modifiche è stata condotta l'ultima simulazione che ha dimostrato la tenuta del nuovo rilevato allo scenario completo di tutte le nicchie sorgenti, anche solo assunte come potenziali, in termini sia energetici che di altezze di passaggio, e anche l'efficacia del vallo realizzato a tergo nel rallentare i blocchi rocciosi.

L'ultimo passo di questo lavoro è stato dedicato alla proposta di possibili interventi in termini sia di opere di protezione, considerando che l'estensione del fenomeno franoso rende complicato intervenire attivamente nelle aree di potenziale distacco, che di sistemi di monitoraggio per mantenere sotto osservazione l'intero versante.

Come nota finale si vuole sottolineare l'importanza della consapevolezza sulle possibili conseguenze derivanti da un fenomeno franoso, le quali possono essere evitate o rese meno gravi solo con una buona conoscenza delle caratteristiche geometriche e meccaniche dell'ammasso roccioso e con l'implementazione di sistemi di monitoraggio adeguati.

Inoltre, la Tesi ha messo in evidenza l'importanza di una corretta calibrazione delle analisi numeriche per l'affidabilità dei risultati, che deve essere basata su osservazioni e rilievi in sito e sulla Back Analysis di eventi passati.

Ringraziamenti

Mi sembra solo ieri che camminavo nei corridoi del Politecnico per incominciare una nuova esperienza, e adesso sono giunta al termine di questo mio percorso universitario. La stesura di questa Tesi mi ha richiesto molto impegno, ma alla fine sono riuscita a concludere e a raggiungere questo traguardo; però tutto ciò non sarebbe mai successo senza alcune persone che vorrei ringraziare.

Ringrazio le professoresse Monica Barbero e Marta Castelli e il Dott. Geol. Giovanni Cavagnino per avermi proposto questo caso studio molto interessante e formativo.

Un ringraziamento speciale è dedicato alla Dott.ssa Geol. Chiara Minella il cui aiuto si è rivelato molto prezioso; durante questi mesi di duro lavoro non c'è stata una semplice collaborazione tra una geologa e una studentessa, ma si è sviluppato un rapporto di amicizia che ha permesso la condivisione reciproca di nuove conoscenze legate sia al mondo universitario/lavorativo sia alla sfera ricreativa.

Ringrazio i suddetti geologi per aver condiviso molte foto scattate durante i vari sopralluoghi e molte informazioni che si sono rivelate fondamentali per le attività svolte, per essersi sempre resi disponibili nell'elaborazione della Tesi collaborando costantemente, per aver sempre trovato del tempo da dedicare alla risoluzione dei miei dubbi e per avermi dato la possibilità di svolgere il rilevamento di campagna, descrivendo passo dopo passo tutti gli aspetti ed elementi principali relativi ai fenomeni franosi in questione e facendo conoscere un territorio a me nuovo, mille volte grazie.

Ringrazio la ditta Bertini Costruzioni S.R.L. per aver cortesemente concesso le fotografie scattate da drone.

Ringrazio il Politecnico di Torino per questa bellissima esperienza che ha lasciato un segno indelebile nel mio cuore, aiutandomi a svelare tutte le capacità che non pensavo di possedere.

Ringrazio papà Gianni, mamma Margherita e mio fratello Andrea per i loro insegnamenti, i quali mi hanno permesso di diventare la persona che sono, per aver creduto in me durante il mio percorso universitario, per la loro pazienza, per il costante sostegno, per l'incoraggiamento, per avermi sopportata ogni giorno della mia vita, per continuare a sopportarmi nonostante i miei frequenti malumori e le mie lamentele, per il bene che mi vogliono e per essermi sempre accanto tra sorrisi e lacrime.

Ringrazio tutte le persone che, prima o dopo, sono entrate a far parte della mia vita, che mi hanno aiutata e che continuano ad aiutarmi a superare tutti i momenti più difficili, donandomi parte del loro prezioso tempo e condividendo con me i momenti più felici.

Bibliografia

- Agliardi, F., Crosta, G., Zanchi, A. (2000). Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59, pp. 83-102.
- Arattano, M., Chiarle, M., Coviello, V., Turconi, L. (2015). L'utilizzo dei sensori di vibrazione per il monitoraggio delle frane e la salvaguardia del territorio. *Rivista Italiana di Acustica* Vol. 39 (2015), N. 3, pp. 45-59.
- Barbero, M., Castelli, M. (2022). Rock slope stability: Rockfall. *Analysis and design of geotechnical structures and earthworks course*. Politecnico di Torino, a.a. 2022.
- Brogini, V. (2010). Analisi del rischio da frane di crollo in presenza di sistemi di protezione passiva nella Provincia Autonoma di Bolzano. Tesi di Laurea Specialistica. Università di Bologna. Relatore: Dott. Laura Govoni, Correlatori: Prof. Guido Gottardi, Dott. Marco Ranalli, Dott. Geol. Claudia Strada.
- Claps, P., Vigna, B., Vagnon, F. (2022). Liquefazione. *Corso di Protezione Civile*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Claps, P., Vigna, B., Vagnon, F. (2022). Monitoraggi e valutazione del rischio dei fenomeni franosi. *Corso di Protezione Civile*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Comella, P. (2016). Analisi e modellazione della struttura geologica della DGPV di Colzate-Vertova (BG). Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Milano. Relatore: Prof. Vincenzo Francani, Correlatore: Dott. Ing. Paola Gattinoni.
- Crosta, G. B., Frattini, P., Agliardi, F. (2013). Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, pp. 13–33.
- Deangeli, C. (2021). Classification of landslides. *Corso di Landslides and slope engineering*. Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021.
- Deangeli, C., Marchelli, M. (2021). Risk Analysis. *Corso di Landslides and slope engineering*. Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021.
- Deangeli, C., Marchelli, M. (2021). Trajectory analysis – RocFall. *Corso di Landslides and slope engineering*. Politecnico di Torino, a.a. 2020/2021.
- Dei Cas L., Trigila A., Iadanza C. (eds) Linee Guida per il monitoraggio delle frane. Linee Guida SNPA 32/2021. Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Regione Toscana, Consorzio LaMMA (2018). Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici del geoportale Regione Toscana. Manuale d'uso.
- Dorren L.K.A., Simoni, S. (2014). Rockyfor3D (V5.1) rivelato – Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi. EcorisQ Paper.
- Dramis, F., Sorriso-Valvo, M. (1994). Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. *Engineering Geology*, 38, pp. 231–243.
- Fanni, S. (2019). La protezione del territorio nei confronti della caduta massi: un caso studio nel comune di Cravagliana (VC). Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. Relatori: Prof. Marta Castelli, Prof. Monica Barbero, Ing. Gianmarco Vallero.
- Flaim, L. (2012). Le deformazioni gravitative del versante sinistro della Val Ridanna (Alto Adige-Südtirol, Italia): geologia strutturale e geomeccanica. Tesi di Laurea Magistrale. Università degli Studi di Padova. Relatore: Prof. Rinaldo Genevois, Correlatori: Dott. Luca Zorzi, Dott. Matteo Massironi.
- Gandolfo, L. (2013). Studio della frana di Prezzo (TN) nel quadro delle grandi frane del Trentino sud-occidentale. Tesi di Laurea Magistrale. Università degli studi di Padova. Relatore: Prof. Rinaldo Genevois, Correlatore: Prof. Mario Floris.

- Giani, G. (1997). Caduta Massi - Analisi del moto ed opere di protezione. Hevelius Edizioni.
- Grossi, C. (2017). Studio della stabilità di un versante in Valsesia: la frana del Santin (VC). Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. Relatore: Prof. Monica Barbero, Correlatore: Prof. Andrea M. Lingua, Relatore esterno: Dott. Giovanni Cavagnino.
- Mattioli, C. (2018). Monitoraggio e modellazione numerica del fenomeno di caduta massi: il caso studio di Antey-Saint-André. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. Relatori: Prof. Marco Barla, Francesco Antolini, Patrick Thuegaz.
- Migioia, M. (2020). Valutazione del parametro scabrezza per analisi speditive nella modellazione del fenomeno di caduta massi. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. Relatori: Prof. Monica Barbero, Prof. Marta Castelli, Ing. Gianmarco Vallero, Ing. Giulia Torsello.
- Pánek, T., Klimeš, J. (2016). Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: A review. *Earth-Science Reviews*, 156, pp. 14-38.
- Pasuto, A., Silvano, S., Soldati, M. (1997). Deformazioni gravitative profonde di versante e frane: casi di studio nella Valle del Boite (Dolomiti, Italia). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 20 (1997), pp. 107-111.
- Progetto Interreg IIB Alpine Space CLimChalp WP6 (2008). Slope Monitoring Methods – A state of the Art Report.
- Provincia di Torino (2011). Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale – Gruppo di studio sulle deformazioni gravitative di versante. Progetto definitivo, elaborato DS4.
- Rondelet, G. (1834). Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare.
- Scappatura, V. Y. (2018). Analisi traiettografica 3D di un fenomeno di caduta massi nel Comune di Perrero (TO) e proposta di un intervento di difesa. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. Relatori: Prof. Claudio Scavia, Prof. Marta Castelli, Prof. Monica Barbero.
- Studio Tecnico Associato di Geologia Tecnoesia (2021). Evento franoso del novembre 2021 sulla S.P. 299 in Comune di Campertogno. Rapporto di sopralluogo e prime analisi speditive.
- Taddia, G. (2022). Dighe: problemi geologici. *Corso di Geologia Tecnica Ambientale*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Taddia, G., Vigna, B., Vagnon, F. (2022). Classificazione dei fenomeni franosi. *Corso di Geologia Tecnica Ambientale*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Taddia, G., Vigna, B., Vagnon, F. (2022). Interventi frane. *Corso di Geologia Tecnica Ambientale*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Taddia, G., Vigna, B., Vagnon, F. (2022). Monitoraggio frane. *Corso di Geologia Tecnica Ambientale*. Politecnico di Torino, a.a. 2021/2022.
- Tancredi, G., Pietrantoni, M. (2002). Classifica delle frane e interventi di stabilizzazione. Rivisto e aggiornato da Massimo Pietrantoni – febbraio 2016.
- Trigila, A., Iadanza, C., Bussettini, M., Lastoria, B. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2021. ISPRA, Rapporti 356/2021.
- Yan, P., Zhang, J., Kong, X., Fang, Q. (2020). Numerical simulation of rockfall trajectory with consideration of arbitrary shapes of falling rocks and terrain. *Computers and Geotechnics*, 122, 103511.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R. (1987). Quantitative analysis of the land surface topography. *Earth Surf. Proc. And Landf.*, 12, 47-56.

Sitografia

- <https://chiesurin-geoengineering.it/caduta-massi/>
- https://corsofraneunisa2013.files.wordpress.com/2013/10/frane_aa2013-14_lezione_classifiche.pdf
- https://ftp.geologiapiemonte.it/sifrap/2009.05.19_corso%20ordine_sifrap_b.pdf
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/304776/mod_resource/content/1/02_Dissesto%20idrogeologico%20in%20legge.pdf
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/315977/mod_resource/content/1/06_Geomorfometria_03.pdf
- <https://postidavisitare.com/wiki/campertogno>
- <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/classificazione-sismica>
- https://sciamlab.com/opendatahub/dataset/r_piemon_arlpa_to-07-07-02-d_2017-12-20-11-32
- [http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20\(active\)%3A%20attualmente,p%20rima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale](http://web.tiscali.it/riccardo.ruffilli-wolit/html/glossario%20internazionale.html#:~:text=Frana%20ATTIVA%20(active)%3A%20attualmente,p%20rima%20dell'ultimo%20ciclo%20stagionale)
- <https://www.anpanacosenza.it/riservato/Monitoraggio%20frane.pdf>
- <https://www.arpa.piemonte.it/>
- <https://www.autoritadistrettoac.it/pianificazione/pianificazione-di-bacino-idrografico>
- <https://www.aziendaagricolalari.com/calcola-piante-per-ettaro/>
- <https://www.bgeo.it/la-classificazione-delle-frane/>
- https://www.cartografia.regione.lombardia.it/metadata/PROGETTO_IFFI/DOC/schema.pdf
- <https://www.comune.campertogno.vc.it/it-it/home>
- <https://www.ecorisq.org/>
- <https://www.geoportale.piemonte.it/cms/>
- <https://www.gestecno.it/estensimetri-multibase-da-foro/#:~:text=Gli%20estensimetri%20ad%20aste%20in,all'imbocco%20del%20foro%20stesso>
- <https://www.gissiamo.it/>
- <https://www.globalgeografia.com/italia/piemonte.htm>
- <https://www.gmpe.it/geomorfologia/carsismo>
- <https://www.idrogeo.it/wp-content/uploads/2017/06/Convegno-Bossea.pdf>
- <https://www.ingenio-web.it/19887-linterferometria-sar-satellitare-per-lo-studio-dei-processi-di-subsidenza>
- https://www.irea.cnr.it/index.php?option=com_k2&view=item&id=77:interferometria-differenziale-radar-ad-apertura-sintetica&Itemid=139
- <https://www.isprambiente.gov.it/it>
- <https://www.meccaniciterrestri.it/articoli/43-crepe-nei-muri-come-monitorarle>
- https://www.monterosavalsesia.com/alta_valsesia_paesi/it/it-campertogno.html
- https://www.prefettura.it/FILES/AllegatiPag/1190/Riferimenti_legislativi_rischio_idrogeologico.pdf
- <https://www.progettoiffi.isprambiente.it/>
- <https://www.qgis.org/it/site/>
- <https://www.sapere.it>
- https://www.sisgeo.com/uploads/manuali/distometro_a_nastro_it_01_12.pdf
- https://www.treccani.it/enciclopedia/radar-meteorologico_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/
- <https://www.unife.it/scienze/lm.geologia/insegnamenti/geomorfologia-applicata/materiale-didattico/FRANE%20NOMENCLATURA%20ED%20INTERVENTI.pdf>
- <https://www.unisalento.it/documents/20152/1503373/GeotecnicaUniSalento-versantilnRoccia.pdf/ce4db6f9-6b2d-4a55-4a31-39406e261d59?version=1.0&download=true>

Allegati esterni

- Allegato fotografico
- Allegato grafico