

COMUNE DI MONCENISIO

PROVINCIA DI TORINO
REGIONE PIEMONTE



STUDIO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO DEL VERSANTE A MONTE DELL'ABITATO DI MONCENISIO

RELAZIONE GEOLOGICA

DATA:

06/2025

La committenza: **COMUNE DI MONCENISIO**
P.zza Chiavanna, 1 – Moncenisio 10050
CF / P. IVA: 01021740012

I tecnici:

GEOL. MICHELANGELO DI GIOIA

Ordine Geologi del Piemonte n° 145 Sez. A
Via Pietrino Belli, 65 – 10145 Torino
335.5898360 - michelangelodigioia@gmail.com



Michelangelo Di Gioia



MARCO BAlestro

GEOLOGIA APPLICATA E TERRITORIO

Ordine Geologi del Piemonte - n°431 Sez. A
335.6312861 - marco.balestro@gmail.com



Indice

1. PREMESSA	
1.1. Ubicazione e oggetto dello studio	2
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	
2.1. Inquadramento geologico – strutturale	4
2.2. Cartografia geologica	4
3. GEOMORFOLOGIA	
3.1. Inquadramento geomorfologico	8
3.2. Carta geologico – geomorfologica	9
4. FENOMENI DI DISSESTO	
4.1. Dati esistenti ed idoneità all'utilizzazione urbanistica	10
4.2. Dinamica torrentizia	15
4.3. Valanghe	16
4.4. Fenomeni gravitativi	18
5. ANALISI STRUTTURALE	
5.1. Analisi da modelli 3D	22
5.2. Strutture principali	24
6. ANALISI DEI FENOMENI DI CROLLO	
6.1. Rilievo dei blocchi e degli accumuli lungo il versante	27
6.2. Crollo del 10/2024	31
7. SIMULAZIONI NUMERICHE DEI CROLLI	
7.1. Premessa	35
7.2. Campo di applicazione, limiti ed incertezze	35
7.3. Preparazione del modello	36
7.4. Calibrazione del modello	37
7.5. Risultati delle simulazioni	38
8. ANALISI SETTORI CRITICI E PROPOSTE DI INTERVENTO	
8.1. Settori critici	44
8.2. Proposte di intervento	45

TAV 1 - Carta geologico - geomorfologica

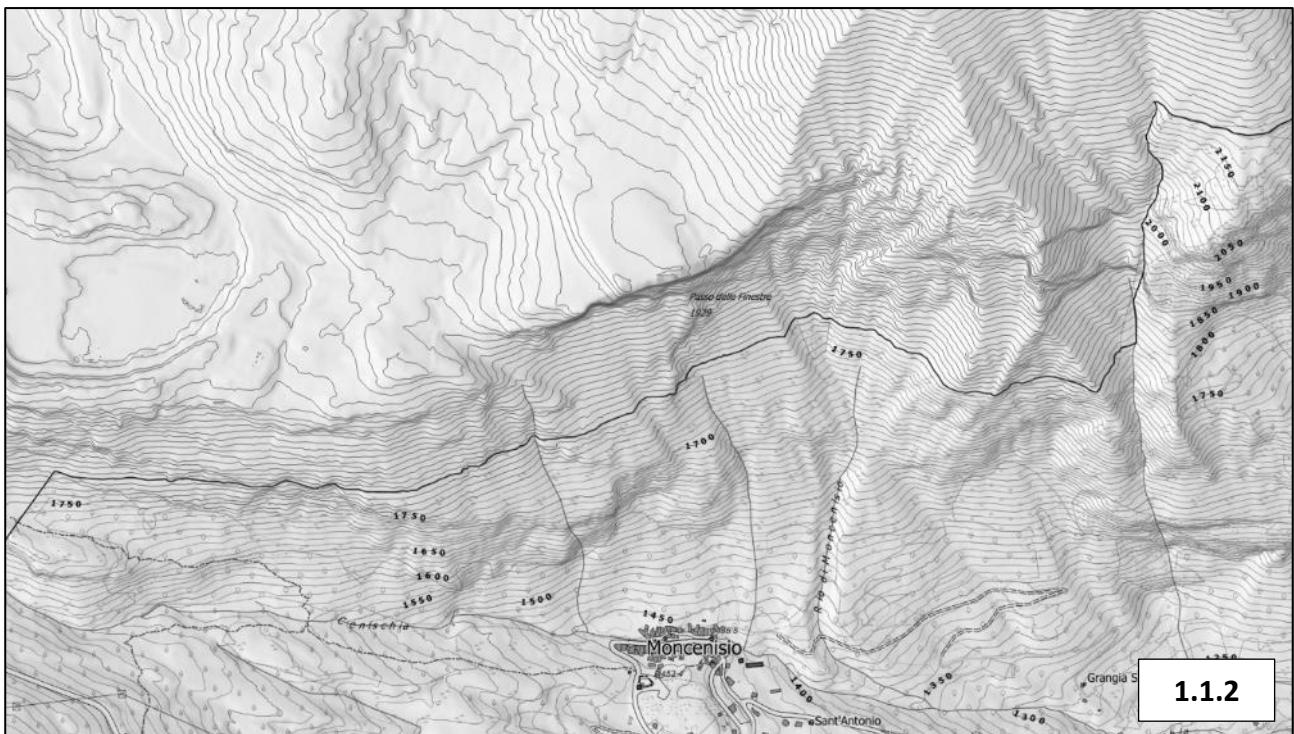
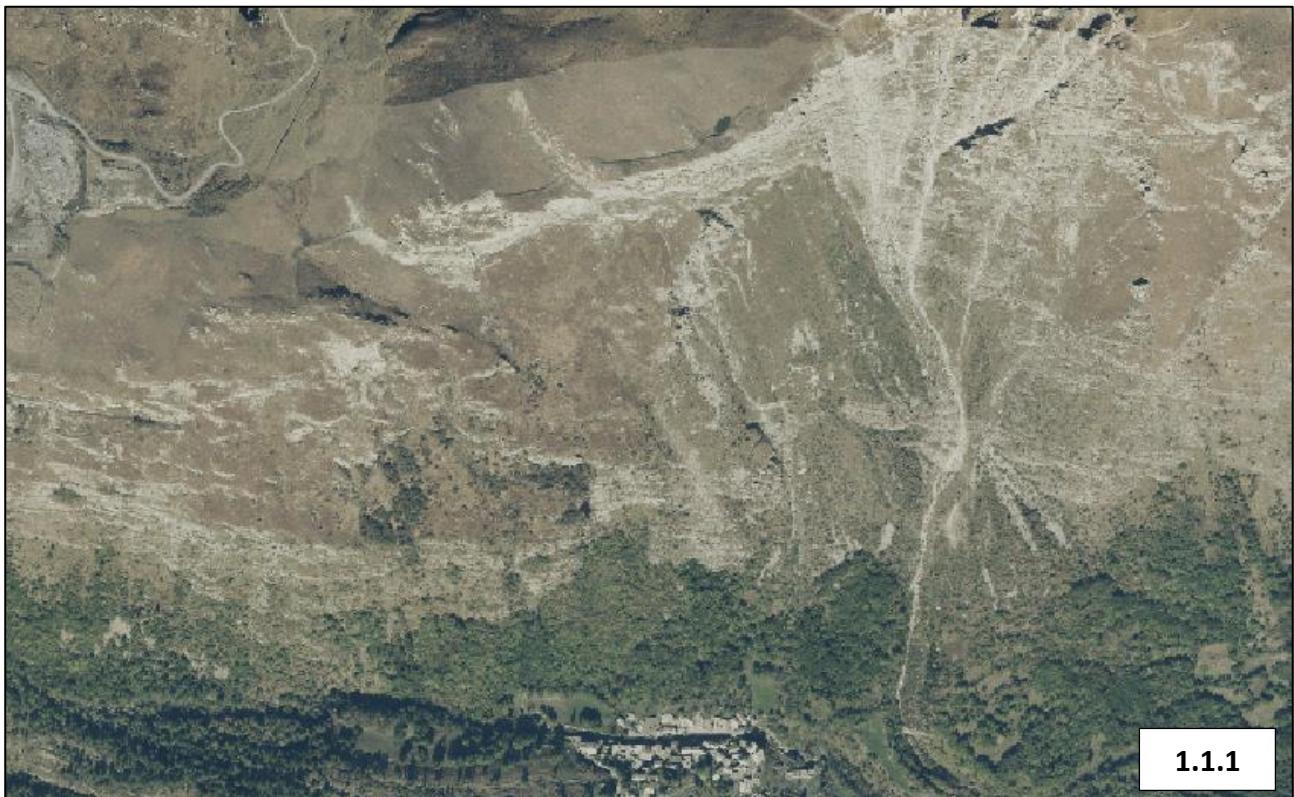
TAV 2 - Distribuzione blocchi principali – Evento 10/2024

Allegato 1 – Tavole settori critici

1. PREMESSA

1.1. Ubicazione e oggetto dello studio

Lo studio è stato condotto al fine di fornire un'analisi geologico - geomorfologica propedeutica alla realizzazione di interventi di mitigazione del rischio lungo il versante a monte del paese (Ortofoto AGEA 2021 in Fig. 1.1.1 e BDTRE Regione Piemonte 1.1.2).



In riferimento al Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018 (NTC2018) e alla relativa Circolare 21 gennaio 2019 n. 7 C.S.LL.PP., lo studio ha per oggetto la Relazione geologica (NTC2018 § 6.2.1), con particolare riferimento al rischio connesso a fenomeni di crollo; non sono oggetto del presente incarico altri aspetti di carattere geotecnico - progettuale ed ambientale.

L'analisi geologica, geomorfologica e strutturale è stata condotta mediante rilievi di terreno e fotointerpretazione con l'ausilio di DTM e ortofoto derivanti sia da dati esistenti ("DTM ICE" Regione Piemonte e "MNT RGE ALTI® IGN-F, Institut National de l'information Géographique et Forestière), sia da elaborazioni fotogrammetriche (volo da drone ed elaborazioni a cura di SRIA, 2025).

Per lo svolgimento dello studio si è fatto riferimento anche ai dati esistenti fra il quali il PAI, il PGRA, gli allegati geologici alla Variante Strutturale n°2 di adeguamento al PAI del PRGC (Geol. Z. Vangelista, 2020), la cartografia geologica ufficiale e le banche dati tematiche disponibili.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

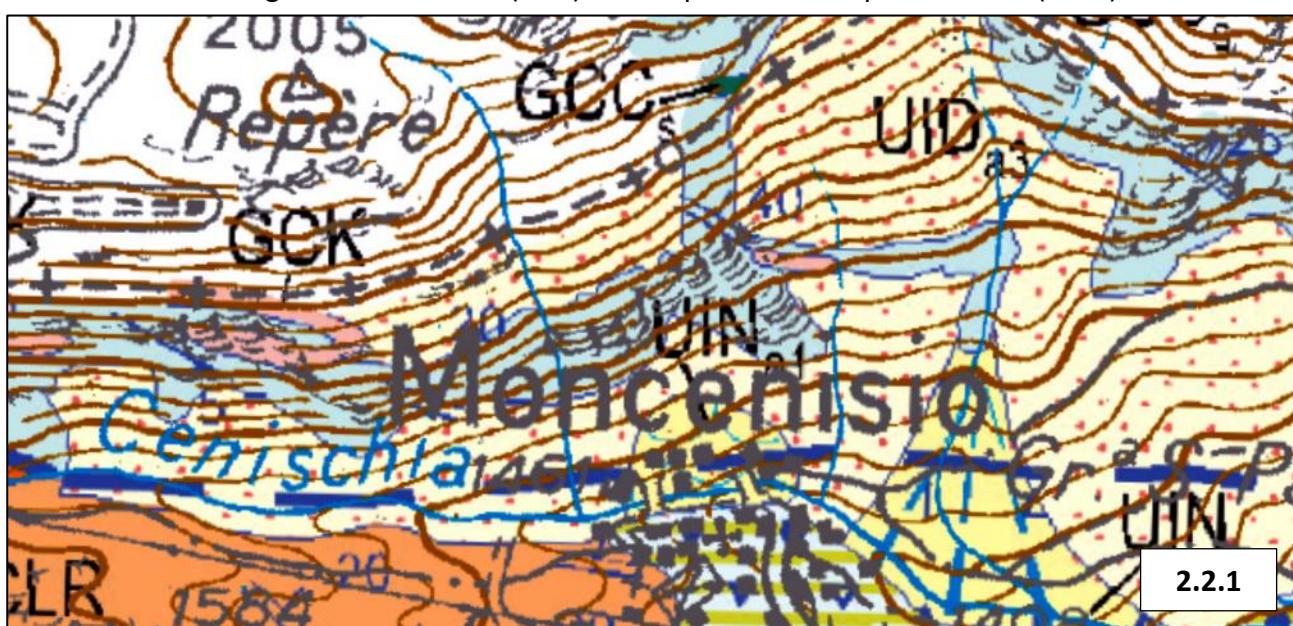
2.1. Inquadramento geologico – strutturale

L'area è caratterizzata dalla presenza delle unità della Zona Piemontese a Nord (Unità di Puis – Venaus, Complesso di Venaus), e a Sud dalle falde pennidiche (Unità dell'Ambin, Complesso di Clarea), separate da un contatto tettonico ad andamento Est-Ovest che coincide in buona parte con il T. Cenischia; in Fig. 2.1.1 è riportato uno stralcio dello Structural Model Of Italy (CNR, 1990)

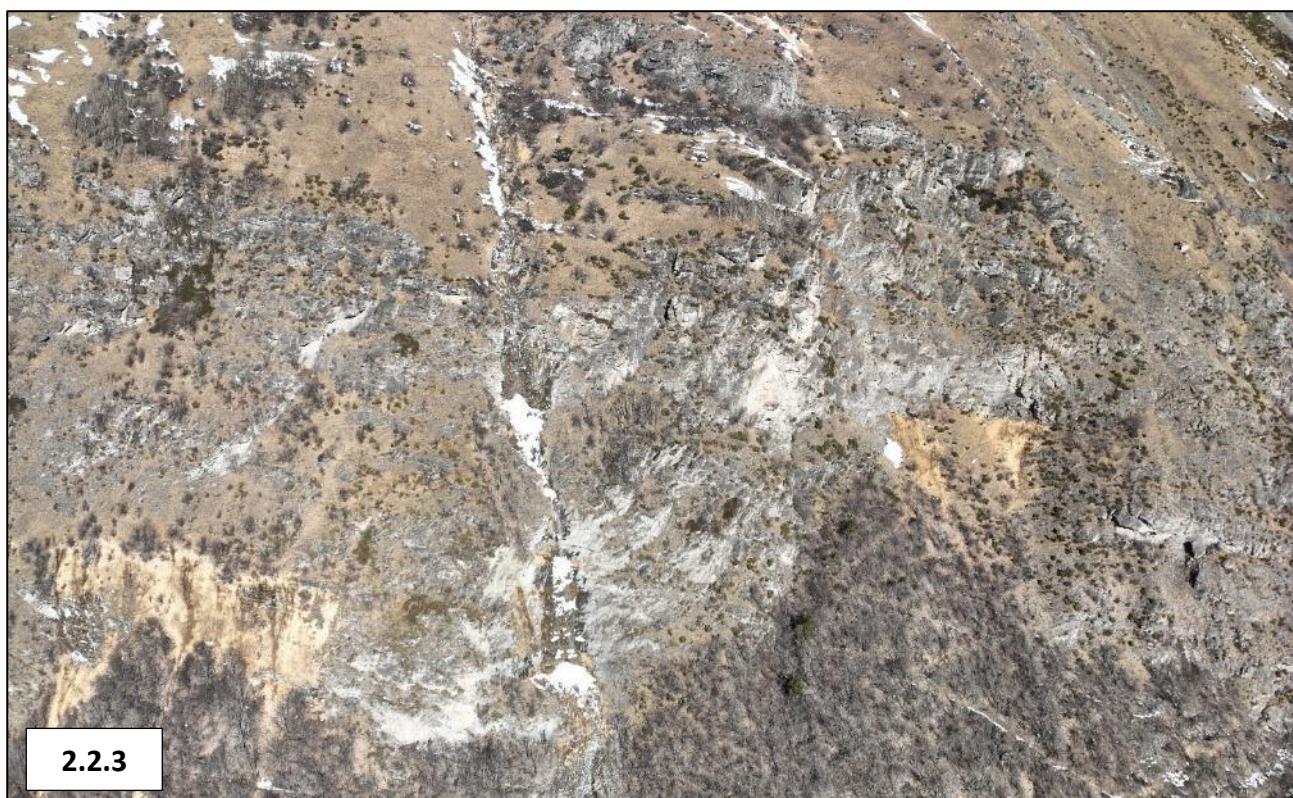


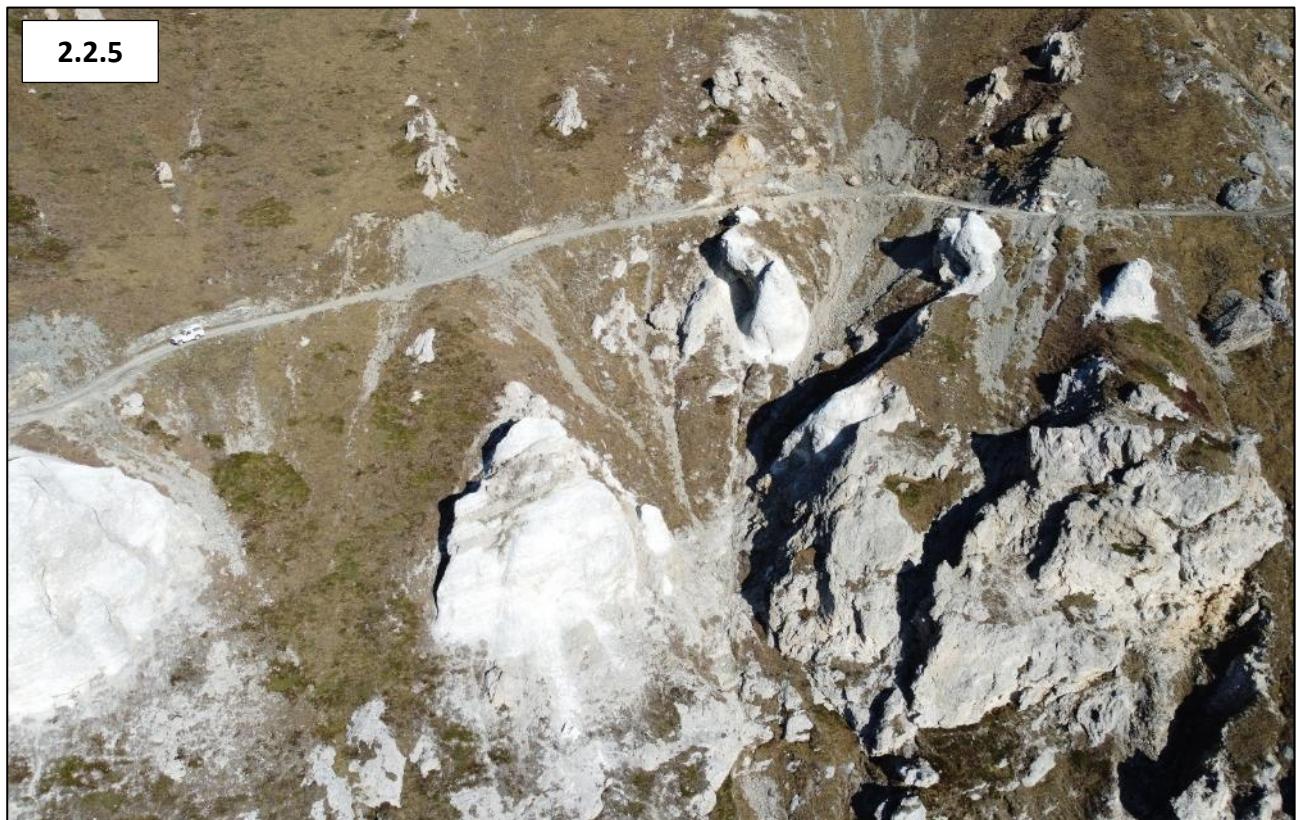
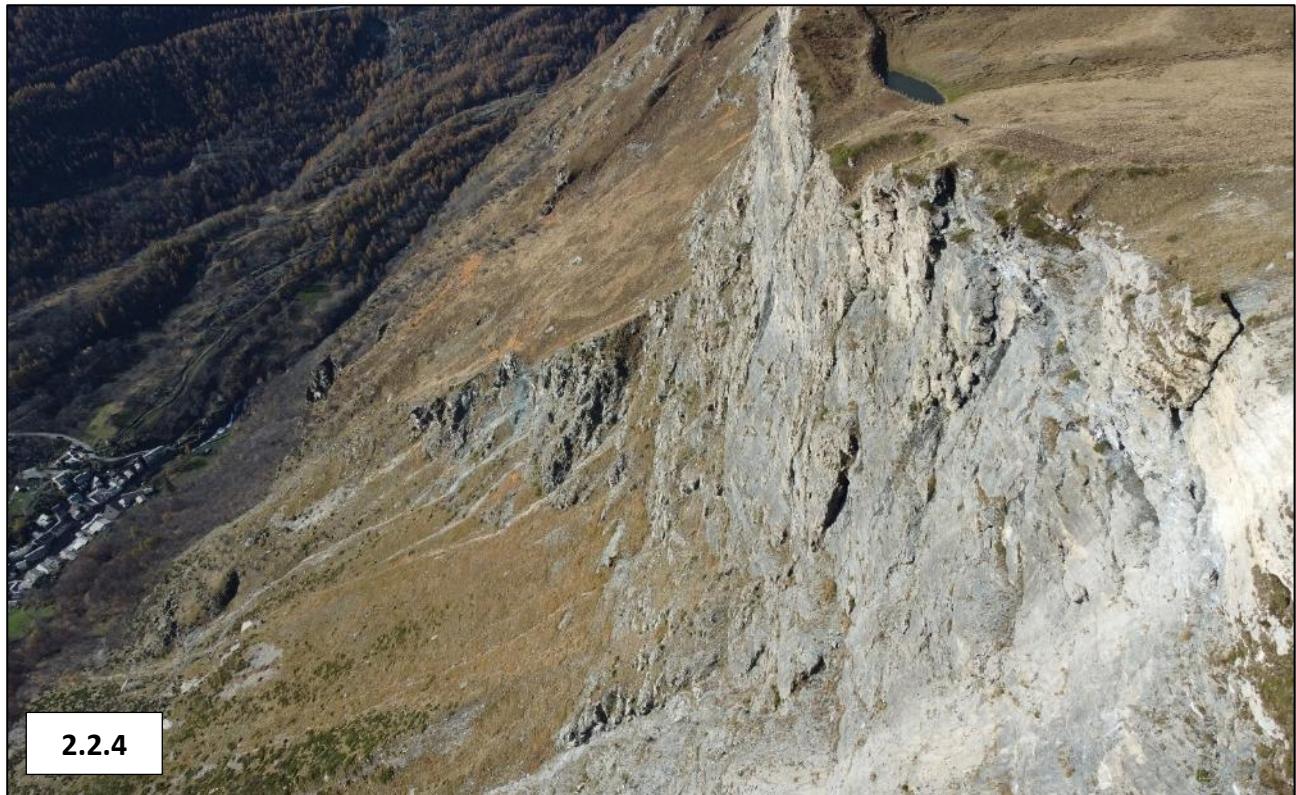
2.2. Cartografia geologica

Dall'esame del Foglio n°153 "Bardonecchia" del CARG (Fig. 2.2.1) si evince che il versante è impostato nel Complesso di Chiomonte - Venaus (GCC) costituito da calcescisti con livelli marmorei ed intercalazioni di gneiss albitici, micascisti e paragneiss; sono presenti anche lenti di quarziti micaceo-cloritiche e gneiss leucocratici (GCK) e di serpentiniti e serpentinoscisti (GCC_s).

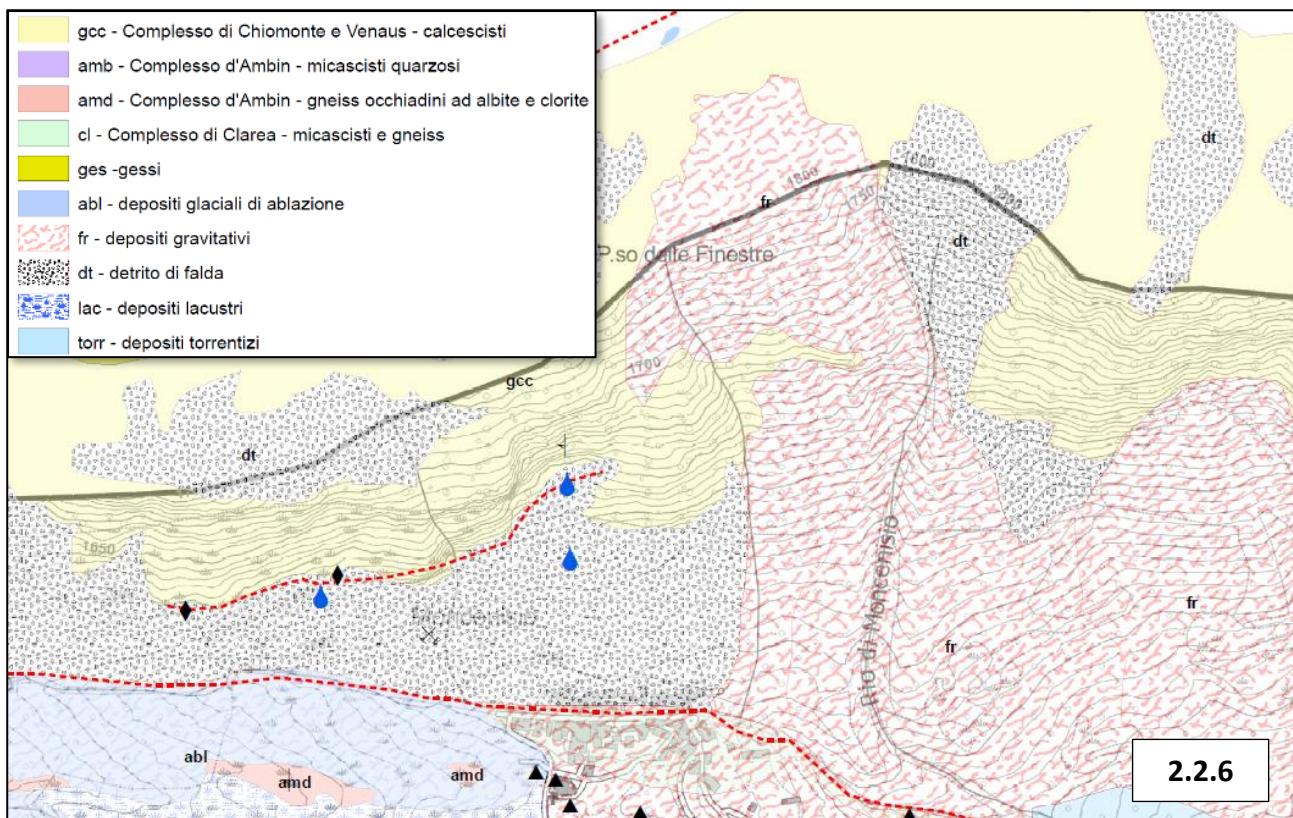


Nel Foglio n°776 "Lanslebourg Mont-d'Amboin" della Carte Géologique de France alla scala 1:50000 (Fig. 2.2.2) il settore di versante in esame è costituito da litotipi della Zona Piemontese: nella parte medio - bassa (Fig. 2.2.3) da calcescisti e marmi impuri (CsC) con lenti di serpentiniti (Λ) e metagabbri (Θ), e nella parte medio - alta (Fig. 2.2.4) da marmi fillitici; al di sopra è presente una fascia costituita da gessi, brecce dolomitiche e carniole (Fig. 2.2.5).





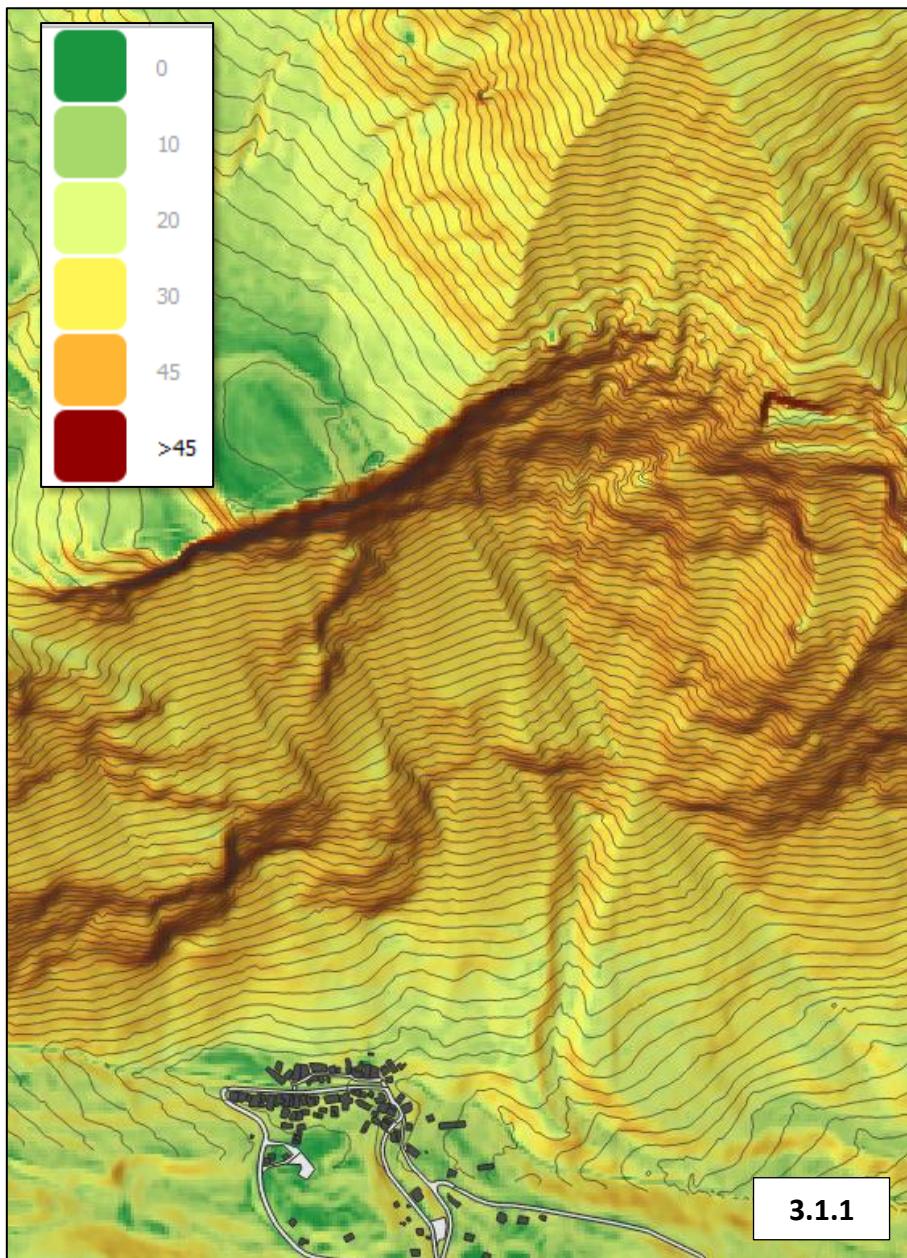
Nella “*Carta geologica*” del PRG (stralcio in Fig. 2.2.6), il versante è costituito dai calcescisti del Complesso di Chiomonte e Venaus, da depositi gravitativi e detrito di falda.



3. GEOMORFOLOGIA

3.1. Inquadramento geomorfologico

Il versante sinistro della Val Cenischia nel settore a monte dell'abitato di Moncenisio - Ferrera, è caratterizzato dalla presenza di due fasce di pareti rocciose, quella alta subverticale fra 1950 e 2000-2100 m s.l.m. ed una inferiore più irregolare nella fascia altimetrica 1500 – 1750 m s.l.m., separate da ripidi pendii erbosi con balze rocciose minori ed affioramenti sparsi; nella parte bassa il versante si raccorda al fondovalle con pendii boscati la cui morfologia è quella di conoidi (di genesi mista e/o di accumulo detritico o crollo), talora coalescenti. Gli elementi più significativi sono rappresentati dallo svuotamento che comprende sia la parte alta sotto la punta del Côte du Lamet, sia quella delle sottostanti pareti rocciose del Passo delle Finestre. In Fig. 3.1.1 l'assetto morfologico è evidenziato dalla carta delle pendenze con curve di livello di equidistanza 10 m, interpolate dal DTM con passo 1 m "MNT RGE ALTI®" dell'IGN-F (Institut National de l'information Géographique et Forestière).

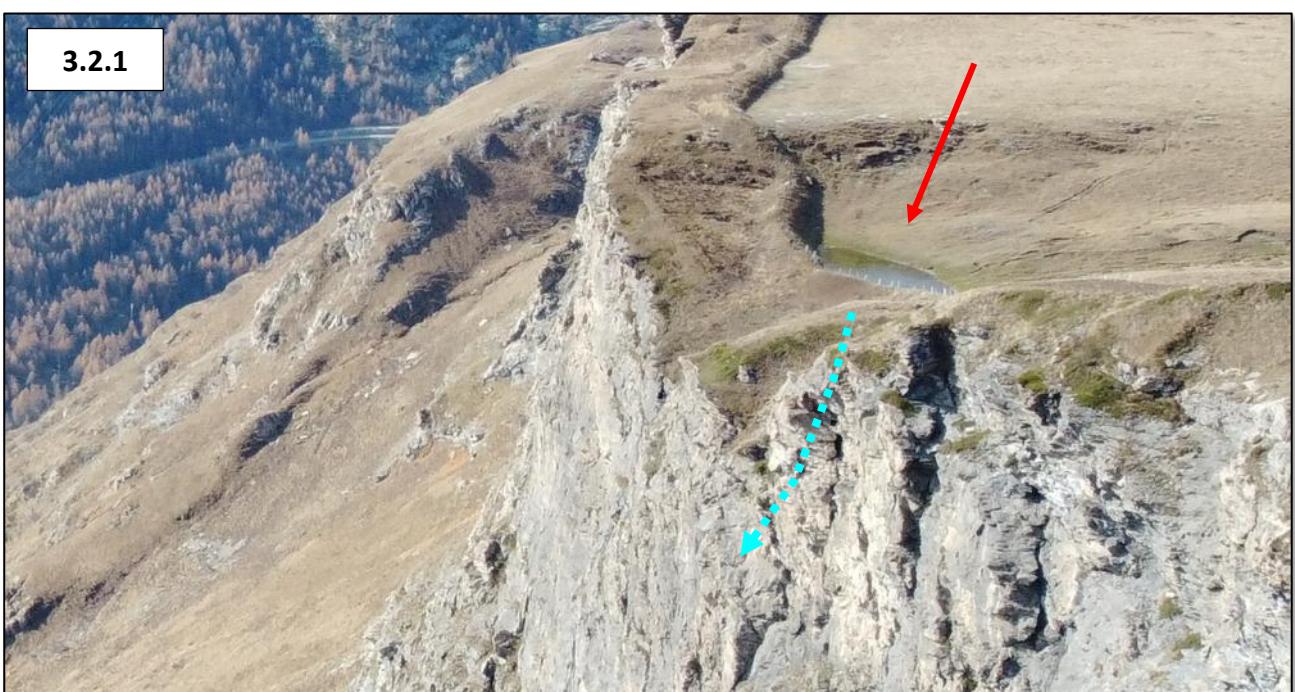


3.2. Carta geologico – geomorfologica

I risultati dell'analisi sono rappresentati nella **TAV. 1** "Carta geologico – geomorfologica" dove:

- gli affioramenti del substrato sono stati perimetinati prevalentemente dalle ortofoto aeree con l'ausilio dei DTM disponibili; agli affioramenti sono poi stati associati i litotipi (sulla base della cartografia geologica italiana e francese di cui al Par. 2.2);
- il contatto tettonico in corrispondenza della fascia di gessi e brecce è quello riportato nelle carte geologiche con andamento adattato alla scala di rappresentazione e al limite visibile con i marmi e calcescisti; lungo la parete bassa a NW dell'abitato è riportato un piano di taglio cui corrispondono varie emergenze idriche allineate e con tendenza al deposito di travertini (settore individuato in carta e in legenda); un tipo di circolazione simile può essere quella connessa alle sorgenti captate delle "Fontane" a monte del paese;
- sono indicate solo le fratture principali rappresentabili alla scala di lavoro;
- le coltri superficiali sono state distinte in "detritiche" e "detritico - colluviali", non vegetate o boscate; in ogni caso si tratta di depositi grossolani e con presenza di blocchi riferibili a fenomeni di crollo e/o crollo in massa;
- i blocchi cartografati sono solo quelli principali e/o significativi, con approfondimento nella parte bassa del versante a ridosso dell'abitato;
- le nicchie di distacco sono quelle principali ben riconoscibili, e per i crolli è stato indicato il ciglio superiore delle pareti soggette a distacchi;
- gli orli morfologici sono connessi sia a nicchie di distacco rimodellate, sia al coronamento di fenomeni di erosione rimontante;
- i canali con trasporto solido si riferiscono sia a processi di tipo torrentizio, sia a transito di blocchi di crollo e valanghe;
- nella zona sopra il Passo delle Finestre è indicata una depressione chiusa con un laghetto (Fig. 3.2.1), per la quale non è chiaro se l'origine sia connessa a fenomeni di dissoluzione carsica (dolina), e/o ad interventi antropici connessi al sistema di fortificazioni; la depressione e il laghetto possono comunque favorire l'alimentazione di circolazioni idriche nelle fratture dell'ammasso roccioso proprio a monte del ciglio della parete, con possibile innesco di fenomeni di instabilità;

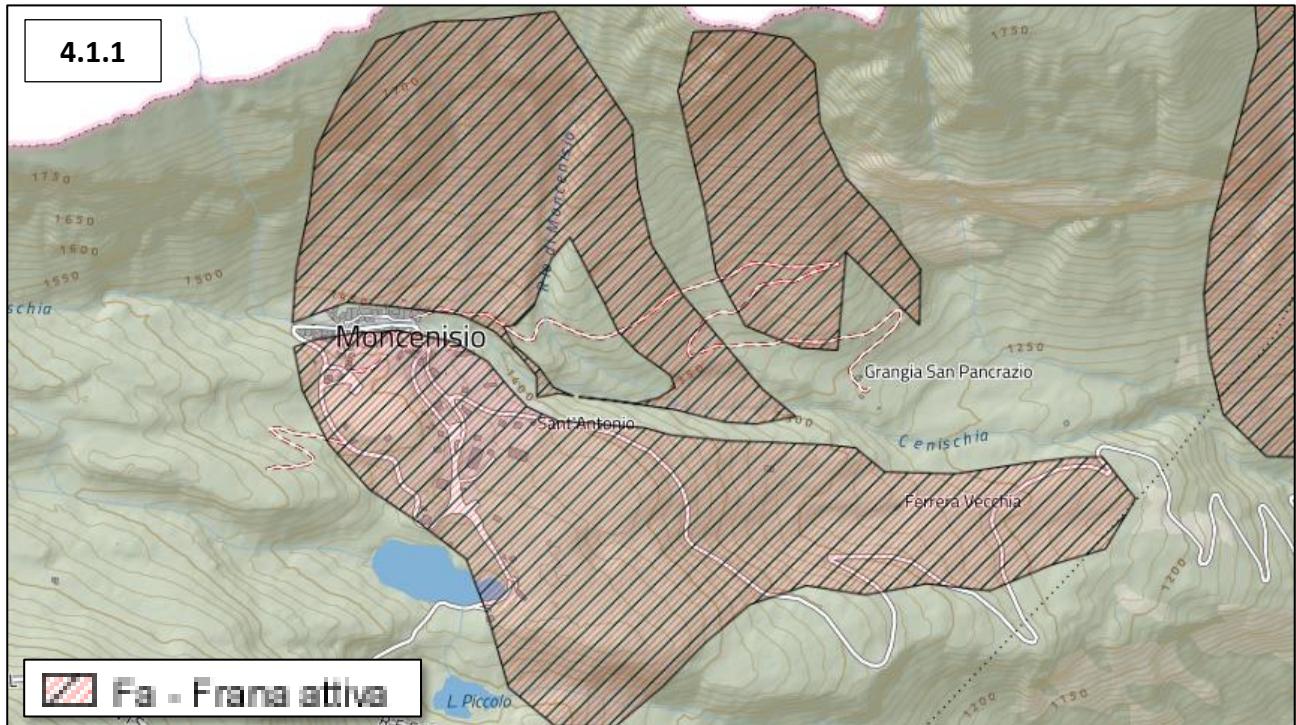
3.2.1



4. FENOMENI DI DISSESTO

4.1. Dati esistenti ed idoneità all'utilizzazione urbanistica

Per quanto concerne le frane nel **PAI** (Piano Assetto Idrogeologico - quadro del dissesto, Fig. 4.1.1), il settore di versante a monte dell'abitato di Moncenisio è indicato come Fa - frana attiva, con una perimetrazione molto vasta che si estende anche a Sud e Sud-Est dell'abitato.

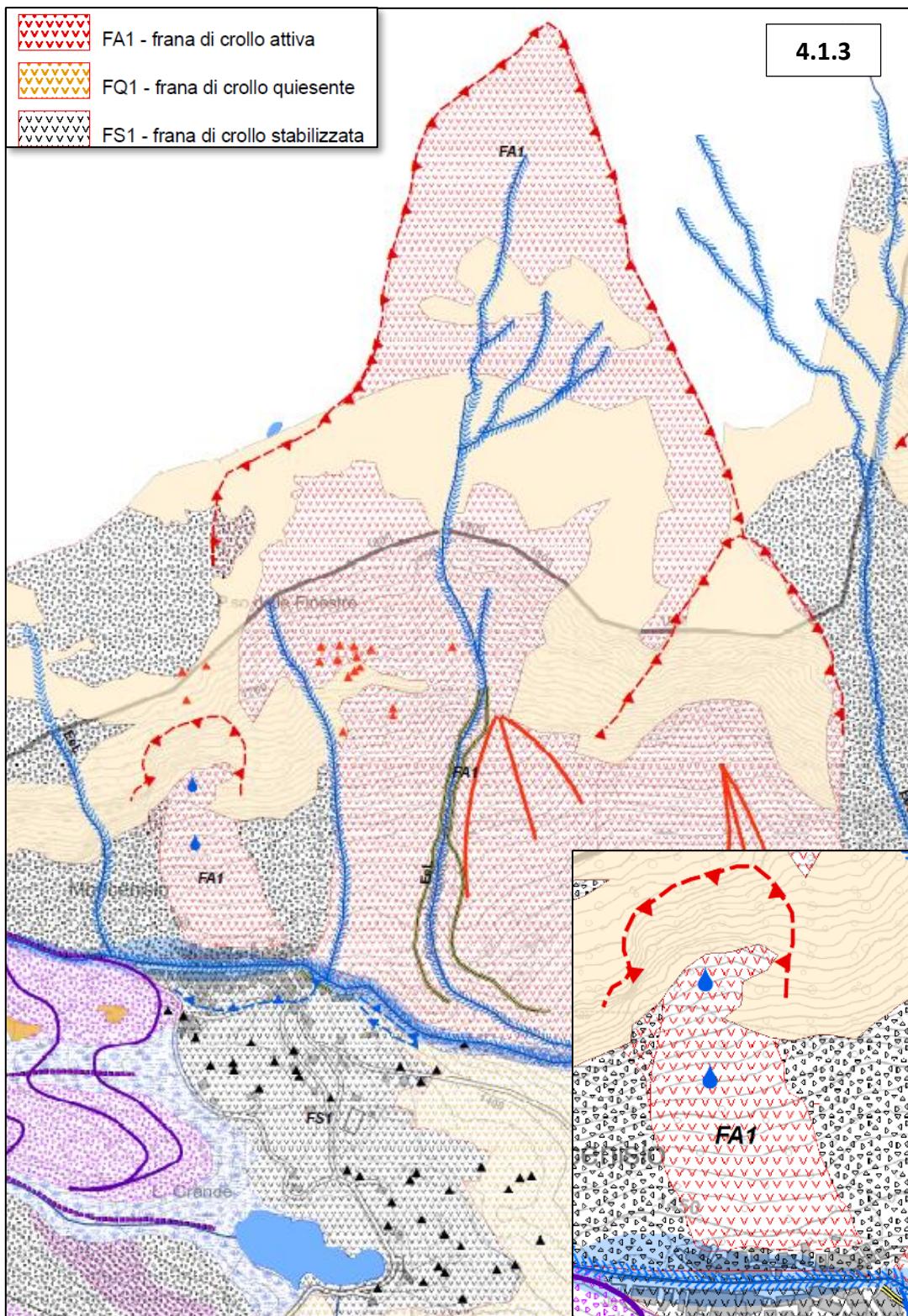


Nel **SIFRAP** (Sistema Informativo Frane in Piemonte, Fig. 4.1.2) è riportata la perimetrazione di una frana il cui stato di attività è “stabilizzato” (meccanismo non determinato), con una perimetrazione complessiva simile a quella del PAI.

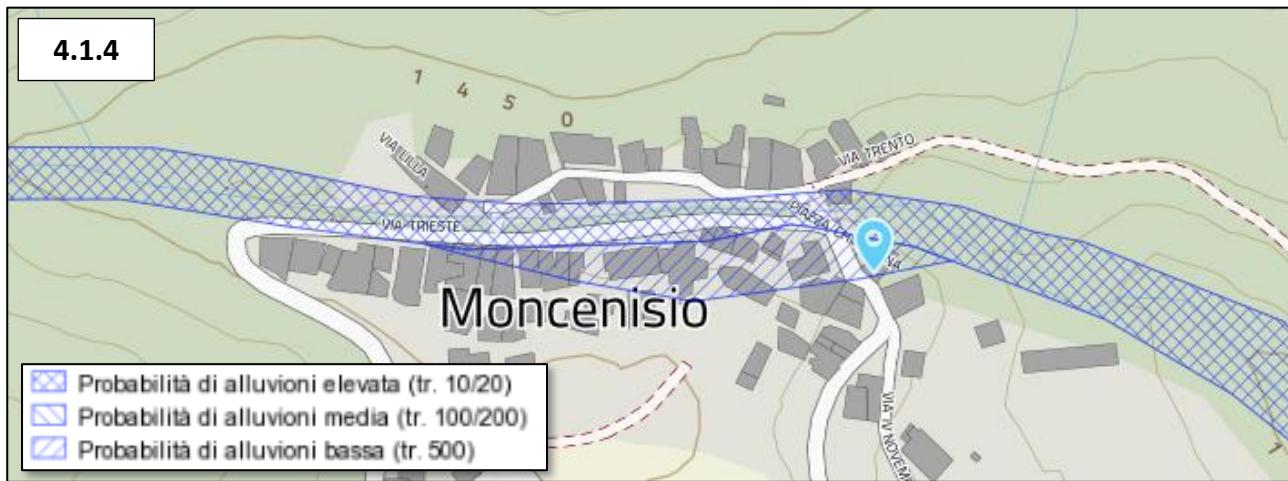


Sia il PAI che il SIFRAP quindi attribuiscono il grande accumulo di blocchi che caratterizza l'abitato e la zona a Sud ed Est ad un fenomeno di svuotamento la cui nicchia è individuata in corrispondenza della fascia di gessi e carniole che affiora in Francia intorno a quota 2100 ÷ 2200 m s.l.m..

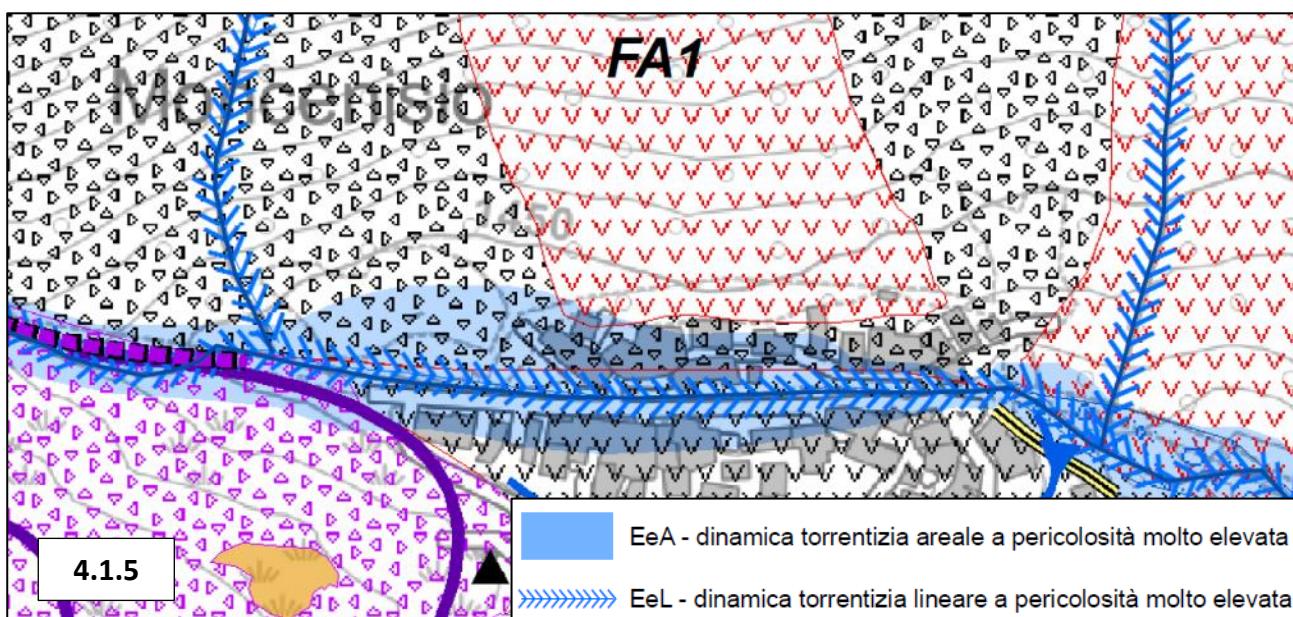
Negli allegati geologici del PRGC (Fig. 4.1.3) vengono introdotte delle distinzioni che comprendono una frana attiva di crollo FA1 a monte dell'abitato e la grande frana attiva FA1 più ad Est; gli accumuli a S-SE dell'abitato sono differenziati un settore a monte stabilizzato (FS1), e quello a valle quiescenti (FQ1).



Per quanto concerne la dinamica torrentizia nel **PGRA** (Piano Gestione Rischio Alluvioni, Fig. 4.1.4) è riportato lo scenario di alluvioni lungo l'alveo del T. Cenischia in corrispondenza dell'abitato. La probabilità di alluvioni varia da bassa, in sponda destra, a elevata, per una l'alveo e una stretta fascia in sponda sinistra.



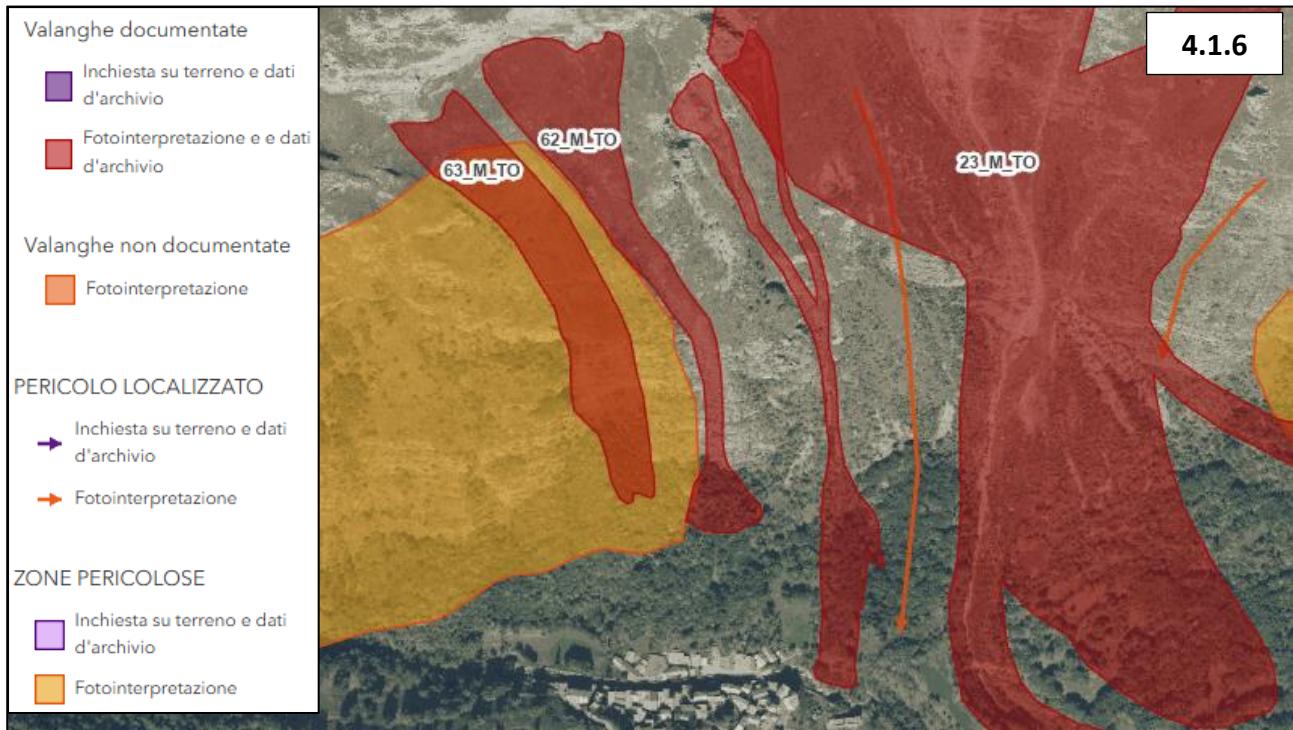
Nel PRGC (Fig. 4.1.5) sono indicati i fenomeni lineari a pericolosità molto elevata (EeL) lungo i due rii che confluiscono nel T. Cenischia rispettivamente ad W e E dell'abitato, e l'area inondabile a pericolosità molto elevata (EeA) che si estende ai lati del T. Cenischia comprendendo parte dell'abitato.



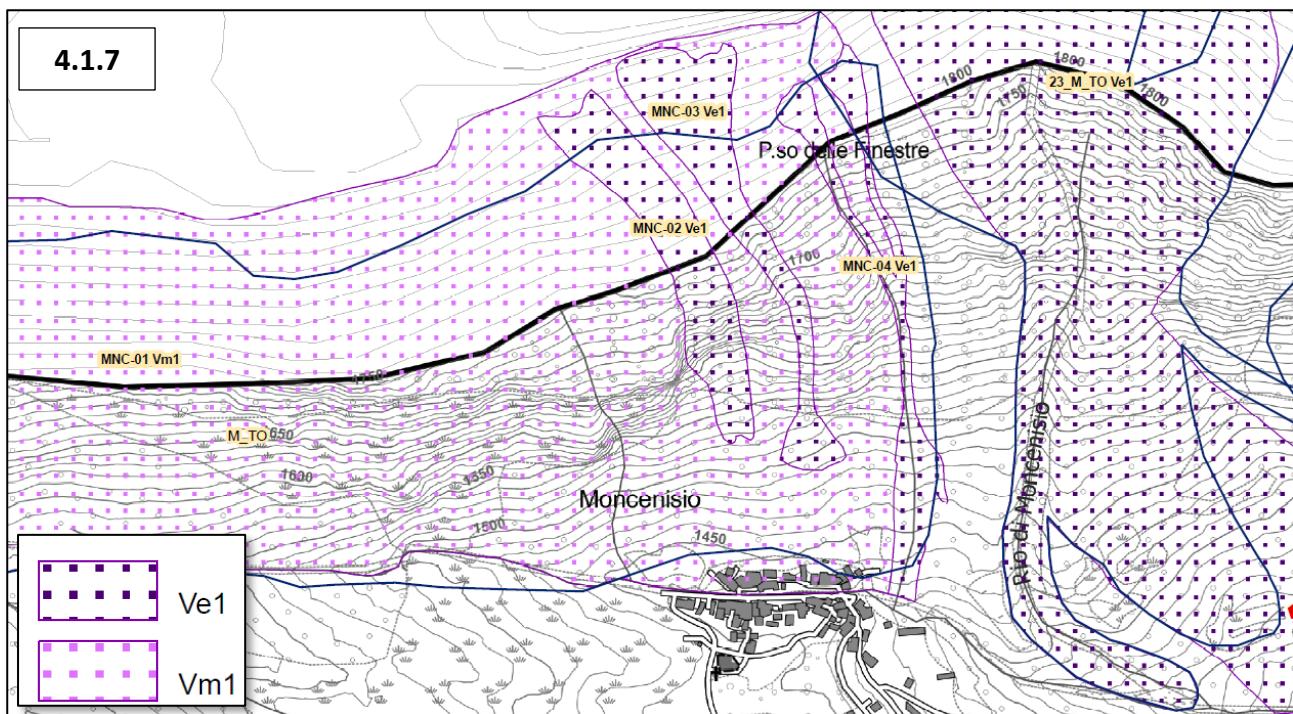
Per quanto concerne le valanghe, nel **SIVA** (Sistema Informativo Valanghe, Fig. 4.1.6), sono individuate le valanghe:

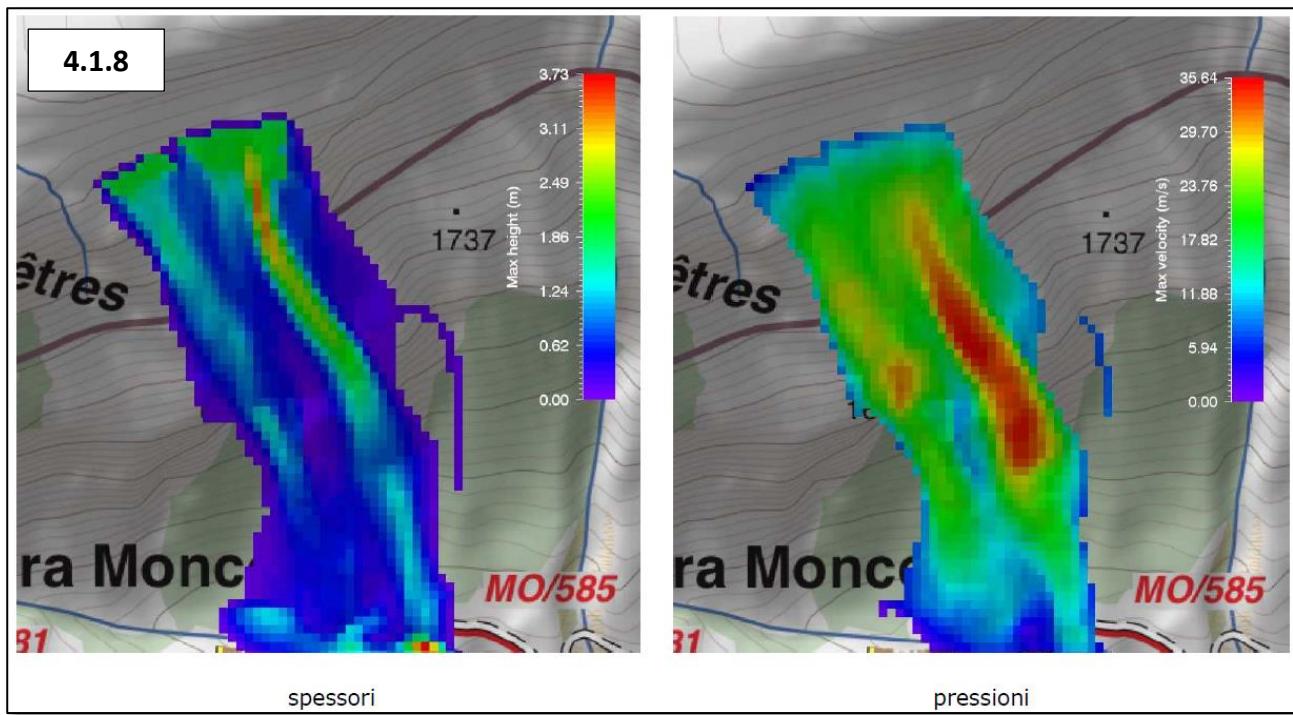
- 63_M_TO "Fontane" con quota minima di arresto a 1570 m;
- 62_M_TO "Passo della Finestra" con quota minima di arresto a 1490 m;
- 61_M_TO "Sant'Anna" con arresto nell'alveo del T. Cenischia poco ad Est dell'abitato;
- Una "Zona pericolosa" che comprende tutto il versante ad Ovest delle valanghe n°62 e 63;

In tutti i casi non è disponibile documentazione aggiuntiva (foto, rilievi, notizie di danni, etc.). Più ad Est è presente il grande sito valanghivo 23_M_TO "Costa Lamet" lungo il Rio di Moncenisio, che storicamente ha causato danni alla viabilità e alle malghe.



Le perimetrazioni del SIVA sono sostanzialmente confermate anche nell'elaborato A4 "Carta delle valanghe" degli allegati geologici al PRGC del Comune di Moncenisio (stralcio in Fig. 4.1.7); nello studio però sono riportate le simulazioni numeriche dalle quali si evince le due valanghe possono raggiungere l'abitato per tempi di ritorno $Tr = 30$ anni (Fig. 4.1.8).



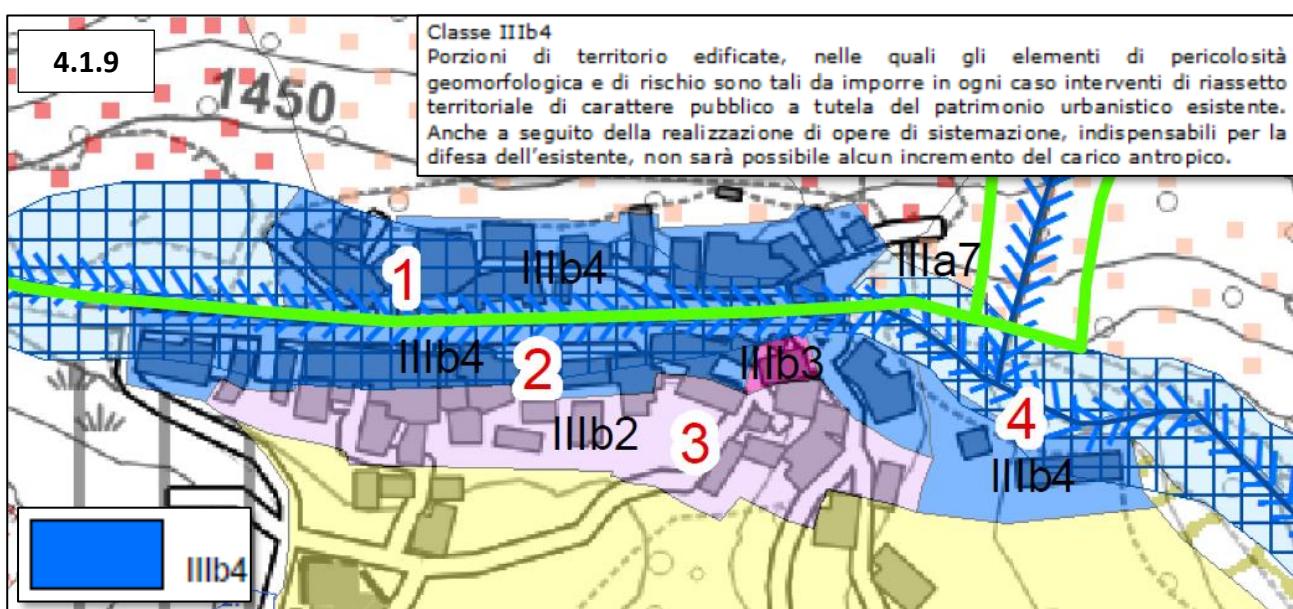


Nella "Carta di sintesi della pericolosità geomorfologica e dell'idoneità all'utilizzazione urbanistica" (Fig. 4.1.9) tutto l'abitato in sponda sinistra ricade in **Classe IIIb4**: "porzioni edificate nelle quali gli elementi di pericolosità geomorfologica e di rischio sono tali da imporre in ogni caso interventi di riassetto territoriale di carattere pubblico a tutela del patrimonio urbanistico esistente".

Nella Scheda 1 del cronoprogramma degli interventi è indicato:

Descrizione: L'area è soggetta a rischio di caduta massi, a rischio valanghe provenienti dal versante e a rischio idraulico.

Nuove opere: È necessario, per garantire una maggiore sicurezza, la realizzazione di una briglia selettiva a monte dell'abitato. È necessaria la realizzazione di un vallo paramassi e paravalanghe sulla pendice in sinistra del Cenischia, a monte dell'abitato.



4.2. Dinamica torrentizia

Nella parte alta sono presenti vari impluvi e rii con fenomeni di trasporto solido evidenti (esempio di accumulo recente in Fig. 4.2.1), che però tendono a confluire nel vallone del Rio di Moncenisio (Rio Gorgian sul catastale), e nel grande conoide ad Est dell'abitato.



Il rio ad Ovest dell'abitato (Rivo Giasset) è interessato da fenomeni di trasporto solido ed erosivi che non sembrano essere di magnitudo particolarmente elevata: dall'esame di foto aeree di varia epoca (a partire dal 1981, freccia azzurra in Fig. 4.2.2), non si sono osservati indizi di debris-flow o processi erosivi, salvo la porzione immediatamente a valle della cascata, dove però si sovrappongono fenomeni di crollo e probabilmente anche di distacchi di neve o piccole valanghe. Il corso d'acqua è stato comunque regimato con opere di ingegneria naturalistica (Fig. 4.2.3) e con un argine in palificata doppia nel tratto terminale in sponda sinistra. Il rio ad Est dell'abitato è caratterizzato da un alveo poco inciso lungo il quale si sovrappongono frequenti fenomeni torrentizi, valanghivi e di crollo (freccia gialla in Fig. 4.2.1).



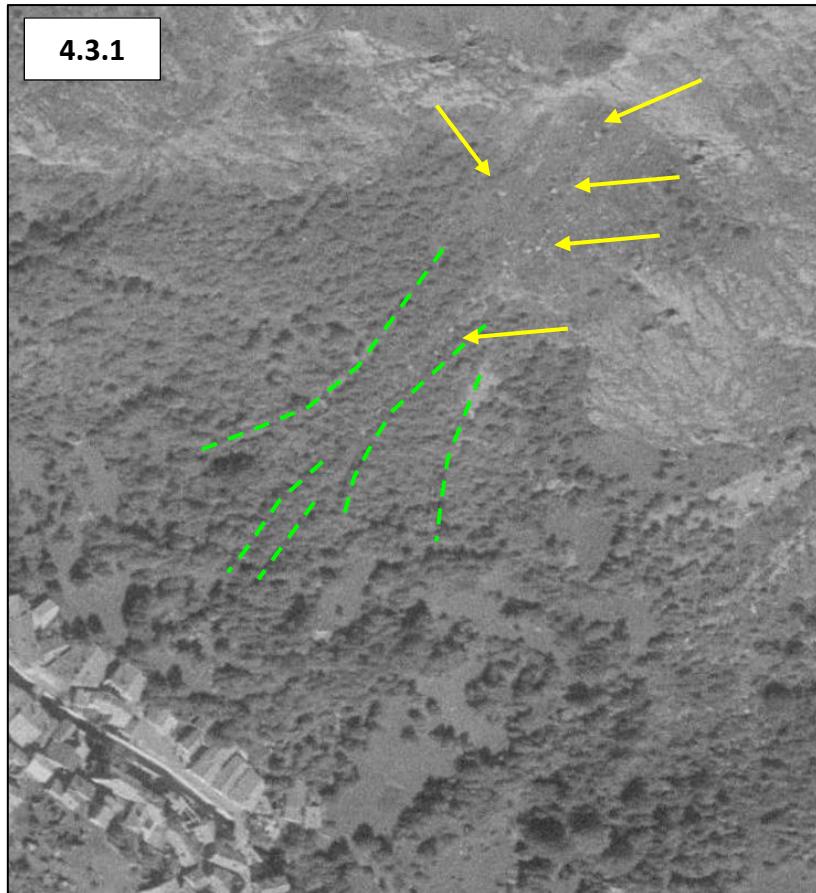
4.2.3



4.3. Valanghe

Per quanto concerne le valanghe si conferma in generale quanto definito dal SIVA e nell'ambito del PRGC. Nel caso della valanga n° 63_M_TO, nelle foto aeree del 1983 (Fig. 4.3.1), si osservano delle tracce penetranti che sembrano estendersi a valle un po' oltre il perimetro del SIVA (dato confermato dalle simulazioni e dall'immagine riportata nella "Relazione tecnico - descrittiva" del PRGC (Geol. Z. Vangelista, 2020); a monte si notano alcuni blocchi che potrebbero esser connessi a fenomeni di crollo ma anche trascinati dalla massa nevosa.

4.3.1



Per La valanga n°62_M_TO, si osservano chiaramente gli effetti nella zona di arresto degli eventi ricorrenti (Fig. 4.3.2).



4.4. Fenomeni gravitativi

Per quanto concerne i fenomeni di crollo si rimanda ai capitoli successivi. Le frane di tipo superficiale sono diffuse soprattutto nella parte alta (versante Sud della Côte du Lamet) ed interessano modesti spessori di depositi detritico - colluviali e talora porzioni superficiali del substrato (Fig. 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3).

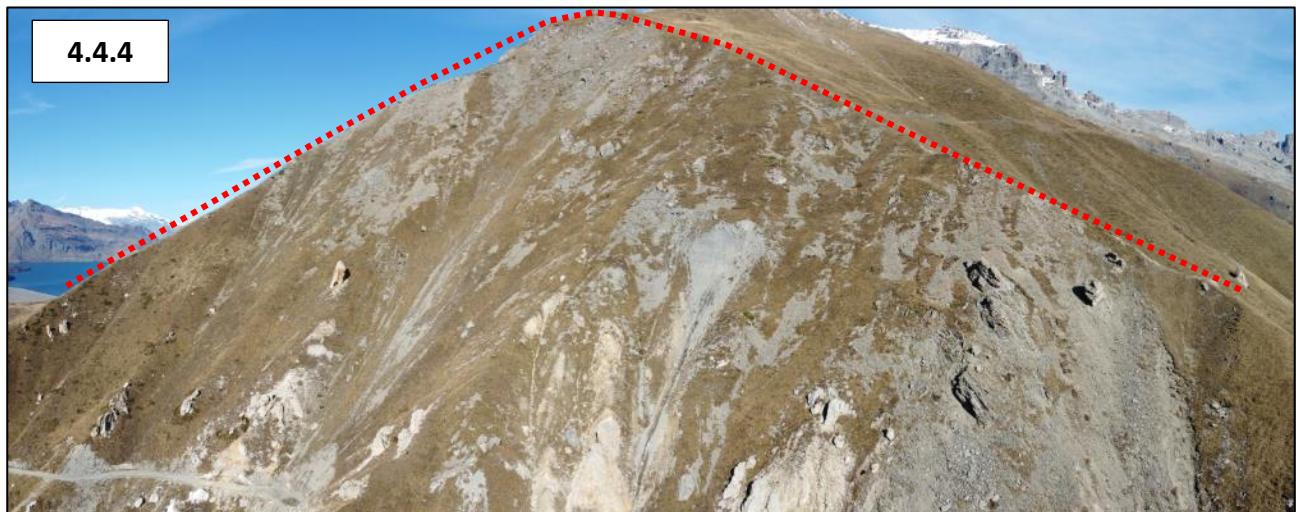


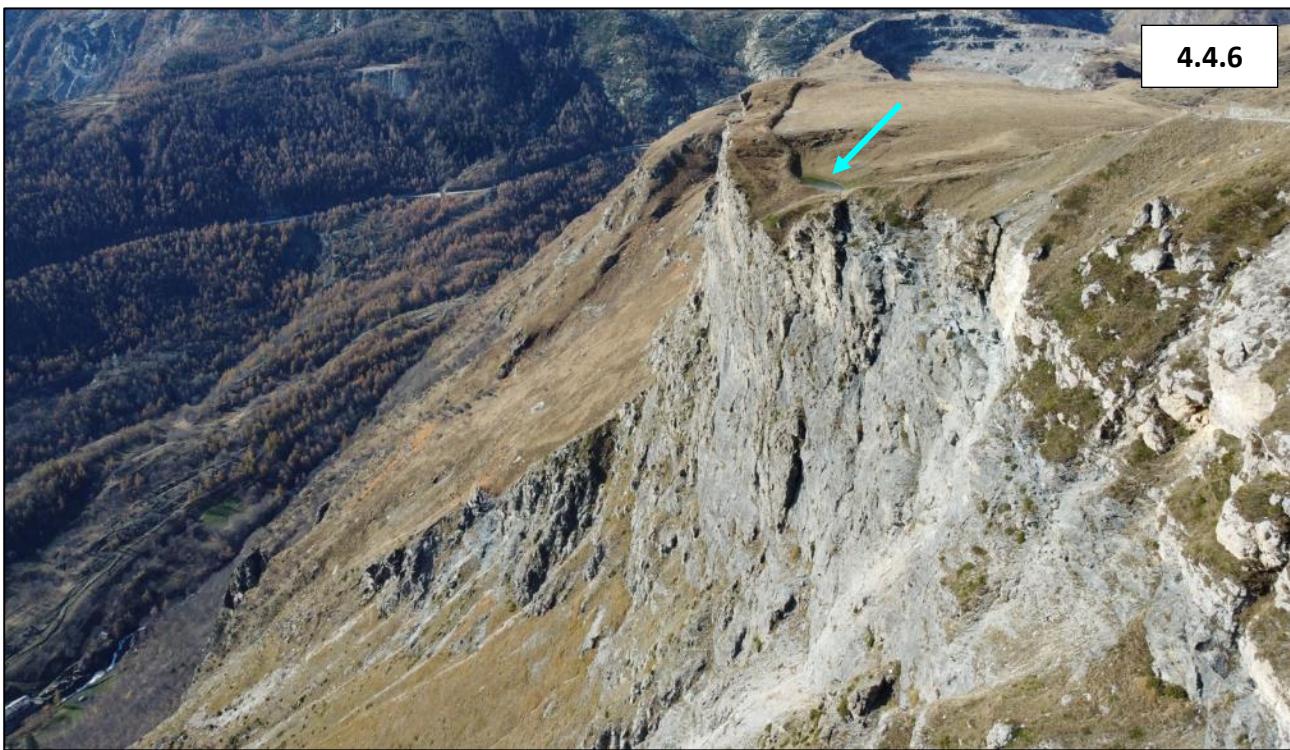


Per la grande frana di cui al Par. 4.1 (fenomeno caratterizzato da un cinematismo complesso a controllo strutturale), le immagini che seguono mostrano:

- il coronamento della parte più alta (Fig. 4.4.4);
- la fascia di affioramenti di gessi, brecce e carniole (Fig. 4.4.5);
- le pareti del Passo delle Finestre con il laghetto appena sopra il ciglio (Fig. 4.4.6);
- lo svuotamento e la parte bassa (Fig. 4.4.7 e 4.4.8) con il grande accumulo del fondovalle.

Senza entrare nel dettaglio, si concorda con l'ipotesi avanzata negli allegati geologici del PRG dal Geol. Z. Vangelista, circa la possibilità che il grande accumulo del fondovalle possa essere interpretato anche come una "marocca" (accumulo di frana trasportato dal ghiacciaio), soprattutto in riferimento all'assenza di blocchi di gessi o brecce.





4.4.7**4.4.8**

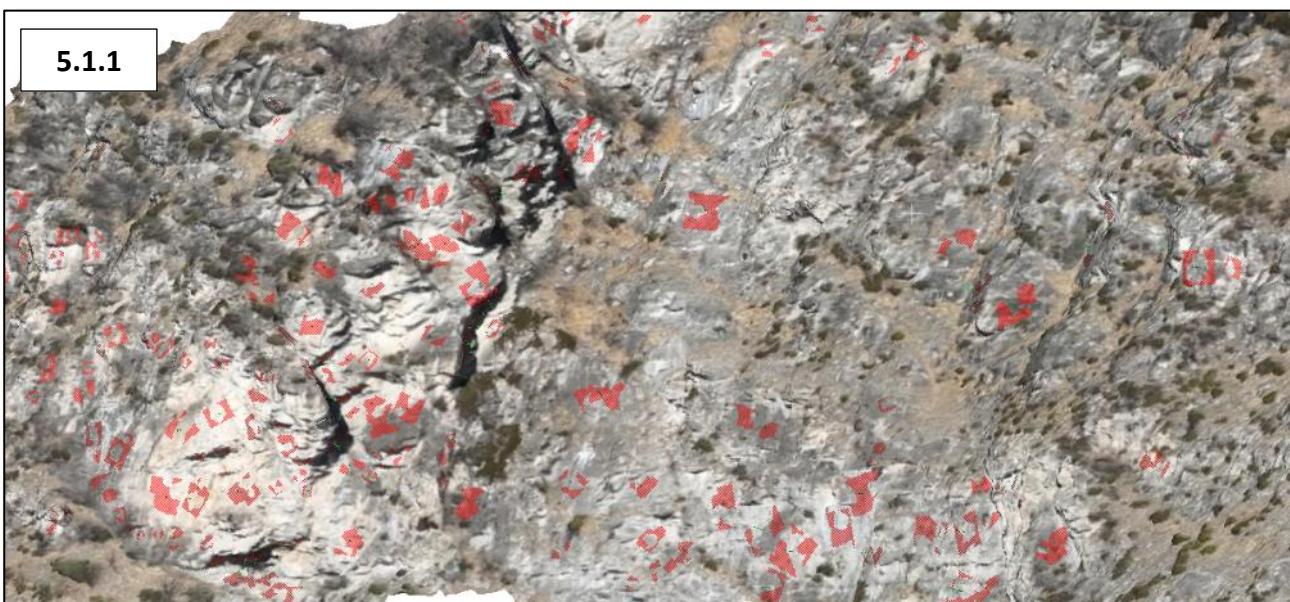
5. ANALISI STRUTTURALE

5.1. Analisi da modelli 3D

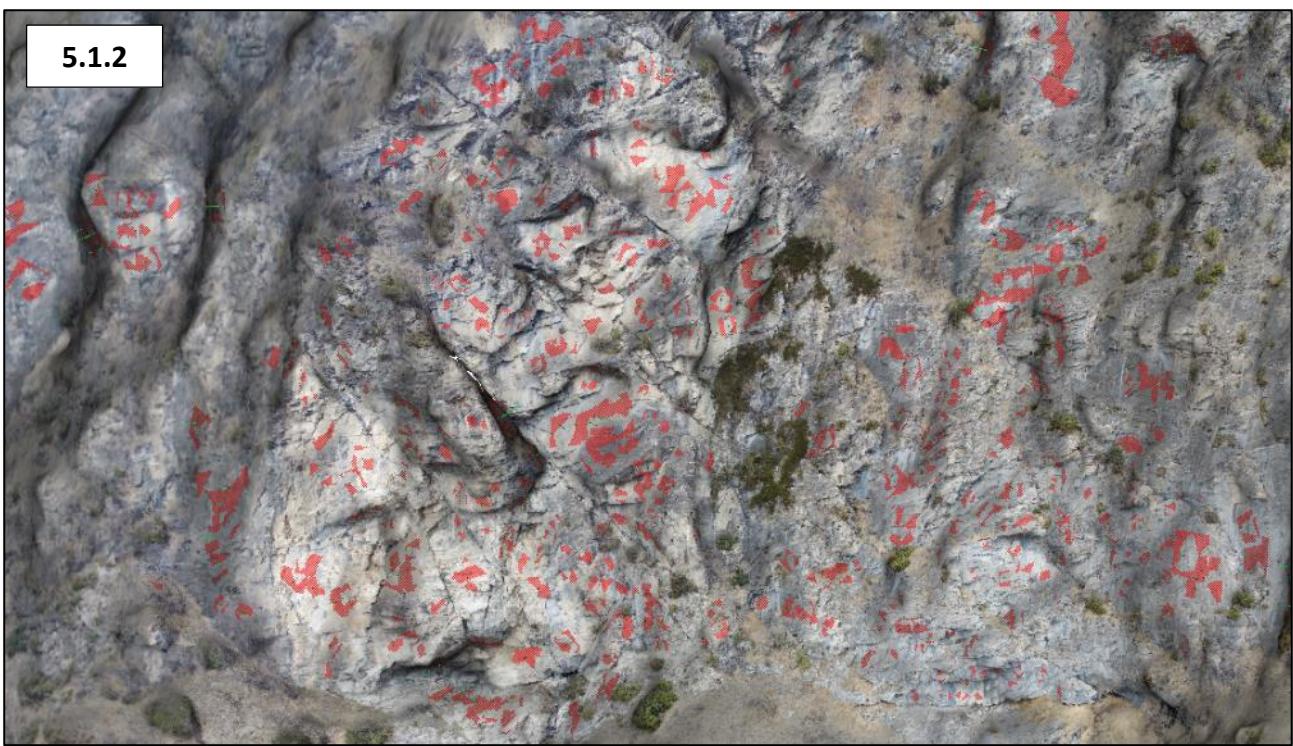
Lungo il versante a monte dell'abitato sono presenti numerose pareti rocciose (di varia altezza, estensione e morfologia), la cui caratterizzazione strutturale - geomeccanica risulta molto difficoltosa sia perché sarebbero necessari lunghi rilievi in parete, sia per le condizioni di sicurezza: durante i rilievi infatti, (svolti nell'inverno fra fine ottobre e marzo), si sono sempre osservati distacchi isolati che rendono pericoloso avvicinarsi al piede della parete; fra l'altro il crollo descritto al paragrafo precedente si è verificato due giorni prima dell'inizio dei rilievi. Si è proceduto dunque con l'analisi strutturale dalla nuvola densa e dalla mesh 3D del rilievo fotogrammetrico (Fig. 5.1.1); per un'analisi di maggior dettaglio gli scriventi hanno eseguito un ulteriore rilievo speditivo con drone (senza GCP, ma con verifica dell'orientazione dal modello elaborato da SRIA), con restituzione di modelli 3D più ravvicinati (esempio in Fig. 5.1.2).

Nelle figure 5.1.3 e 5.1.4 sono riportati i diagrammi di Schmidt con i poli dei piani individuati (rispettivamente n°698 e n°1080 misure). I diagrammi evidenziano un certo grado di dispersione dei dati connesso sia alla qualità del modello 3D, sia alle effettive condizioni degli affioramenti spesso molto fratturati e con settori caratterizzati da giunti poco persistenti e difficilmente misurabili. In Fig. 5.1.5 è riportato il diagramma di Schmidt interpretativo dove sono evidenziati i sistemi principali, individuati anche dal confronto fra i vari set di dati:

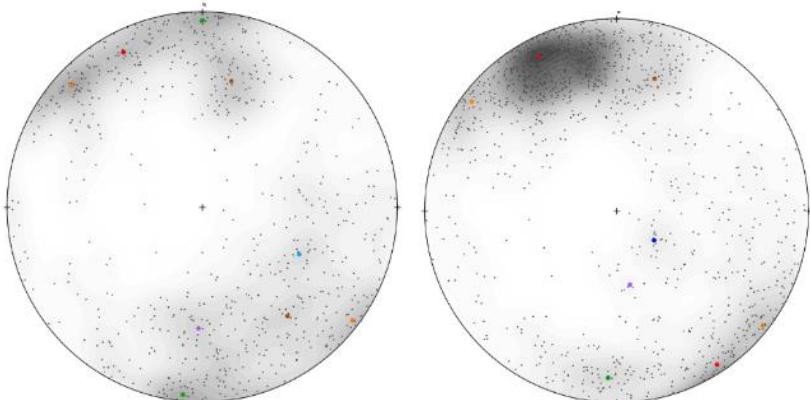
- Ks: scistosità principale che immerge a basso angolo verso NW; sono presenti anche piani leggermente più ruotati verso N (Ks*), ed altri verso Ovest con maggior inclinazione (Ks**); a questo sistema sono riferibili anche alcune strutture a persistenza pluri-decametrica (piani di taglio alla base delle pareti e alcuni allineamenti di tetti)
- K1: piani ad alto angolo, spesso con persistenza decametrica, che immerge verso S-SE; sono presenti anche varianti leggermente ruotate verso E e relativi coniugati (K1a, K1* e K1*a); formano evidenti superfici a franappoggio predisponenti per cinematismi di scivolamento;
- K2: sistema con giacitura media intorno a 3/76, ma piuttosto disperso e con inclinazioni che scendono fino a 55°-60°; in alcuni settori tende a formare speroni strapiombanti;
- K3 e K4: piani con inclinazione media di 60° ed immersione rispettivamente verso SSW e WSW; forma superfici strapiombanti nei settori dove il fronte della parete è SSW-NNE o N-S.



5.1.2

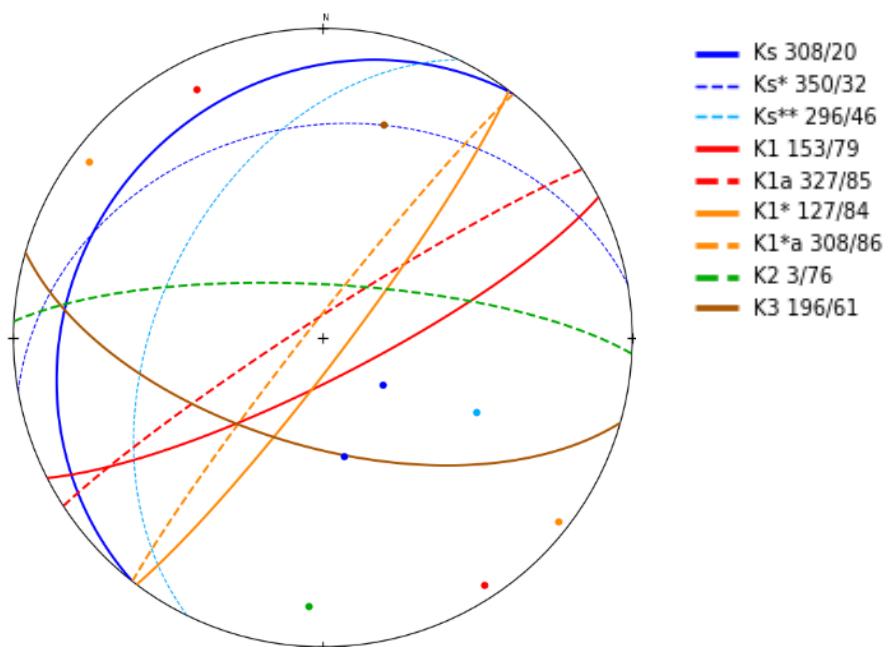


5.1.3



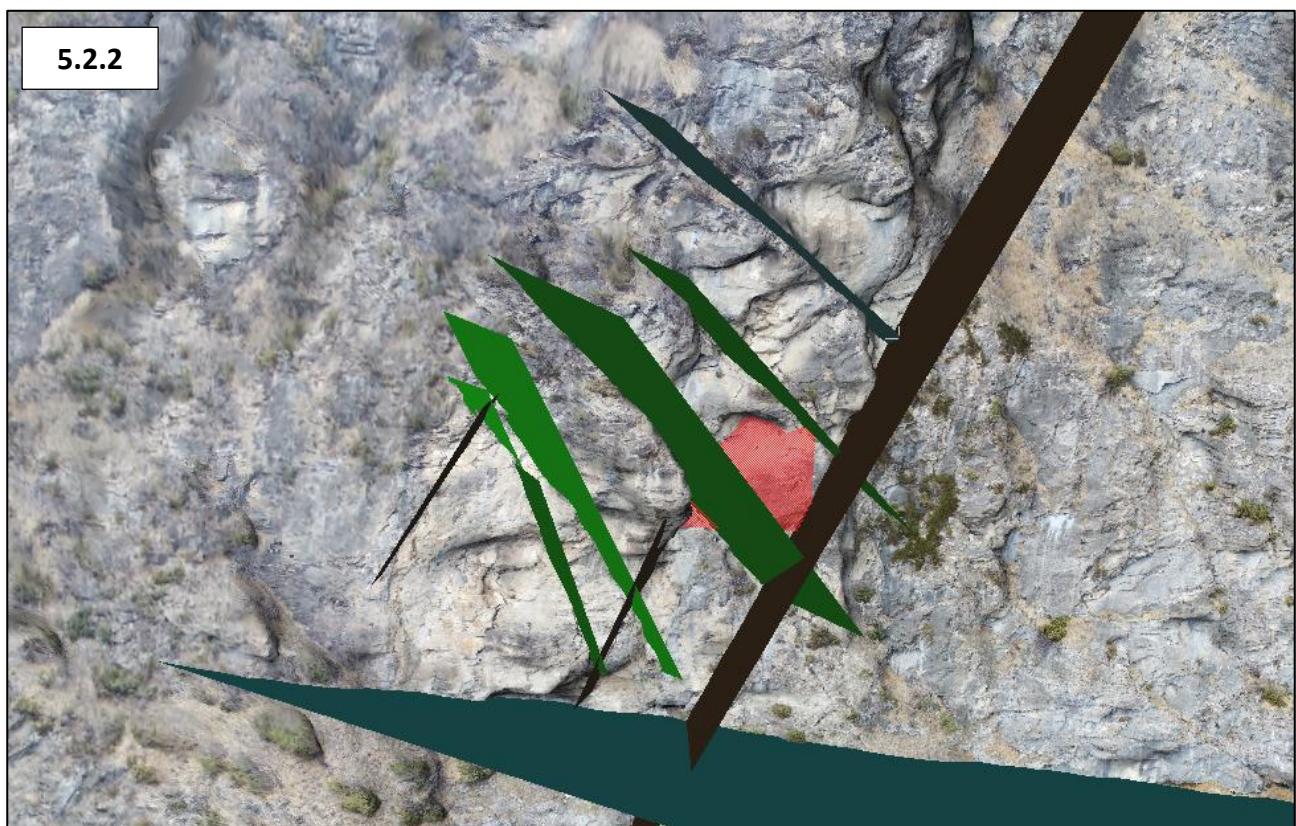
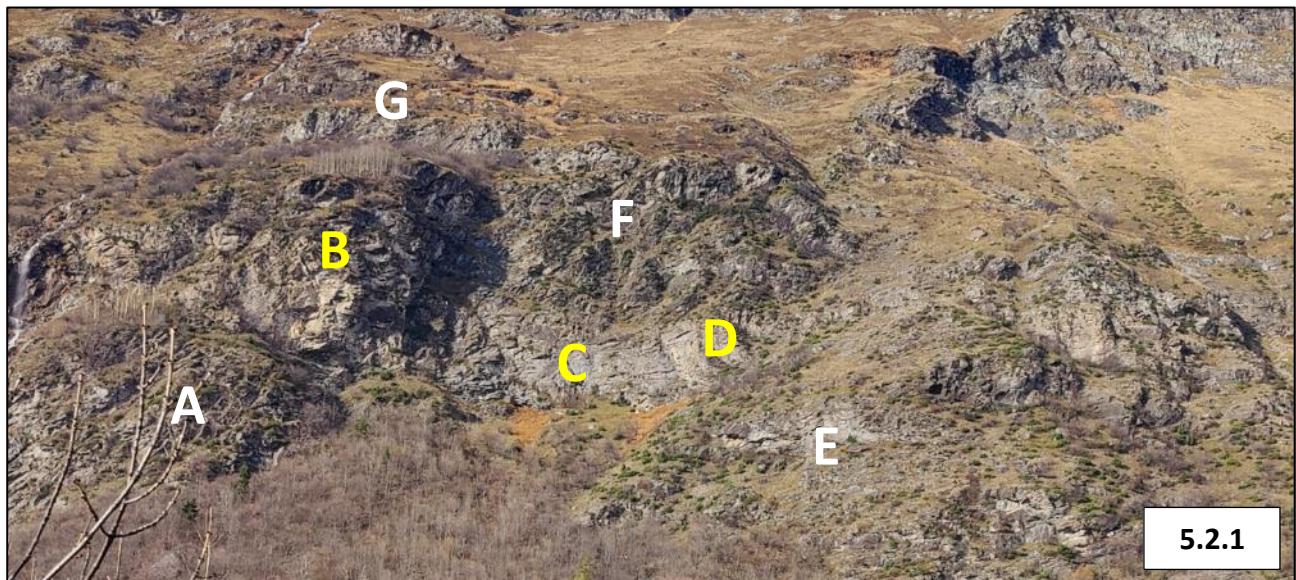
5.1.4

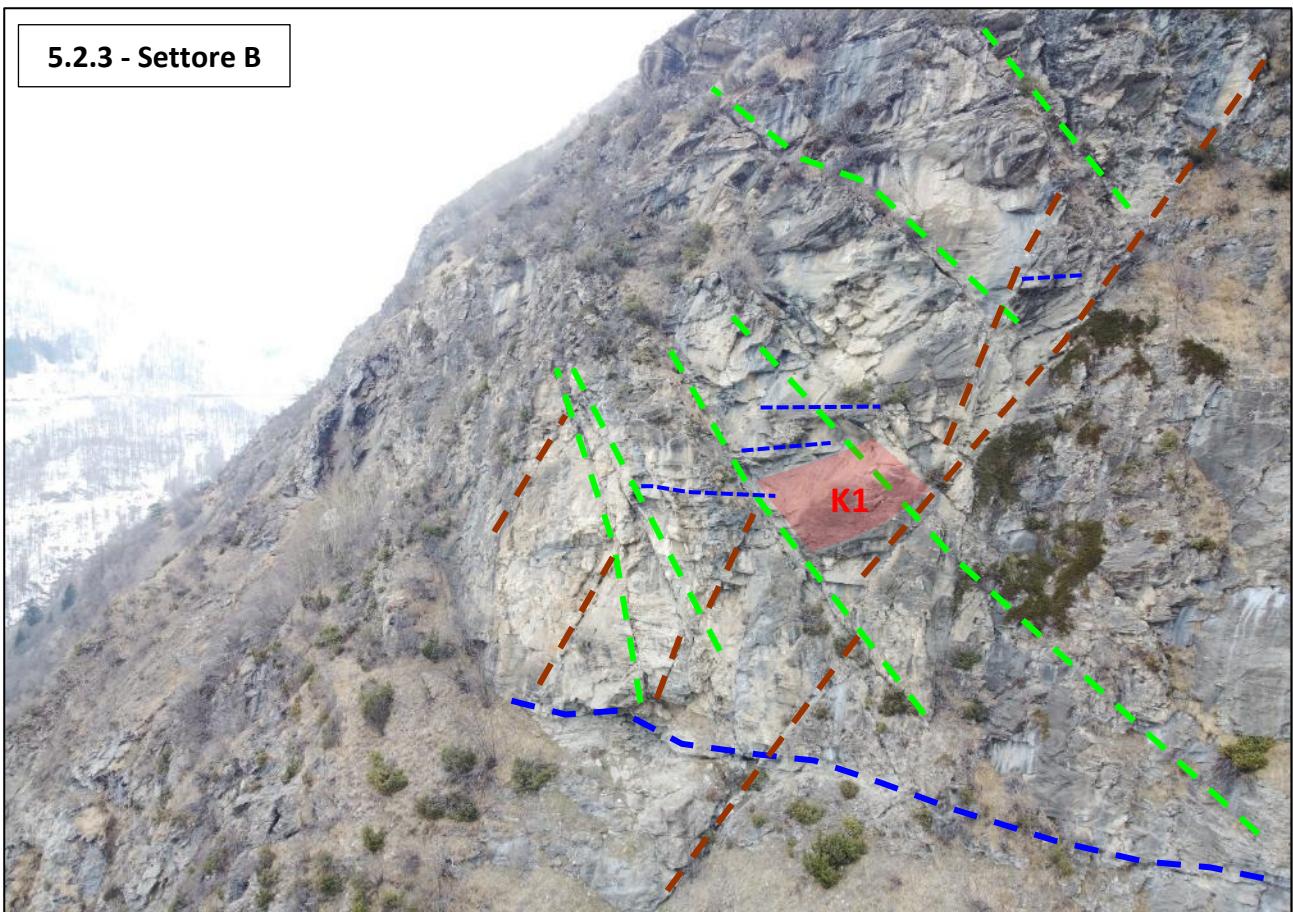
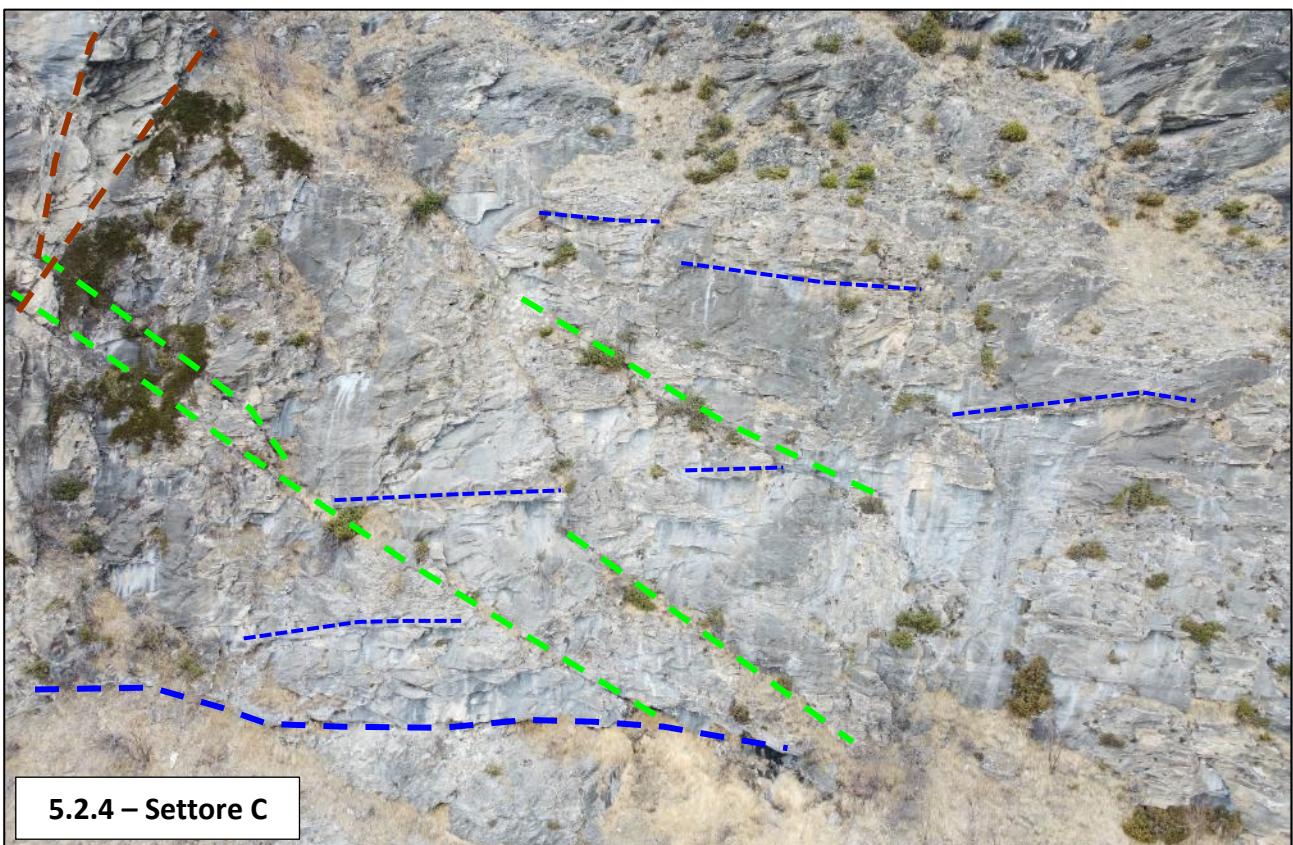
5.1.5

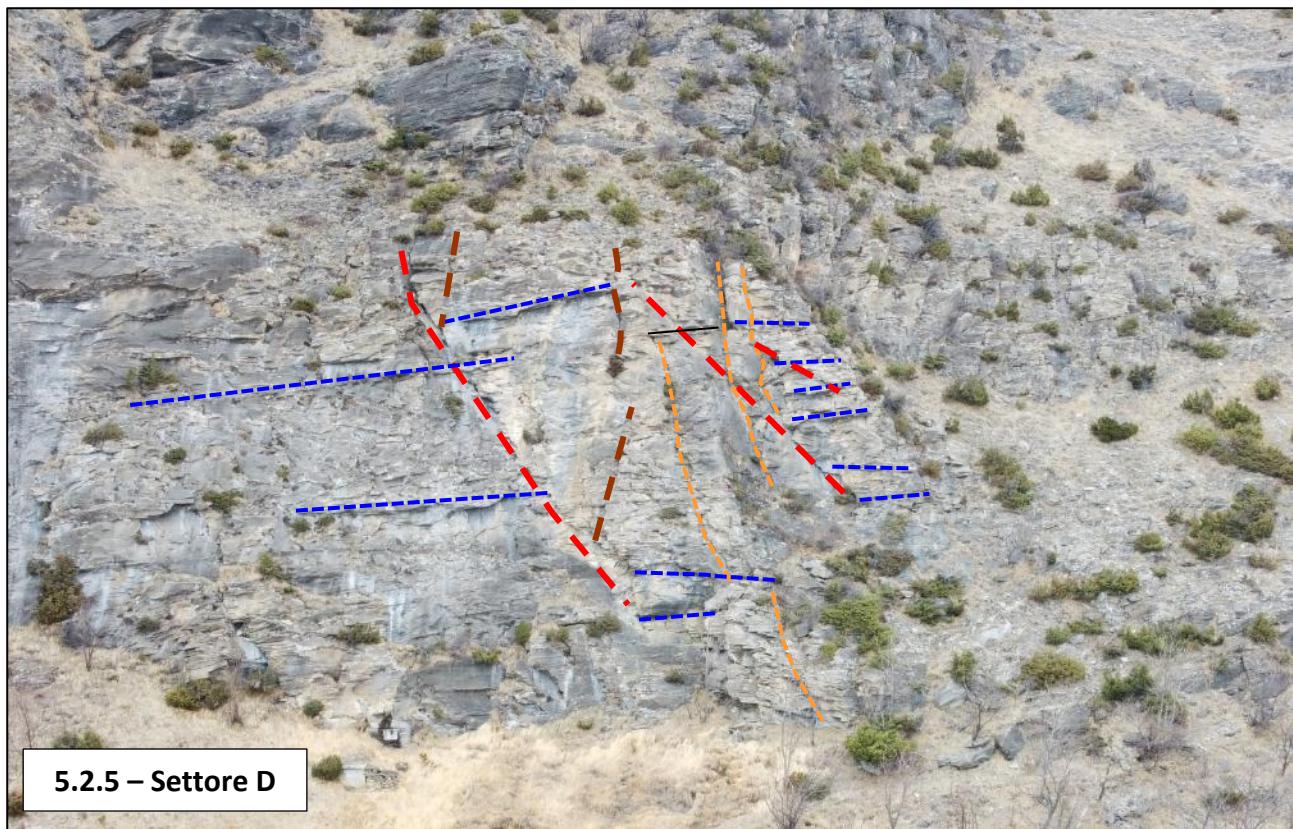


5.2. Strutture principali

Le immagini che seguono descrivono le strutture più importanti nelle pareti della parte medio bassa del versante (settori principali **B**, **C** e **D** indicati dalle lettere in Fig. 5.2.1); mediante interpolazioni della mesh 3D (Fig. 5.2.2), seppure con un certo grado di incertezza connessa alla bassa risoluzione del modello (soprattutto per il settore D), le fratture sono state ricondotte ai sistemi principali (i colori sono quelli del diagramma di Schmidt di cui al paragrafo precedente).



5.2.3 - Settore B**5.2.4 – Settore C**



Il settore **B** è delimitato alla base da un piano di taglio a basso angolo e sul lato Est da un importante struttura che immerge verso SW; in generale l'ammasso è caratterizzato da numerose fratture con persistenza pluridecametrica che la tagliano obliquamente e che formano speroni strapiombanti e a sbalzo verso Est; si osservano vari distacchi per scivolamento (lungo piani immergeenti verso SE), delimitati superiormente da piani del sistema K1.

Il settore **C** è più uniforme e caratterizzato da superfici corrispondenti sia a K1 sia a piani con orientazione simile ma minor inclinazione.

Nel settore **D** si osservano due ampi volumi isolati da fratture pluridecametriche che immergeano a franapoggio verso SE; nell'insieme l'ammasso è disarticolato e sussistono condizioni predisponenti per un crollo in massa.

6. ANALISI DEI FENOMENI DI CROLLO

Di seguito si approfondiscono gli aspetti relativi ai fenomeni di crollo che alla luce dello studio condotto, costituiscono la principale criticità in termini di pericolosità e rischio per l'abitato.

6.1. Rilievo dei blocchi e degli accumuli lungo il versante

Nella **TAV. 2** è riportata una carta della fascia di versante a ridosso del paese con evidenziata la distribuzione dei blocchi; dall'analisi condotta è emerso che:

- in alcuni settori, talora con terrazzamenti in pietra a secco, i grossi blocchi sono sporadici o assenti (quantomeno non visibili in superficie), ma sono presenti un po' ovunque blocchi sub-metrici / decimetrici (Fig. **6.1.1** e **6.1.2**);
- nel settore orientale sono presenti accumuli e “sciami” di grossi blocchi riferibili con ogni probabilità ad uno o più eventi di crollo in massa; l'accumulo si estende verso monte conferendo al versante una morfologia convessa (Fig. **6.1.3** e **6.1.4**);
- a ridosso delle case si osservano ovunque grossi massi (Fig. **6.1.5**), talvolta inglobati nella struttura dell'edificio (Fig. da **6.1.6** a **6.1.9**);
- i blocchi sono costituiti prevalentemente da calcescisti con significativa variabilità di facies (calcemicascisti, marmi, marmi filladici, etc.), con alcuni blocchi di serpentinite (Fig. **6.1.10**, è probabile che siano presenti lenti di serpentinite non segnalate nelle carte geologiche), a testimonianza del fatto che i distacchi provengono un po' tutto il versante soprastante e non da un singolo settore delimitabile;
- i blocchi presentano dimensioni molto variabili, dalle piccole pezzature fino a blocchi con asse maggiore intorno ai 6-7 m; la stima dei volumi è difficoltosa sia per il gran numero di blocchi di forma irregolare, sia soprattutto perché molti blocchi affiorano solo parzialmente: nella tavola è riportata una classificazione solo indicativa e cautelativa;
- le forme prevalenti dei blocchi sono tabulare e prismatica irregolare / complessa; alcuni blocchi sub-sferici sono quelli di serpentinite (volume < 1 m³)
- la maggior parte dei blocchi presenta superfici alterate con copertura di licheni e muschi, e in molti casi il blocco è parzialmente coperto da un suolo sottile e con vegetazione (Fig. **6.1.11**);
- nella parte occidentale e risalendo il versante compaiono blocchi di piccole dimensioni con superfici fresche connessi a crolli recenti (Fig. **6.1.12**).

6.1.1









6.1.11



6.1.12

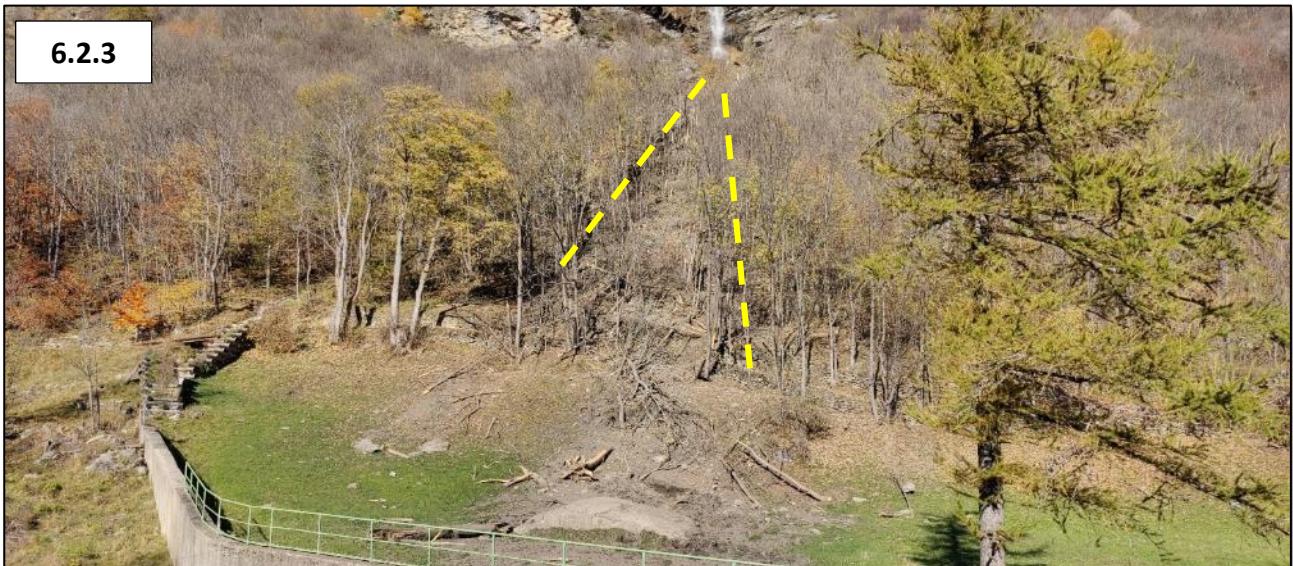


6.2. Crollo del 10/2024

Alla fine di ottobre si è verificato un crollo nella zona ad Ovest del paese, dove un grosso masso si è arrestato sul prato pianeggiante. Gli elementi principali sono rappresentati in **TAV. 2**; il fenomeno può essere così descritto (Fig. da **6.2.1** a **6.2.9**):

- non si conosce il punto esatto di distacco, ma dall'esame delle immagini sembra individuabile in un settore del ciglio della parete appena ad Est della cascata;
- al momento risulta che siano stati fatti dei sopralluoghi in elicottero ed anche degli interventi nella zona di distacco;
- il blocco principale è tabulare di dimensioni metriche (non è stato possibile misurarlo perché nel frattempo è stato smantellato); nell'area circostante si sono arrestati blocchi e numerosi frammenti di dimensioni decimetriche (sembra che un frammento abbia raggiunto e danneggiato il tetto di una delle case più ad Ovest in sponda sinistra del T. Cenischia);
- dopo il salto in roccia (più o meno lungo la cascata), lungo il percorso si osserva una fascia con alberi abbattuti, buche da impatto e muri a secco sfondati; nella parte terminale il blocco

ha scavato ed “arato” i depositi fini del pianoro; nel bosco si osservano numerose tracce di transito fino a 4-5 m, ed alcuni rami e cime spezzate fino a 7-10 m circa.

6.2.1**6.2.2****6.2.3**



6.2.7**6.2.8****6.2.9**

7. SIMULAZIONI NUMERICHE DEI CROLLI

7.1. Premessa

Lo studio della dinamica di caduta mediante modelli numerici, insieme all'analisi geologica e geomorfologica di cui ai capitoli precedenti, ha come finalità quella di fornire elementi utili per la scelta e il dimensionamento degli interventi di difesa; la soluzione più adatta terrà comunque conto di altri aspetti, non di competenza, relativi anche alla fattibilità tecnico - economica.

Il grado di pericolosità dell'area e di rischio per l'abitato è risultato evidente già dall'analisi geomorfologica, e peraltro è già stata correttamente definita a livello di Piano Regolatore dove tutto l'abitato ricade in Classe IIIb4.

7.2. Campo di applicazione, limiti ed incertezze

Facendo riferimento alle Norme UNI (serie 11211), sono da evidenziare alcuni aspetti di cruciale importanza sia per l'esecuzione delle simulazioni che per un corretto utilizzo dei risultati:

- *"L'impiego dei modelli di propagazione è raccomandabile come supporto alla valutazione dei limiti massimi di propagazione, di velocità, di altezza e di energia dei blocchi. In ogni caso le risultanze devono sempre essere criticamente integrate con le risultanze delle osservazioni di terreno ed esplicitando i limiti dello studio ed eventuali criticità."*
- *"Lo studio delle possibili propagazioni dei massi sul versante ha lo scopo di fornire una valutazione delle possibili altezze di volo e delle energie possedute dai blocchi e, quindi, di indirizzare la scelta relativa all'ubicazione delle opere di difesa";*
- *"La modellazione delle traiettorie di caduta dei blocchi deve essere eseguita secondo criteri fondamentalmente probabilistici a causa della grande aleatorietà del fenomeno e della estrema variabilità dei parametri che condizionano le traiettorie"; "Possono essere utilizzati sia modelli bidimensionali che tridimensionali".*
- *"La numerosità e le incertezze relative ai parametri che caratterizzano le traiettorie e, in generale, le modalità di propagazione del fenomeno di caduta massi, spesso non consentono di definire valori certi, ma piuttosto suggeriscono di considerare intervalli di valori. Il percentile di riferimento è assunto pari al 95%."*

Nel caso in esame l'aleatorietà del fenomeno e dei parametri che lo condizionano è ancor più evidente a causa dell'estensione del versante di caduta, delle varie pareti da cui possono originarsi i distacchi, e della variabilità di forma e volume dei blocchi. I modelli numerici rappresentano dunque una semplificazione rispetto alla complessità del fenomeno naturale, pertanto l'approccio statistico è indispensabile e comunque si impone una dovuta cautela nell'utilizzo dei risultati numerici.

Va precisato che le simulazioni qui eseguite si riferiscono a fenomeni di crollo di singoli blocchi nelle condizioni definite di seguito; per contro le simulazioni non si riferiscono a:

- crolli in massa di grossi volumi e/o comunque con interazione fra i blocchi durante la caduta;
- crolli di singoli blocchi con volume molto elevato, in quanto comportano una estrema complessità delle interazioni blocco / pendio in condizioni al limite dei presupposti fisici semplificati dei modelli numerici (parametri di restituzione energetica di difficile definizione per comportamento fortemente anelastico, caduta non caratterizzata solo da rimbalzi o rotolamento, fenomeni di scivolamento del blocco sul pendio con incisione della superficie, etc.);

- frammenti con traiettorie e velocità assolutamente non prevedibili derivanti dal distacco di schegge e porzioni lapidee durante l'impatto dei massi;
- mobilizzazione di blocchi o frammenti lapidei preesistenti lungo il pendio (come nel caso di impatto su un altro blocco o su un terrazzamento in pietrame a secco).

In generale la simulazione numerica non può tenere conto di traiettorie anomale, anche nella parte finale del percorso, causate dall'impatto del blocco su blocchi preesistenti, strutture antropiche, morfologie a piccola scala non rappresentate dal DTM, alberi o altri ostacoli. Inoltre, sebbene la calibrazione dei modelli sia stata effettuata per back-analysis sulla base dei blocchi presenti al piede (presumibilmente connessi a crolli avvenuti durante diversi periodi dell'anno), le simulazioni non tengono specificatamente conto di condizioni particolari difficilmente quantificabili come la presenza di neve al suolo o nei casi in cui il terreno risulti ghiacciato.

Al fine di caratterizzare quantitativamente il fenomeno sono state effettuate simulazioni numeriche con il software della Geo&Soft International "Rotomap32". La scelta è ricaduta su tale applicativo in quanto, come si evince anche da numerosi articoli scientifici relativi ad applicazioni sul territorio italiano, è risultato essere il più completo ed efficace sia per l'approccio statistico tridimensionale, sia per la possibilità di stimare le traiettorie, i tratti in rotolamento e in volo e le frequenze di arrivo (oltre ad altri parametri come le altezze in volo, l'energia cinetica media e massima ed i tempi degli scendimenti), sia per la possibilità di simulare la presenza di valli o barriere paramassili. Il modello considera i blocchi come entità puntiformi, ma si tiene conto implicitamente di geometria / dimensioni del blocco e delle interazioni con il terreno lungo il percorso, variando opportunamente i coefficienti di restituzione energetica e il coefficiente di attrito in funzione anche della tipologia e del comportamento dei depositi.

7.3. Preparazione del modello

Per le simulazioni è stato utilizzato il DTM con passo 1 m "MNT RGE ALTI®" dell'IGN-F (Institut National de l'information Géographique et Forestière) che arriva a comprendere il fondovalle nella zona dell'abitato. Considerata la dimensione metrica dei blocchi osservati al piede del versante, il DTM è stato ricampionato con un passo di 5 m.

Il caso in esame è molto complesso in quanto il versante è caratterizzato da varie pareti e fasce di affioramenti a quote diverse e con differenti caratteristiche morfologiche (altezza, inclinazione, presenza di asperità, etc.).

Sono state dunque individuate varie linee di distacco utilizzate per simulazioni con differenti impostazioni delle velocità iniziali (le linee infatti devono essere impostate alla base delle pareti, dove stimando differenti range di velocità iniziale è possibile simulare statisticamente distacchi da vari punti della parete fino al ciglio della nicchia di distacco). In particolare sono state eseguite simulazioni separate per:

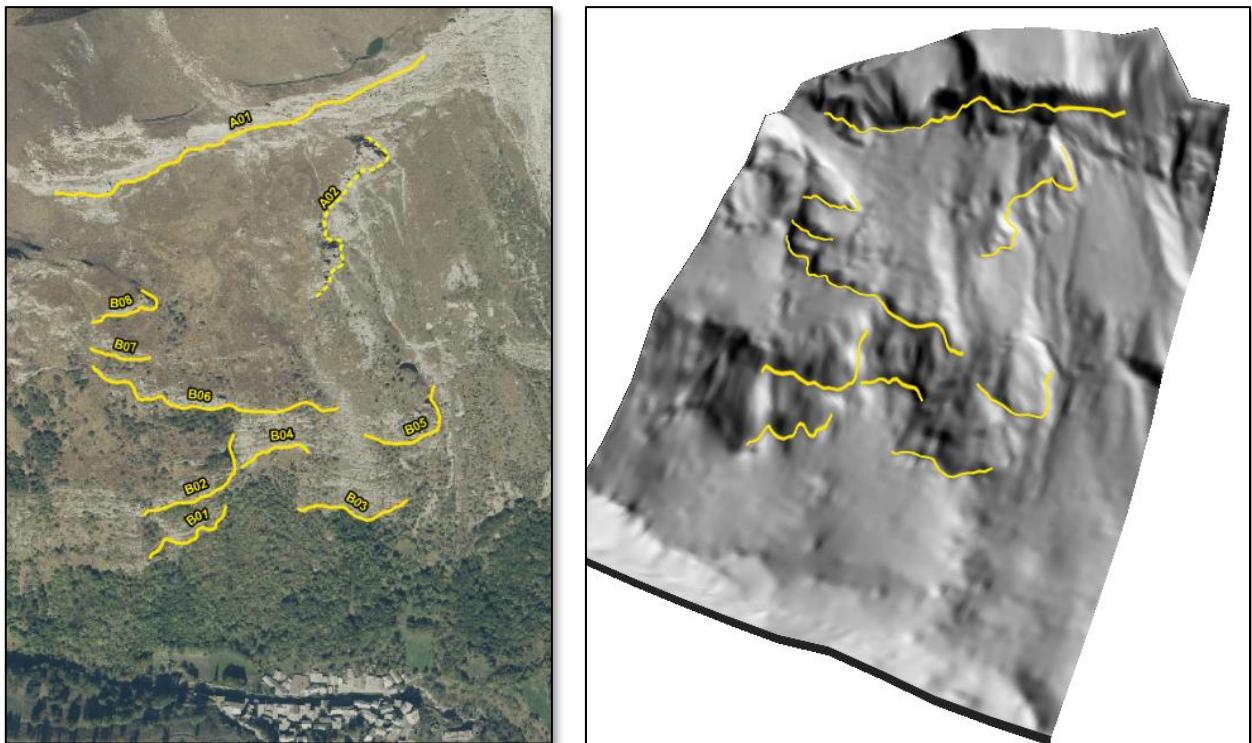
- le pareti della parte bassa del versante (da B01 a B04) che hanno un elevato sviluppo verticale e sono sub-verticali (ad eccezione di B03 che è più appoggiata ma ha un'altezza che raggiunge i 100 m);
- le pareti della fascia intermedia con (da B05 a B08), meno acclivi e con minor altezza;
- la parete alta (A1) con elevato sviluppo verticale, più appoggiata nella parte occidentale e pseudo verticale nella parte centro – orientale;

- la parete A2 non è stata utilizzata nelle simulazioni in quanto ubicata nella parte orientale e rivolta verso Est, per cui può dare origine a traiettorie di crollo già simulate più cautelativamente con quelle della parete A1

Le velocità iniziali sono state stimate per ogni parete lungo più sezioni e poi mediate, utilizzando l'equazione

$$V = Cs * \sqrt{(2gH)}$$

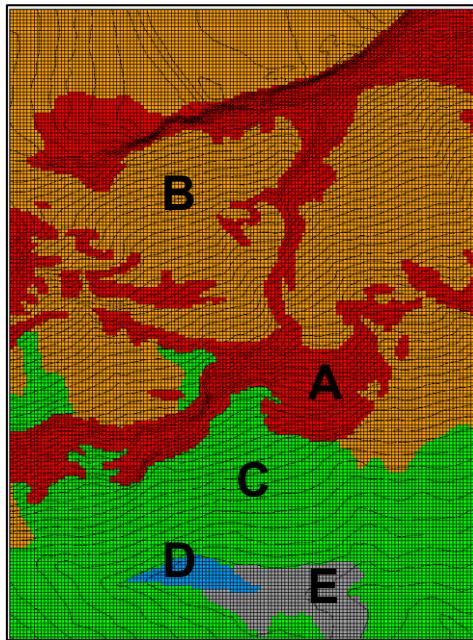
Dove "H" è la differenza di quota minima e massima tra i punti di distacco e la linea di partenza, "g" è l'accelerazione di gravità e "Cs" è un coefficiente di smorzamento (≤ 1) che permette di tenere conto di rotolamenti ed urti "locali".



7.4. Calibrazione del modello

Sulla base dei rilievi svolti è stato possibile caratterizzare sia i terreni interessati dalle traiettorie di crollo, sia la distribuzione areale dei blocchi di grosse dimensioni nella zona di arresto (tenendo conto anche dell'evento dell'Ottobre 2024). Nella griglia utilizzata dal software sono stati perimetrati i diversi tipi di terreno distinti in:

- A: roccia affiorante;
- B: coperture detritico - colluviali poco potenti e non vegetate;
- C: depositi detritici (con anche grossi blocchi), di maggior potenza, boscati, con coltre eluvio - colluviale e con locale presenza di terrazzamenti;
- D: un settore di depositi fini e pianeggianti di origine fluviale / lacustre;
- E: l'abitato dove sono presenti muri, edifici, aree pavimentate, etc.



I parametri geomeccanici che controllano il moto dei blocchi sono:

- coefficiente di restituzione energetica normale (r_n)
- coefficiente di restituzione energetica tangenziale (r_t)
- coefficiente di attrito di roto-scivolamento ($\text{tg}\delta_r$).

Partendo dalle tabelle dei valori di letteratura (ad es. Pasquero 1987, Hoek 1987, Pfeiffer & Bowen 1989, Azzoni & De Freitas 1995, Crosta & Agliardi 2003), sono state eseguite varie simulazioni variando i parametri in modo da ottenere risultati ragionevolmente corrispondenti con le zone di arresto osservate per i blocchi di grosse dimensioni.

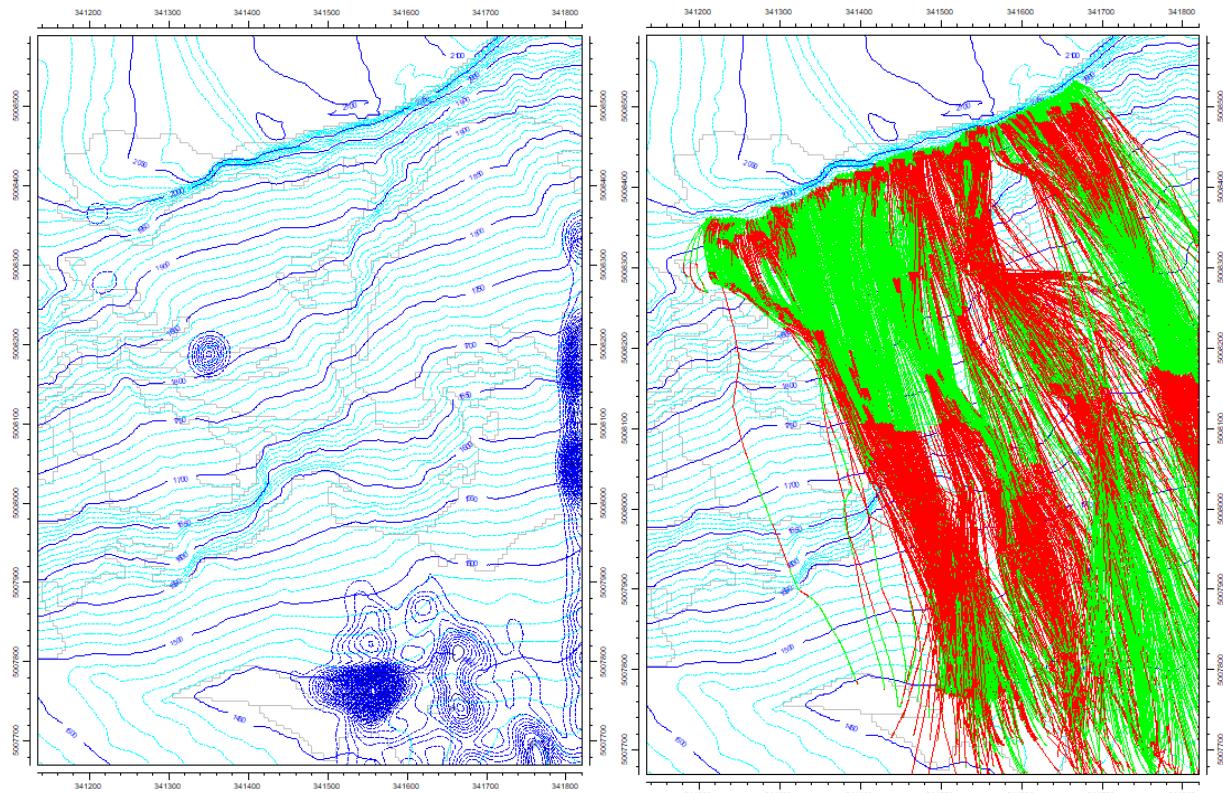
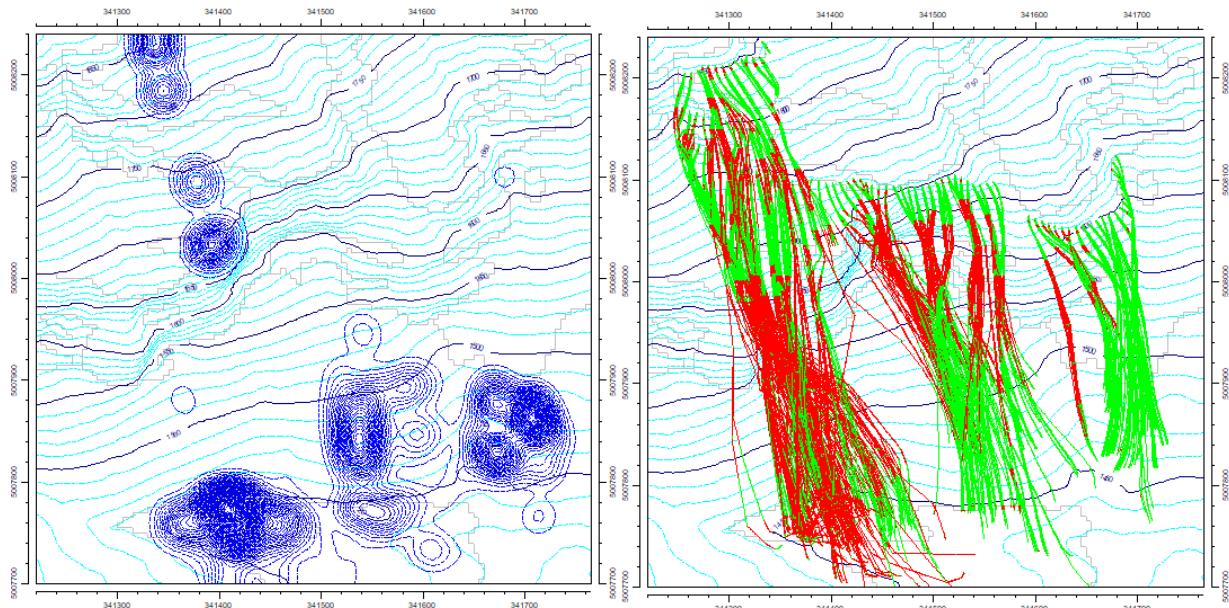
Premesso che:

- i blocchi grossi tendono a deformare significativamente il terreno e dissipare energia negli impatti, quindi bisogna adottare coefficienti di restituzione energetici nella parte bassa del range;
- la maggioranza dei blocchi ha forma tabulare o prismatica - irregolare, quindi coefficienti di attrito leggermente superiori simulano meglio il comportamento osservato;
- la presenza di vegetazione, di terrazzamenti e (soprattutto nella parte medio-bassa) di grossi blocchi affioranti, aumenta la “scabrezza” del pendio (con maggior interazione ad ogni impatto)

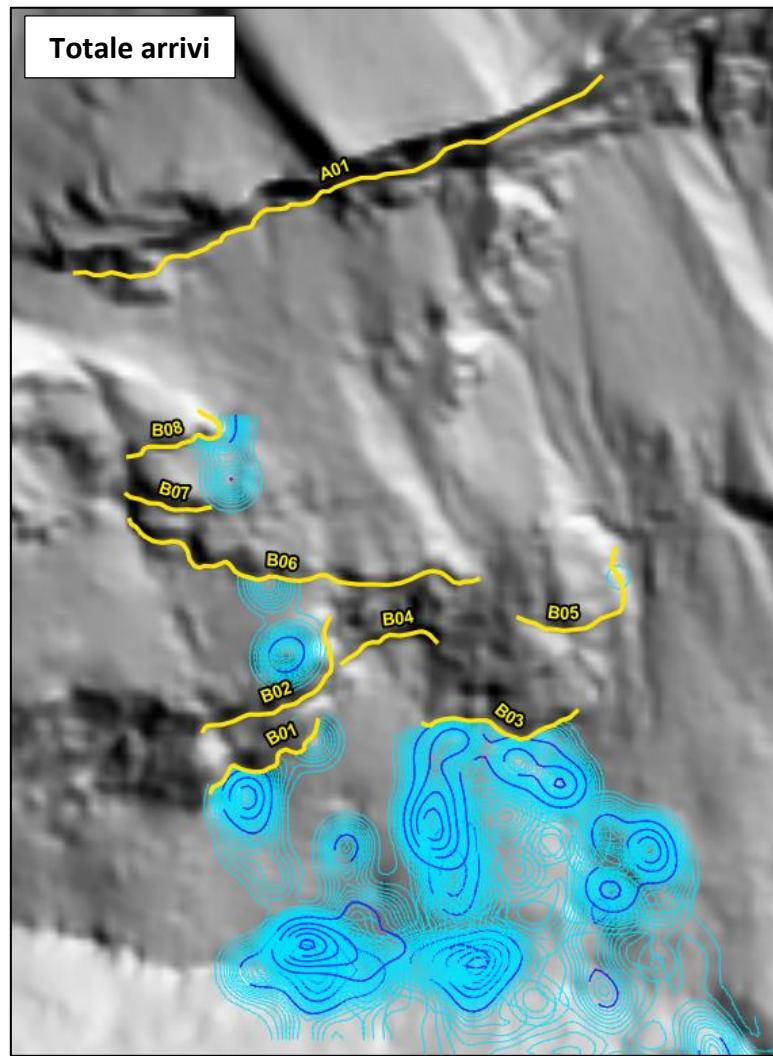
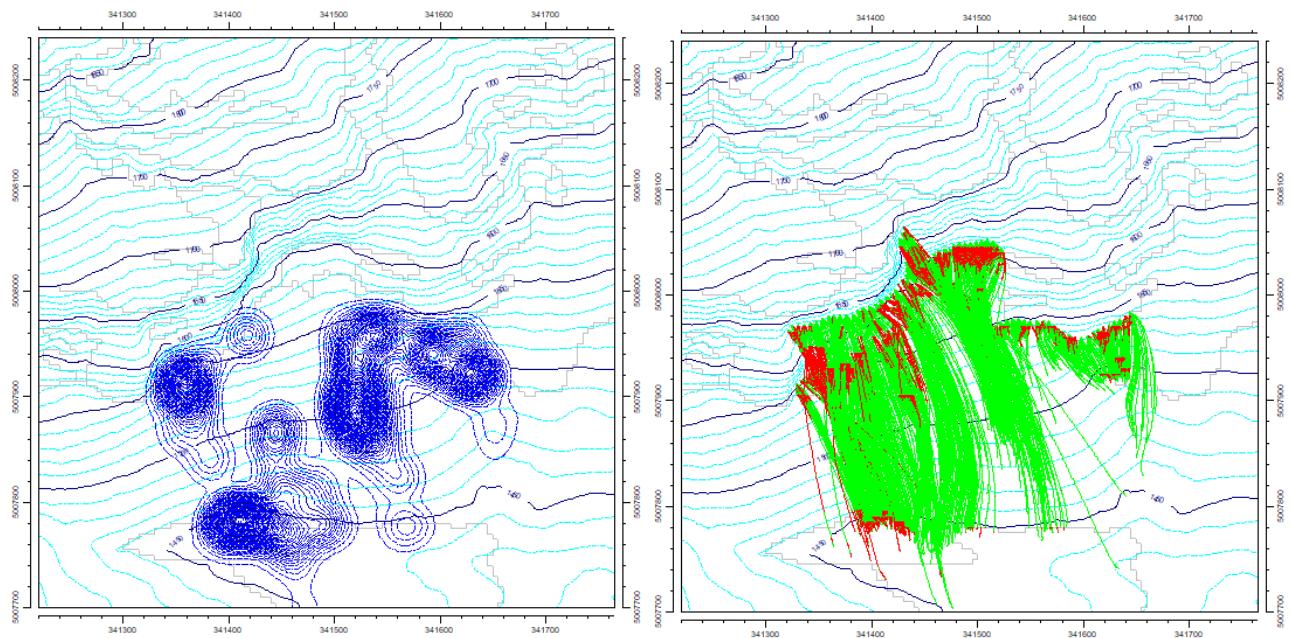
a seconda del tipo di terreno sono stati testati ed adottati valori dei parametri geomeccanici nei range: $r_n = 0.2 \div 0.4$; $r_t = 0.25 \div 0.65$; $\text{tg}\delta_r = 0.45 \div 0.8$

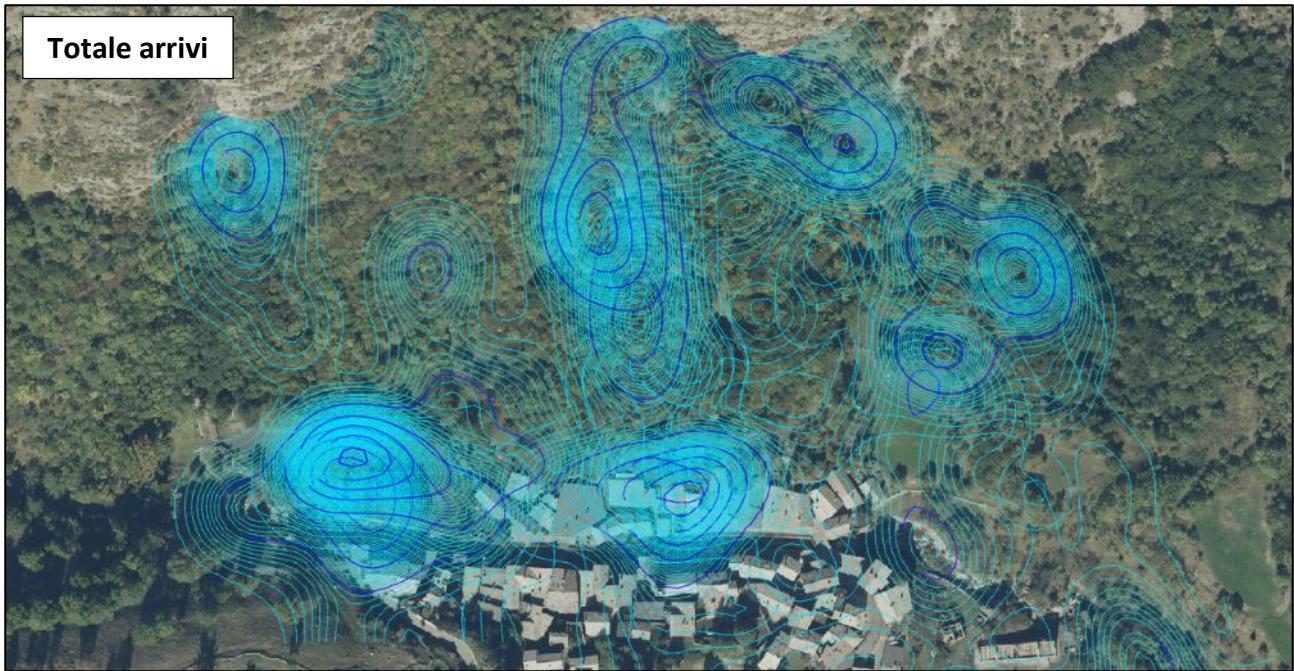
7.5. Risultati delle simulazioni

Di seguito si riportano le immagini degli output del modello: le frequenze di arrivo (in parti per milione di numero di scendimenti al metro quadrato) e i percorsi. In totale sono stati simulati 4500 scendimenti (1500 per ogni settore), con n°5 velocità iniziali (fra 1 m/s e massimo 17 m/s), e n°3 deviazioni angolari $\pm 35^\circ$ - $\pm 45^\circ$.

Parete alta (linea di distacco A1)**Parte intermedia (linee di distacco B5-8)**

Parte bassa (linee di distacco B1-4)





Esaminando la sovrapposizione delle varie simulazioni per blocchi di grosse dimensioni si evince che:

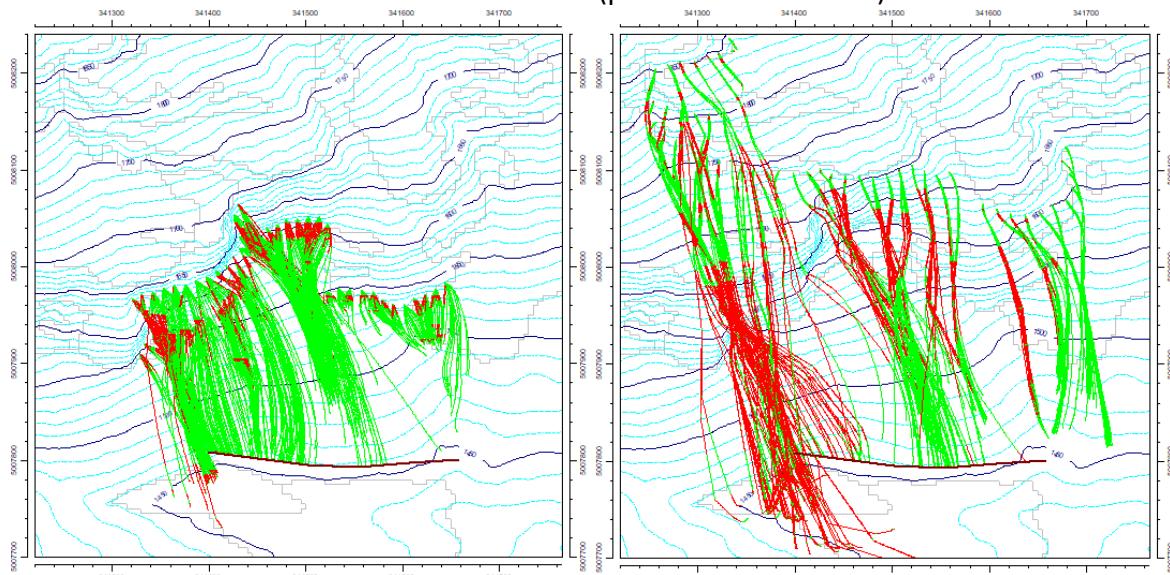
- tutta la parte di versante immediatamente a monte dell'abitato è soggetta all'arrivo di blocchi, con alcuni settori a maggior frequenza connessi a traiettorie condizionate dalla morfologia locale.
- i blocchi arrivano nel prato pianeggiante ad Ovest e a ridosso dell'abitato, con una buona corrispondenza rispetto a quanto osservato sul terreno;
- la bassa frequenza di arrivo a monte della parte Est dell'abitato è probabilmente connessa alla presenza del grosso accumulo che condiziona le traiettorie lateralmente ad Ovest e a Est dello stesso;
- una parte degli arrivi supera le prime case, raggiunge l'alveo del T. Cenischia, e alcune traiettorie proseguono anche sulla sponda opposta; con approccio statistico, e nei limiti di applicazione dei modelli numerici a fenomeni complessi come le frane di crollo, ciò è verosimile considerato che:
 - alcuni blocchi sono effettivamente presenti fra le case, e probabilmente altri blocchi sono stati smantellati storicamente per la costruzione degli edifici;
 - sulla sponda opposta del torrente sono presenti alcuni blocchi degli stessi litotipi, anche se è difficile distinguerne l'appartenenza a crolli dalle pareti in esame o al grande accumulo che caratterizza la parte a Sud dell'abitato;
 - nella "Relazione Tecnica Descrittiva" degli allegati geologici al PRGC (Geol. Z. Vangelista, 2020), è riportata una interessante immagine di Moncenisio Ferrera del 1906 (Fig. 7.5.1), dove si notano molti grossi blocchi lungo le sponde del T. Cenischia;
 - attualmente si osservano blocchi di grosse dimensioni più che altro a valle del ponte (Fig. 7.5.2).



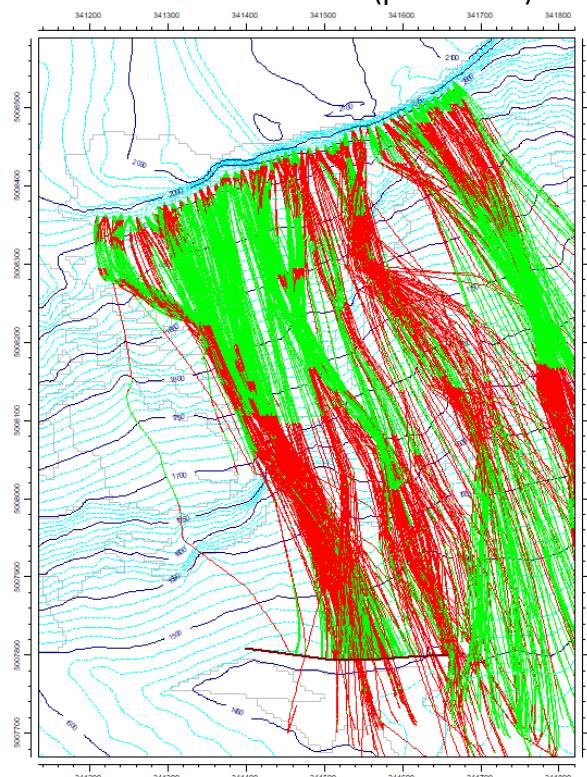
In via preliminare sono state fatte anche simulazioni (750 scendimenti ciascuna) con inserimento di una prima ipotesi di vallo poco a monte del paese, lungo 260 m ed ipotizzato con paramento di monte pari a 5 m e resistenza di 25000 kJ. Come si vede dai risultati, l'opera sarebbe efficace per i distacchi dalla parte media e bassa del versante; per quelli dalla parete alta si avrebbero circa 30-50

scendimenti non verificati sia per superamento che per sfondamento (circa il 4-6%). Si precisa che, qualora si decida di valutare nel dettaglio la realizzazione di un vallo o reti paramassi, tali aspetti dovranno essere ulteriormente valutati sia in relazione ad ipotesi progettuali meglio definite, sia mediante simulazioni bidimensionali che sono più idonee per una puntuale stima sia delle altezze dei tratti in volo, sia delle energie cinetiche dei blocchi.

Simulazioni con vallo (pareti basse e medie)



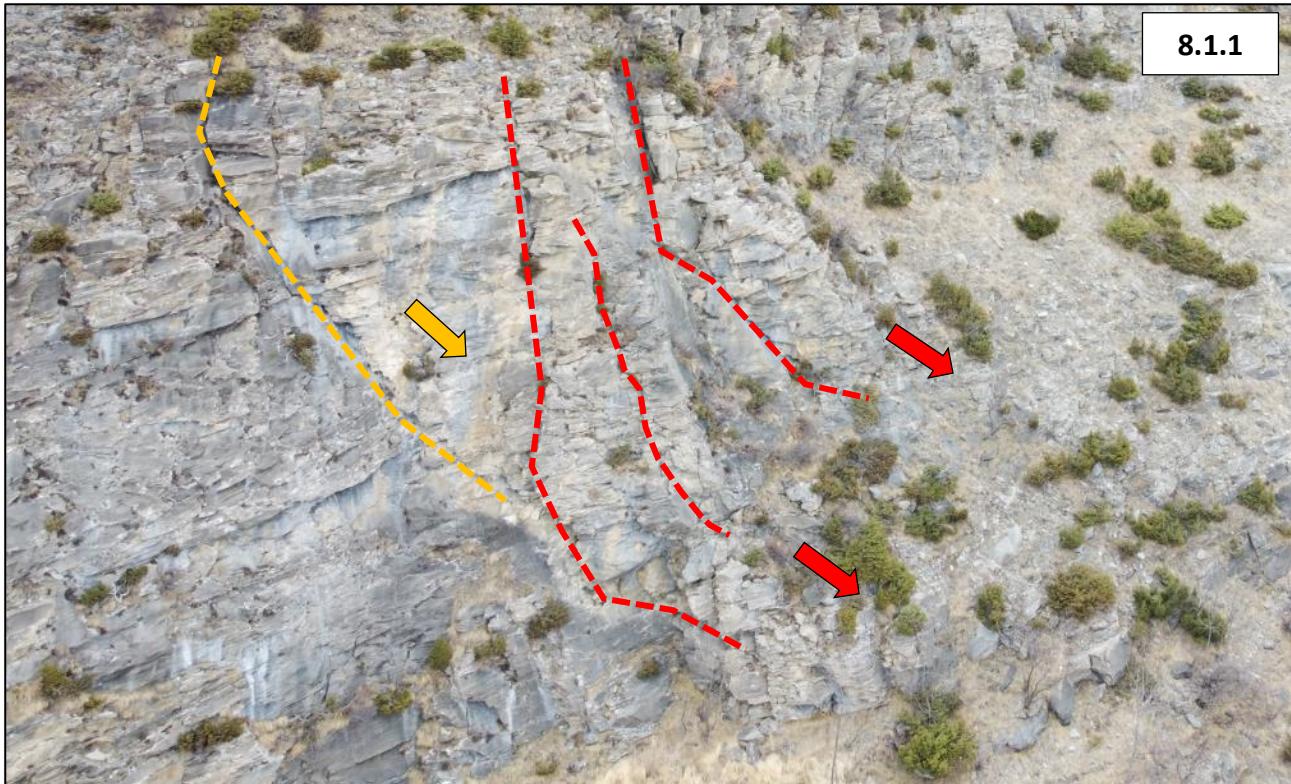
Simulazioni con vallo (parete alta)

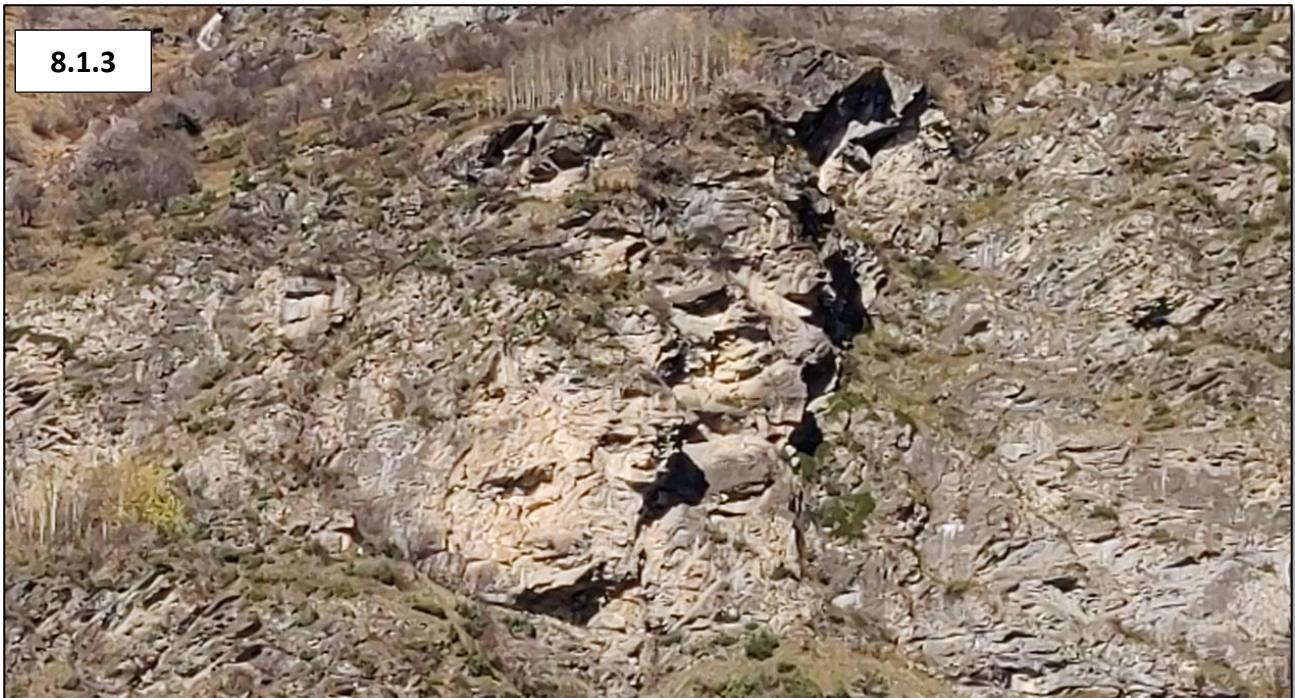


8. ANALISI SETTORI CRITICI E PROPOSTE DI INTERVENTO

8.1. Settori critici

Considerata l'estensione e la morfologia delle pareti rocciose lungo il versante, le potenziali criticità per crollo sono innumerevoli: in questa sede si è tentato di evidenziarne alcune mediante l'analisi delle riprese fotografiche e quanto è stato possibile osservare sul terreno. Si tratta dunque di indicazioni di massima, che dovranno essere verificate ed integrate mediante ulteriori ispezioni, sia con voli da drone ravvicinati, sia con rilievi in parete da parte di personale specializzato, anche per la valutazione di fattibilità e la quantificazione dei possibili interventi di disgaggio, chiodatura, posa di reti in aderenza o installazione di sistemi di monitoraggio. Oltre ai possibili distacchi isolati di blocchi di dimensioni molto variabili (come evidenziato dall'analisi degli accumuli al piede del versante), sono presenti anche potenziali criticità connesse ad ampi volumi di roccia estremamente fratturati (Fig. 8.1.1, vedasi anche Par. 5.4 e Fig. 5.4.5), o di interi speroni aggettanti (esempio in Fig. 8.1.2 e 8.1.3), il cui collasso può generare fenomeni di crollo in massa.





In **Allegato 1** sono riportate le tavole dei 7 settori principali delle pareti nella parte medio - bassa del versante

8.2. Proposte di intervento

Con l'obiettivo di pervenire ad una efficace mitigazione del rischio, vista l'estensione del versante e delle pareti rocciose che insistono sull'abitato, si ritiene che siano necessari interventi sia di tipo attivo in parete, sia di tipo passivo a monte dell'abitato e/o lungo la parte bassa del versante.

Fra i possibili interventi si propone:

- disgaggio, soprattutto di piccoli volumi instabili, e per la messa in sicurezza dei settori ove saranno previsti interventi di consolidamento;
- chiodature per l'ancoraggio e la stabilizzazione di singole placche o volumi instabili;
- rafforzamento corticale con reti in aderenza per la stabilizzazione di settori più ampi e caratterizzati da instabilità diffusa;
- realizzazione di un vallo a monte dell'abitato, eventualmente integrato con reti paramassi;
- realizzazione di opere fermaneve nella zona di distacco delle valanghe.

Considerata la complessità dei fenomeni e del contesto geomorfologico - geostrutturale, si raccomanda di valutare possibili approfondimenti, quali ad esempio:

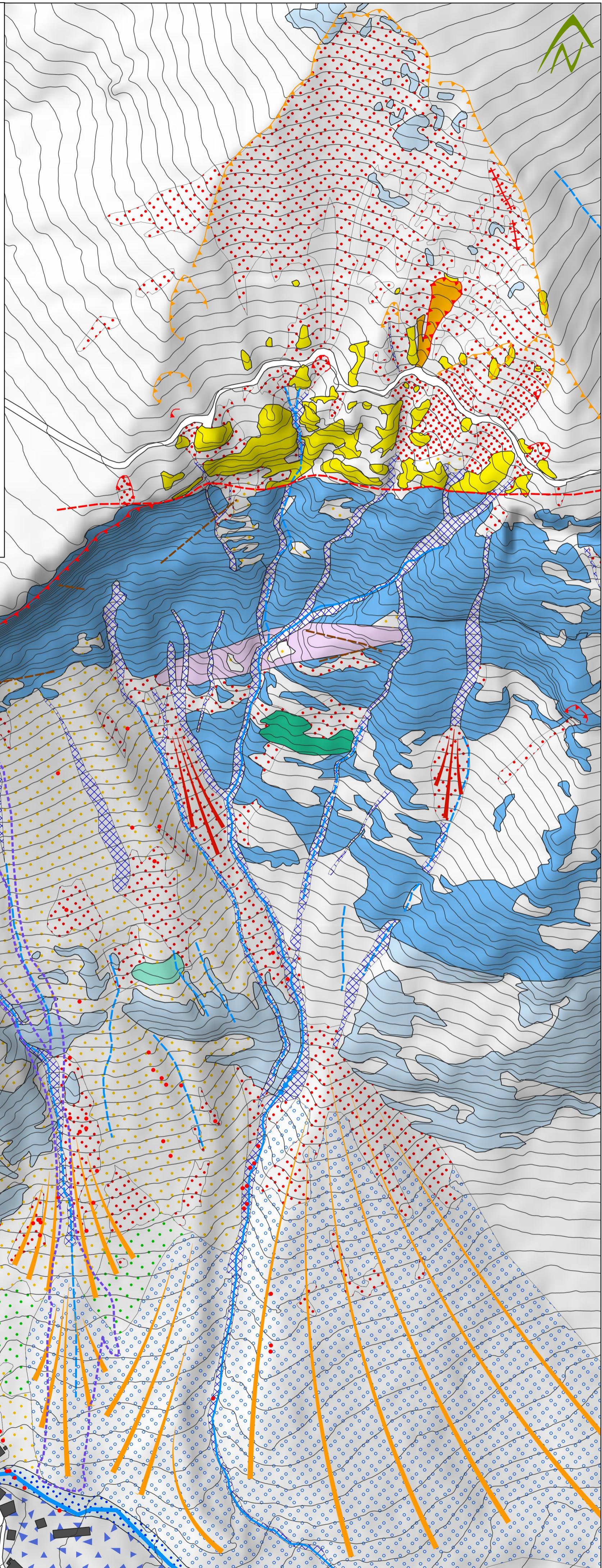
- rilievi 3D fotogrammetrici e/o Lidar
- ispezioni in parete da parte di personale specializzato;
- simulazioni numeriche bidimensionali dei crolli per la valutazione del posizionamento e dell'efficacia delle possibili combinazioni di vallo e reti paramassi;
- analisi nivologica e simulazione dei fenomeni valanghivi.

Da valutarsi il possibile ricorso a sistemi di monitoraggio delle pareti in corrispondenza delle situazioni più critiche (ad esempio con sistemi topografici, estensimetri, etc.).

TAV. Carta geologico - geomorfologica

Scala 1:2500

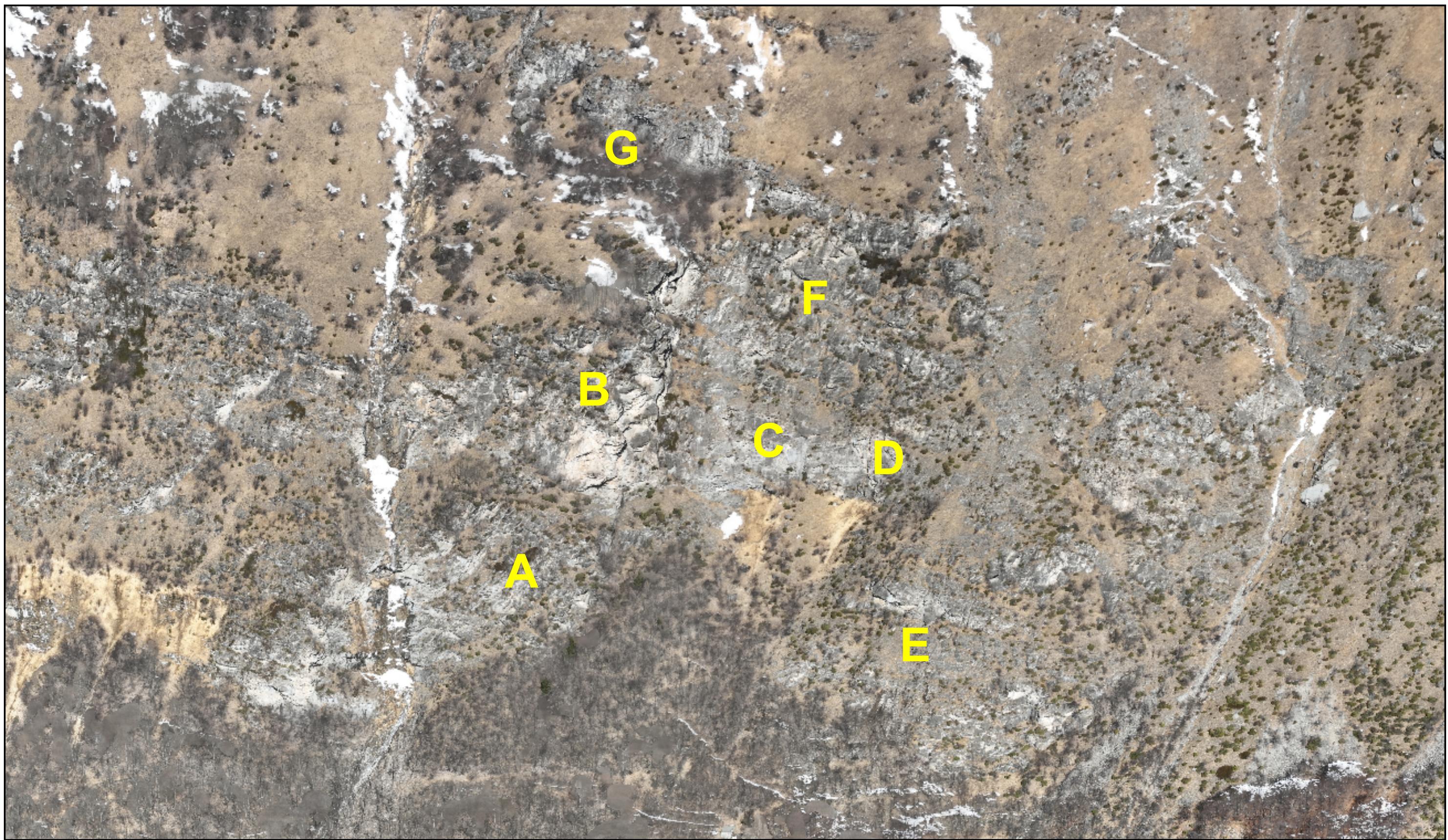
•	Blocchi principali
★	Torrione / blocco
○	Depressione / dolina
■	Vasca / captazione
▼	Nicchia di idstcco
→	Crollo isolato
→→	Traiettoria crollo 10/2024
○—○	Orlo morfologico
—·—	Fratture principali
—·—	Contatto tettonico / piano di taglio
++—++	Trecnh / Frattura da trazione
—→	Conoide detritico / accumulo di crollo
—○—	Conoide misto
■	Quarziti, gneiss leucocratici
■	Gessi, brecce e carniole
■	Calcescisti
■	Marmi fillitici
■	Calcescisti e marmi
■	Serpentiniti, serpentinoscisti
■	Gabbri
■	Micascisti, gneiss minuti
■	Micascisti quarzosi
■	Canale con trasporto solido
■	Frana superficiale
■	Deposito detritico instabile
■	Deposito detritico non vegetato
■	Coltre detritico - colluviale
■	Coltre detritico - colluviale boschata
■	Depositi torrentizi
■	Conoide
■	Depositi glaciali
■	Settore con emergenze e travertini
■	Valanghe (perimetrazioni SIVA)





ALLEGATO 1

Tavole settori critici

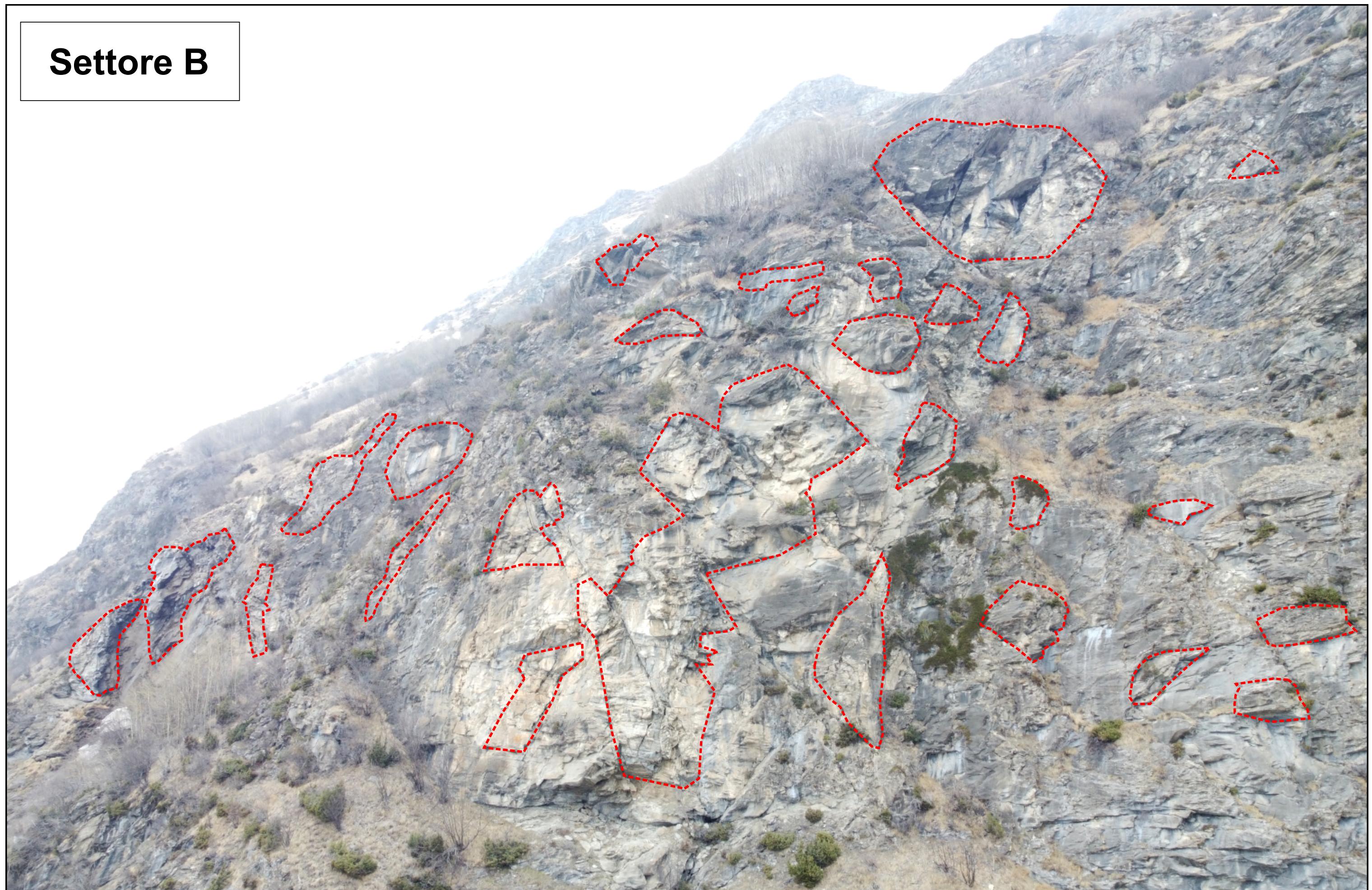


Inquadramento

Settore A



Settore B





Settore C



Settore D



Settore E



Settore F

Settore G

