



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
UNIONE EUROPEA
Fondo europeo per lo sviluppo regionale

Interreg **IV**
Italia • Österreich Italia • Austria



KÄRNTEN
WWW.KTN.GV.AT

STESURA DEGLI STANDARD MINIMI PER LA COMPILAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ PER
FRANE DI CROLLO QUALE STRUMENTO PER LA PREVENZIONE DEI DISSESTI FRANOSI
NELL' AMBITO DEL PROGETTO NR. 1381 – 302 INTERREG IV

MASSMOVE

RELAZIONE FINALE

VILLA SANTINA-CANEVA DI TOLMEZZO



Settembre 2011



*Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie
Università degli Studi di Milano - Bicocca*

Il documento è stato realizzato da:

Giovanni B. Crosta

Federico Agliardi

Paolo Frattini

Francesca Colucci

Andrea Crema

Andrea Valagussa

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE	7
2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE	7
2.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO LOCALE.....	11
2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO - STRUTTURALE LOCALE.....	12
2.3.1 LA SUCCESSIONE STRATIGRAFICA E I DEPOSITI QUATERNARI.....	12
2.3.2 IL QUADRO STRUTTURALE	15
2.4 INQUADRAMENTO SISMOLOGICO	18
3. LA CADUTA MASSI	19
4. RACCOLTA DATI	20
4.1 DATASET ESISTENTI	20
4.1.1 CARTA TOPOGRAFICA	20
4.1.2 CARTA GEOLOGICA.....	21
4.1.3 ORTOFOTO.....	21
4.1.4 FOTO AEREE	23
4.1.5 LIDAR	24
4.1.6 STUDI ANTECEDENTI	27
4.2 DATASET REALIZZATI A SEGUITO DELL’ ATTIVITÀ DI TERRENO.....	29
4.2.1 CARTA GEOLOGICA.....	30
4.2.2 CARTA DELLA LITOLOGIA SUPERFICIALE	31
4.2.2.1 CARTA DELLA FRATTURAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI.....	32
4.2.2.2 CARTA DELLA TESSITURA DEI DEPOSITI SUPERFICIALI	33
4.2.3 CARTA DELL’USO DEL SUOLO	34
4.2.4 CARTA GEOMORFOLOGICA E DEI LINEAMENTI	35
5. ATTIVITÀ DI TERRENO	38
5.1 RILEVAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	38

5.1.1 CATALOGO DEI BLOCCHI.....	40
5.1.1.1 RELAZIONE INTENSITÀ-FREQUENZA.....	42
5.1.2 CATASTO OPERE DI DIFESA PASSIVA	44
5.2 RILEVAMENTO GEOLOGICO-TECNICO.....	49
5.2.1 CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICHE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI.....	51
5.2.2. RILIEVI GEOMECCANICI.....	58
6. VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO.....	90
6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA IN COLTOP 3D	93
6.2 ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO CON APPROCCIO DETERMINISTICO.....	98
6.2.1 VERIFICA DI FATTIBILITÀ CINEMATICA	98
6.2.2 ANALISI CINEMATICA SPAZIALMENTE DISTRIBUITA CON SLOPEMAP	102
6.3 ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO CON APPROCCIO EURISTICO	106
7. MODELLAZIONE DELLE FRANE DA CROLLO	108
7.1 MODELLI EMPIRICI.....	111
7.1.1 CONEFALL	113
7.1.1.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA.....	116
7.1.1.2 CARTA DI PERICOLOSITÀ BASATA SU CONEFALL	122
7.2 MODELLO 2D: ROCFALL.....	124
7.2.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA	125
7.2.2 DEFINIZIONE DELLA VARIABILITÀ DEI PARAMETRI IN INGRESSO	132
7.2.3 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ: LA PROCEDURA RHAP	137
7.2.3.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA.....	139
7.3 MODELLO MATEMATICI	143
7.3.1 IL CODICE HY-STONE	145
7.3.1.1 I DATI DI INGRESSO (<i>INPUT</i>).....	146
7.3.1.2 DESCRIZIONE DELLA TOPOGRAFIA.....	147
7.3.1.3 I DATI DI USCITA (<i>OUTPUT</i>).....	149
7.3.2 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA	150
7.3.2.1 IL BLOCCO DI PROGETTO.....	154
7.3.2.2 MODELLAZIONI ESEGUITE	158

7.3.2.3 CONFRONTO TRA LIDAR OBLIQUO E NADIRALE	169
7.3.3 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ: PROCEDURA RHIV	172
7.3.3.1 RICLASSIFICAZIONE DEI PARAMETRI	173
7.3.3.2 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA.....	177
7.3.3.3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ LUNGO UN TRACCIATO STRADALE	183
8. TERREMOTO DEL 6 MAGGIO 1976: TEMPO DI RITORNO.....	187
9. CONCLUSIONI.....	194
BIBLIOGRAFIA.....	197
ALLEGATI	201

1. INTRODUZIONE

Scopo del progetto è la definizione dei requisiti minimi per la redazione di carte di pericolosità per frane di crollo quale strumento per la prevenzione dei dissesti franosi. A tal fine il Servizio Geologico della Regione FVG ha individuato tre aree di interesse, quali: Sottomonte-Portis-Carnia (Venezia), Villa Santina-Caneva di Tolmezzo (area di pertinenza dell'elaborato) e Timau.

Il lavoro è stato articolato nelle seguenti fasi:

- ✓ revisione della letteratura e dei dati geologici e geologico-tecnici esistenti;
- ✓ rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio;
- ✓ rilevamento geologico-tecnico in sito con rilievi geomeccanici;
- ✓ analisi stereoscopica di foto aeree (stereocoppie e ortofoto);
- ✓ acquisizione ed organizzazione in ambiente GIS dei dati;
- ✓ analisi della suscettibilità all'innescamento di fenomeni di caduta massi;
- ✓ analisi e modellazione dei processi di propagazione dei blocchi;
- ✓ realizzazione delle carte di pericolosità.

Oggetto dell'indagine sono state le frane di crollo. Con il termine pericolosità da crollo si fa riferimento alla probabilità di accadimento di un fenomeno di una certa intensità in un certo intervallo di tempo in una determinata area (Varnes et al., 1984). In tale definizione sono dunque inclusi i concetti di intensità, frequenza di ricorrenza e localizzazione nello spazio, le cui valutazioni risultano essere molto complesse soprattutto nell'identificazione dell'aspetto temporale dei fenomeni. Per tale motivo la valutazione della suscettibilità è stata realizzata per mezzo di metodologie quantitative, attraverso la stima della probabilità di innescamento del processo e della probabilità che, una volta innescato, il fenomeno raggiunga una certa posizione nello spazio, costituente la probabilità di propagazione. La probabilità di innescamento è stata valutata secondo due metodologie: un approccio euristico e uno deterministico. La probabilità di propagazione è stata stimata per mezzo di differenti modelli, quali: il codice di calcolo Hy-Stone che costituisce una modellazione matematica 3D seguita dall'impiego della procedura RHIV per la determinazione della pericolosità; una modellazione empirica pseudo-3D tramite il programma Conefall per la valutazione della massima distanza di propagazione dei blocchi crollati, sfruttando la metodologia del cono d'ombra; il software RocFall costituente una modellazione 2D atta ad una zonazione della pericolosità secondo la procedura RHAP.

Basilari per lo svolgimento dell'intero lavoro sono stati il DTM LIDAR, fornito dalla Protezione Civile regionale, la CTR a scala 1:2500 , le foto aeree e le ortofoto.

Il rilevamento litologico e geologico-strutturale è stato affidato al dott. Geol. Fulvio Podda, mentre sul terreno è stato svolto il rilevamento geomorfologico e geologico-tecnico. Ciò ha portato, nell'area di Villa Santina, alla catalogazione di 1528 blocchi ricollegabili ai fenomeni franosi, alla realizzazione di 10 rilievi geomeccanici e alla stilatura di un catasto di 18 opere di difesa passiva da caduta massi.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE

2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE

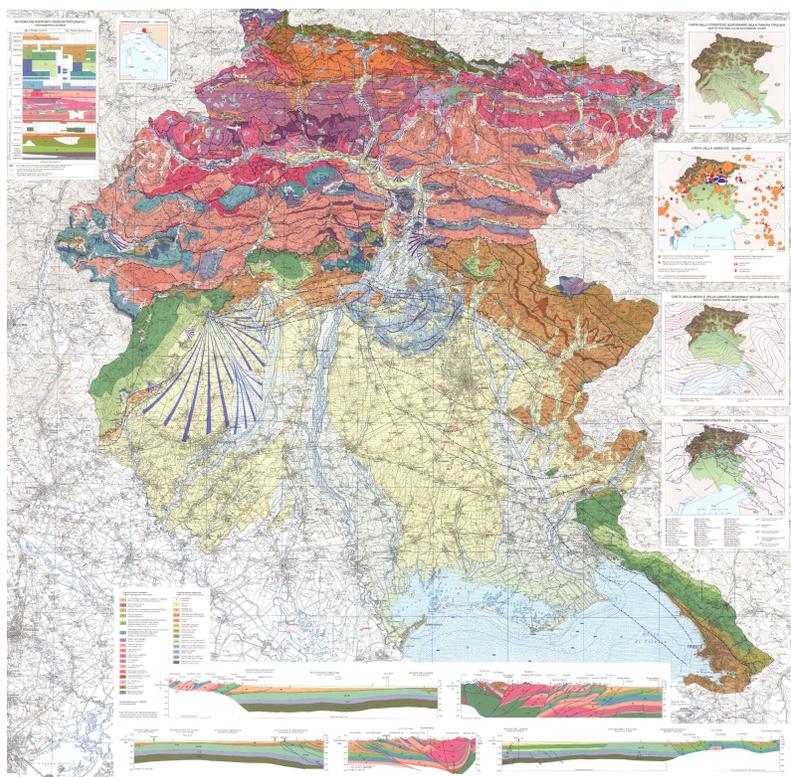


Figura 2.1: Carta geologica della regione Friuli Venezia Giulia (Carulli 2006).

Il territorio della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia appartiene all'unità subalpina.

Nell'area settentrionale della regione (al confine con l'Austria e la Slovenia) si saldano le terminazioni di tre catene montuose: la Catena ercinica Paleocarnica, quella delle Alpi Meridionali orientali e delle Dinaridi esterne.

Le litologie principali sono caratterizzate da rocce sedimentarie quali: terrigene (arenarie, argilliti, siltiti, conglomerati ecc.) e carbonatiche (calcarei e dolomie). Sono presenti poi rocce evaporitiche (gessi e dolomie), che giocano un ruolo decisivo nel contesto strutturale, infatti fungono da superfici di scollamento dei principali thrust alpini che caratterizzano l'assetto tettonico regionale, conferendogli la tipica struttura a scaglie embriciate sud-vergenti responsabile dei numerosi raccorciamenti stratigrafici e dei raddoppiamenti delle sequenze. Subordinatamente sono presenti prodotti effusivi costituiti da emissioni di vulcaniti basiche e vulcanoclastiti di età Carbonifero. Del

Triassico medio sono invece i depositi terrigeno-tufitici e piroclastici di tipo ignimbrico. Rocce metamorfiche di basso grado sono presenti nelle formazioni paleozoiche.

Il territorio regionale è caratterizzato da un assetto strutturale che permette di distinguere in maniera chiara la distribuzione secondo fasce allungate lungo la direzione Est-Ovest caratterizzate da litologie relativamente continue. Le litologie più antiche sono attribuite all'Ordoviciano inferiore (Paleozoico) ed affiorano nella Catena Carnica con progradazione verso le più recenti spostandosi a Sud fino a raggiungere i depositi quaternari della Pianura friulana. In questo quadro schematico della distribuzione cronologica dei terreni fa eccezione l'area del Carso (Cretacico inferiore-Eocene inferiore) che appartiene al dominio dinarico ed è quindi caratterizzata da una distribuzione dell'età non corrispondente con quella a fasce del resto della regione con le formazioni geologiche orientate dalla più antica alla più recente secondo la direzione Nord Ovest – Sud Est.

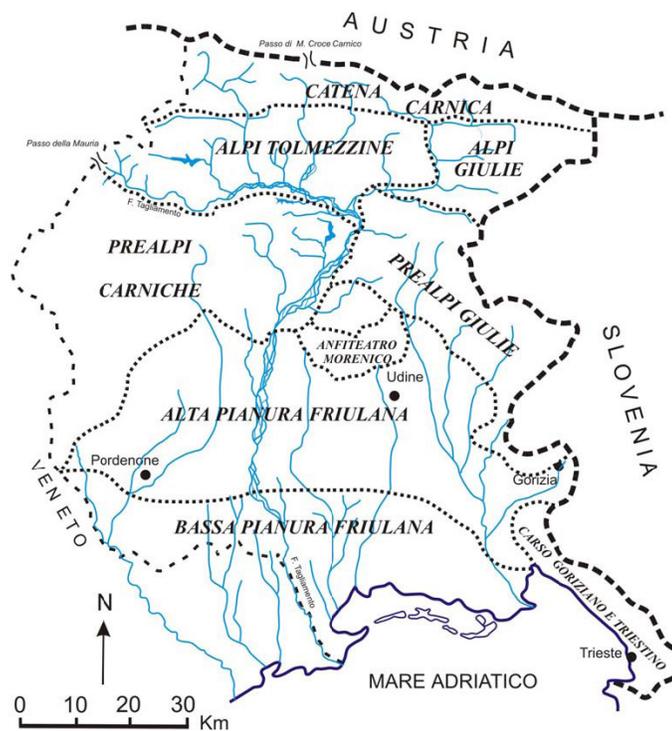


Figura 2.2: Settori orografico-geologici del Friuli Venezia Giulia.

I settori orografico-geologici del Friuli Venezia Giulia (figura 2.2) possono essere così riassunti:

- Il *primo settore*, la Catena Carnica è ubicato tra la linea della Gailtal a Nord ed la Linea Comeglians-Paularo a Sud. La stessa può essere divisa in due comparti, uno a NW e l'altro a SE, separati dalla linea della Val Bordaglia (NE-SW). Il comparto NW è costituito dal paleozoico metamorfico (Ordoviciano inf., Siluriano e Devonico) costituito da Scisti e Marmi, affioranti

soprattutto nella zona del Comelico e del Monti Peralba-Avanza. Il comparto SE della fascia settentrionale è caratterizzato dall'ercinico non metamorfico (Devoniano-Carbonifero) che interessa la sequenza calcarea devonica e flyschoidi carbonifera (Fm. dell'Hochwipfel). La linea della Val Bortolaga è di origine ercinica, riattivata poi in fase mesoalpina con attività trascorrente sinistra, assumendo un'importanza regionale e guidando le compressioni alpino-dinariche, in particolare i *trust* sudvergenti delle Alpi Carniche Occidentali

- Il *secondo settore*, le Alpi Tolmezzine (o Carniche Meridionali) sono poste a Sud del primo settore, fino all'alto corso del F. Tagliamento. In questo settore, sopra le facies evaporitiche del Permiano si depositano sedimenti marini più profondi. A partire dal Triassico si imposta l'estesa piattaforma della Dolomia dello Sciliar (Schlern) che è presente pressoché in tutta la Carnia. Sono inoltre presenti corpi

bacinali che durante l'intervallo del Triassico medio sono interessati da episodi tufitici, come le vulcaniti della zona di Forni di Sopra, nella Formazione di La Valle di età Ladinico superiore. Un'altra potente piattaforma carbonatica di età Ladinico superiore-Carnico inferiore è quella della Dolomia Cassiana che ha il suo maggior sviluppo in Val Pesarina. Dolomie evaporitiche e gessi appartenenti alla formazione di Raibl (Carnico superiore) caratterizzano le aree di Socchieve e di Enemonzo. In particolare la causa del dissesto geologico nei pressi dell'abitato di Enemonzo è dovuto alla presenza di substrati gessosi che subiscono una rapida e facile dissoluzione favorita anche dalla oscillazione della falda freatica.

- Il *terzo settore*, le Alpi Giulie poste a Est delle Alpi Tolmezzine e separate da queste dal basso corso del F. Fella, fino alla Val Resia. Questo settore è dominato dalle facies di piattaforma carbonatica con scogliere dolomitiche massicce. Le facies possono variare da subtidali di ambiente ossigenato a quelle anossiche. La Dolomia principale del Norico è ben rappresentata ad esempio nella Val Cellina. In particolare a continuazione della Dolomia Principale nell'area delle Alpi Giulie ad esempio M. Cimone, M. Montasio e M. Canin si depositano calcari dolomitici ben stratificati appartenenti alla Formazione del Dachstein di età Retica.

- Il *quarto settore*, le Prealpi Carniche, si estende a Sud ed a Ovest del percorso montano del F. Tagliamento, fino all'alta Pianura Friulana ed è caratterizzato da una successione di terreni con una stratigrafia compresa tra il Carnico inferiore e il Miocene. Questa area è interessata da due grandi elementi strutturali; a Nord la Linea dell'Alto Tagliamento, che corre lungo tutto l'alto corso del F. Tagliamento e la Linea Barcis-Starò Selo a Sud.. Questo sovrascorrimento a carattere regionale è il più importante delle Prealpi Carniche ed è caratterizzato da una fascia di cataclasi. Nel settore

settentrionale i termini più antichi vengono testimoniati da calcari scuri, marne, arenarie, dolomie e gessi del Carnico inferiore. Procedendo verso Sud nella zona del M. Pramaggiore a Sud di Forni di Sopra affiora la Dolomia Principale del norico-retico. Nel Monte Raut affiorano i Calcari Grigi del Friuli di età liassica inferiore. Sebbene poco potente ma molto estesa è la facies del Rosso Ammonitico (M. Verzegnis, Colle dei Larici, M. Lovinzola) del Lias medio-superiore. La tettonica della zona agisce sui terreni antichi posti nei territori a Nord determinando il loro lento smantellamento e la successiva produzione e allontanamento dei prodotti che nell'Eocene inferiore vanno a colmare bacini profondi, formando così depositi di flysch. Questi eventi sono testimoniati dagli affioramenti nelle zone di Clauzetto, Frisarco, Claut, Andreis, ecc. Depositi molassici di età oligocene-miocene che giacciono sopra il flysch testimoniano la presenza di un mare poco profondo.

- Il *quinto settore*, le Prealpi Giulie essendo confinante a Nord con le Alpi Giulie e a Est con le Prealpi Carniche ha con tali aree molti elementi in comune, infatti le dolomie e i calcari triassici delle Alpi Giulie si rinvencono anche nella Val Resia, nel M. Plauris nella catena dei Musi ecc. Anche il flysch che caratterizzano i termini più recenti del settore delle Prealpi Carniche affiorano nei rilievi collinari da Gemona fino al limite sud-orientale del Friuli. Del resto il settore è rappresentato da rocce carbonatiche del Cretaceo, mentre il Paleocene-Eocene è testimoniato da potenti depositi terrigeni marnosi-arenacei. La porzione sud-orientale delle Prealpi Giulie segue l'assetto tettonico dinarico, come ad esempio tipica orientazione dinarica ha la "linea della Bernadia" che porta i calcari cretaccici ad accavallarsi su quelli eocenici dei colli di Tarcento.

- Il *sesto settore*, l'anfiteatro morenico che corrisponde allo sbocco nell'Alta Pianura Friulana del F. Tagliamento, occupa una superficie di circa 200 kmq ed è costituito da tre cerchie. Si tratta in genere di materiali eterogenei a granulometria molto variabile.

- Il *settimo settore*, della Pianura Friulana è divisa in alta pianura e bassa pianura. L'alta pianura, delimitata verso sud dalla fascia delle risorgive e verso Nord dai rilievi dell'Anfiteatro morenico e dai rilievi pedemontani delle Prealpi Cariche e Giulie si è formata in corrispondenza dell'ultimo massimo glaciale würmiano tra i 20.000 ei 15.000 anni fa. La bassa pianura posta a sud della fascia delle risorgive è caratterizzata prevalentemente da sedimenti olocenici sabbioso-gliaiosi che si protendono fino all'area litorale.

- L'*ottavo settore*, del Carso diviso in Carso Goriziano e Triestino è caratterizzato da una potente successione di rocce carbonatiche sedimentate in un ambiente di mare generalmente poco profondo. La crescita della piattaforma carbonatica viene interrotta dall'arrivo delle correnti di torbidità responsabili della sedimentazione del flysch a partire dal Eocene medio.

2.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO LOCALE

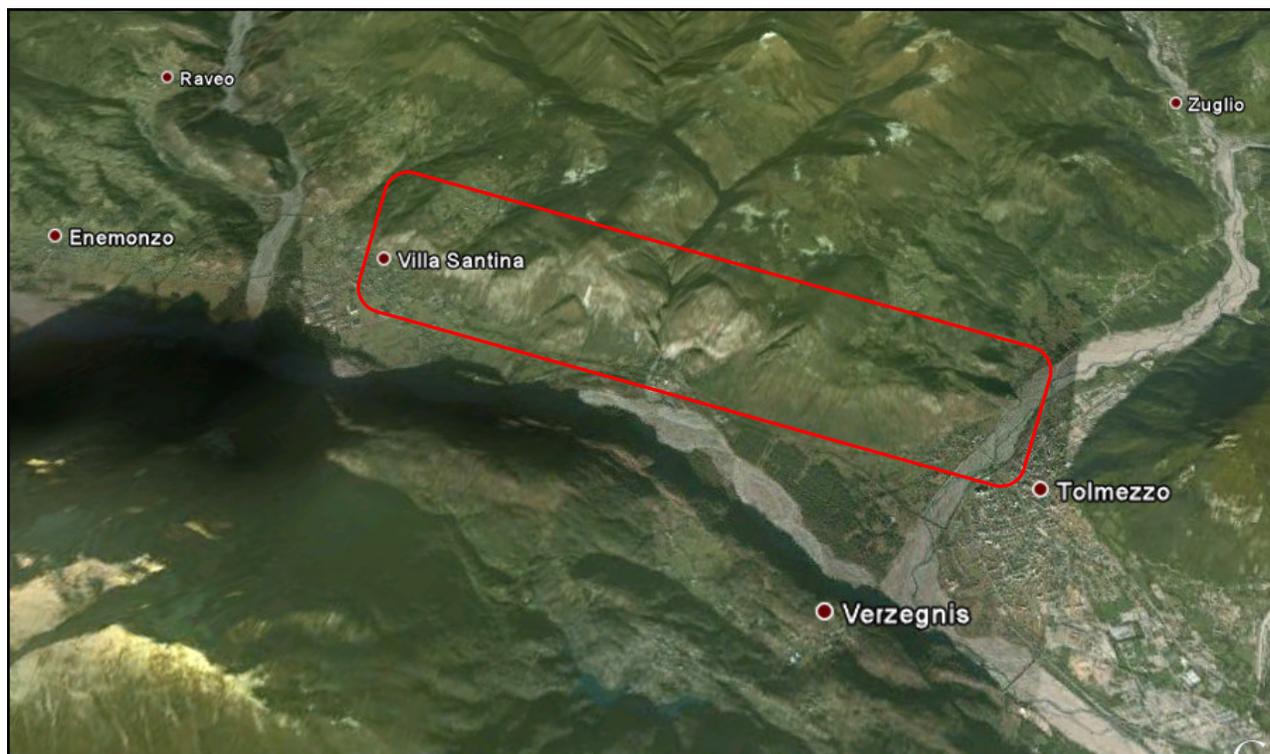


Figura 2.3: Area oggetto dello studio, Villa Santina-Caneva di Tolmezzo.

L'area si estende con direzione W-E sulla sponda sinistra idrografica dell'ampia valle del medio corso montano del Fiume Tagliamento, a partire ad Ovest dalla periferia occidentale dell'abitato di Villa Santina e terminare a Est, dopo circa 8 km di andamento sub-rettilineo, in corrispondenza dell'abitato di Caneva, alla confluenza del Torrente But nel Fiume Tagliamento. Le quote vanno dai 320-360 m dell'esteso fondo valle ai 1041 m del M. Crettis.

Morfologicamente l'area è caratterizzata dal netto contrasto fra l'ampio letto alluvionale, ormai assestato, del Tagliamento (il corso attuale del fiume si sviluppa a 1-2 km a meridione dell'area) e le ripide pareti che lo sovrastano a Nord, raccordate da estese fasce di detrito di falda che insistono sulla S.S.52 che le lambisce al piede.

2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO - STRUTTURALE LOCALE

2.3.1 LA SUCCESSIONE STRATIGRAFICA E I DEPOSITI QUATERNARI

L'area appartiene alle Alpi Carniche Meridionali (o Alpi Tolmezzine). Nella zona affiora una successione molto semplice, che va dal Ladinico superiore al Carnico inferiore, ed è caratterizzata dalla presenza di due sole unità stratigrafiche pre-quadernarie in regolare sovrapposizione stratigrafica.

- *Gruppo del M. Siera (sensu Venturini, 2009)*: Calcari, calcari dolomitici e dolomie cristalline subtidali grigio chiari, a bioclasti, mal stratificati, in banchi metrici o massicci, con rare intercalazioni calcaree stratificate; locali breccie carbonatiche di *talus*. Comprende la Formazione del Contrin, i “calcari dolomitici del M. Tiarfin” e la Dolomia dello Sciliar, quest'ultima volumetricamente preponderante nell'area rilevata. Essa costituisce infatti tutta la ripida parete che da Villa Santina arriva a Caneva di Tolmezzo. La potenza raggiunge massimi di oltre 800 m.



Figura 2.4: L'aspetto massiccio della piattaforma della Dolomia dello Sciliar soprastante la località di Borgo S. Antonio di Villa Santina.

- *Formazione della Val Degano (Calcari scuri s.l. Auctt.) con intercalazioni di lutiti verdi* (Ladinico sup. – Carnico inf.): Calcari micritici grigio scuri, a volte bituminosi e fetidi in strati decimetrici e banchi metrici alternati a marne e marne calcaree in strati dm-cm, con rare areniti tuffitiche verdi e lutiti silicee. Alla base sporadiche breccie carbonatiche e occasionali livelli sottili di carbone.



Figura 2.5: Affioramento dei calcari scuri, nodulari, alternati a livelli di marne della Formazione della Val Degano lungo la strada che sale da Villa Santina a Lauco.

Il quadro generale è dominato dalla prima unità che qui, per ragioni storiche, si preferisce chiamare Dolomia dello Sciliar e che rappresenta la quasi totalità dei rilievi essendo la Formazione della Val Degano, al tetto della piattaforma carbonatica, limitata a lembi affioranti per lo più all'estremo orientale dell'area.

Le lutiti verdi affiorano sulle pendici meridionali del M. Dobis e continuano, verso Est, al di sopra delle pareti che sovrastano l'abitato di Caneva. Costituiscono un orizzonte torbido frapposto fra due corpi carbonatici: il corpo inferiore, potente circa 20 m, è formato da calcari neri stratificati che poggiano con un contatto netto sulla piattaforma carbonatica massiccia; il corpo superiore è composto da calcari scuri, ben stratificati, con intercalazioni marnose.

I depositi quaternari presenti nella zona vengono qui descritti dal più antico al più recente:

- *Till indifferenziato* (Pleistocene): è un deposito caotico eterogeneo con trovanti, matrice limosa, clasti da subarrotondati a subangolosi, striati, tessitura matrice-sostenuta. L'unico deposito di till indifferenziato si rinviene sul pianoro di quota 700m a Nord-Ovest di Caneva.

- *Deposito di frana* (Pleistocene sup.-Attuale): deposito eterogeneo costituito da blocchi e frammenti eterometrici angolosi e/o subarrotondati immersi in matrice sabbiosa, tessitura da clasto-sostenuta a matrice sostenuta, talvolta cementati. Per l'area di Villa Santina si è reso necessario includere in questo tipo di deposito anche le paleo frane. Esse si sviluppano alla base delle pareti carbonatiche che sovrastano la S.S 52 specie in corrispondenza delle paleofaglie triassiche. Il corpo delle paleofrane è costituito da blocchi di dolomia dello Sciliar di dimensioni variabili da diversi m³ ad intere porzioni di piattaforma di lunghezza e spessore ettometrico, solo in parte disarticolato. La matrice è o assente o costituita da frammenti spigolosi minori.

- *Deposito di conoide alluvionale* (Pleistocene sup.-Attuale): ghiaie a clasti subangolosi-subarrotondati con matrice sabbiosa, tessitura da clasto-sostenuta a matrice sostenuta. E' il conoide formato dal T. Vinadia al km 16 della S.S. n° 52 Carnica.

- *Alluvioni attuali* (Olocene): sono ghiaie grossolane subarrotondate con matrice sabbiosa e tessitura clasto-sostenuta. Rappresentano sia le alluvioni in formazione lungo gli alvei dei corsi d'acqua principali (Fiume Tagliamento) sia le alluvioni recenti stabilizzate.

- *Detriti di falda attuali e recente* (Olocene): sono brecce gravitative di versante, in prevalenza sciolte, eterogenee, clinostratificate in falde e conoidi. Si rinvencono alla base dei massicci rocciosi carbonatici. I clasti sono generalmente angolosi, eterometrici, fino a grossi blocchi. La tessitura è da clasto-sostenuta a matrice-sostenuta.



Figura 2.6: Tipico detrito di falda alla base del costone roccioso, presso Borgo S. Stefano.

2.3.2 IL QUADRO STRUTTURALE

L'assetto generale è quello di un piastrone sub-orizzontale (con deboli immersioni a NNE) della piattaforma carbonatica, sormontato localmente da lembi residui di calcari scuri a pari giacitura.

Il lineamento tettonico principale dell'area è la "linea dell'Alto Tagliamento" (Carulli, 2006) chiamata anche "linea di Villa Santina" (Venturini, 2009), faglia inversa ad alto angolo, con direzione E-W ed immersione del piano a N. Il disturbo tettonico non è mai affiorante, essendo coperto dagli ampi, estesi e potenti, depositi alluvionali pleistocenici ed attuali del F. Tagliamento, ma è intuibile sulla base dei rapporti stratigrafici fra le formazioni affioranti sulle sponde opposte della valle. La linea infatti porta la base della piattaforma ladino-carnica dei rilievi in sponda sinistra del Fiume Tagliamento, a sormontare le unità del Carnico sup.-Norico che affiorano nei rilievi in destra idrografica. La posizione della linea tettonica è supposta passare entro il limite meridionale dell'area.

Decisamente affioranti, o comunque ben intuibili, sono invece numerose faglie sub-verticali a direzione NE-SW, N-S (foto 16, 17 e 18) e l'unica a direzione NW-SE nell'area di Caneva (foto

19). Esse, nel Ladinico superiore-Carnico inferiore, hanno tagliato a blocchi la piattaforma ad opera di una fase tettonica distensiva, creando un complesso paesaggio ad horst e graben. Gli effetti di questa fase estensiva sono stati quelli di abbassare a gradinata verso Ovest blocchi di piattaforma nonché quello di condizionare, su ogni singolo blocco, la sedimentazione delle unità successive sia in termini di facies che di spessore. Come già segnalato, solo al limite orientale dell'area, a Nord di Caneva, si osserva una paleofaglia distensiva che abbassa un blocco di piattaforma verso Est (foto 19). I rigetti fra i singoli blocchi sono di qualche decina (massimo poche centinaia) di metri. Queste paleofaglie sono poi state riprese in età alpina, talora con segni di attività trascorrente (con deboli componenti sia transtensive che transpressive).

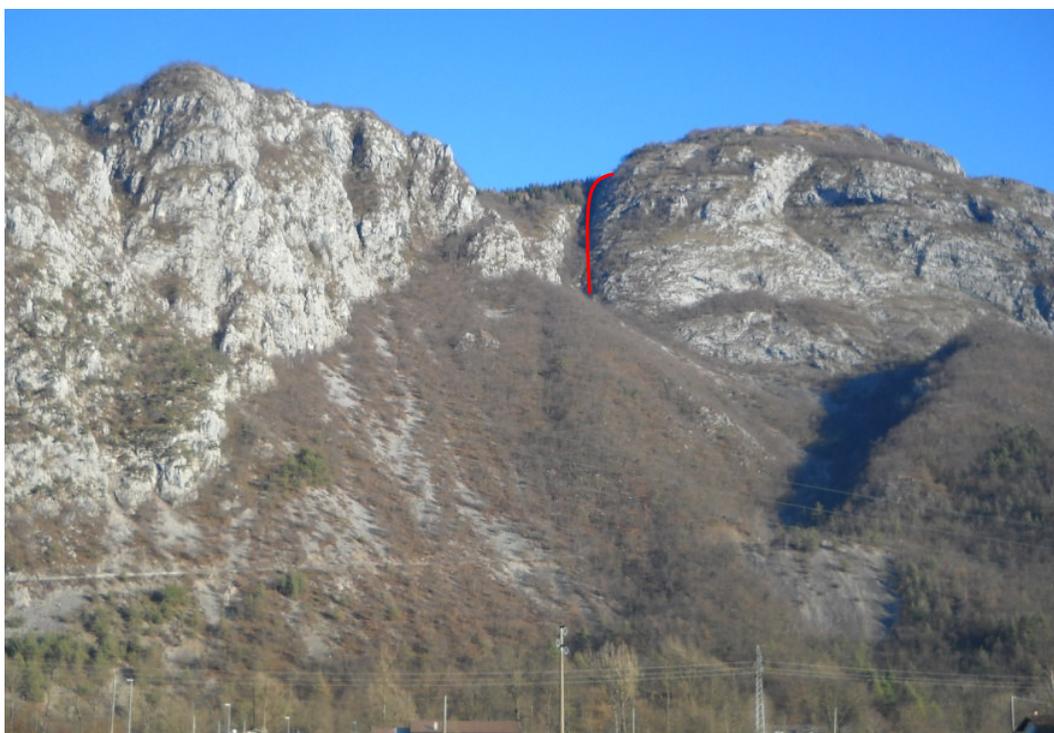


Figura 2.7: La paleofaglia del M Crettis che ha abbassato verso W il blocco di Piattaforma della Dolomia dello Sciliar.

Un lineamento di un certo interesse è quello presente fra il Monte Dobis e Caneva: è una faglia inversa ad alto angolo che porta la Dolomia dello Sciliar a contatto con la Formazione della Val Degano. Essa potrebbe rappresentare la riattivazione in inversione, durante la fase valsuganese a compressione NW-SE, di una paleofaglia triassica facente parte del “semigraben” di Villa Santina. Una struttura minore, ma morfologicamente molto evidente, è quella impostata nella Dolomia dello Sciliar, sul versante meridionale del Col Maior, all’imbocco della forra del Torrente Vinadia. Il piano è verticale con direzione E-W. E’ ben visibile sulla superficie di faglia la polifasicità dei movimenti, di cui il più evidente è l’ultimo, in trascorrenza destra.



Figura 2.8: Faglia polifasica, con direzione E-W, sulle pendici del Col Maior, ad Est della forra del T. Vinadia.

2.4 INQUADRAMENTO SISMOLOGICO

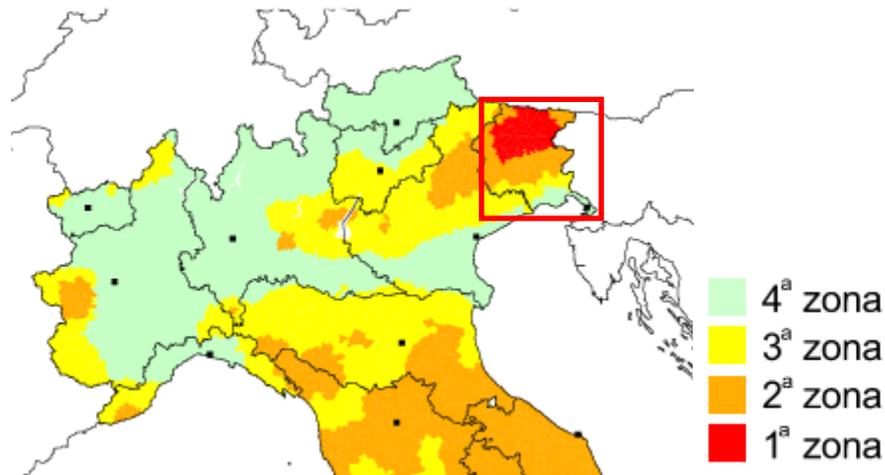


Figura 2.9 Sismicità del Friuli Venezia Giulia

Da un punto di vista sismologico il Friuli-Venezia Giulia si inserisce in un contesto geodinamico particolarmente attivo, conseguenza della collisione tra la microplacca adriatica e quella europea. I lineamenti sismicamente più attivi presentano orientamento E-W nella fascia pedemontana (Linea Barcis - Staro Selo ed associate) con attività principalmente inversa e andamento NW - SE, con attività trascorrente destra ed inversa. Le aree interessate dai sismi sono ben definite nella Provincia di Udine, in particolare lungo la valle del Fiume Tagliamento (da Buia - Tarceno fino a Tolmezzo), la parte finale della valle del Fiume Fella e qualche altra limitata area alpina. La fascia pedemontana presenta un elevato gradiente che porta i valori di accelerazione sismica da 0,32 g fino a 0,56 g, con riferimento ad un tempo di ritorno pari a 475 anni, rientrando così tra le zone a pericolosità più alta dell'Italia centro-settentrionale.

Tra gli eventi sismici più forti si ricorda il terremoto del 1976, nel quale si sono verificate due scosse principali, la prima il 6 maggio e la seconda il 15 settembre. L'epicentro del primo evento venne localizzato a circa 3 km ad O/SO di Gemona. Durante tale sisma la scossa principale fu di magnitudo 6,4 con una durata di circa 50 secondi e fu preceduta da una più debole di magnitudo 4,5. Il secondo evento si manifestò con magnitudo di 6,1 ed epicentro presso l'abitato di Venzona (circa 7 km a nord dell'epicentro precedente). In entrambi i casi secondo i dati raccolti dall'Osservatorio Geofisico di Trieste, le profondità focali furono uguali o inferiori a 10 km.

L'attività sismica risulta essere di notevole importanza in quanto è tra le principali cause di innesco dei fenomeni di crollo e ribaltamento, come testimoniato dal terremoto del 1976, che causò il verificarsi di numerosi eventi nell'area oggetto di indagine.

3. LA CADUTA MASSI

Il problema della caduta massi costituisce uno dei fenomeni calamitosi più gravi e ricorrenti che si verificano ove le condizioni geologiche e meteorologiche risultano particolarmente gravose per la stabilità dei versanti.

L'elevata pericolosità del processo di crollo è principalmente legata alla sua rapidissima evoluzione, con velocità dei blocchi spesso comprese tra i 30 e i 100 chilometri orari, e alla difficoltà di previsione dei punti di distacco e dei percorsi di discesa dei blocchi.

L'innescò di un movimento di caduta è determinato generalmente da una rottura per taglio o per trazione lungo i piani di discontinuità preesistenti che separano un blocco potenzialmente instabile dalla retrostante massa rocciosa costituente il pendio.

I fattori che condizionano la stabilità dei versanti rocciosi sono numerosi, spesso interdipendenti e possono essere raggruppati nel modo seguente:

- *fattori litologici;*
- *fattori tettonici;*
- *fattori morfologici;*
- *fattori idrogeologici;*
- *fattori connessi al tipo e all'uso del suolo;*
- *fattori antropici.*

4. RACCOLTA DATI

Per la realizzazione di una modellazione da caduta massi occorre la disponibilità di diverse informazioni. I dataset utilizzati sono stati in parte forniti dalla Regione Friuli Venezia Giulia e in parte ottenuti a seguito dell'attività di terreno svolta.

4.1 DATASET ESISTENTI

4.1.1 CARTA TOPOGRAFICA

La carta topografica fornita alla scala 1:2500 è stata realizzata con tecniche digitali fotogrammetriche. La mappa è resa disponibile in formato elettronico come file CAD. La problematica legata a tale carta riguarda il fatto che, in alcune aree, le linee di quota sono state rasterizzate come linee spezzate (*figura 4.2*).

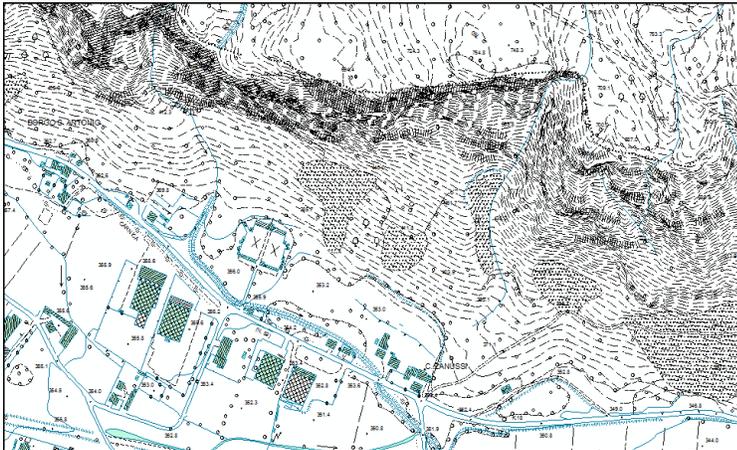
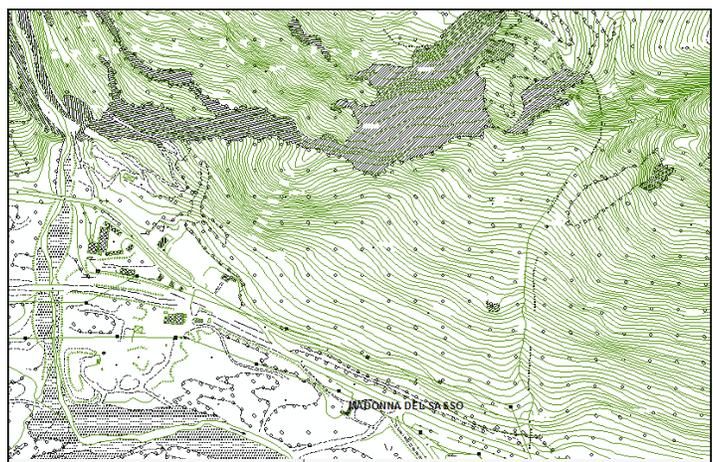


Figura 4.1: Carta topografica (CTR, Carta Tecnica Regionale) in scala 1:2500 dell'area di Villa Santina, località Case Zanussi. Esempio di linee di quota a tratto spezzato.

Figura 4.2: Carta topografica in scala 1:2500 dell'area di Villa Santina, località Madonna del Sasso. Esempio di linee di quota a tratto continuo.



4.1.2 CARTA GEOLOGICA

La carta geologica in scala 1:150.000 è stata realizzata dal Servizio Geologico della Regione Friuli Venezia Giulia (Carulli, 2006) (figura 4.3). La mappa è stata creata prendendo in considerazione l'intera letteratura geologica della regione. Considerando la scala della mappa rispetto alla quella delle analisi si è deciso di optare per un miglioramento delle informazioni geologiche per mezzo di un'indagine di dettaglio sul campo che ha portato alla stesura di una carta in scala 1:5.000.

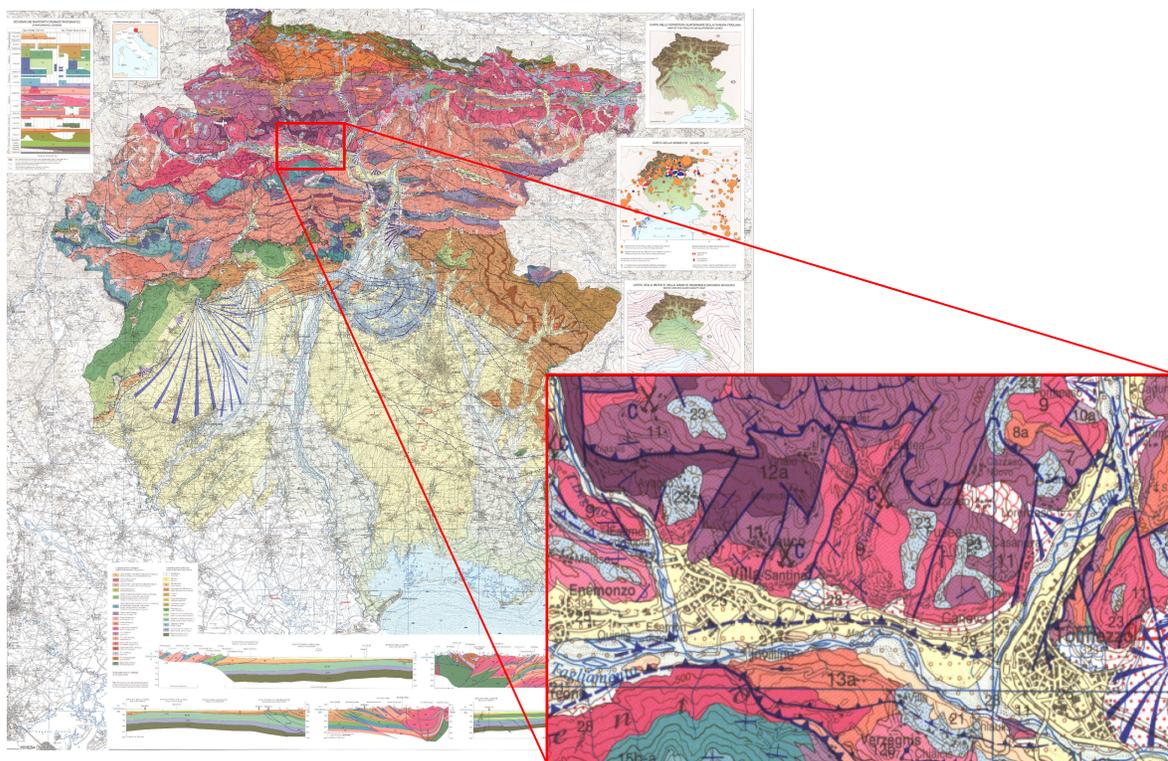


Figura 4.3: Carta geologica alla scala 1:150.000 del Friuli Venezia Giulia (Carulli 2006) con dettaglio dell'area di indagine.

4.1.3 ORTOFOTO

Una ortofoto è una fotografia aerea che è stata geometricamente corretta e georeferenziata (ortorettificata) in modo tale che la scala della fotografia sia uniforme, ovvero la foto può essere considerata equivalente ad una mappa. A differenza di una foto aerea, una ortofoto può essere usata per misurare distanze reali, in quanto raffigura una accurata rappresentazione della superficie della Terra. Diverse serie di ortofoto, dal 1998 al 2007 (esempi in figura 4.4), sono disponibili per la Regione Friuli Venezia Giulia con risoluzione sempre migliore. Le ortofoto più recenti, create

durante la realizzazione del LIDAR DTM, posseggono una risoluzione nominale di 0,2 x 0,2 m. La risoluzione dell'immagine della superficie reale dipende dalla elevazione, e potrebbe essere più alta per le montagne e più bassa per i piani vallivi.

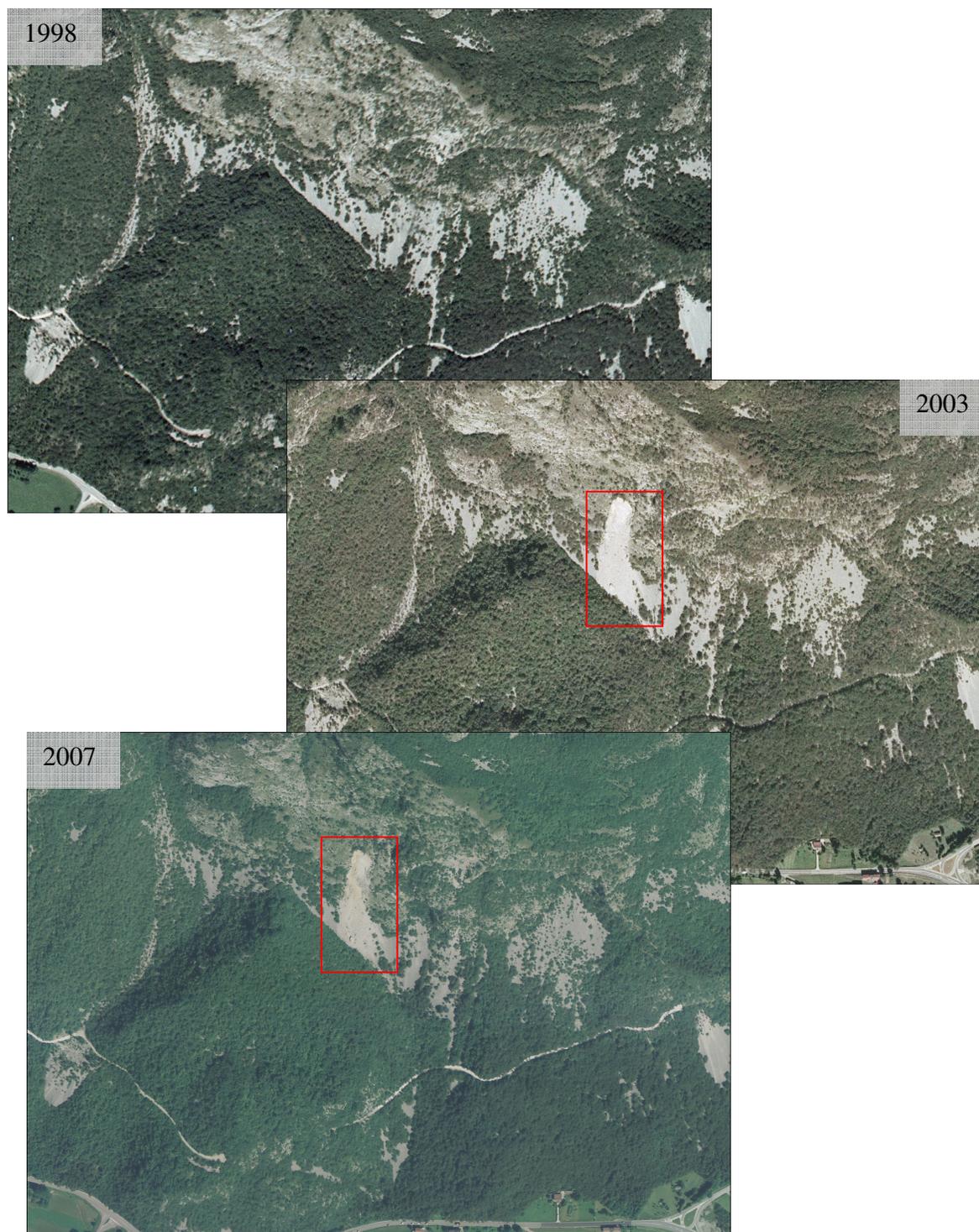


Figura 4.4: Confronto tra l'ortofoto del 1998, del 2003 e del 2007. Dal confronto è possibile vedere come il fenomeno franoso nei riquadri sia successivo all'ortofoto realizzata nel 1998.

4.1.4 FOTO AEREE

Uno degli strumenti più importanti per l'identificazione e la mappatura delle frane è la fotointerpretazione. Dall'interpretazione delle stereocoppie di fotogrammi, si è in grado di riconoscere frane antiche, frane attive, aree che sono soggette a frane e qualsiasi altra caratteristica che può essere rilevante per l'attività di frana. L'Istituto Geografico Militare italiano (IGM) scatta regolarmente foto su tutto il territorio nazionale, con voli supplementari a seguito di eventi significativi (alluvioni, terremoti, incidenti industriali, tempeste).

Anno	Foglio	Strisciata	Fotogrammi
1957	13	XVII	3003-3006
1976	13	XIV	9211-9213
1976	14	XIV	9217-9223
2000	13	29	1131-1133
2000	13	91	3559-3562
2000	14	91	3564-3567

Tabella 4.1: Elenco delle foto aeree dell'IGM utilizzate per l'area di Villa Santina.

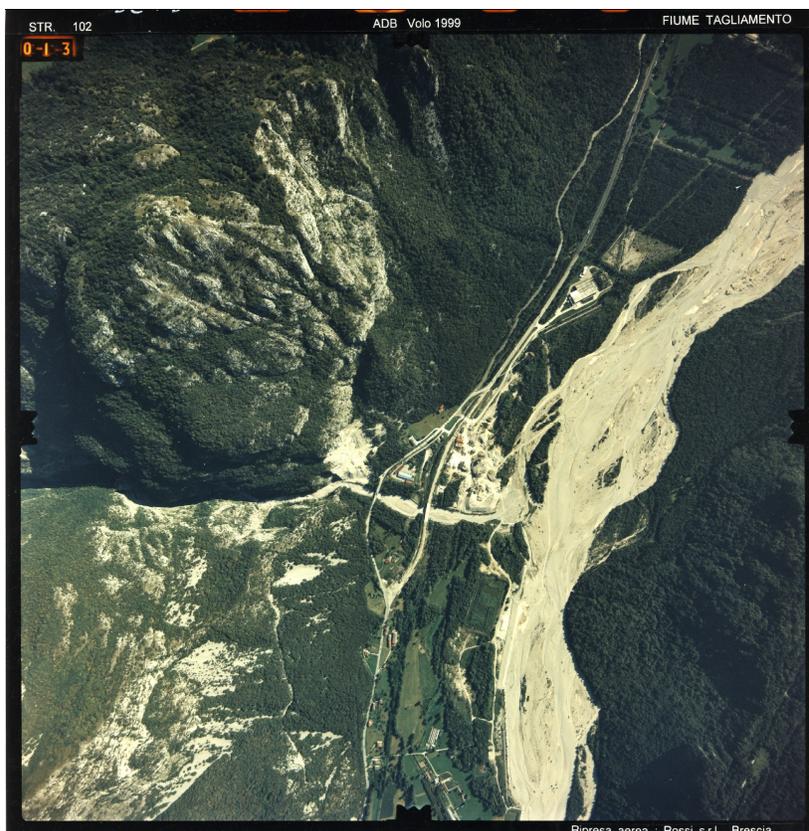


Figura 4.5: Esempio di foto aerea utilizzata per la fotointerpretazione.

4.1.5 LIDAR

Il termine LiDAR (*Light Detection and Ranging*) indica un sensore laser, più o meno complesso, per la misura di distanze, rispetto ad un bersaglio, senza alcun riferimento alla piattaforma (terrestre o aerea) sulla quale il sensore è montato. Alcuni autori propongono l'utilizzo del termine di *Airborne Laser Scanning* (ALS) (Wehr & Lohr, 1999) quando si vuole fare riferimento agli apparati laser scanner montati su elicotteri o aeroplani per distinguerlo dal sistema LiDAR terrestre. La tecnologia LiDAR (Baltsavias, 1999; Casella, 2003) è basata sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo o da un elicottero per mezzo di un telemetro laser che misura la distanza tra il punto di missione, rappresentato dal telemetro, ed il punto di riflessione corrispondente ad un generico punto appartenente alla superficie rilevata colpito dal laser.

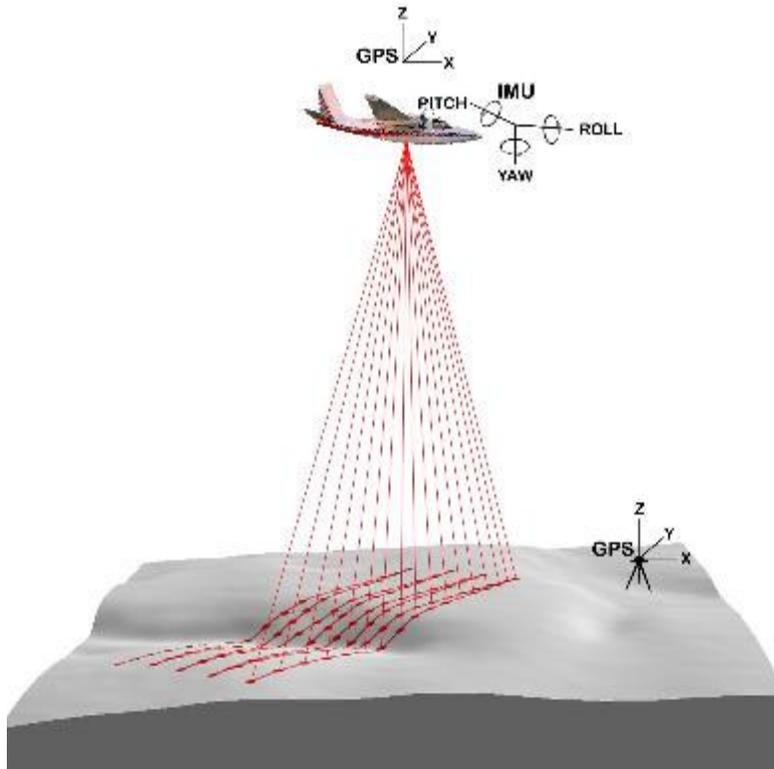


Figura 4.6: Schema di esecuzione della tecnica LIDAR.

Nel LiDAR topografico l'impulso elettrico prodotto da un generatore crea un raggio di luce infrarossa (lunghezza d'onda $\lambda = 1064 \text{ nm}$), con una divergenza variabile a seconda della qualità dello strumento; il segnale riflesso dall'elemento colpito viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione. Il telemetro misura il tempo impiegato dall'impulso

laser a percorrere il percorso di andata e ritorno. Il risultato fondamentale di un rilievo LiDAR è la restituzione delle coordinate x , y , z di ogni misura. Per calcolare le coordinate dei punti colpiti, oltre alla distanza fra il velivolo ed il punto a terra, è necessario conoscere anche la posizione e l'assetto del velivolo in ogni istante. A questo scopo sono integrati nel sistema LiDAR aerotrasportato un sistema inerziale (INS/IMU) che determina l'assetto del velivolo ed un GPS che determina la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento. La conoscenza della

distanza fra i due punti consente, infine, di ricavare le coordinate x , y , z del punto bersaglio. Una delle caratteristiche di maggior delicatezza della tecnologia LiDAR è la dimensione variabile dell'impronta a terra del raggio laser. La dimensione dell'impronta del raggio laser può variare da circa 0.1 m a 2 m ed è proporzionale all'altitudine e all'apertura angolare del sensore e consente di generare echi multipli aumentando notevolmente la probabilità che una parte dei raggi raggiunga il terreno determinando la quota dei punti a terra (figura 4.7). Esse infatti vengono registrate dal ricevitore in tempi diversi consentendo già una prima discriminazione in fase di registrazione: il primo eco di ritorno (*first pulse*) corrisponderà al primo oggetto incontrato (ad es. chioma di un albero) mentre

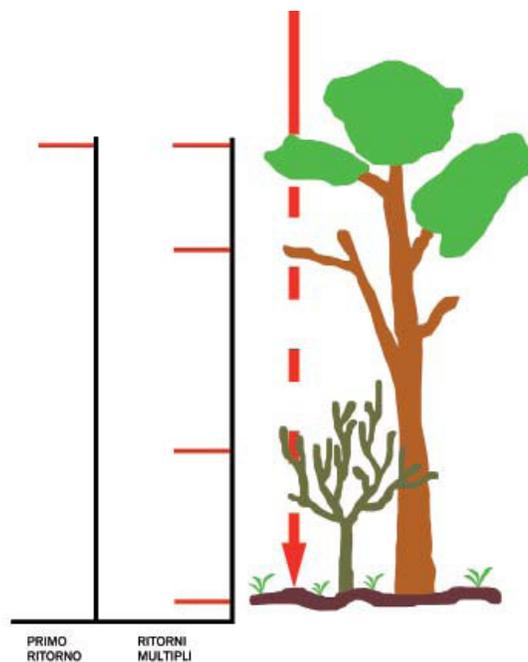


Figura 4.7: Le riflessioni multiple dell'impulso laser.

l'ultimo (*last pulse*) è riconducibile alla quota del terreno sotto copertura. Mediante opportune operazioni di post-processamento basate sull'utilizzo di algoritmi di filtraggio della nuvola di punti rilevati in origine (*raw data*) è possibile derivare mediante la scelta di un opportuno metodo di interpolazione il Modello Digitale del Terreno (DTM) (PIROTTI & TAROLLI, 2010) costituito dalle quote dei soli punti a terra. Si parla, invece, di Modello Digitale delle Superfici (DSM) nel caso di un modello digitale costruito a partire dai dati LiDAR non filtrati. È importante segnalare che le superfici di profondi corpi d'acqua non riflettono il segnale con le sole eccezioni nel caso di acqua torbida o dell'utilizzo di LiDAR batimetrico.

Per l'area di Villa Santina sono stati realizzati due differenti prodotti secondo due diversi sensi di rilievo: uno obliquo con inclinazione di 45° (figura 4.8), scelta legata alla complessità della geometria delle cime e alla loro componente verticale, mentre uno con direzione nadirale (figura 4.9), ovvero verticale. I dati Lidar sono stati filtrati dalla Helica srl. e forniti come nuvole di punti. Esse sono state utilizzate per ottenere una struttura TIN (*Triangulate Irregular Network*) che rappresenta un vettore DTM (*Digital Terrain Model*), il quale è stato successivamente convertito in formato raster con una dimensione della cella di 1m. La densità della nuvola di punti dipende dalla riflettività, dalla configurazione della scansione e dalla successiva elaborazione. Durante il presente lavoro sono state utilizzate delle densità di punti massime in zone rocciose ($> 1.000.000$ pts/km²) intermedie nelle aree vegetate (300-400,000 pts/km²) e minime nelle aree urbane (circa 150,000 pts/km²).

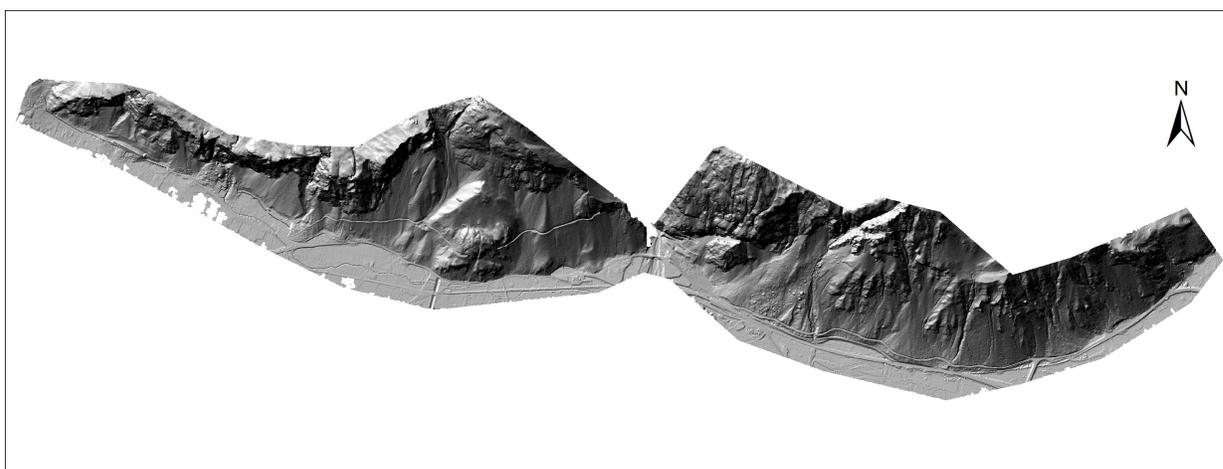


Figura 4.8: Lidar obliquo con inclinazione di 45° .

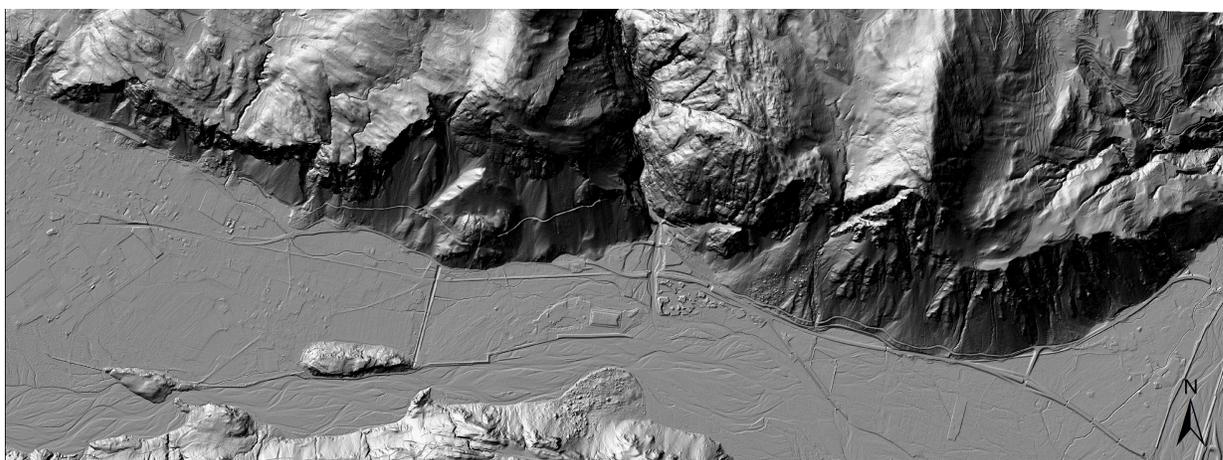
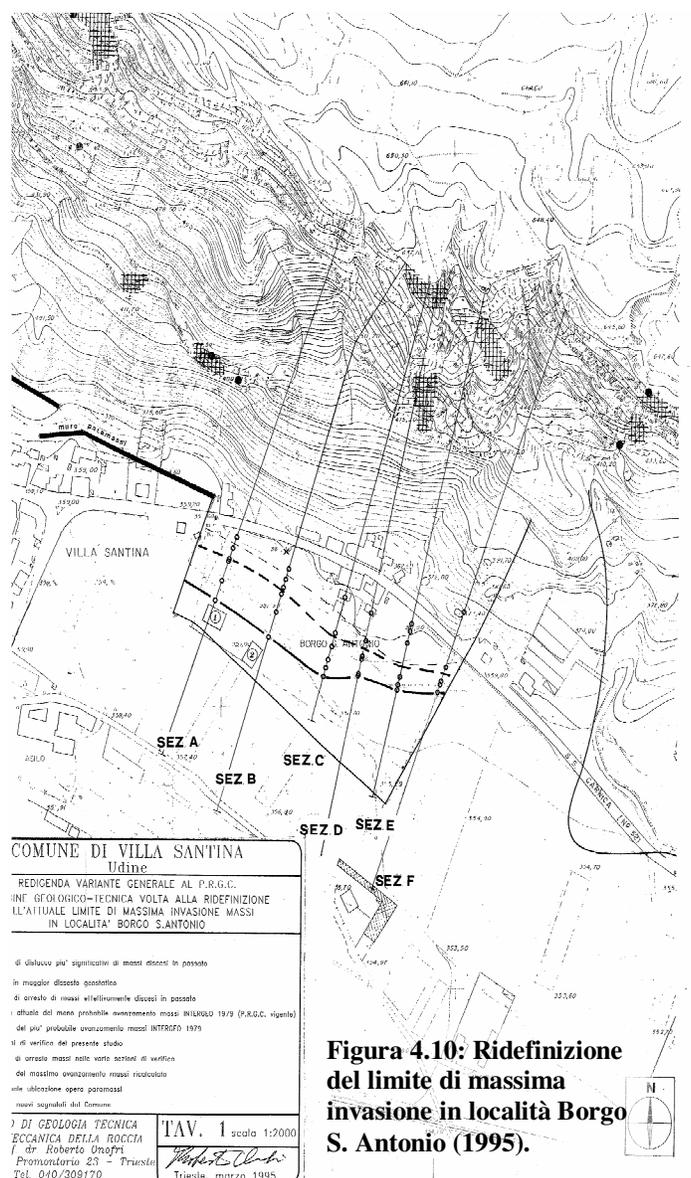


Figura 4.9: Lidar nadirale.

4.1.6 STUDI ANTECEDENTI

La documentazione relativa all'attività di frana nell'area di Villa Santina risulta essere limitata. Una panoramica generale sulle frane in Friuli-Venezia Giulia è offerta da Manca et al. (2006), come commentario della banca dati regionale nel catalogo nazionale delle frane (IFFI, *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia*). La maggior parte della letteratura scientifica relativa alle frane in Friuli si concentra sugli effetti del terremoto del 1976. Un articolo di Govi e Sorzana (1977) documenta con osservazioni dirette di dettaglio gli effetti del terremoto sulle frane. Il documento comprende anche una mappa in scala 1:150.000 delle frane indotte dal terremoto (Govi, 1977).

In relazione ai fenomeni seguiti al 1976 è stata redatta una relazione sui fenomeni di scendimento massi a monte dell'abitato di Villa Santina, con un'analisi dei processi e considerazioni sul dimensionamento delle opere protettive (1977). Allo scopo di identificare le caratteristiche dei fenomeni passati e avvenuti durante il terremoto si sono rilevati in sito la posizione ed il volume dei massi rotolati a valle, la direzione di scendimento, le caratteristiche dei rimbalzi, la natura degli ostacoli travolti e si è tracciato il limite massimo d'invasione. Il limite identificato decorre al margine settentrionale dell'abitato coinvolgendo alcune abitazioni, mentre ad oriente è stato posto a valle della sede della strada statale. La conclusione del lavoro ha portato alla identificazione delle caratteristiche delle opere di difesa passiva successivamente realizzate. Successivi lavori ad esso correlati sono stati svolti tra cui la ridefinizione del limite di massima invasione massi (1995).



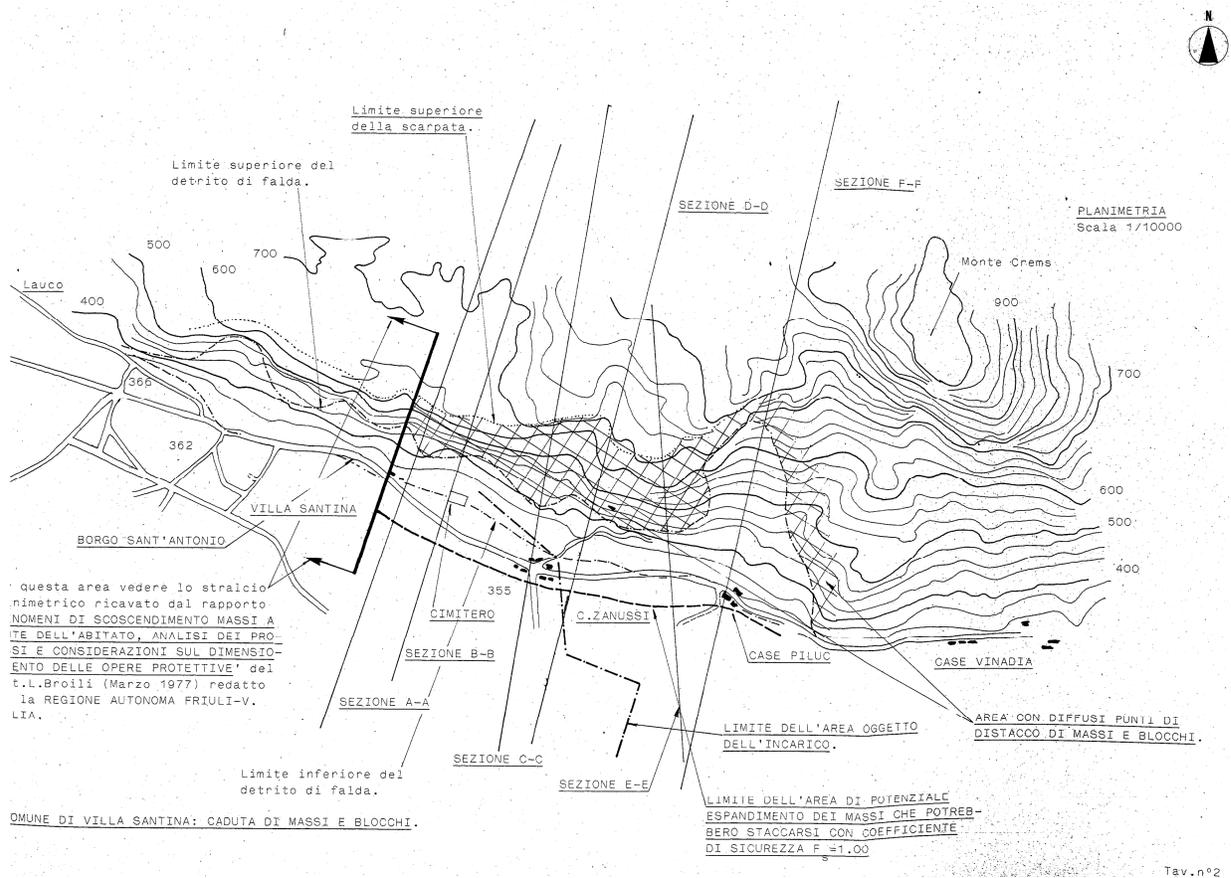


Figura 4.11: Comune di Villa Santina, caduta di massi e blocchi.

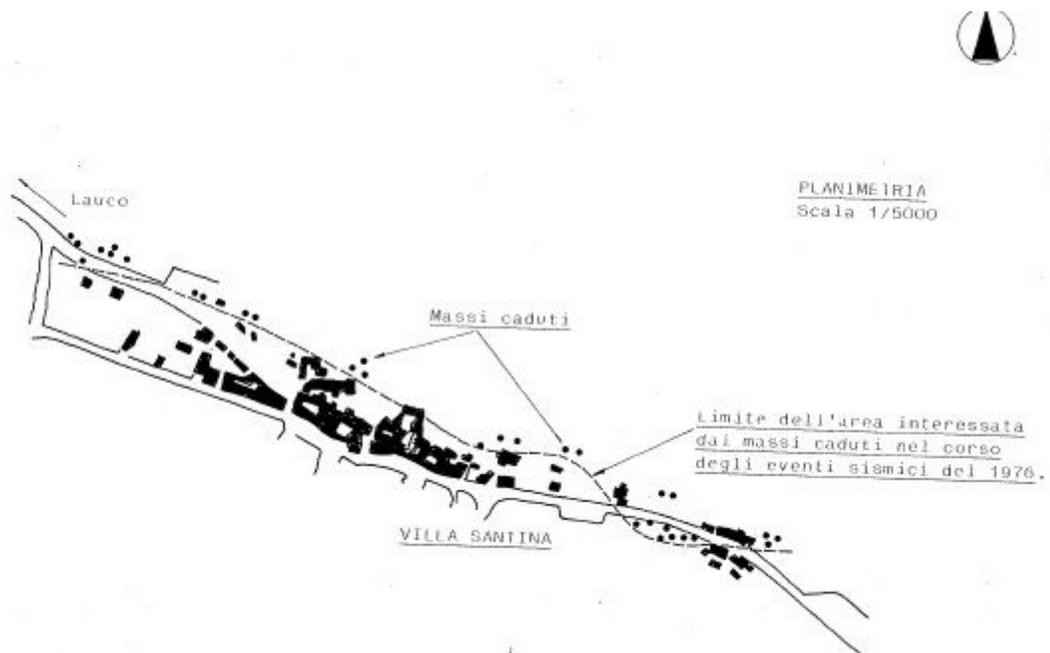


Figura 4.12: Stralcio planimetrico ricavato dal rapporto sui fenomeni di scendimento massi a monte dell'abitato di Villa Santina, con un'analisi dei processi e considerazioni sul dimensionamento delle opere protettive (1977).

4.2 DATASET REALIZZATI A SEGUITO DELL'ATTIVITÀ DI TERRENO

L'attività di terreno è stata svolta al fine di realizzare un'integrazione ai dataset esistenti e raccogliere nuovi dati necessari per le successive attività del lavoro.

Tale attività è stata progettata per ottenere le informazioni necessarie alla valutazione:

- ~ della frequenza e suscettibilità di innesco dei crolli (stabilità dei versanti, frequenza degli eventi);
- ~ della cinematica e suscettibilità di propagazione (traiettorie, velocità, energia) dei crolli;
- ~ della distribuzione, tipologia e efficienza delle opere di difesa dal rischio.

Per tale motivo la raccolta dati si è focalizzata sui seguenti aspetti:

- ~ mappatura dei blocchi franati;
- ~ mappatura della geologia;
- ~ mappatura dell'uso del suolo;
- ~ mappatura degli eventi di crollo sul campo;
- ~ caratterizzazione degli ammassi rocciosi;
- ~ individuazione e catalogazione delle opere di difesa.

Tutti i dati raccolti sul terreno sono stati digitalizzati in ambiente di lavoro ArcGIS™, in modo da integrare i dati già esistenti e forniti dalla regione, che in questo modo hanno subito anche una riesamina che ha portato alla definizione della loro validità.

Alla base delle indagini svolte si hanno le seguenti carte:

- ~ carta geologica;
- ~ carta della fratturazione rocciosa (per le aree in cui il basamento è affiorante-subaffiorante);
- ~ carta della granulometria-tessitura (per i depositi superficiali);
- ~ carta dell'uso del suolo;
- ~ carta della litologia superficiale;
- ~ carta geomorfologica e dei lineamenti.

4.2.1 CARTA GEOLOGICA

La carta geologica utilizzata è stata ottenuta attraverso l'integrazione delle osservazioni fatte sul terreno e la carta realizzata dal dott. Geol. F. Podda su incarico dell'Università degli Studi di Milano Bicocca. La redazione e successiva digitalizzazione (*figura 4.14*) è stata svolta al fine di:

- ~ adattare le informazioni geologiche esistenti alla scala del progetto, tenendo anche in conto l'utilizzo di uno strumento ad alta risoluzione come il LIDAR;
- ~ raccogliere informazioni sulle caratteristiche geologiche di rilievo ai fini di un'analisi da caduta massi, ma non direttamente riportate nelle mappe esistenti. Tra queste si possono ricordare le zone di faglia e relative zone di danneggiamento, i domini strutturali omogenei, i cambiamenti litologici, le correlazioni generali tra le unità litostratigrafiche e la qualità degli ammassi rocciosi;
- ~ eseguire un rilievo di dettaglio dei depositi di frana e di versante al fine di una caratterizzarne dell'estensione, della geometria, della litologia e della granulometria;
- ~ redigere una mappa dei lineamenti strutturali da integrare con la fotointerpretazione e l'analisi strutturale della topografia LIDAR allo scopo di fornire dati per la caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi alla scala di versante.

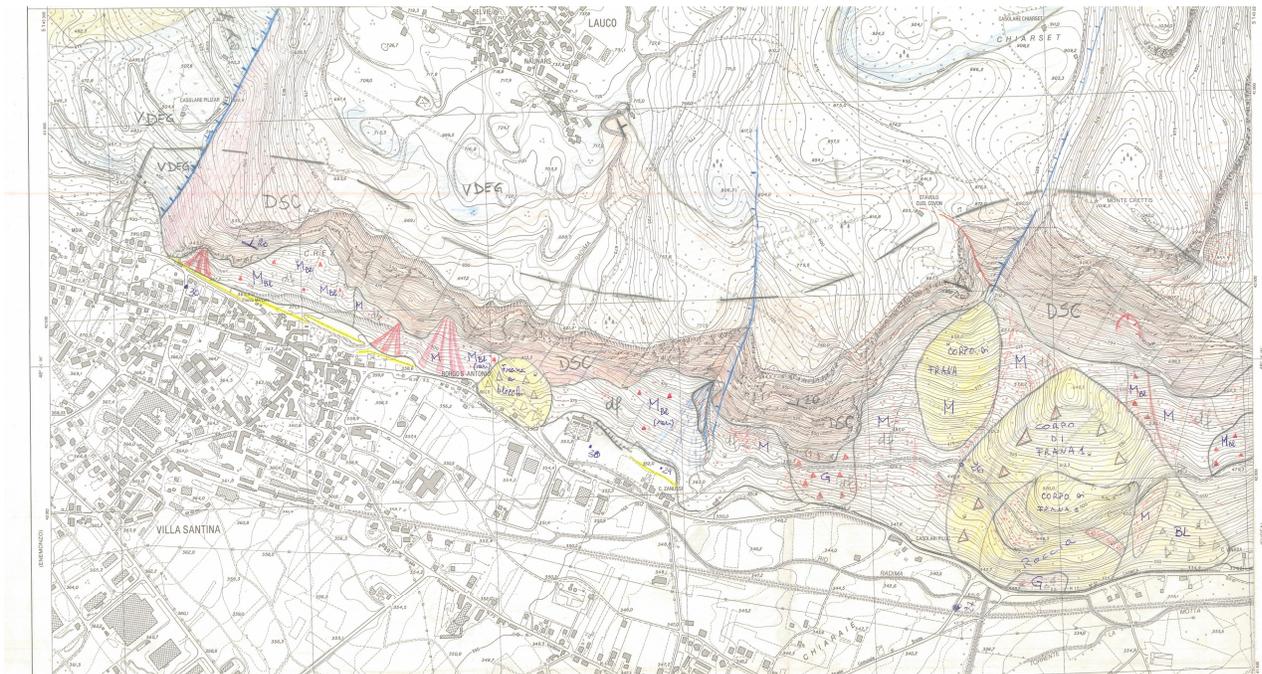


Figura 4.13: Stralcio della carta geologica redatta dal Dott. Geol. F. Podda sul terreno.

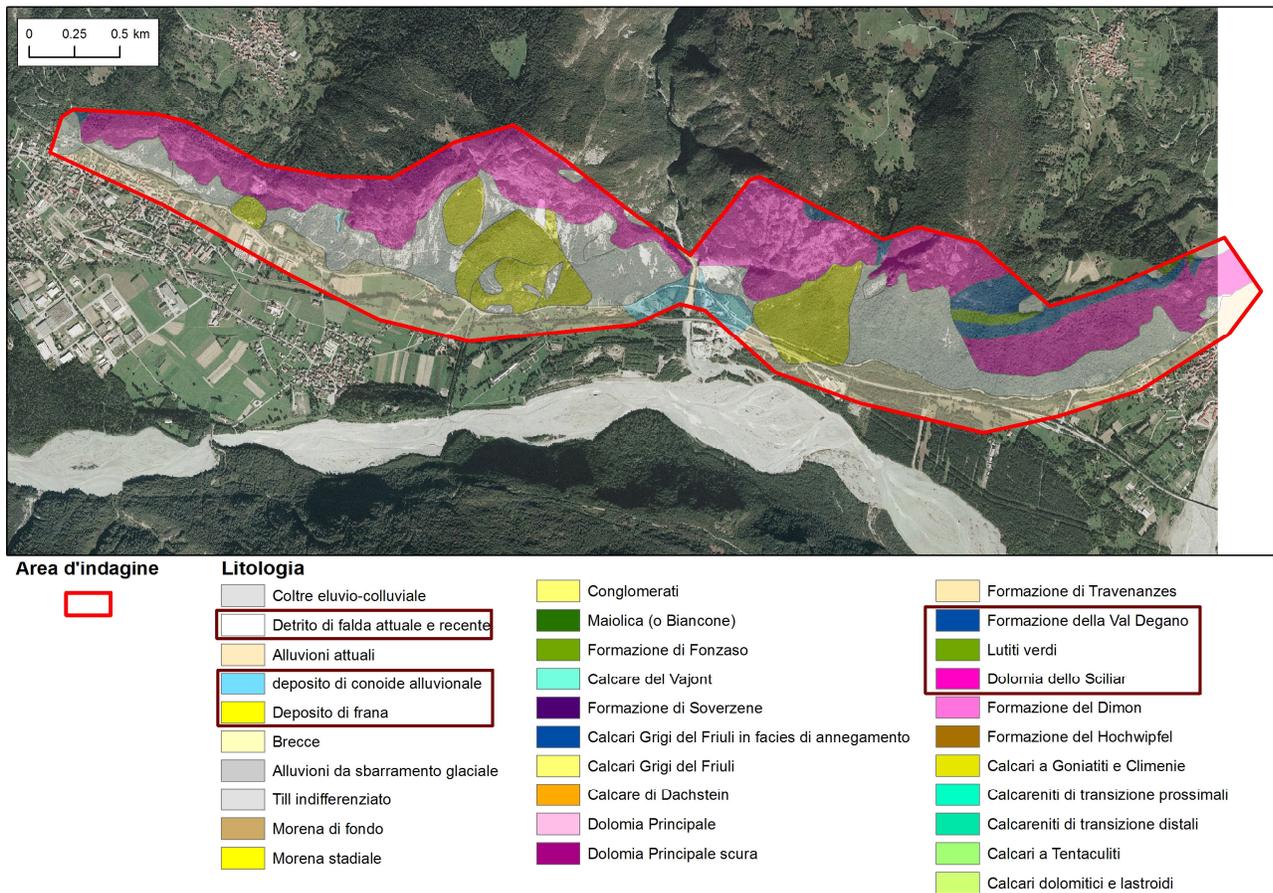


Figura 4.14: Carta geologica digitalizzata; nei riquadri le litologie presenti nell'area.

4.2.2 CARTA DELLA LITOLOGIA SUPERFICIALE

All'interno della carta della litologia superficiale è stato essenzialmente definito il limite roccia-detrito individuato per mezzo dell'utilizzo delle ortofoto e del LIDAR e validato tramite il rilevamento di terreno. Il detrito è stato suddiviso in detrito di versante, detrito, detrito alluvionale ed eluvium.

Gli ammassi rocciosi sono stati in seguito classificati in funzione del grado di fratturazione mentre i depositi in base alla granulometria e al grado di cementazione realizzando così la carta della fratturazione degli ammassi rocciosi e la carta della granulometria dei depositi superficiali.

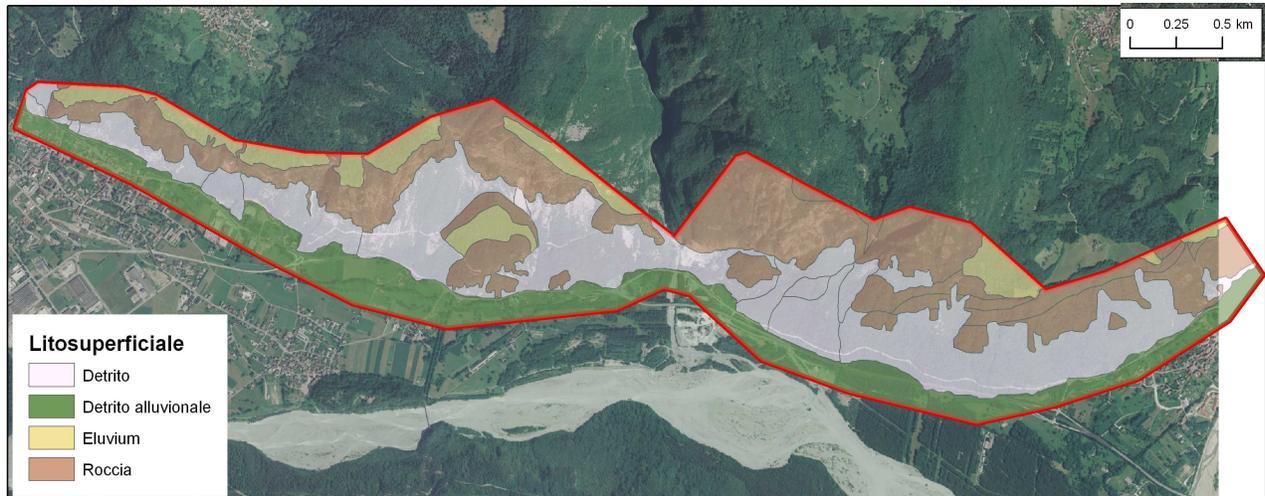


Figura 4.15: Carta della litologia superficiale.

4.2.2.1 CARTA DELLA FRATTURAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

Relativamente agli ammassi rocciosi sono state effettuate osservazioni al fine di ottenere una valutazione di basso dettaglio ma spazialmente distribuita di un descrittore roccioso per la successiva caratterizzazione geomeccanica dettagliata degli ammassi rocciosi. Il descrittore utilizzato è il *Volumetric Joint Count* (J_v , Palmström, 1982), definito come la somma dei giunti presenti per metro cubo, fornendo così le condizioni della fratturazione rocciosa. Attraverso l'utilizzo del J_v si può fornire una stima della dimensione media dei blocchi degli ammassi rocciosi.

Sono state individuate quattro classi:

- 1) $1 < J_v < 3$ → blocchi di notevoli dimensioni;
- 2) $3 < J_v < 10$ → blocchi medi;
- 3) $10 < J_v < 30$ → blocchi piccoli;
- 4) $J_v > 30$ → blocchi molto piccoli.

Questo parametro può darci anche un'idea indiretta delle possibili tipologie di movimenti di massa: valori molto alti di J_v , come si può intuire, presuppongono un materiale molto disgregato su cui è possibile ipotizzare dei movimenti di porzioni di massa rocciosa con cinematismi prevalentemente rototraslazionali; viceversa valori molto piccoli di J_v indicano la presenza di blocchi di dimensioni grandi dove si possono verificare movimenti prevalenti di scivolamento o ribaltamento di cunei rocciosi.



Figura 4.16: Carta della fratturazione degli ammassi rocciosi.

4.2.2.2 CARTA DELLA TESSITURA DEI DEPOSITI SUPERFICIALI

Durante il rilevamento, per ciò che concerne i depositi superficiali, oltre alla determinazione della natura del deposito stesso, si è dato rilievo a una classificazione dal punto di vista della granulometria e del grado di cementazione.

Le classi granulometriche prese in considerazione sono tre: fino, medio, grossolano. Viene indicato come fine il deposito che presenta clasti inferiori a 10 cm, come medio quello con granulometria compresa fra 10-20 cm e grosso quello con i clasti che superano i 20-30 cm e arrivano fino ai blocchi. Un'ulteriore informazione che è stata fornita sui depositi quaternari riguarda il loro grado di cementazione. Per caratterizzare un deposito, in tal senso, si è stabilito che la percentuale dei clasti facenti parti di una determinata classe deve essere in percentuale maggiore dell'80% (stima visiva). E' stato notato che numerosi depositi classificabili con la granulometria "medio" hanno al loro interno anche blocchi di notevoli dimensioni. In questo caso è stato classificato come medio con blocchi.

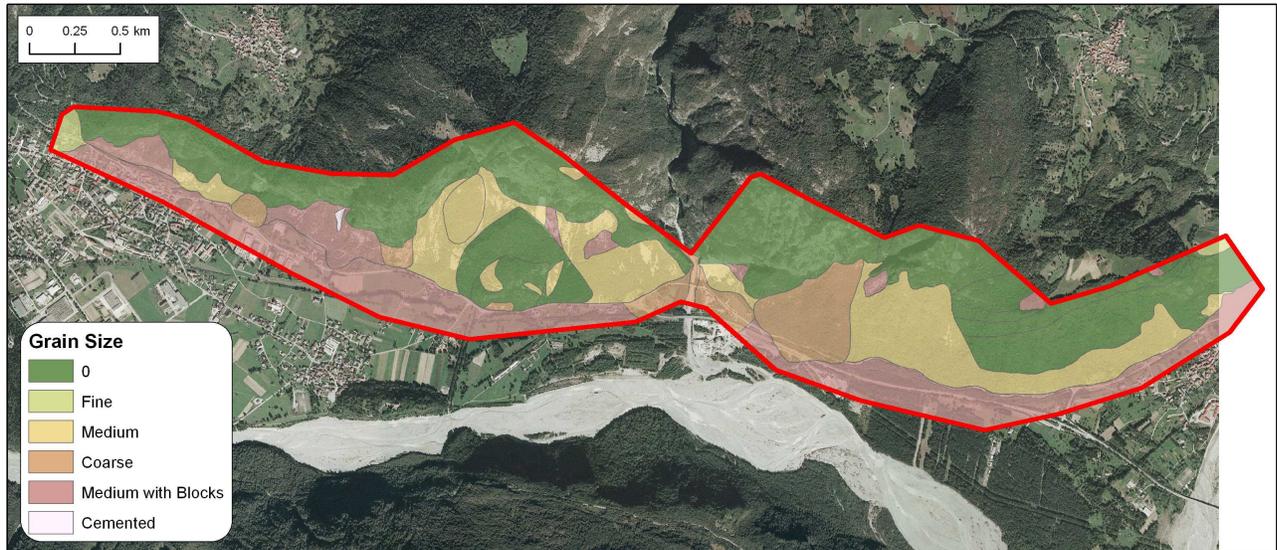


Figura 4.17: Carta della tessitura dei depositi superficiali.

4.2.3 CARTA DELL'USO DEL SUOLO

Nonostante siano già disponibili carte dell'uso del suolo, l'analisi legata alla propagazione della caduta massi richiede una conoscenza molto dettagliata e aggiornata della copertura. A tal fine è stata redatta una nuova carta dell'uso del suolo a scala 1:5000 sulla base delle ortofoto del 2007, successivamente validata sul terreno. La mappatura sul campo ha permesso di ridefinire i limiti e i caratteri riguardanti la vegetazione in modo da ottenere una versione sempre più aggiornata ed affidabile ai fini della modellazione. Sono state mappate e incluse nel database anche le aree urbane e le infrastrutture (strade, aree urbane continue, singoli edifici).

Le categorie utilizzate per la classificazione dell'uso del suolo sono le seguenti:

- ~ nudo, ovvero vegetazione assente;
- ~ arbusti;
- ~ bosco;
- ~ bosco rado;
- ~ prati e pascoli;
- ~ strade;
- ~ linee ferroviarie;
- ~ urbano che è stato ulteriormente suddiviso in case, capannoni, cimitero, chiesa, campo sportivo, stazione ferroviaria, strade e prati.

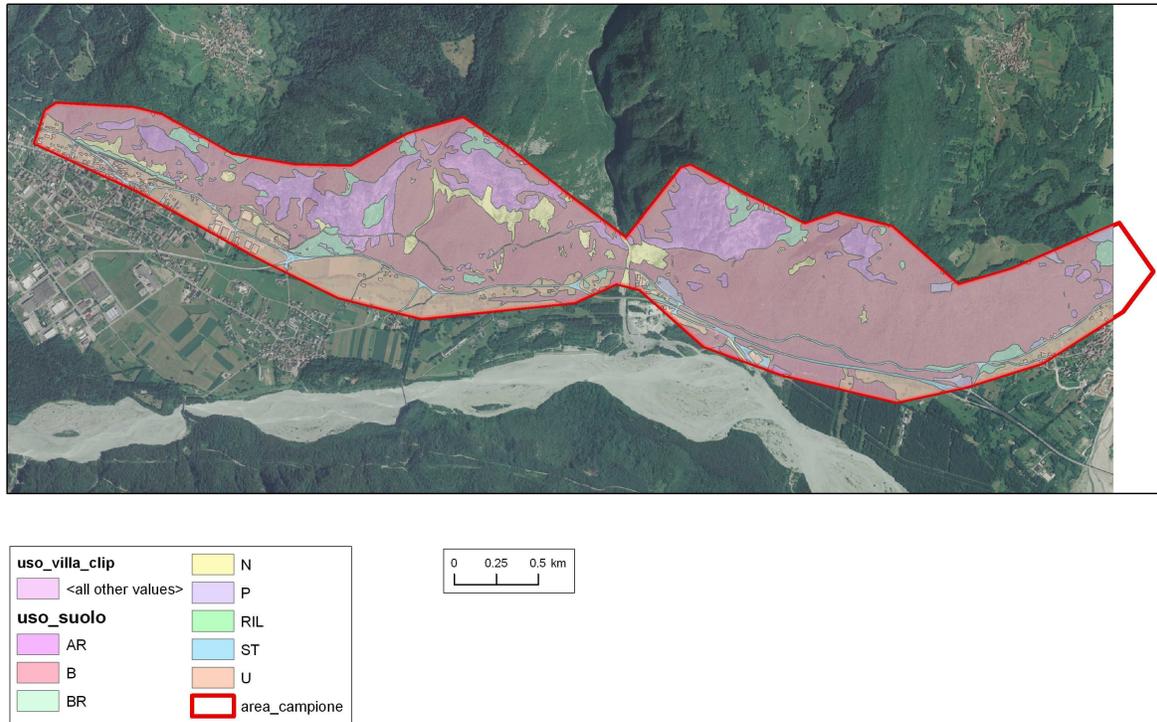


Figura 4.18: Carta dell'uso del suolo.

Le mappe dell'uso del suolo e della litologia superficiale sono importanti perché permettono di ottenere una “unique condition map”, data dalla sovrapposizione e ricodifica in ambiente GIS delle due carte, ottenendo così una carta composta da nuove “unità territoriali” (con caratteristiche omogenee rispetto agli attributi delle mappe di ingresso) alle quali è possibile attribuire un livello di suscettibilità da frana.

4.2.4 CARTA GEOMORFOLOGICA E DEI LINEAMENTI

La carta geomorfologica è stata realizzata a partire da:

- ~ fotointerpretazione;
- ~ dati di terreno;
- ~ lidar;
- ~ foto aeree georeferenziate in ambiente GIS;
- ~ CTR;
- ~ ortofoto.

La fotointerpretazione tramite stereoscopio è indispensabile per la realizzazione di tale carta. Tramite l'analisi delle foto aeree è stato possibile mappare i fenomeni franosi e le sorgenti di crollo (puntuali, lineari o areali) oltre che classificare i depositi, gli alvei e gli orli.

Per ciascuno dei fenomeni franosi identificati è stata delimitata l'area di nicchia e di accumulo con specificazione dello stato di attività.

I depositi individuati tramite la fotointerpretazione sono stati classificati in coni o falde di detrito, corpo o conoide da debris flow, conoide alluvionale o di origine mista, aree a franosità diffusa.

Gli orli sono stati riconosciuti prevalentemente da fotointerpretazione ma anche dal rilevamento di terreno; sono stati individuati orli di scarpata di degradazione, orli di scarpata di erosione attiva e inattiva, orli di origine morfologica, orli di scarpata interessati da caduta massi; questi ultimi costituiscono un'elevata percentuale degli orli identificati.

In ultimo i lineamenti strutturali sono stati individuati in prevalenza tramite l'analisi del LIDAR e sulla base della fotointerpretazione con successivo implementato per mezzo dell'utilizzo del programma *Coltop 3D*.

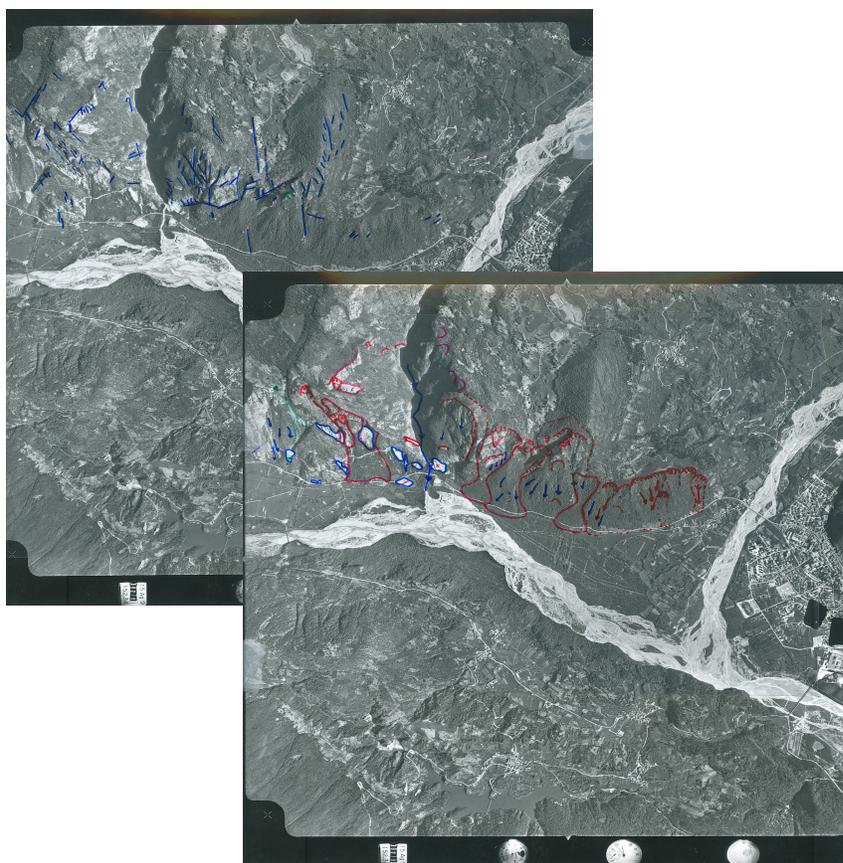


Figura 4.19: Esempio di fotointerpretazione, Lineamenti sopra, geomorfologia sotto.

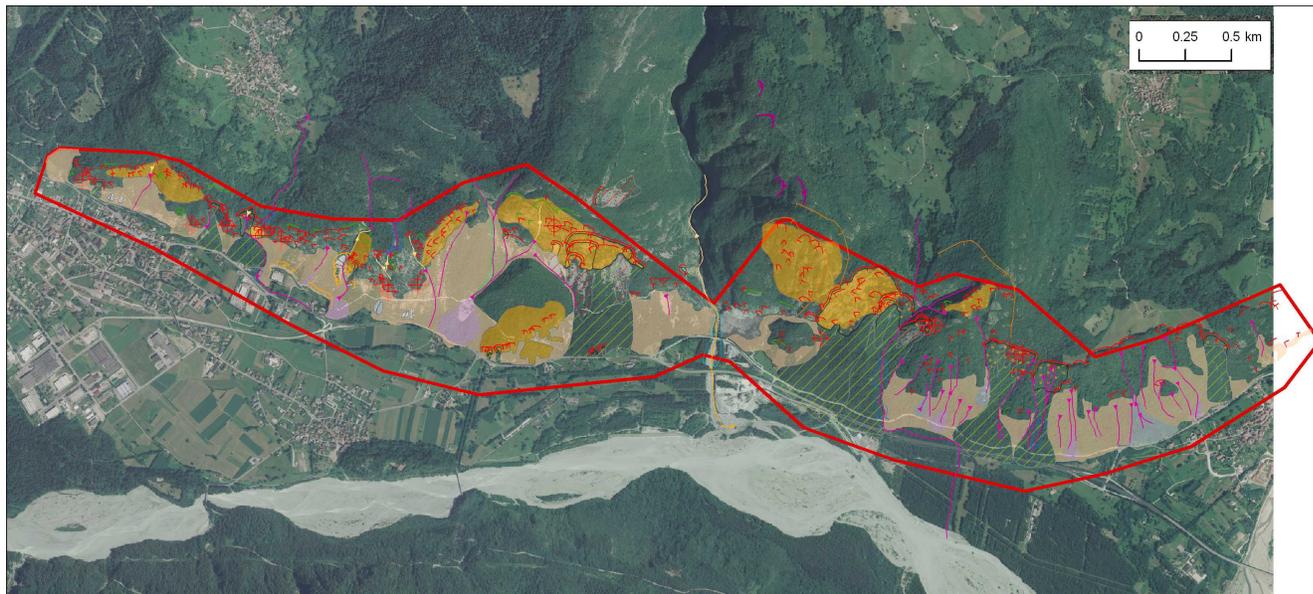


Figura 4.20: Carta Geomorfológica.



Figura 4.21: Carta dei Lineamenti.

5. ATTIVITÀ DI TERRENO

5.1 RILEVAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il rilevamento geomorfologico, realizzato alla scala 1:2500, è stato volto all'individuazione e alla mappatura delle evidenze di crolli (*figura 5.1*). Durante tale attività sono state svolte le seguenti operazioni:

- ~ mappatura dei singoli blocchi lungo il versante;
- ~ identificazione di un volume rappresentativo per alcuni settori;
- ~ individuazione di aree costituenti zone di potenziali distacchi, ovvero aree intensamente fratturate o blocchi svincolati;
- ~ mappatura delle sorgenti dei fenomeni franosi;
- ~ mappatura degli accumuli e dei depositi attivi;
- ~ individuazione e relativa mappatura delle vie di transito preferenziale dei blocchi.

Tali dati sono necessari per definire le sorgenti di caduta massi costituenti la base per la successiva modellazione della propagazione e per fornire una stima della loro suscettibilità alla rottura. Inoltre, essi permettono di valutare la distribuzione della forma e della dimensione del blocco di progetto, di valutare le interazioni tra fenomeni di crollo e strutture di difesa e di fornire dataset di calibrazione per le successive attività di modellazione.

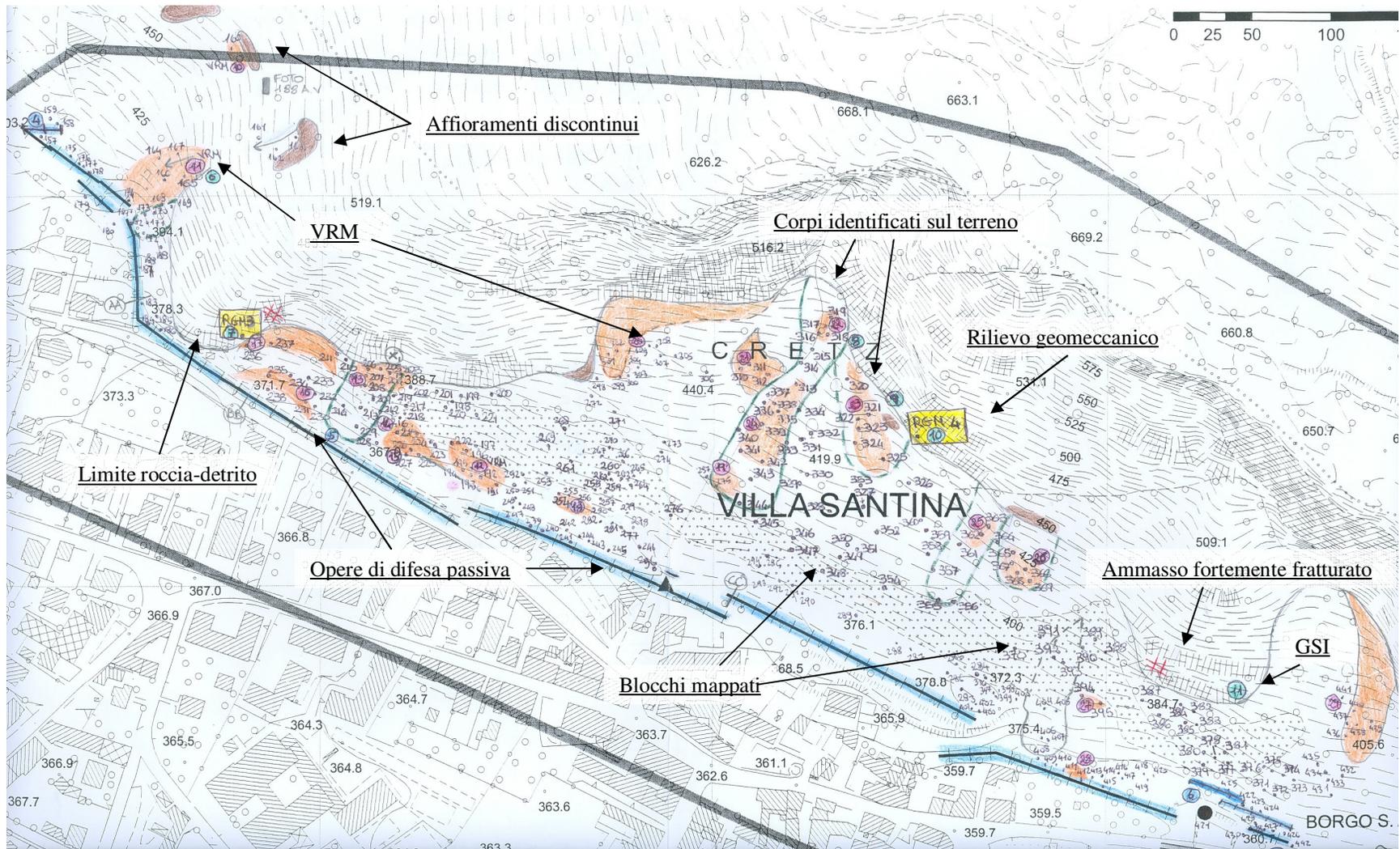


Figura 5.1: Esempio di CTR compilato sul terreno.

5.1.1 CATALOGO DEI BLOCCHI

I blocchi sono stati mappati sulla carta topografica avvalendosi anche dell'utilizzo di un GPS. Ogni blocco è stato identificato per mezzo delle coordinate geografiche nel sistema UTM-WGS84, ove possibile, e da un numero identificativo (ID). Sono state inoltre annotate la forma, le dimensioni (in termini di lunghezza, larghezza e altezza) ed ne è stato stimato il volume (*tabella 5.1*). Durante il rilevamento si è reso necessario effettuare delle scelte che hanno un'influenza sull'affidabilità e sulla distribuzione statistica dell'inventario. Tra queste si può ricordare che nelle aree in cui il numero dei blocchi era talmente elevato da non consentire una completa mappatura si è data maggior importanza all'eventuale prossimità agli abitati o alle strade, ai blocchi marginali che consentono di definire la massima propagazione dell'evento, a quelli presenti vicino alle opere di difesa e quelli di notevoli dimensioni.

Inoltre nelle aree con elevata densità di blocchi si è stimato un volume rappresentativo medio, VRM (*figura 5.2*).



Figura 5.2: Esempio di area in cui si è rilevato il volume rappresentativo medio (VRM).

ID Blocco	Num. Foto	Coordinate			Accuratezza	Forma	Dimensione (m)		
		longitudine	latitudine	altezza			lunghezza	larghezza	altezza
40	121	341263	5142244	385			0.5	0.3	0.4
41		341274	5142196	375			0.7	0.6	0.3
42	122	341274	5142196	375			0.7	0.4	0.5
43	123	341314	5142180	375			0.8	0.6	0.5
44		341314	5142180	375			0.8	0.6	0.4
45		341292	5142213	380	11		0.8	0.65	0.6
46		341321	5142221	385	8		0.8	0.6	0.4
47		341329	5142203	385	8		0.5	0.4	0.4
48		341330	5142169	380	8		1	0.7	0.3
49		341355	5142147	380			1.1	0.7	0.7
50	125			365			1.6	0.9	0.8

Tabella 5.1: Esempio dei dati raccolti sul terreno.

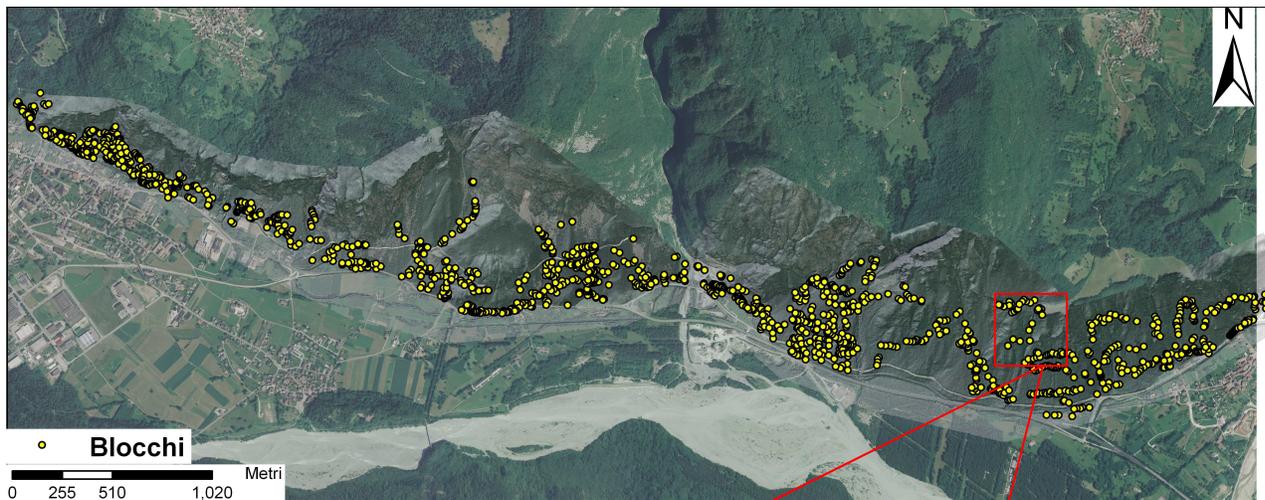


Figura 5.3: Blocchi mappati a Villa Santina (UD).



**Figura 5.4: Esempi di blocchi rilevati.
Rispettivamente: Blocco ID 1423 (sopra);
1415 (a lato).**

La distribuzione statistica del campione di dati raccolto (figure 5.3; 5.4), costituito da 1528 blocchi è riportata nella seguente tabella:

<i>Statistica descrittiva</i>	
Media	10.98602043
Errore standard	3.819907496
Mediana	0.2835
Moda	0.06
Deviazione standard	149.318811
Varianza campionaria	22296.10733
Curtosi	1325.31632
Asimmetria	35.29557242
Intervallo	5639.999
Minimo	0.001
Massimo	5640
Somma	16786.63922
Conteggio	1528
Più grande (1)	5640
Più piccolo (1)	0.001
Livello di confidenza (95,0%)	7.492810888

Tabella 5.2: Statistica descrittiva dell'inventario di Villa Santina.

5.1.1.1 RELAZIONE INTENSITÀ-FREQUENZA

In letteratura le relazioni intensità-frequenza sono realizzate anche per frane di crollo (Hungar et al., 1999; Dussauge et al., 2003). Queste relazioni possono essere espresse in termini di frequenza o densità di probabilità, sia in forma cumulata che non cumulata. Per le frane di crollo le curve intensità-frequenza sono espresse in termini di volumi e costituiscono delle relazioni di tipo potenza. Per mezzo dell'utilizzo dell'inventario dei blocchi sono state realizzate relazioni non cumulate di intensità-frequenza in cui la frequenza di densità ($f = \frac{dN}{dV}$) è espressa in funzione del volume dei blocchi V , usando un binning logaritmico. In tale relazione N corrisponde al numero di blocchi aventi un volume compreso tra V e $V+dV$, che nel caso in esame corrisponde a 1528.

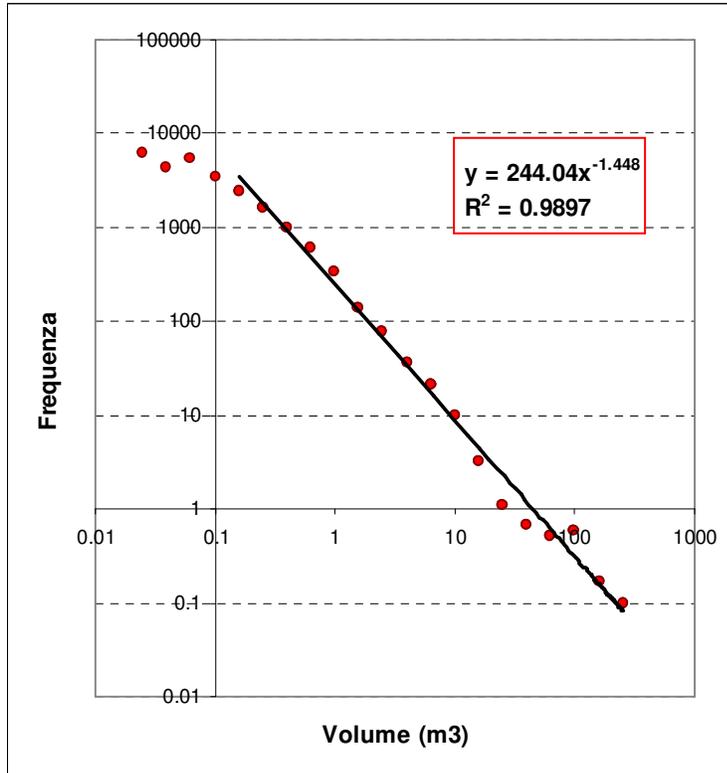
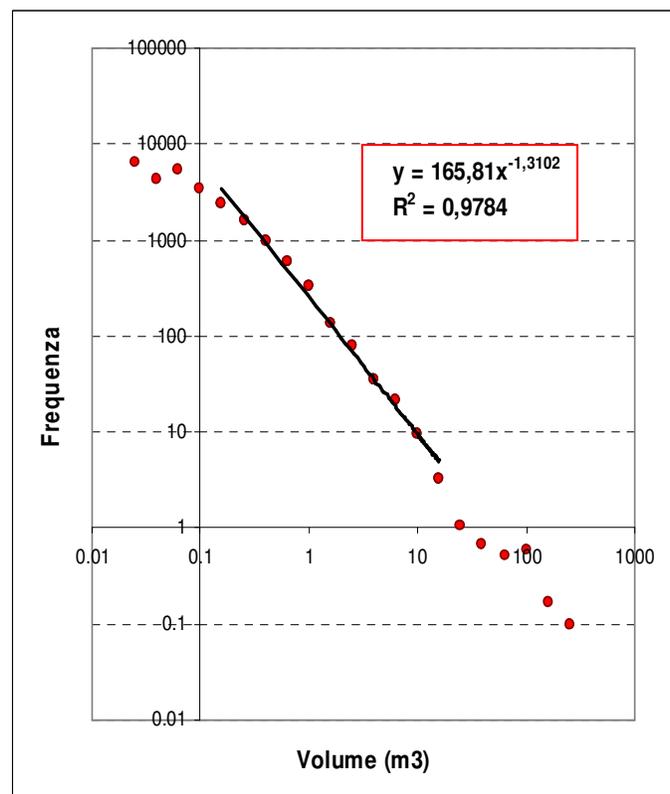


Figura 5.5: Relazione intensità-frequenza relativa all'inventario di Villa Santina.

Dall'analisi della retta di interpolazione si osserva una forte dipendenza dell'esponente b dai valori costituenti la coda con volumetria maggiore ($>15.85\text{m}^3$) costituenti una minima parte rispetto all'intero dataset. Eliminando tali dati dall'interpolazione (figura 5.6) si ottiene un abbassamento del parametro b che passa da -1.448 a -1.3102, portando ad una volumetria media inferiore, tuttavia anche R^2 decresce indicando una perdita di correlazione tra i dati. Di conseguenza si ritiene accettabile la relazione del grafico di figura 5.5.

Figura 5.6: Relazione intensità-frequenza ottenuta escludendo le volumetrie maggiori.



La relazione è stata interpolata con una funzione di potenza esprimibile come:

$$N(V) = A \cdot V^{-b}$$

dove A è ricavato attraverso il catalogo storico e b è un parametro che caratterizza la distribuzione volumetrica e vale in questo caso 1.448 (figura 5.5).

Il tempo di ritorno può essere stimato dalla seguente formula:

$$T(V) = \frac{1}{N(V)}$$

a patto di conoscere la frequenza annua dei crolli che causano i blocchi di dimensioni maggiori rispetto ad un dato volume, implicando la conoscenza di A .

5.1.2 CATASTO OPERE DI DIFESA PASSIVA

Nell'ambito del progetto, è stato richiesto di realizzare un censimento delle opere di difesa presenti sul territorio, in modo da integrare e verificare il database già esistente.

Le strutture presenti sono costituite da opere di difesa passiva, atte alla protezione dei centri abitati e delle infrastrutture da eventuali crolli provenienti dalle sovrastanti pareti rocciose. Tali opere si differenziano per tipologia, dimensione, energia di assorbimento, efficacia ed efficienza.

Al fine di ottenere un database omogeneo e consistente per il loro rilevamento è stato realizzato un apposito modulo di campagna entro cui sono raccolti i seguenti dati:

- ~ Numero identificativo dell'opera (ID);
- ~ Eventuale presenza nell'inventario della Regione;
- ~ Informazioni generali:
 - la scala del rilevamento;
 - la cartografia di riferimento;
 - il numero progressivo di foto;
 - l'ubicazione dell'opera rispetto alla sorgente del crollo più influenti (parete rocciosa, canale/impluvio, talus, base del talus, fondovalle);
 - la tipologia di opera passiva (barriera paramassi rigida, barriera elastica a basso assorbimento, barriera deformabile a medio o alto assorbimento, muro in gabbioni o in calcestruzzo, vallo paramassi, rilevato paramassi, rete metallica in aderenza, pannelli di fune metallica in aderenza, chiodature-bullonature-legature);
 - le quote di riferimento;
 - la restituzione grafica (puntuale, lineare, areale).
- ~ Caratteristiche della zona sorgente:
 - tipologia della sorgente (parete rocciosa continua molto o mediamente fratturata, affioramenti discontinui, rimobilizzazione da coperture detritiche, rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana, altro);
 - evidenze di attività della zona sorgente;
- ~ Caratteristiche dell'opera:
 - materiali costruttivi (legname, metallo, terra, terra armata/rinforzata, cemento armato);

- stato di efficienza e di efficacia dell'opera (pessimo, discreto e ottimo) e gli eventuali danni riportati all'opera;
- dimensione dell'opera (lunghezza, larghezza media alla base e alla sommità, altezza/profondità minima, media e massima);
- tipologia e quantità di elementi a rischio (edifici residenziali, industriali o di interesse pubblico, strade, ferrovie, infrastrutture tecnologiche, altro);

~ Annotazioni e disegni.

Il rilevamento delle opere di difesa e la compilazione del modulo (*figura 5.8*), oltre alla redazione del nuovo inventario, hanno permesso di valutare l'interazione tra aree sorgenti, aree di propagazione e di accumulo dei fenomeni franosi e gli elementi a rischio. I dati ottenuti sono stati digitalizzati e riportati in ambiente GIS distinguendo opere puntuali, lineari e areali (*figura 5.7*). Nel complesso a Villa Santina sono state censite 18 opere di difesa passiva di cui 13 lineari e 5 areali (*figure 5.9 e 5.10*).

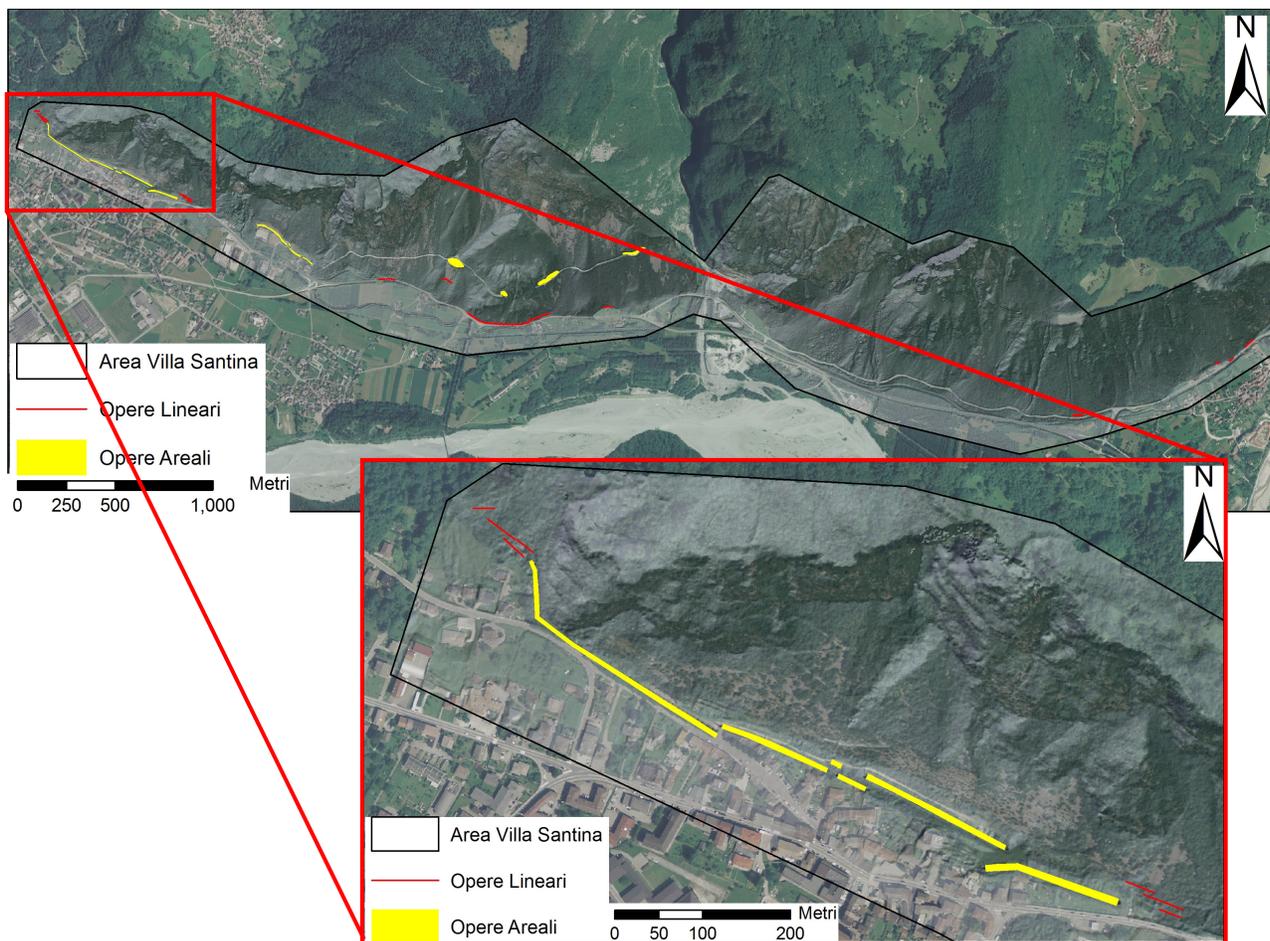


Figura 5.7: Opere digitalizzate in ambiente GIS e dettaglio dell'area a Nord dell'abitato di Villa Santina.

INFORMAZIONI GENERALI											
Scala di rilevamento	1:2500					Cartografia di riferimento	CTR			Progressivo foto	1050-1051 AC
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE									
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE									
Quota minima (m. s.l.m.)											
Quota massima (m. s.l.m.)											
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale							
CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE											
Tipologia dell'opera (3)	3	NOTE									
Estensione massima (m, m2)		NOTE									
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi								
CARATTERISTICHE DELL'OPERA											
Materiali costruttivi (4)	5	NOTE	Muro in CA e presenza di rete								
Stato di efficienza (5)	3	NOTE		Efficacia (5)	3						
Descrizione dei danni											
DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	1	QUANTITA'	1					
	Larghezza media base (m)										
	Larghezza media sommità (m)	0.8									
	Altezza/prof. minima (m)										
	Altezza/prof. media (m)	3+3									
	Altezza/prof. massima (m)										
	Superficie (m2)										
ANNOTAZIONI E DISEGNI											
<p>Muro in calcestruzzo</p> <p>Barriera rigida con putrelle in acciaio, traverse in acciaio e lamierino appoggiato a monte</p> <p>3 m</p> <p>3 m</p>											
ATTRIBUTI											
(1)	1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base) 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza) 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione) 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base) 5: Fondovalle										
(2)	1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche) 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete) 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni) 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM) 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero) 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari) 7: Vallo paramassi (in scavo) 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto) 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione) 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica) 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi) 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)										
(3)	1: Parete rocciosa continua molto fratturata 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata 3: Affioramenti discontinui 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana 6: Altro (indicare)										
(4)	1: Legname 2: Metallo 3: Terra 4: Terra armata/rinforzata 5: CA					(5) 1: Pessimo 2: Discreto 3: Ottimo					
(6)	1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza) 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza) 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali) 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro) 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari) 6: Infrastrutture tecnologiche 7: Altro (indicare)										

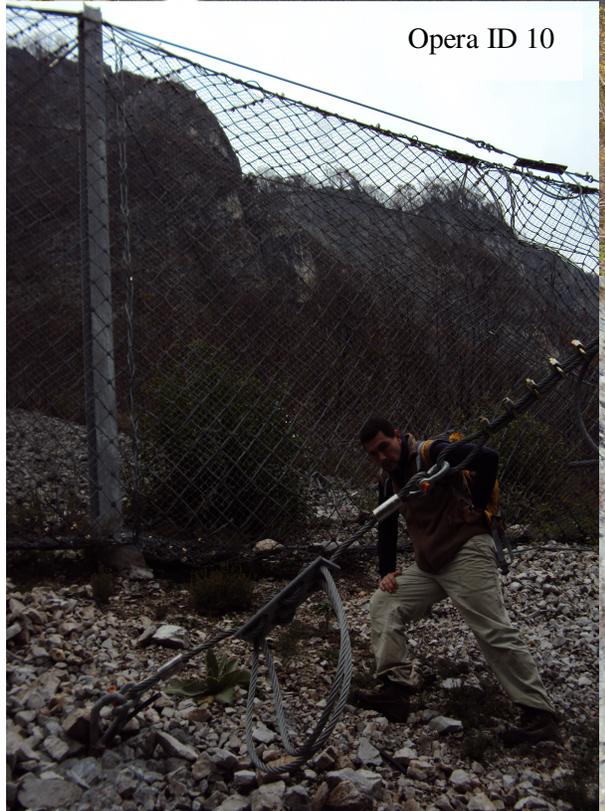
Figura 5.8: Scheda delle opere digitalizzata con le informazioni richieste, l'esempio si riferisce all'opera n°13 costituita da un muro in calcestruzzo e da una barriera rigida con putrelle in acciaio, traverse in acciaio e lamierino appoggiato a monte.



Opera ID 3



Opera ID 5



Opera ID 10



Opera ID 6

Figura 5.9: Esempi di opere di difesa presenti nell'area di Villa Santina.



Figura 5.10: Esempi di danneggiamento delle opere presenti a Villa Santina, in particolare nell'opera con ID 4 si osserva un blocco collocato oltre la rete e la relativa, seppur parziale, risaldatura del foro creato dall'impatto.

5.2 RILEVAMENTO GEOLOGICO-TECNICO

L'insieme delle attività svolte sul terreno e finalizzate alla descrizione e classificazione tecnica sia dei materiali geologici (rocce e terreni) che degli eventuali geomateriali (minerali o rocce trattati o meno), costituisce il rilevamento geologico-tecnico. Un affioramento è costituito da due componenti principali:

- la roccia intatta, a sua volta costituita da particelle discrete, granuli o cristalli, legate tra loro da forze coesive a carattere permanente;
- le discontinuità, ovvero qualsiasi superficie di debolezza strutturale, che condiziona le proprietà fisiche, meccaniche e idrauliche degli ammassi rocciosi.

La risposta di un ammasso alle sollecitazioni applicate, in relazione alla scala considerata, dipende quindi dalle caratteristiche della roccia intatta, in termini di resistenza e deformabilità e dalle caratteristiche geometriche e meccaniche delle discontinuità. Si potrà dunque osservare che la resistenza dell'ammasso è inversamente proporzionale alla densità e persistenza delle discontinuità e al grado di alterazione presente.

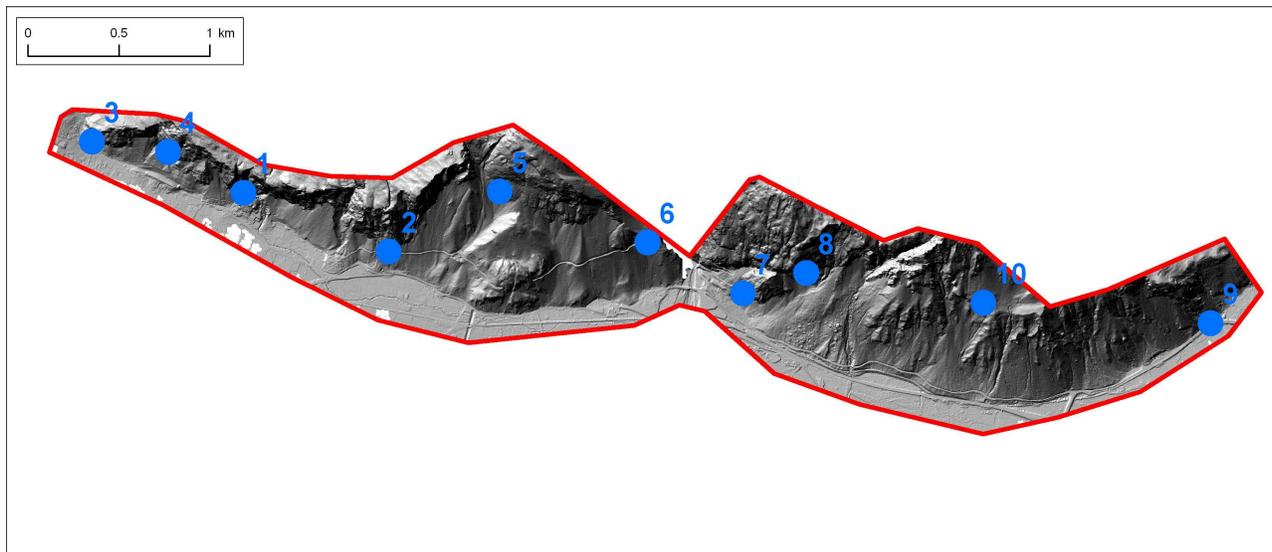


Figura 5.11: Ubicazione dei 10 rilievi geomeccanici realizzati nell'area di Villa Santina.

Come visibile dalla *figura 5.11* nell'area in esame sono stati realizzati 10 rilievi geomeccanici, la cui collocazione è stata atta ad una copertura idonea della zona, cercando di considerare tutti gli aspetti litologici e strutturali di maggiore interesse. Per l'esecuzione di tali rilievi sono stati utilizzati degli appositi moduli in modo da contenere le informazioni di maggior interesse. Relativamente alle discontinuità si hanno:

- il numero di famiglie;
- l'orientazione;
- la spaziatura;
- la persistenza, lineare ed areale;
- l'ondulazione;
- l'alterazione;
- il riempimento;
- l'apertura;
- la presenza di acqua.

Inoltre, per ogni rilievo è importante descrivere le caratteristiche di rugosità (*JRC, joint roughness coefficient*) e resistenza superficiale (*JCS, joint wall compressive stress*) delle discontinuità. Il primo viene identificato per mezzo del pettine di Barton tramite il quale sono stati presi i profili lungo la direzione di immersione delle singole discontinuità, in seguito confrontati con 10 profili di riferimento dalla lunghezza di 10 cm. Tale parametro ha un valore variabile tra 0 e 20. Per la stima del secondo è stato utilizzato il martello di Schmidt o sclerometro per mezzo del quale si ottiene il valore di rimbalzo, *R*, funzione della resistenza a compressione della superficie di discontinuità. Il martello di Schmidt utilizzato è di tipo L, ovvero da roccia, con un'energia d'impatto pari a 0,73Nm. Conoscendo *R*, l'inclinazione con cui è stato usato il martello e la densità della roccia è possibile, tramite un apposito abaco, determinare la resistenza a compressione monoassiale e il valore di dispersione media.

Un altro parametro da stimare in sito è costituito dal volume roccioso unitario (*VRU*). Esso identifica la dimensione dei blocchi, dipendente dalla spaziatura delle discontinuità e dalla forma dei blocchi, quest'ultima legata al numero di famiglie di discontinuità. Questa valutazione ha portato alla stima del volume roccioso unitario massimo, medio e minimo. I rilievi condotti sono stati eseguiti seguendo il campionamento oggettivo di tipo areale secondo lo standard ISRM (International Society for Rock Mechanics, 1978) il quale prevede la caratterizzazione di tutte le discontinuità ricadenti all'interno della finestra di indagine.

5.2.1 CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICHE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

Le classificazioni geomeccaniche più usate sono schemi multi-parametrici ottenuti a partire da un numero significativo di *case studies* attraverso cui si cerca di sviluppare relazioni empiriche che leghino i dati rilevati alla qualità generale dell'ammasso roccioso. Questi schemi di classificazione risultano essere validi se applicati a contesti idonei con quelli in cui sono stati sviluppati.

Sul terreno sono stati utilizzati i seguenti schemi classificativi:

- I. il GSI, Geological Strength Index di Hoek et al. (1995);
- II. l'RQD, Rock Quality Designation proposto da Deere et al. (1967);
- III. l'RMR, Rock Mass Rating introdotto da Bieniawski (1976,1989);
- IV. il Q-system, Rock Tunnelling Quality System di Barton et al. (1974);
- V. l'SMR, Slope Mass Rating system proposto da Romana nel 1985.

I. Geological Strength Index (Hoek et al., 1995)

La resistenza di un ammasso roccioso fratturato dipende dalle proprietà della roccia intatta che compone i blocchi isolati dalle discontinuità, ma anche dalla libertà che tali blocchi hanno di scorrere o ruotare lungo i piani di frattura sotto l'influenza di diversi campi di sforzo. Questa libertà è funzione della forma dei blocchi e delle condizioni delle superfici di discontinuità. Infatti, blocchi poligonali separati da superfici ruvide e prive di riempimento, formeranno un ammasso globalmente più resistente rispetto ad uno composto da porzioni di roccia intatta arrotondate con discontinuità riempite da materiale fine ed alterato.

Il Geological Strength Index (GSI), introdotto da Hoek et al. nel 1995, fornisce una stima della variazione della resistenza di un ammasso roccioso per condizioni geologiche differenti. La sua determinazione, o meglio di un suo range di variazione, è eseguita in sito per mezzo di un apposito modulo (*figura 5.12*) nel quale le condizioni di fatturazione dell'ammasso sono associate alle condizioni delle discontinuità.

Per ciò che concerne la struttura dell'ammasso si hanno le seguenti categorie:

- Intact or Massive (Massiva)
- Blocky (A blocchi cubici)
- Very Blocky (A blocchi irregolari)
- Blocky/Disturbed/Seamy (A blocchi, piegata, stratificata)
- Disintegrated (Disgregata)
- Laminated/Sheared (Laminata, foliata).

Mentre la superficie delle discontinuità è classificata in 5 categorie, simili a quelle adottate per la definizione dell'indice RMR:

- Very Good (Molto buona)
- Good (Buona)
- Fair (Discreta)
- Poor (Scadente)
- Very Poor (Molto scadente).

Nel caso in cui l'ammasso roccioso risulti essere caratterizzato da un GSI maggiore di 25, è possibile stimare tale parametro per mezzo dell'RMR di Bieniawski del 1989 (con parametro "acqua" pari a 15, ovvero asciutto) secondo la relazione:

$$GSI = RMR_{89} - 5.$$

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slacksided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slacksided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓</p>	 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A
	 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70			
	 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60	50		
	 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			40	30	
	 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20	
	 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10

Figura 5.12: Modulo per la determinazione del GSI.

II. Rock Quality Designation Index (Deere, 1967)

Il Rock Quality Designation Index (RQD) fu sviluppato per fornire una stima quantitativa della qualità degli ammassi rocciosi tramite analisi di carote di sondaggio. L'indice rappresenta la percentuale di recupero modificata di un sondaggio che è data dal rapporto tra la somma degli spezzoni di carota aventi lunghezza superiore a 10 cm e la lunghezza totale della carota. La misura avviene lungo la linea centrale della carota trascurando le fratture indotte dal carotaggio. Quando non si hanno a disposizione dei sondaggi, il valore di RQD può essere stimato tramite due relazioni empiriche:

$\begin{aligned} \text{RQD} &= 115 - 3.3 J_v && \text{per } J_v > 4,5. \\ \text{RQD} &= 100 && \text{per } J_v < 4,5. \end{aligned}$	Palmstrom, 1982;
$\text{RQD} = 100 (0.1 \lambda + 1) e^{-0.1 \lambda}$	Priest e Hudson, 1976.

dove “ J_v ” è il numero di discontinuità per unità di volume e “ λ ” è il numero di discontinuità per metro (o frequenza di discontinuità). Per quanto riguarda il J_v , esso è definito come la somma del numero di discontinuità per metro cubo di ammasso roccioso secondo la formula:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

dove S_1 , S_2 e S_3 sono le spaziature medie dei set di discontinuità. L'inverso del J_v fornisce una indicazione del VRU.

Essendo l'RQD un parametro dipendente fortemente dalla direzione di perforazione, l'uso del J_v permette di eliminare gli effetti di questa dipendenza. L'RQD viene frequentemente applicato nei sondaggi ed è spesso l'unico metodo usato per misurare il grado di fratturazione lungo una carota di sondaggio. Esso, come si vedrà in seguito, costituisce uno dei parametri di ingresso di altre classificazioni degli ammassi rocciosi, come l'RMR e il Q-System.

Per mezzo del parametro ottenuto è possibile stimare la qualità dell'ammasso in base alla seguente classificazione:

RQD (%)	Rock Quality
< 25	Very Poor
25 – 50	Poor
50 – 75	Fair
75 – 90	Good
90 – 100	Excellent

III. Rock Mass Rating (Bieniawski, 1976, 1989)

Tale sistema, sviluppato soprattutto per lo scavo dei tunnel, è stato successivamente rivisto sulla base del grande numero di problemi ingegneristici presi in esame nel corso degli anni. Per applicare questo sistema, l'ammasso viene suddiviso in regioni strutturali, ed ognuna di esse viene classificata separatamente. I limiti di ciascuna regione coincidono di solito con elementi strutturali principali, come faglie o cambiamenti litologici. In alcuni casi, cambiamenti significativi nelle spazature o in altre caratteristiche all'interno dello stesso litotipo, possono costringere a suddividere l'ammasso in un gran numero di piccole regioni strutturali.

L'RMR è basato sulla sommatoria di sei parametri valutati per le condizioni più sfavorevoli con cui si presentano.

Essi sono:

- A1: resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta
- A2: rock quality designation
- A3: spazatura delle discontinuità
- A4: condizioni delle discontinuità
- A5: presenza di acqua
- B: correzione per l'orientazione delle discontinuità.

La somma dei primi 5 parametri costituisce il cosiddetto RMR_{basic} . Se si somma anche il parametro B si ottiene RMR_{total} . In questo progetto è stato utilizzato l' RMR_{basic} .

La valutazione si effettua con l'ausilio di una tabella strutturata in modo tale che ai 5 parametri siano assegnati diversi punteggi prefissati a seconda del *range* di variazione di ciascun parametro. Una volta ottenuto il punteggio finale, si fa riferimento ad un'altra tabella che suddivide i valori di RMR in 5 intervalli, correlando ciascuna classe ad una descrizione qualitativa dell'ammasso e fornendo indicazioni sui possibili sistemi di sostegno da utilizzare in caso di scavo, come segue:

Rating	Class Number	Description
< 21	V	Very Poor rock
21 – 40	IV	Poor rock
41 – 60	III	Fair rock
61 – 80	II	Good rock
81 – 100	I	Very Good rock

Note sulla classificazione:

- Occorre fare esplicito riferimento alla versione utilizzata (1976, 1989): il valore finale di RMR varia tra 18 e 100 per la classificazione del 1976 e tra 23 e 100 per quella del 1989; nel nostro caso corrispondente alla classificazione del 1989;
- Valutare l’RMR separatamente per ciascuna zona omogenea (dominio di discontinuità) individuata all’interno dell’area da caratterizzare;
- Utilizzare valori intermedi dei valori dei parametri, sebbene le tabelle forniscano valori discreti;
- Considerare la situazione peggiore (a favore di sicurezza) nel caso si ottengano valori di RMR “borderline”.

IV. Rock Tunneling Quality Index ~ Q-System (Barton et al., 1974)

Metodo atto alla determinazione delle caratteristiche degli ammassi rocciosi e dei possibili sostegni in fase di scavo.

Il valore numerico dell’indice Q varia su una scala logaritmica da 0,001 a 1000 ed è definito dalla seguente relazione:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

dove:

- RQD è il *rock quality designation* di Deere (1967);
- J_n è un parametro relativo al numero di famiglie di discontinuità;
- J_r è un parametro relativo alla rugosità delle discontinuità;
- J_a è un parametro relativo all’alterazione delle discontinuità;
- J_w è un parametro relativo alla presenza di acqua;
- SRF è il fattore di riduzione dello sforzo (*stress reduction factor*).

La classificazione risulta essere la seguente:

Q-system	Group	Classification
10-40	1	Good
40-100		Very Good
100-400		Extremely Good
400-1000		Exceptionally Good
0.10-1.0	2	Very Poor
1.0-4.0		Poor
4.0-10.0		Fair
0.001-0.01	3	Exceptionally Poor
0.01-0.1		Extremely Poor

Analizzando i singoli fattori che compongono la relazione sopra citata si può osservare che:

- Il rapporto RQD/J_n è rappresentativo della struttura dell'ammasso roccioso, offre una indicazione del grado di fratturazione e quindi della granulometria degli elementi costituenti l'ammasso roccioso, mentre il parametro J_n sottolinea i gradi di libertà per il movimento dei blocchi. Questo termine può variare tra 200 e 0,5;
- Il rapporto J_r/J_a è rappresentativo della resistenza al taglio tra blocchi ed è comprensivo di rugosità, resistenza delle pareti e riempimenti. E' valutato su fratture pulite e poco alterate in diretto contatto;
- Il rapporto J_w/SRF è rappresentativo dello stato di sforzo. Esso indica le forze attive all'interno dell'ammasso roccioso, le pressioni neutre e lo stato di sforzo in sito, la presenza di faglie, il comportamento spingente o rigonfiante degli ammassi. SRF è un fattore che descrive lo stato di sforzo della roccia, mentre J_w è una misura della pressione dell'acqua, che ha un effetto negativo sulla resistenza al taglio delle fratture a causa di una riduzione degli sforzi efficaci. L'acqua può inoltre causare rammollimento e dilavamento in caso di discontinuità con riempimento argilloso.

Uno dei limiti di questo schema consiste nel fatto che i parametri siano moltiplicati tra loro, determinando una elevata sensibilità del risultato per piccole variazioni. Inoltre l'orientazione delle discontinuità non è un parametro considerato costituendo un problema in rocce con anisotropia pervasiva a bassa resistenza (scisti, filladi, argilliti, etc.). Il parametro J_n è spesso condizionato dalla foliazione o dalla stratificazione sottile che, se molto pervasive, dovrebbero essere considerate come famiglie. Se tali elementi sono solo occasionalmente associati allo sviluppo di discontinuità, è più opportuno considerare queste ultime come "*random joints*". Non essendo a conoscenza delle condizioni dello stato di sforzo in sito, nei rilievi geomeccanici effettuati si è posto il rapporto $J_w/SRF = 1$.

V. Slope Mass Rating System (Romana, 1985)

Lo Slope Mass Rating (SMR) System rappresenta un adattamento della classificazione di Bieniawski per applicazioni a problemi di stabilità dei pendii (instabilità di blocchi con cinematismo predefinito).

Romana ha introdotto 4 fattori correttivi rispetto all' RMR_{basic} di Bieniawski:

- F1: indice associato alle relazioni tra orientazione del pendio e delle discontinuità;
- F2: indice relativo all'inclinazione delle discontinuità per il caso di rottura planare;

- F3: indice relativo all'inclinazione del versante rispetto all'inclinazione della discontinuità;
- F4: indice relativo al metodo di scavo adottato.

Il valore finale del parametro SMR è definito come:

$$\text{SMR} = \text{RMR}_{\text{basic}} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4$$

Calcolato il valore di SMR, si possono avere indicazioni generali sul grado di stabilità della scarpata, sul tipo di cinematisimo di rottura che si può instaurare e su quanto possano pesare eventuali interventi di stabilizzazione.

5.2.2. RILIEVI GEOMECCANICI

Nelle pagine seguenti vengono descritti tutti i rilievi geomeccanici effettuati. Per ciascun rilievo geomeccanico viene riportata l'ubicazione territoriale e la formazione geologica (per la descrizione vedere il *capitolo 2.3*), una scheda di sintesi dei dati raccolti, i relativi stereoplot e una tabella con riportate le classificazioni geomeccaniche e la qualità dell'ammasso roccioso. Per ciò che concerne gli stereoplot vengono riportati quelli che rappresentano i poli di tutte le discontinuità rilevate sul campo e le densità, identificando in questo modo la giacitura del piano modale della famiglia di discontinuità considerata, riportata in un'ulteriore plot.

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 1 ~

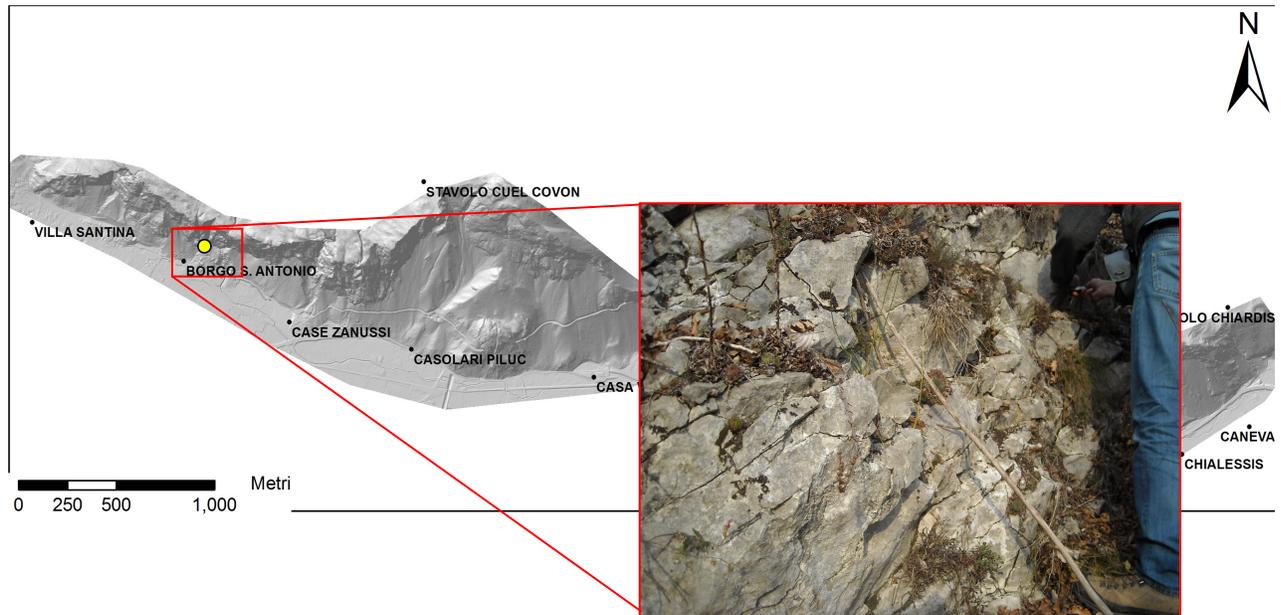


Figura 5.13: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°1.

Località	Borgo San Antonio
Quota	430m
Data	13/11/2009
Giacitura Affioramento	200/90
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Dimensione Affioramento	15X4
Classe	R1-R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	20X20X10
VRU minimo (cm)	3X3X2
VRU massimo (cm)	200X200X100

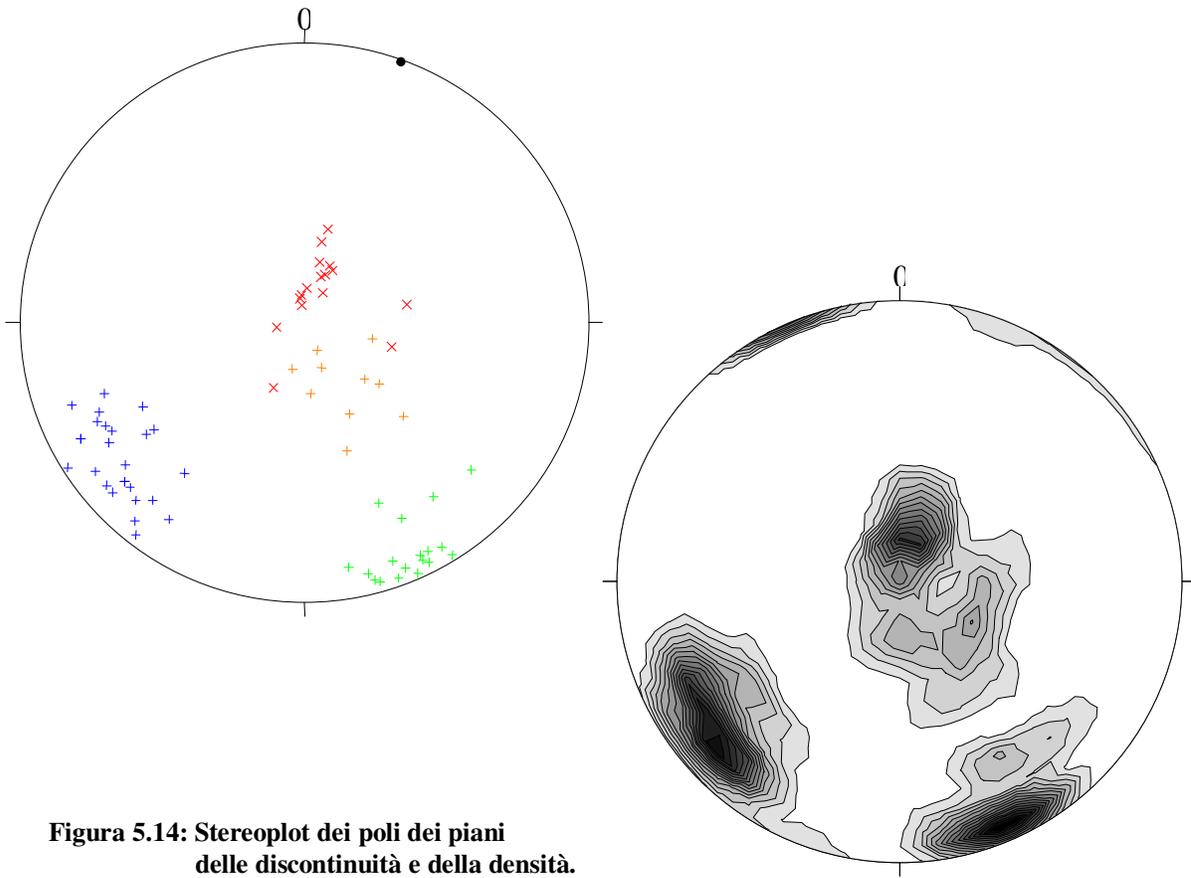


Figura 5.14: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

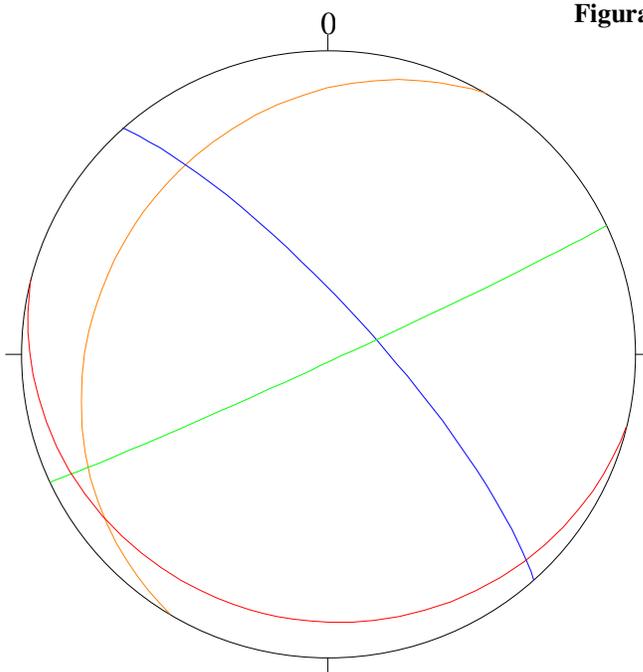


Figura 5.15: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	195/13
K1	155/88
K2	48/78
K3	301/25

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 42.55 il quale porta ad un RQD di 0.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 70 e 78, indicante una struttura di tipologia in transizione tra la categoria “*blocky*” e “*intact or massive*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	85	7
RQD	%	0	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	32	10
Condizioni delle discontinuità	-	-	25
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			60
Classe			III, Fair rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	0	10
n. set di discontinuità (J_n)	-	4	15
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			0.67
Classe			Very poor
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		>30°	0.15
F2		>45°	1
F3		0°(-10°)	-50
F4		-	15
SMR			67.5
Classe			II, Buona

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 2 ~

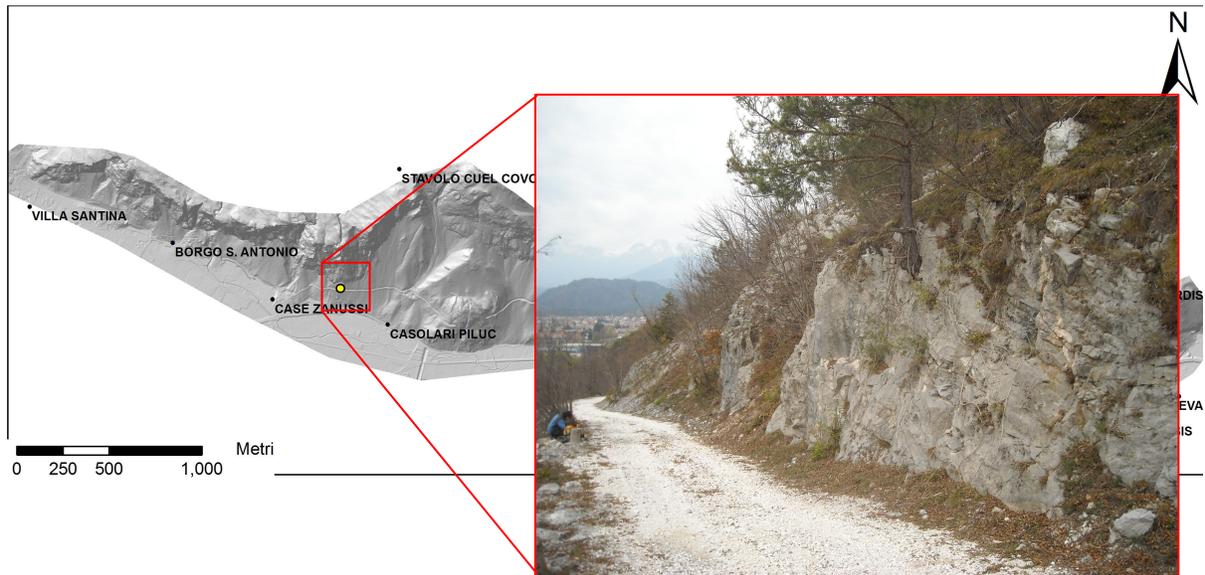


Figura 5.16: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°2.

Località	Est di Case Zanussi
Quota	410m
Data	14/11/2009
Giacitura Affioramento	225/60
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Dimensioni Affioramento	10X3X6
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	20X10X5
VRU minimo (cm)	2X2X2
VRU massimo (cm)	200X100X100

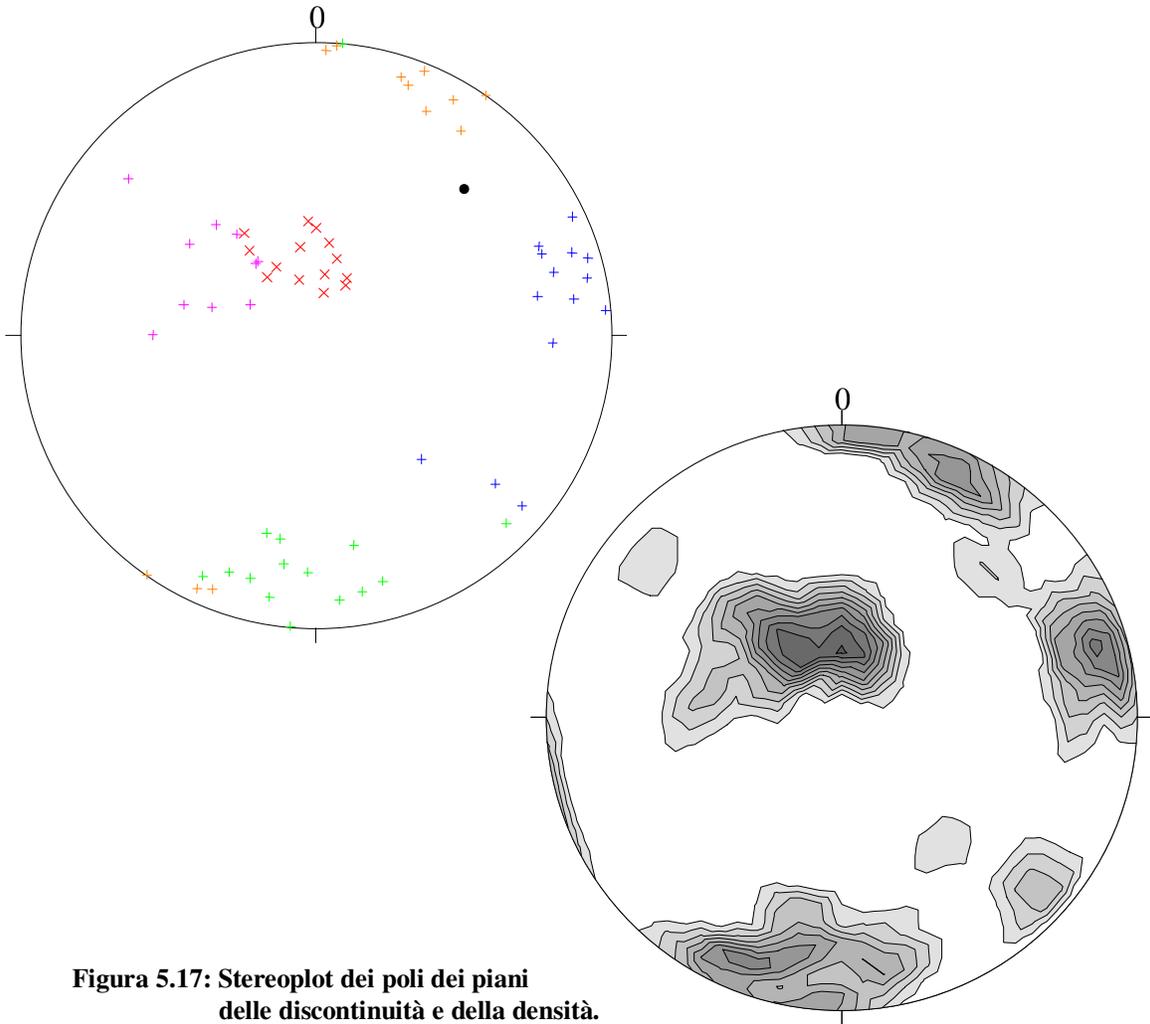


Figura 5.17: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

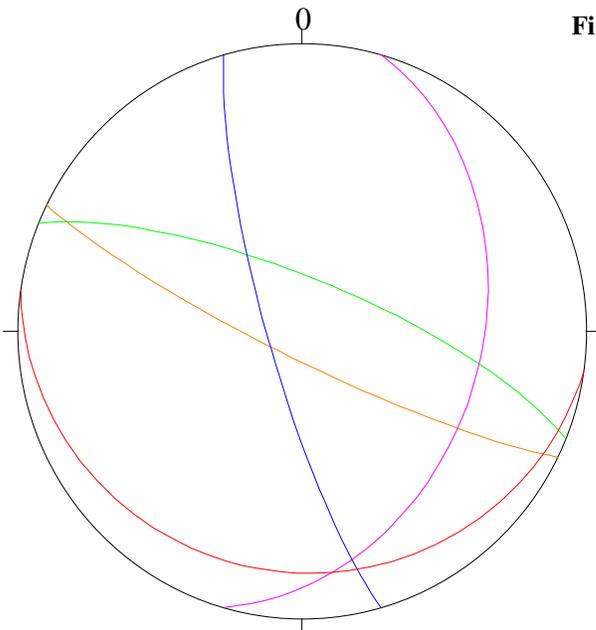


Figura 5.18: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	188/17
K1	22/75
K2	254/80
K3	206/82
K4	106/37

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 20 il quale porta ad un RQD di 49.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 55 e 62, indicante una struttura di tipologia in transizione tra la categoria “*blocky*” e “*very blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	59	7
RQD	%	49	8
Spaziatura delle discontinuità	cm	39	10
Condizioni delle discontinuità	-	-	18
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			58
Classe			III, Fair rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	49	49
n. set di discontinuità (J_n)	-	5	15
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	3
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			4.90
Classe			Fair
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		20°-10°	0.7
F2		>45°	1
F3		>10°	0
F4		-	15
SMR			73
Classe			II, Buona

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 3 ~

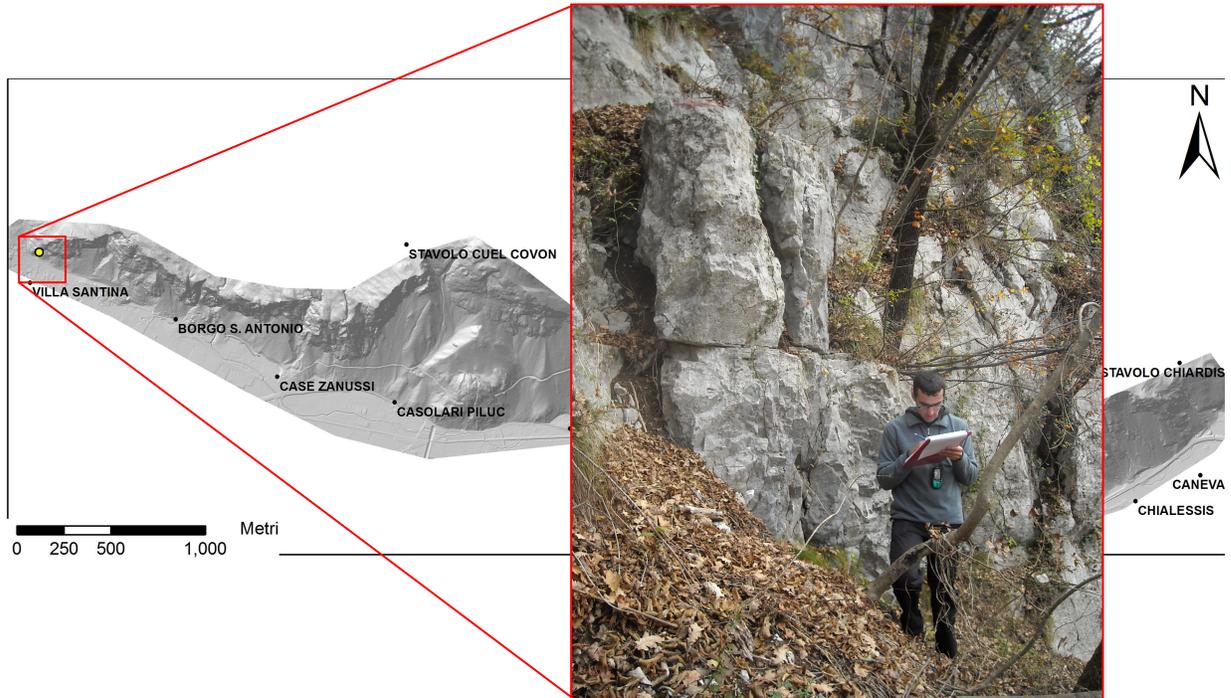


Figura 5.19: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°3.

Località	Nord di Villa Santina
Quota	405m
Data	16/11/2009
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Giacitura Affioramento	180/85
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	14X21X23
VRU minimo (cm)	4X3X3
VRU massimo (cm)	350X130X300

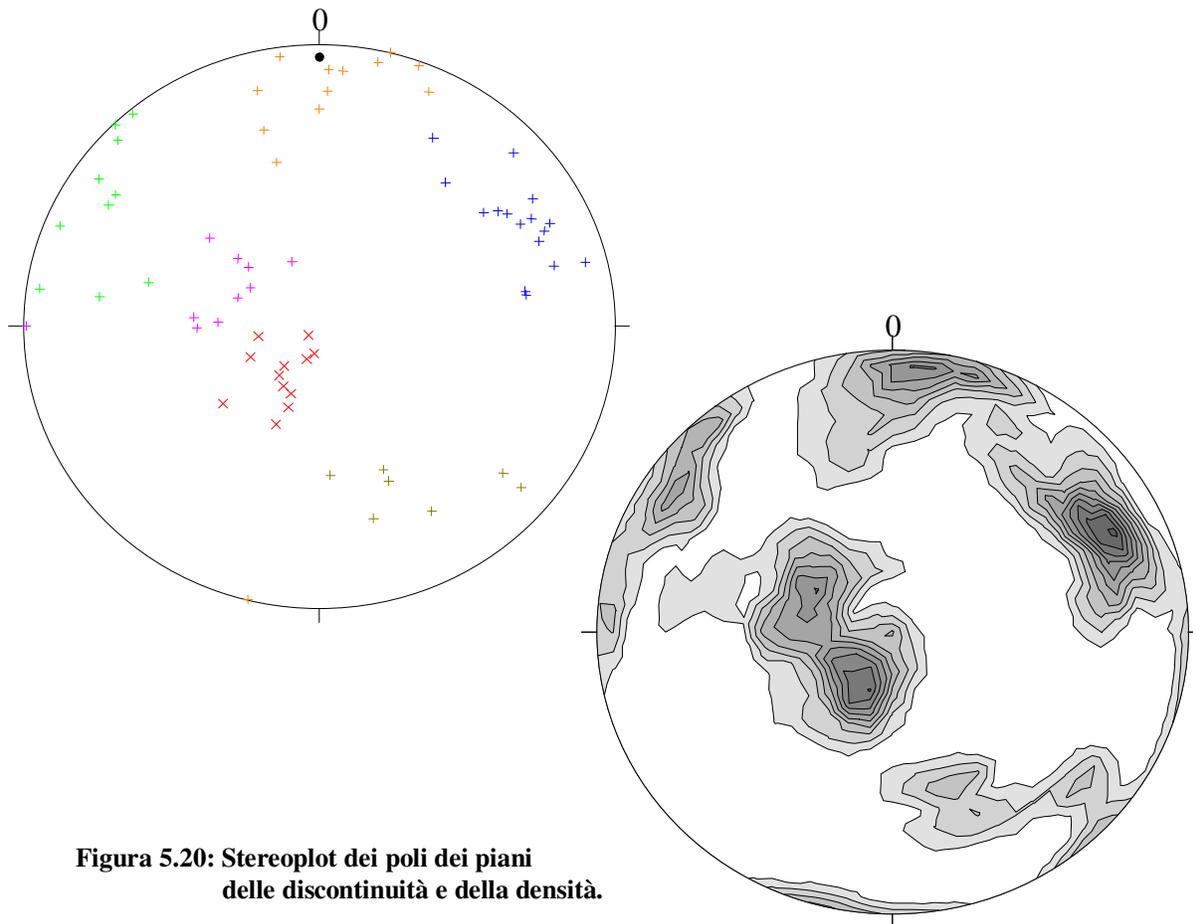


Figura 5.20: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

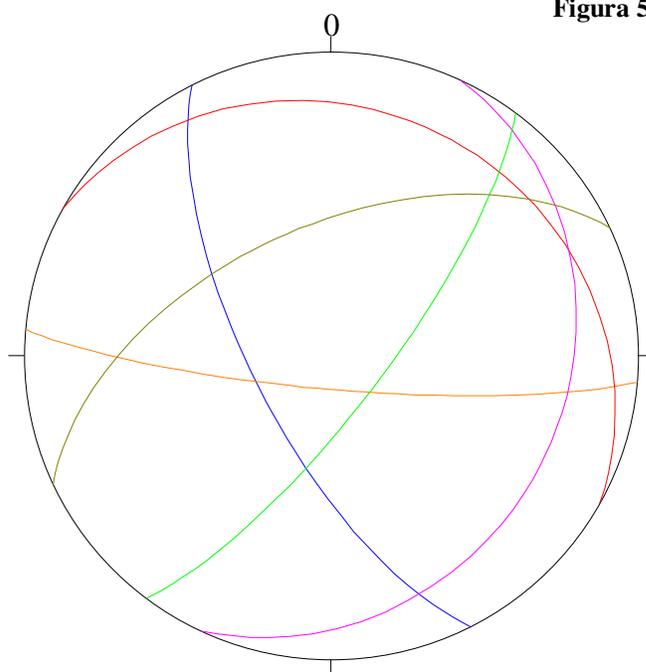


Figura 5.21: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	29/20
K1	127/76
K2	243/69
K3	185/81
K4	115/24
K5	335/55

In tale rilievo si è riscontrato che le famiglie *K1*, *K2* e *K3* sono quelle che controllano la dimensione e la forma dei blocchi risultanti.

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 34.9 il quale porta ad un RQD di 0.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore di 55, indicante una struttura appartenete alla categoria “*very blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	71	7
RQD	%	0	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	36	10
Condizioni delle discontinuità	-	-	16
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			51
Classe			III, Fair rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	0	10
n. set di discontinuità (Jn)	-	5	15
Rugosità delle discontinuità (Jr)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (Ja)	-	-	2
Acqua (Jw)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			0.67
Classe			Very poor
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		10°-5°	0.85
F2		>45°	1
F3		0°(-10°)	-50
F4		-	15
SMR			23.5
Classe			IV, Scadente

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 4 ~

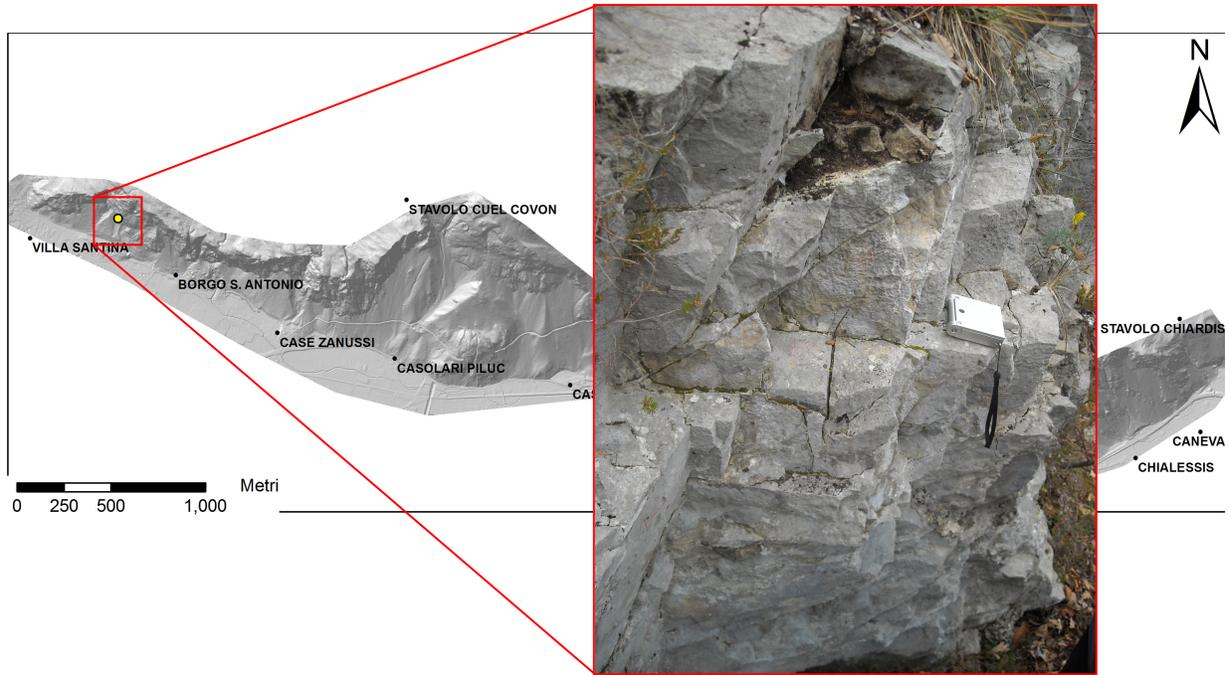


Figura 5.22: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°4.

Località	tra Villa Santina e Borgo S. Antonio
Quota	455m
Data	17/11/2009
Giacitura Affioramento	190/60
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	15X10X7
VRU minimo (cm)	3X2X1
VRU massimo (cm)	150X150X100

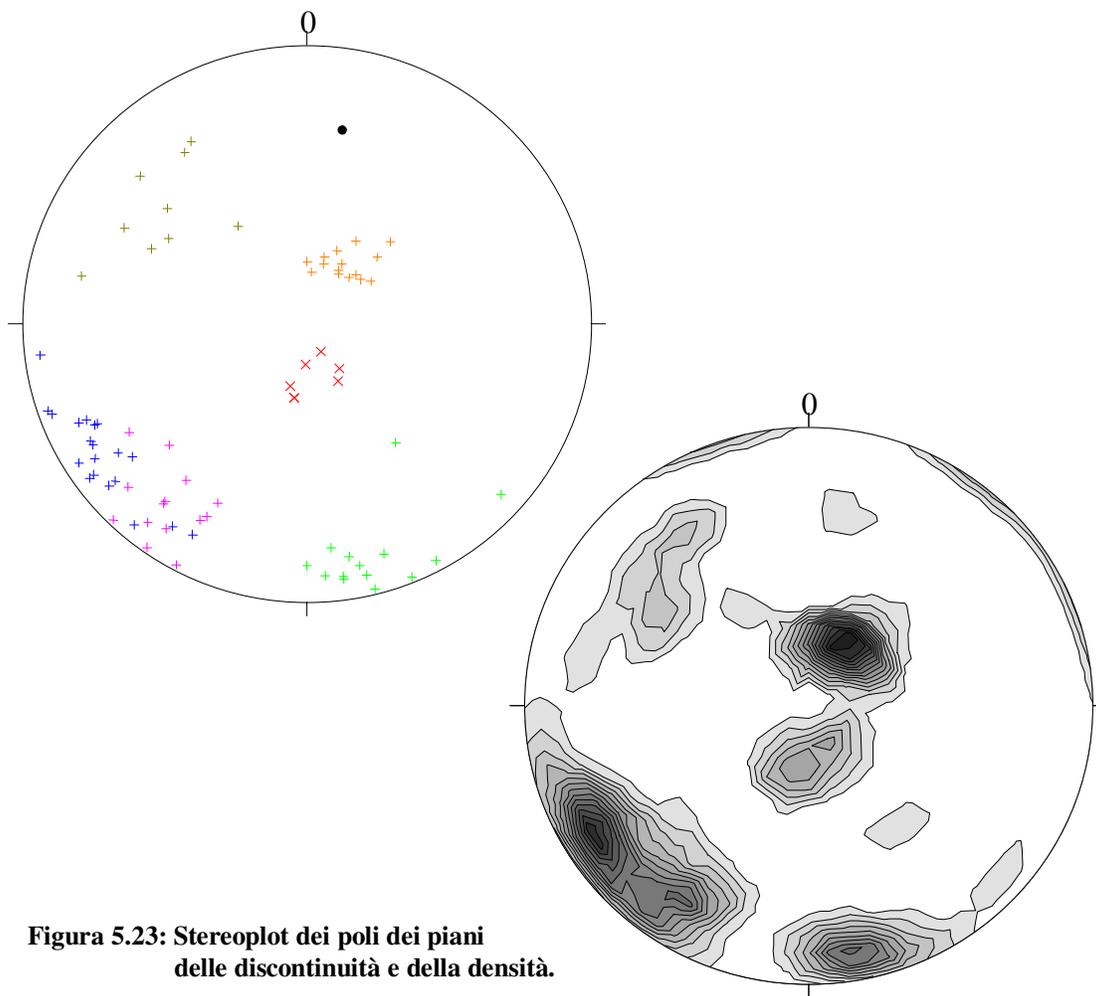
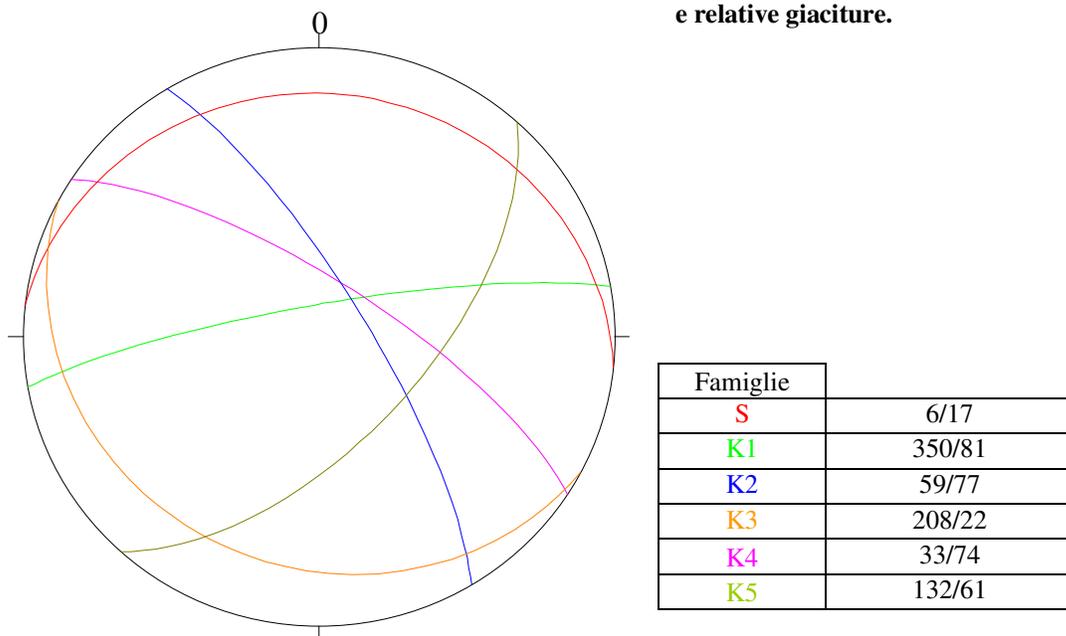


Figura 5.23: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

Figura 5.24: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.



Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 42.35 il quale porta ad un RQD di 0.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 47 e 53, indicante una struttura appartenete alla categoria “*very blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	65	7
RQD	%	0	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	19	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	25
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			58
Classe			III, Fair rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	0	10
n. set di discontinuità (J_n)	-	6	15
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	1.5
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			0.50
Classe			Very poor
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		20°-10°	0.7
F2		20°-30°	0.4
F3		<-10°	-60
F4		-	15
SMR			56.2
Classe			III, Discreta

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 5 ~

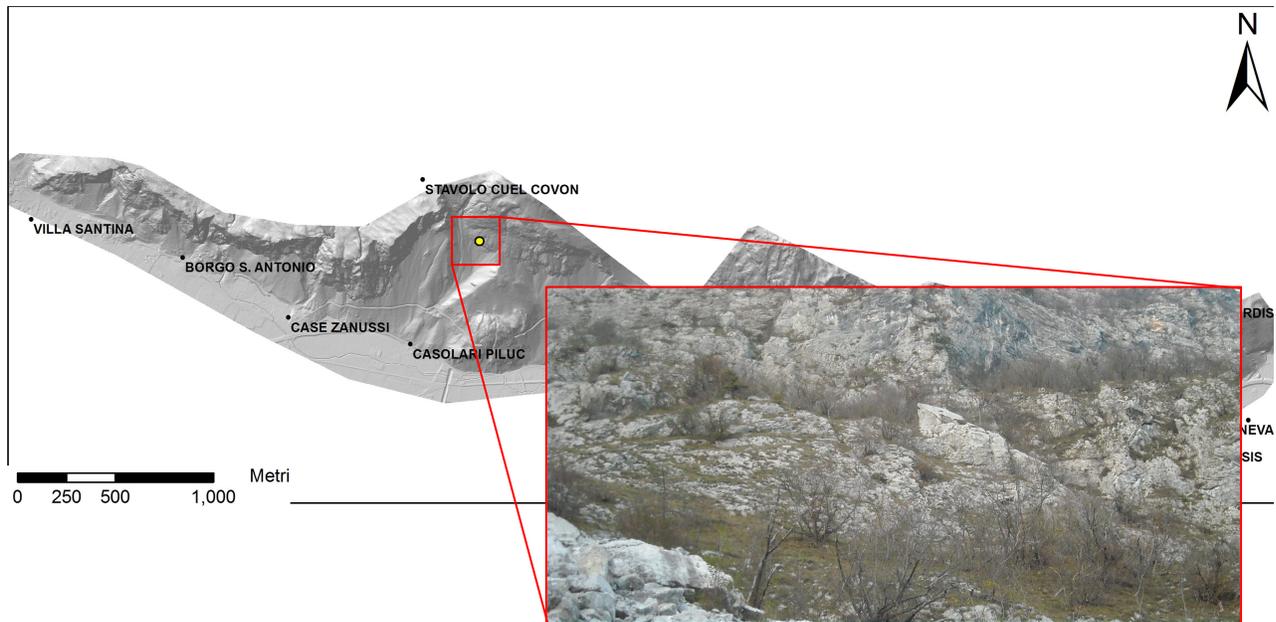


Figura 5.25: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°5.

Località	Nord dei Casolari Piluc
Quota	674m
Data	19/11/2009
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Giacitura Affioramento	210/70
Classe	R1
Alterazione	W1

VRU medio (cm)	20X15X10
VRU minimo (cm)	2X3X1
VRU massimo (cm)	100X60X30

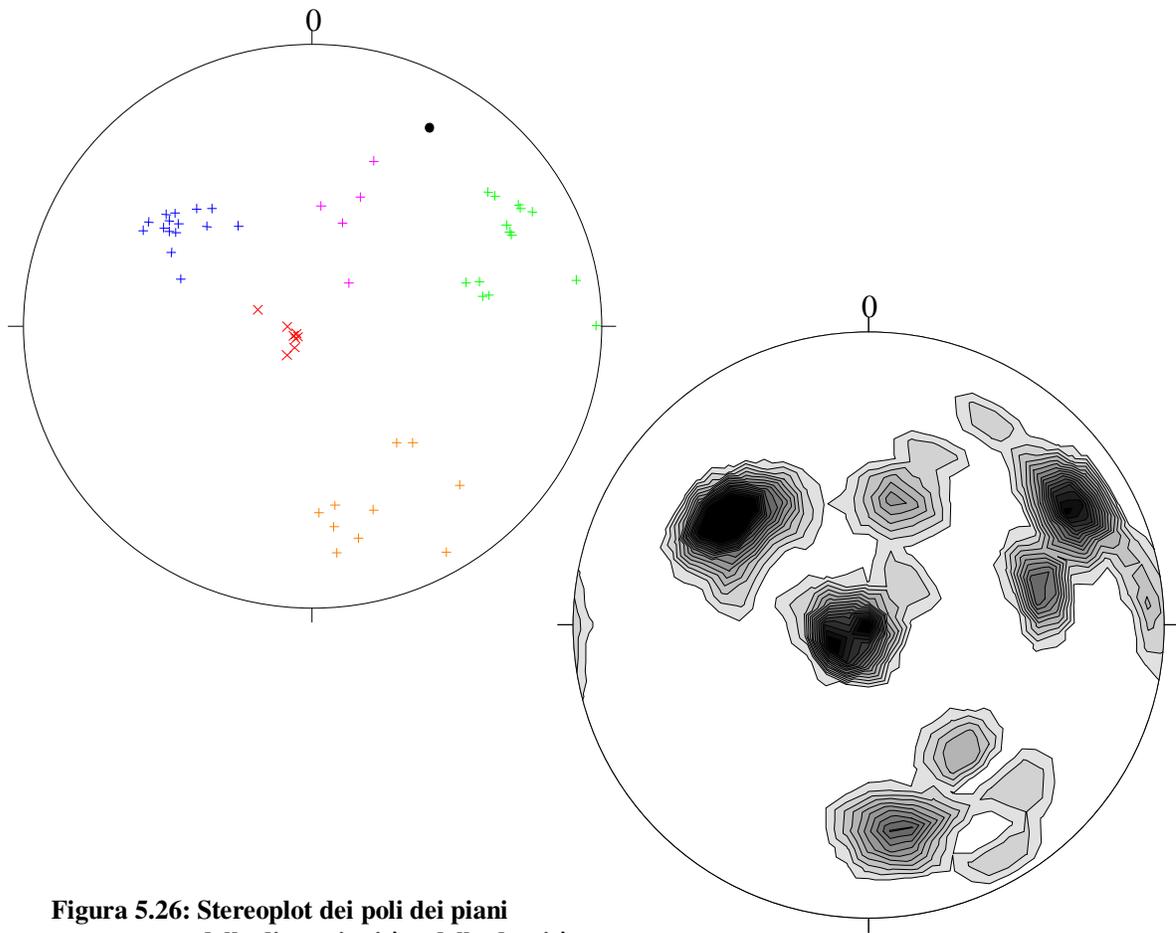


Figura 5.26: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

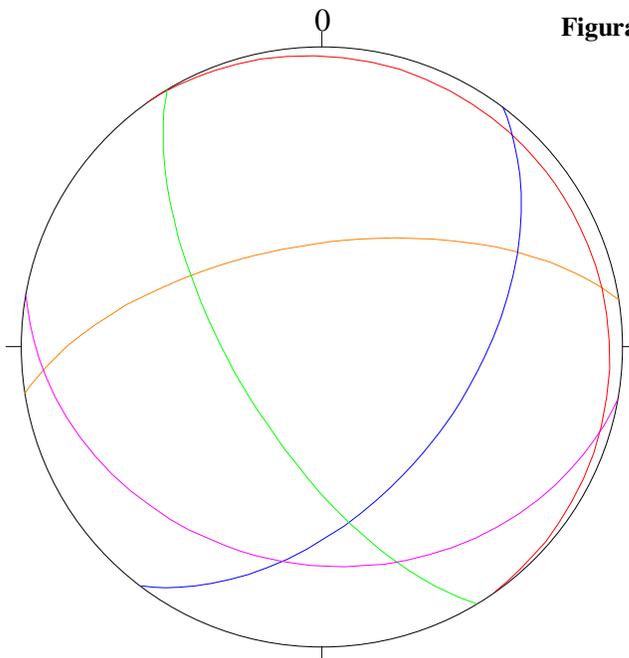


Figura 5.27: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	55/6
K1	239/66
K2	127/50
K3	351/62
K4	190/28

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 57.7 il quale porta ad un RQD di 0.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 58 e 62, indicante una struttura in transizione tra la categoria “*very blocky*” e “*blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	70	7
RQD	%	0	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	11	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	27
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			60
Classe			III, Fair rock

Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	0	10
n. set di discontinuità (J_n)	-	5	15
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	3
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			1.00
Classe			Poor

Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		20°-10°	0.7
F2		20°-30°	0.4
F3		<-10°	-60
F4		-	15
SMR			58.2
Classe			III, Discreta

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 6 ~

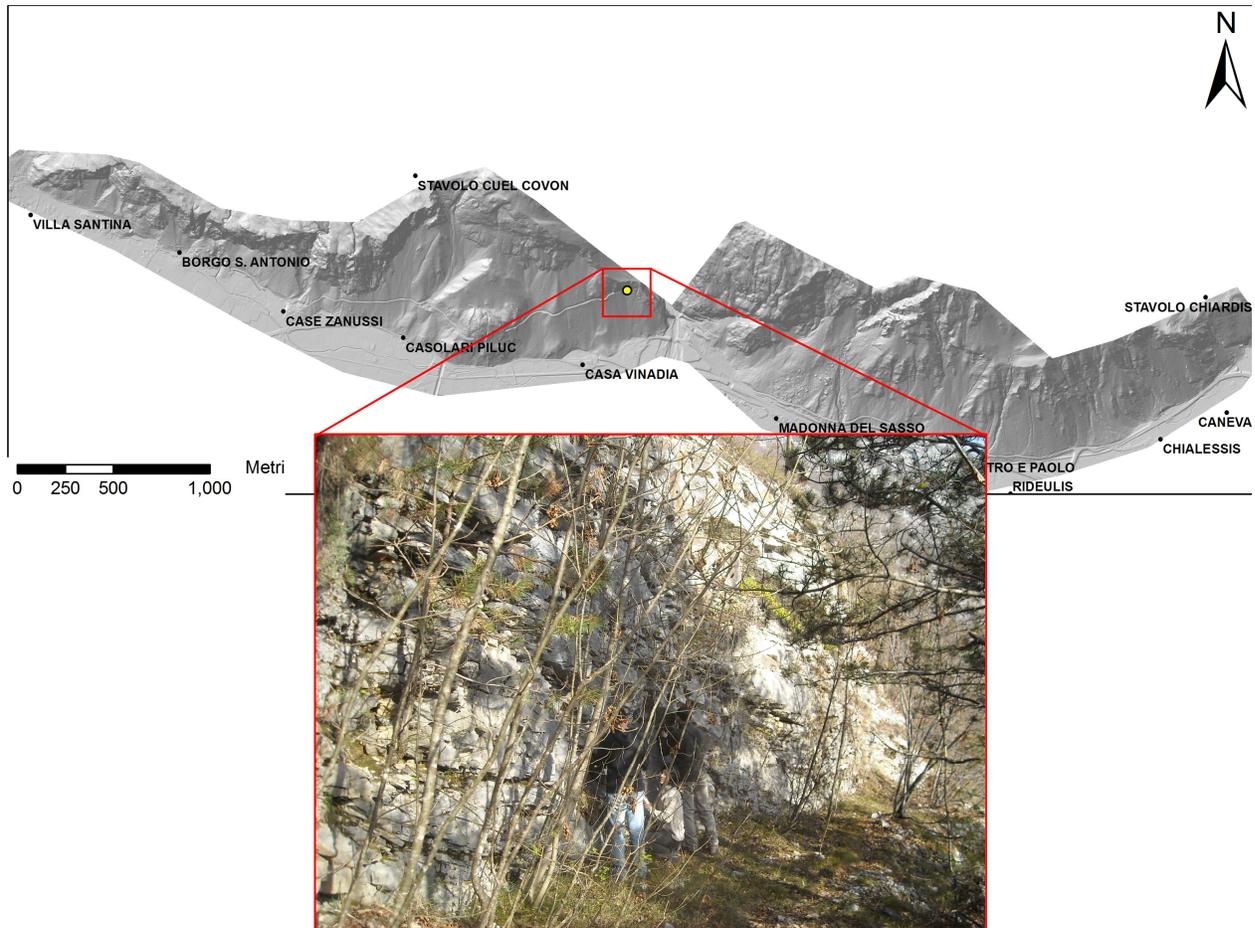


Figura 5.28: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°6.

Località	N/E di Casa Vinadia
Quota	512m
Data	20/11/2009
Giacitura Affioramento	170/75
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	17X9X7
VRU minimo (cm)	2X1,5X1
VRU massimo (cm)	75X40X40

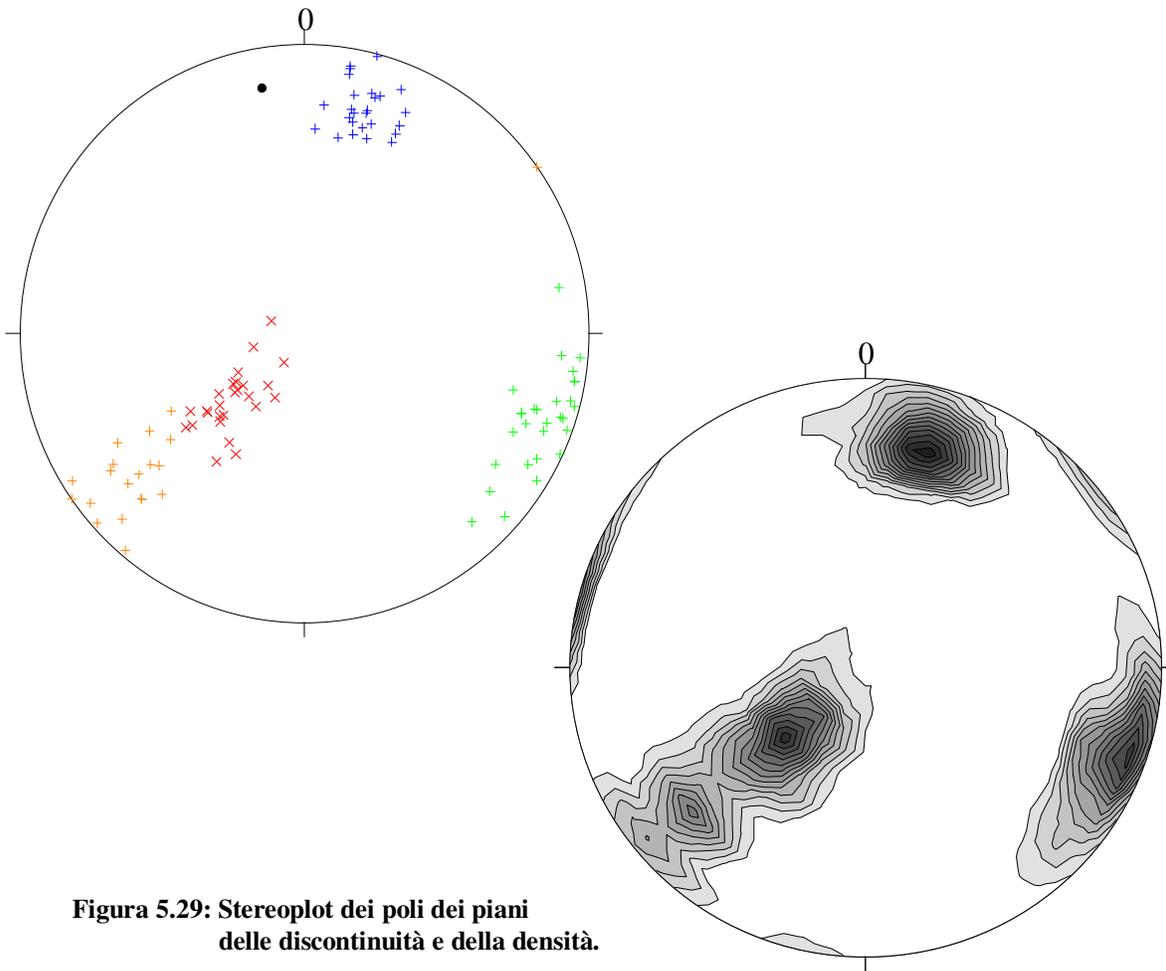
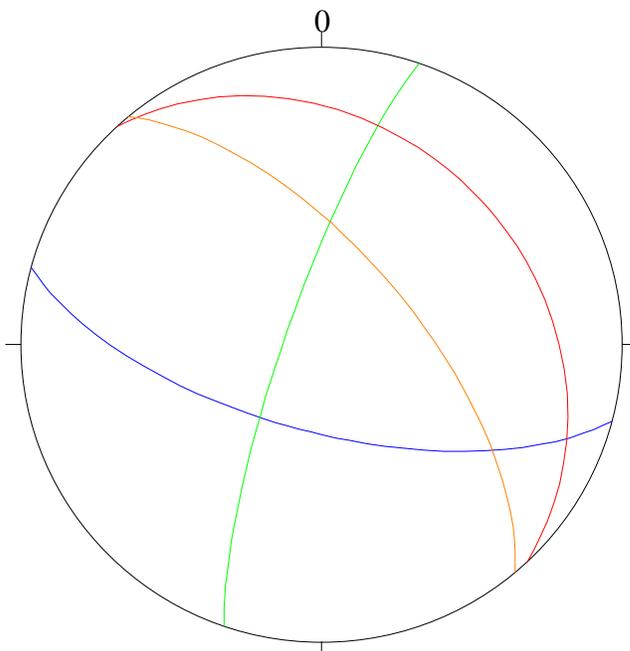


Figura 5.29: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

Figura 5.30: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.



Famiglie	
S	47/29
K1	289/80
K2	195/66
K3	50/65

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 21.9 il quale porta ad un RQD di 43.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 52 e 58, indicante una struttura appartenente alla categoria “*very blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	77	7
RQD	%	43	8
Spaziatura delle discontinuità	cm	19	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	24
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			62
Classe			II, Good rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	43	43
n. set di discontinuità (J_n)	-	4	15
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			2.87
Classe			Poor
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		20°-30°	0.4
F2		>45°	1
F3		0°(-10°)	-50
F4		-	15
SMR			57
Classe			III, Discreta

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 7 ~

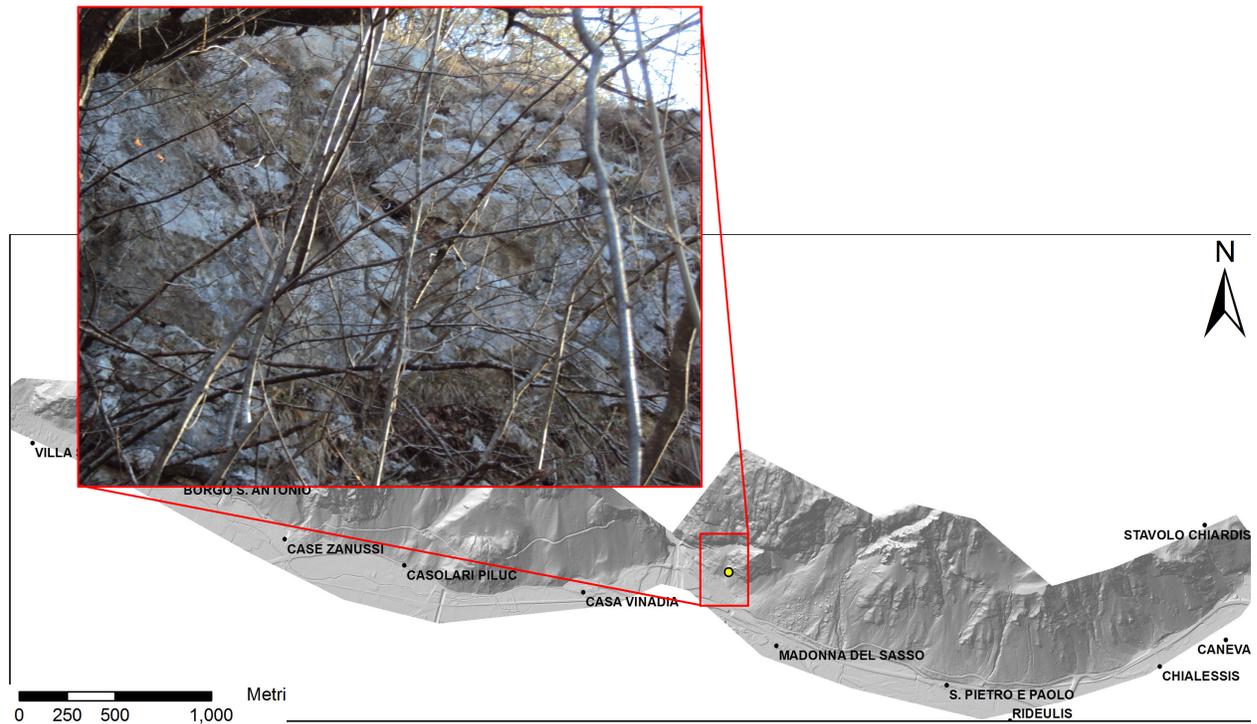


Figura 5.31: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°7.

Località	Sinistra orografica del Torrente Vinadia	VRU medio (cm)
Quota	380m	40X30X30
Data	01/02/2010	VRU minimo (cm)
Gaicitura Affioramneto	70/75	5X5X5
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar	VRU massimo (cm)
Dimensione Affioramento	8X3.5	100X50X30
Classe	R2	
Alterazione	W2	

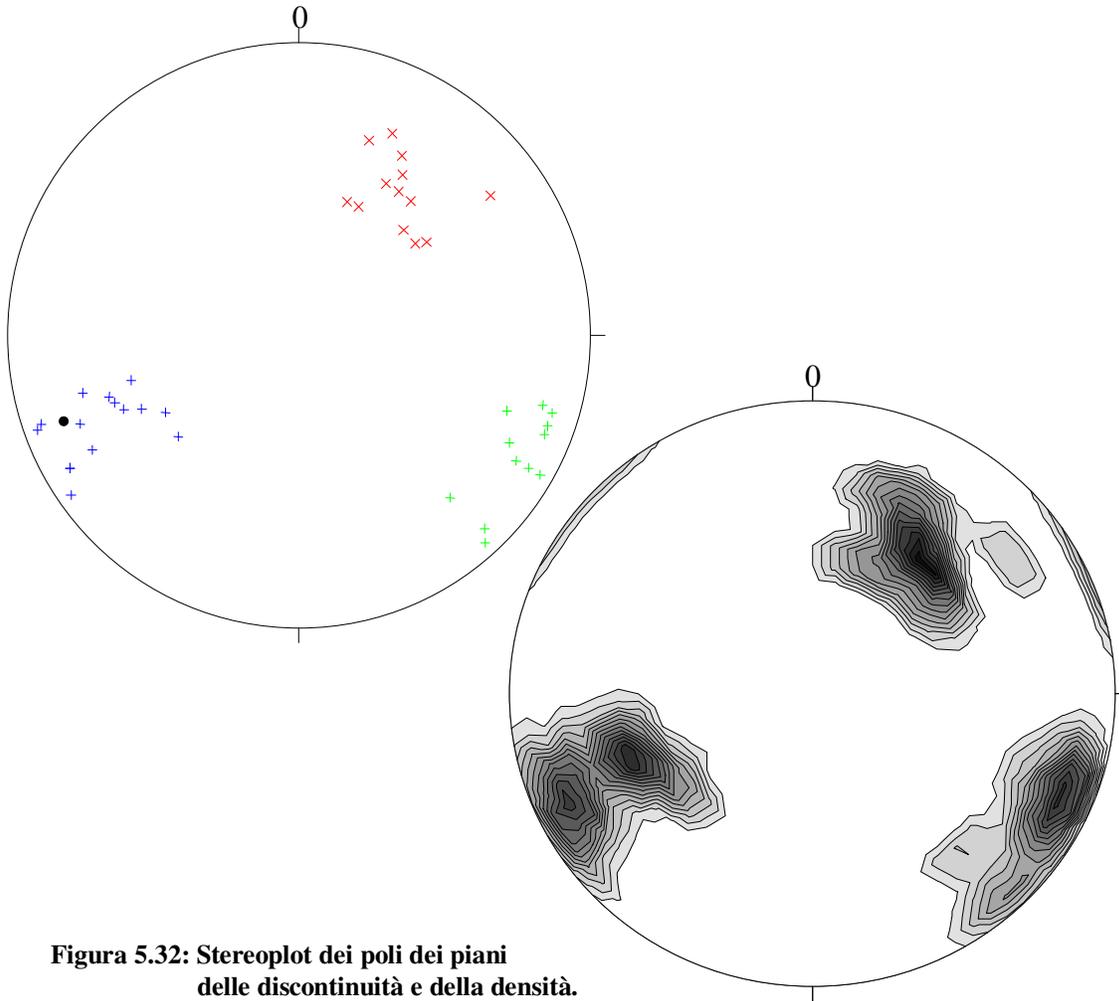


Figura 5.32: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

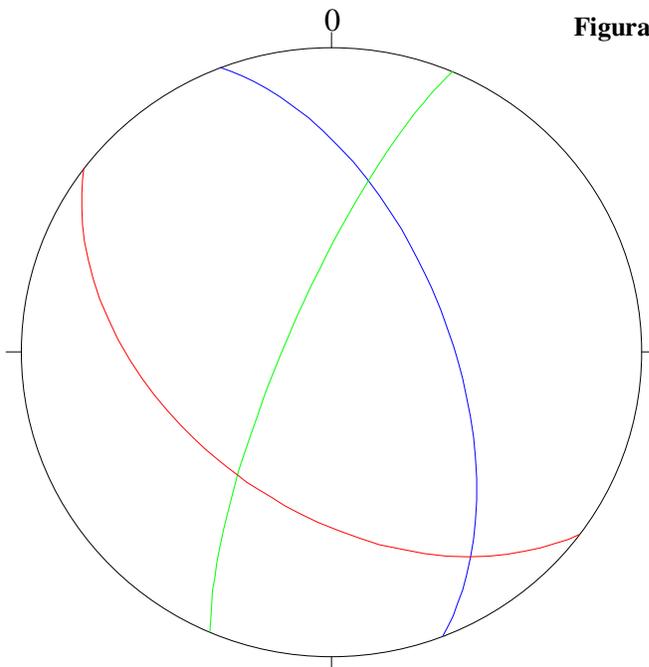


Figura 5.33: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	217/48
K1	293/78
K2	69/59

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 21.9 il quale porta ad un RQD di 43.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 57 e 62, indicante una struttura appartenente alla categoria “*blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*good*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	42	4
RQD	%	69	13
Spaziatura delle discontinuità	cm	24	10
Condizioni delle discontinuità	-	-	22
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			64
Classe			II, Good rock

Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	69	69
n. set di discontinuità (Jn)	-	3	9
Rugosità delle discontinuità (Jr)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (Ja)	-	-	2
Acqua (Jw)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			7.67
Classe			Fair

Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro	Valore	Indice	
F1	<5°	1	
F2	>45°	1	
F3	<-10°	-60	
F4	-	15	
SMR		19	
Classe		V, Molto scadente	

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 8 ~

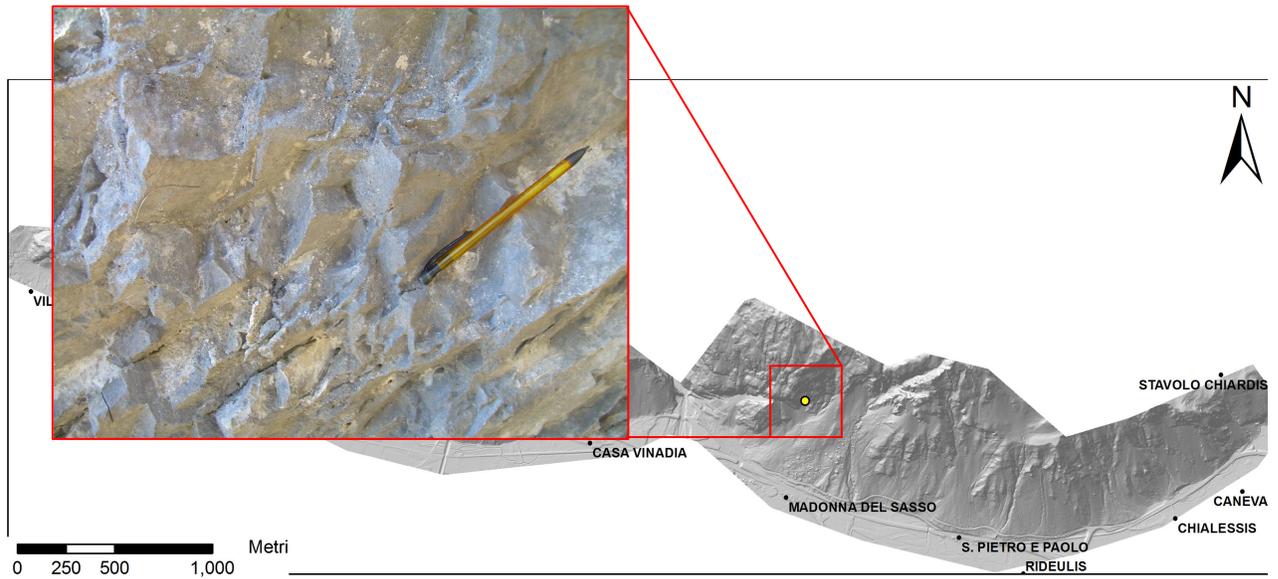


Figura 5.34: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°8.

Località	Nord di Madonna del Sasso
Quota	600m
Data	02/02/2010
Giacitura Affioramento	260/75
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Dimensione Affioramento	10X4
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	10X10X10
VRU minimo (cm)	4X5X3
VRU massimo (cm)	70X60X40

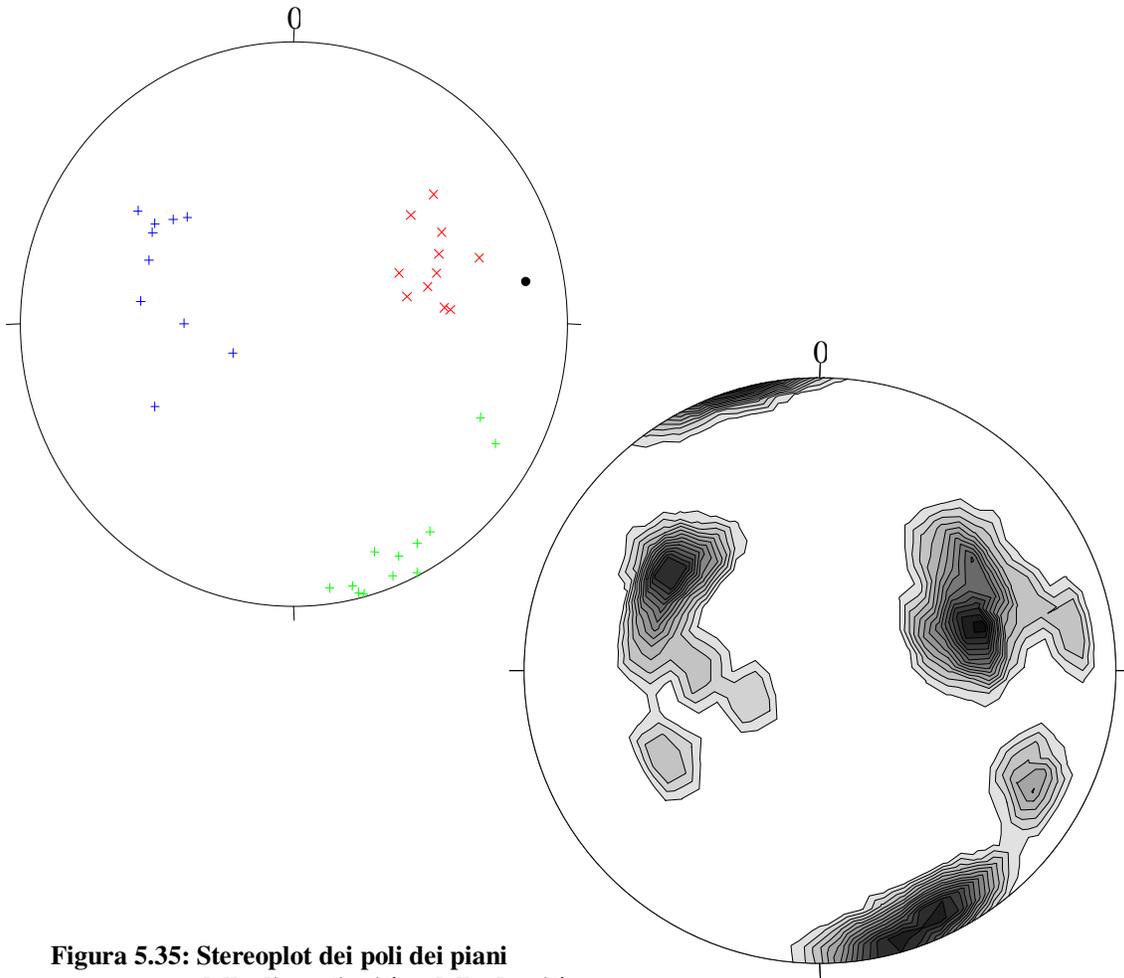


Figura 5.35: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

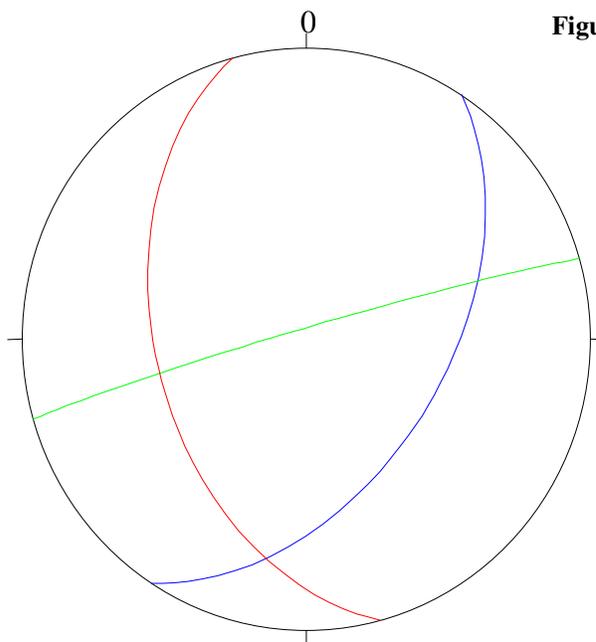


Figura 5.36: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	255/46
K1	344/87
K2	123/50

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 33.3 il quale porta ad un RQD di 5.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 52 e 57, indicante una struttura appartenente alla categoria “*blocky*” e una superficie di discontinuità appartenete alla categoria “*fair*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	34	4
RQD	%	5	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	12	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	22
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			52
Classe			III, Fair rock
Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	5	10
n. set di discontinuità (J _n)	-	3	9
Rugosità delle discontinuità (J _r)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (J _a)	-	-	2
Acqua (J _w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			1.11
Classe			Poor
Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		10°-5°	0.85
F2		>45°	1
F3		<-10°	-60
F4		-	15
SMR			16
Classe			V, Molto scadente

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 9 ~

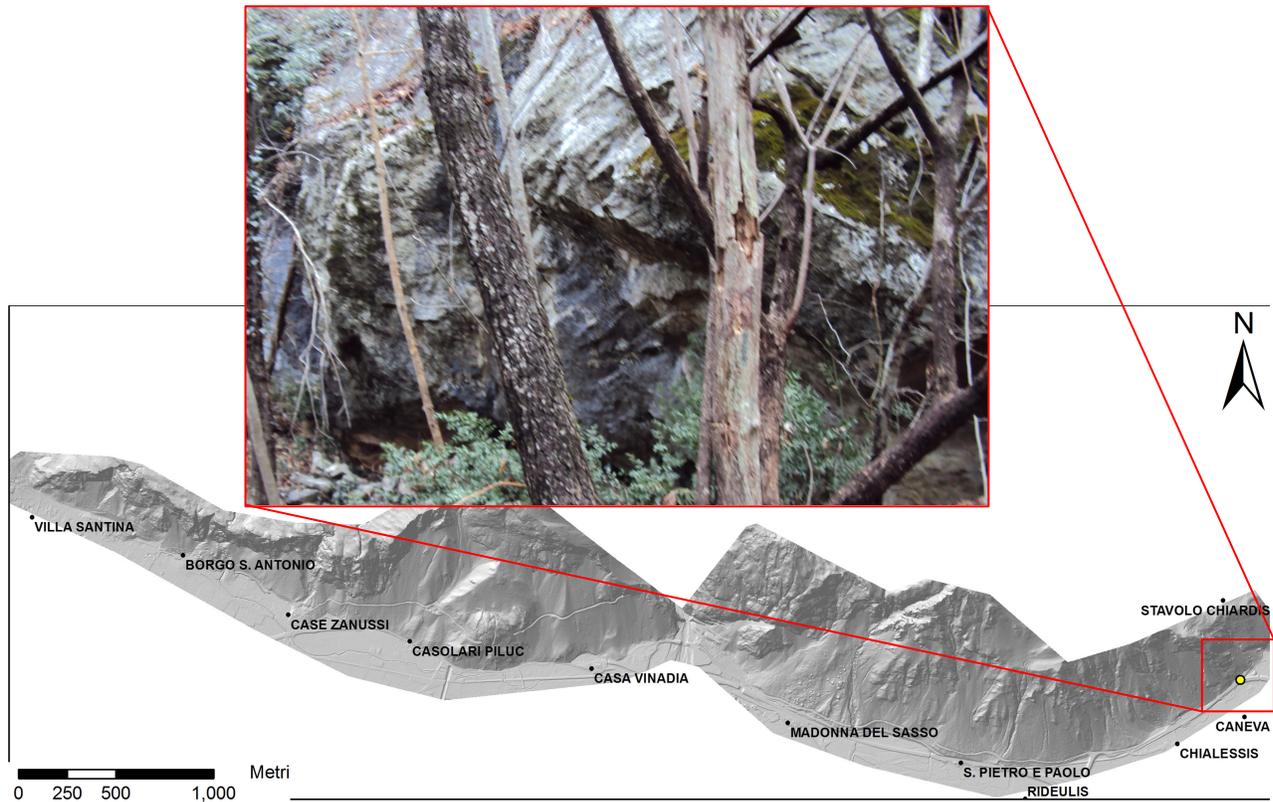


Figura 5.37: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°9.

Località	Nord di Caneva
Operatore	330m
Data	06/02/2010
Giacitura Affioramento	134/75
Descrizione Geologica	Dolomia dello Sciliar
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	35X30X20
VRU minimo (cm)	8X7X6
VRU massimo (cm)	100X140X150

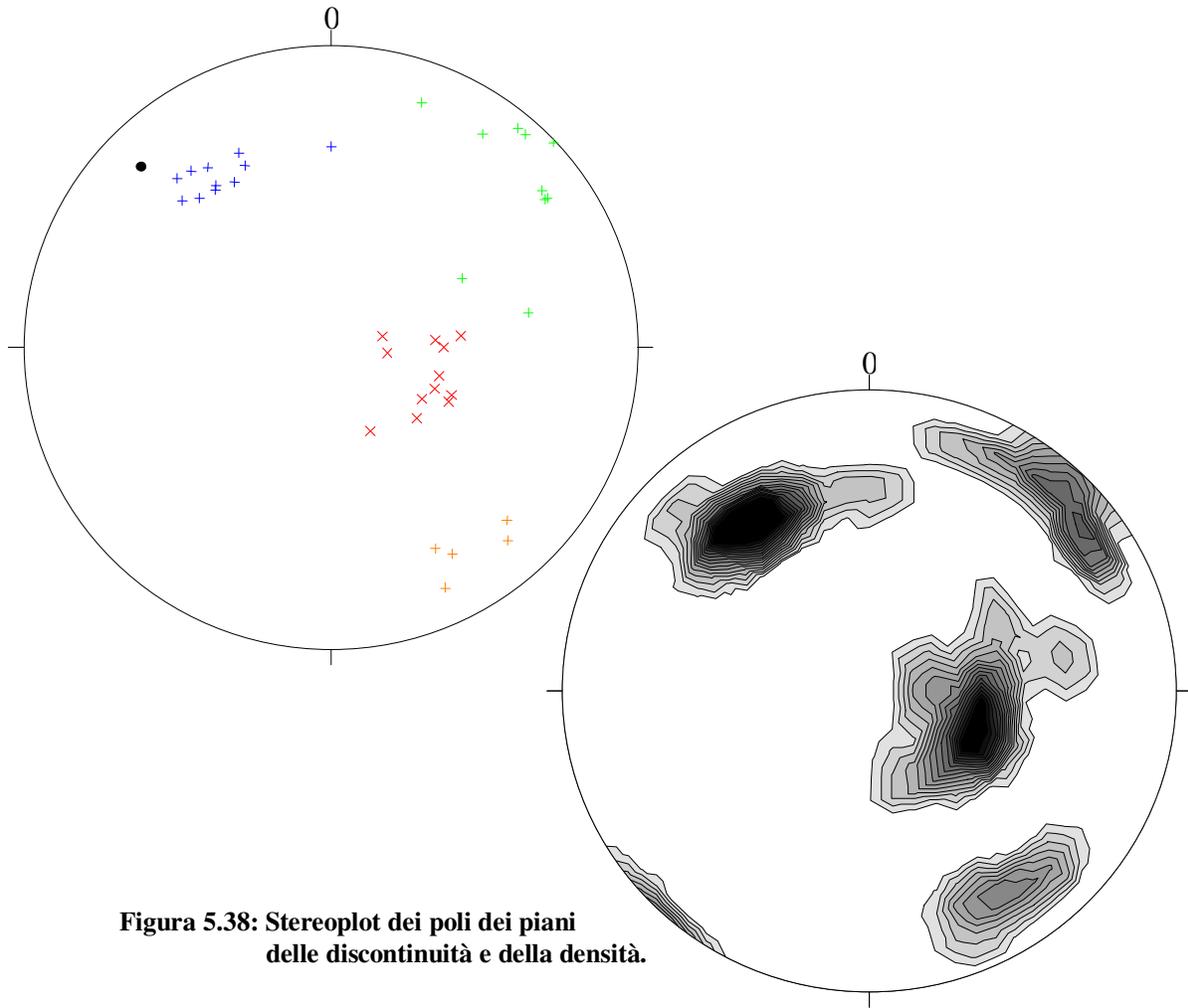


Figura 5.38: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

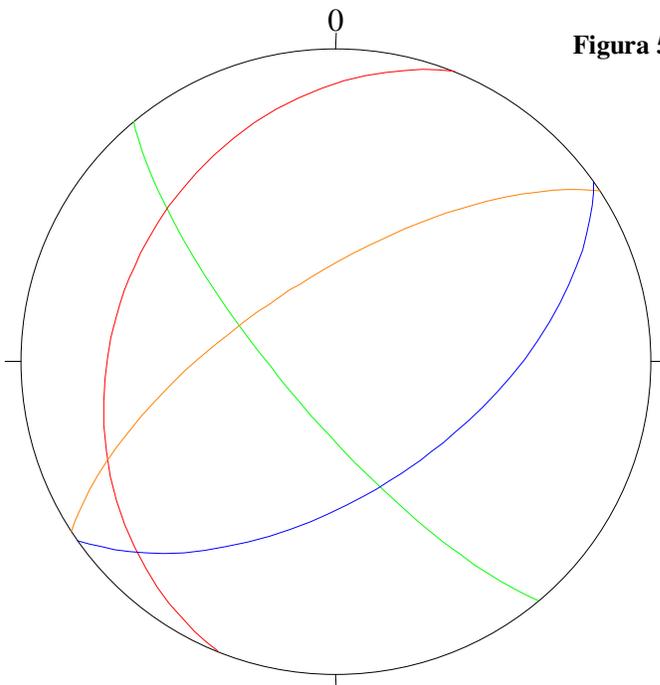


Figura 5.39: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	292/30
K1	230/76
K2	145/56
K3	327/68

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 33.9 il quale porta ad un RQD di 3.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 63 e 67, indicante una struttura appartenente alla categoria “*blocky*” e una superficie di discontinuità in transizione tra la categoria “*good*” e la categoria “*fair*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	35	4
RQD	%	3	3
Spaziatura delle discontinuità	cm	12	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	23
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			53
Classe			III, Fair rock

Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	3	10
n. set di discontinuità (Jn)	-	4	15
Rugosità delle discontinuità (Jr)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (Ja)	-	-	2
Acqua (Jw)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			0.67
Classe			Very poor

Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro		Valore	Indice
F1		20°-10°	0.7
F2		>45°	1
F3		<-10°	-60
F4		-	15
SMR			26
Classe			IV, Scadente

~ RILIEVO GEOMECCANICO N° 10 ~

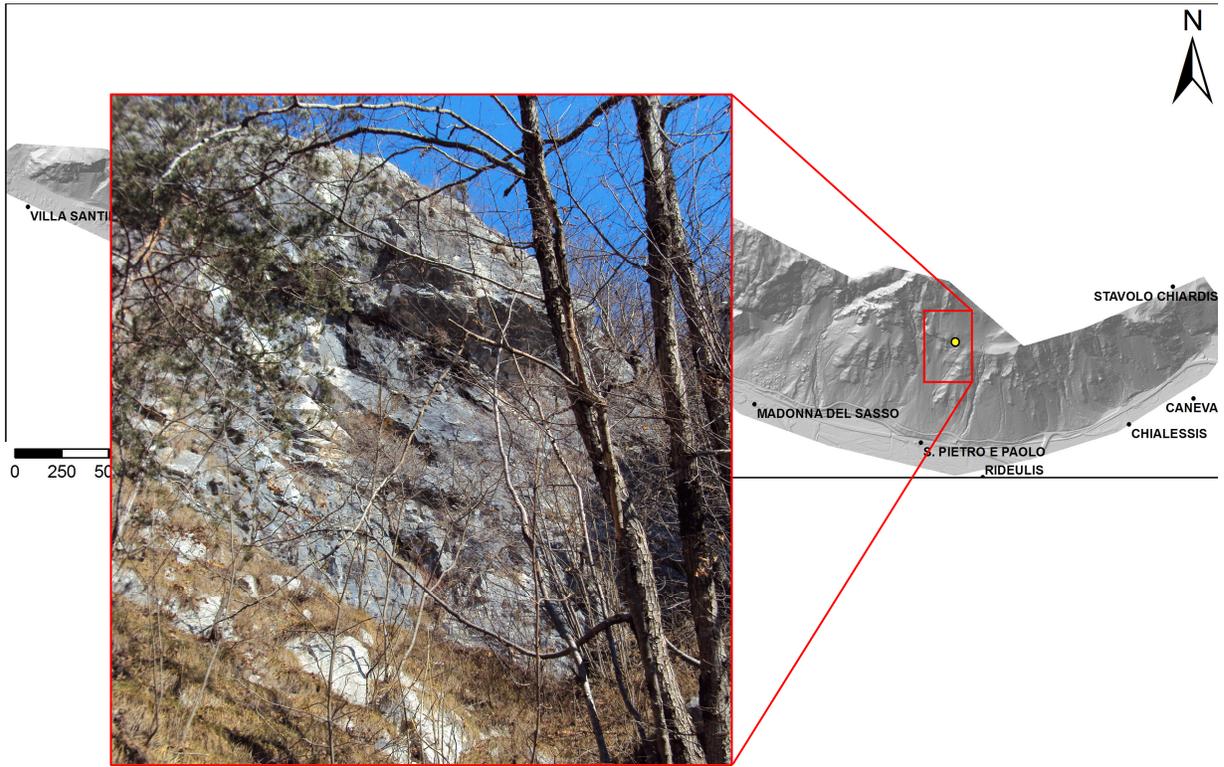


Figura 5.40: Localizzazione e relativa immagine dell'affioramento su cui si è svolto il rilievo n°10.

Località	Nord di S. Pietro e Paolo
Quota	680m
Data	08/02/2010
Giacitura Affioramento	245/80
Descrizione Geologica	Formazione della Val Degano
Dimensione Affioramento	1700
Classe	R2
Alterazione	W2

VRU medio (cm)	15X10X7
VRU minimo (cm)	3X2X1
VRU massimo (cm)	150X150X100

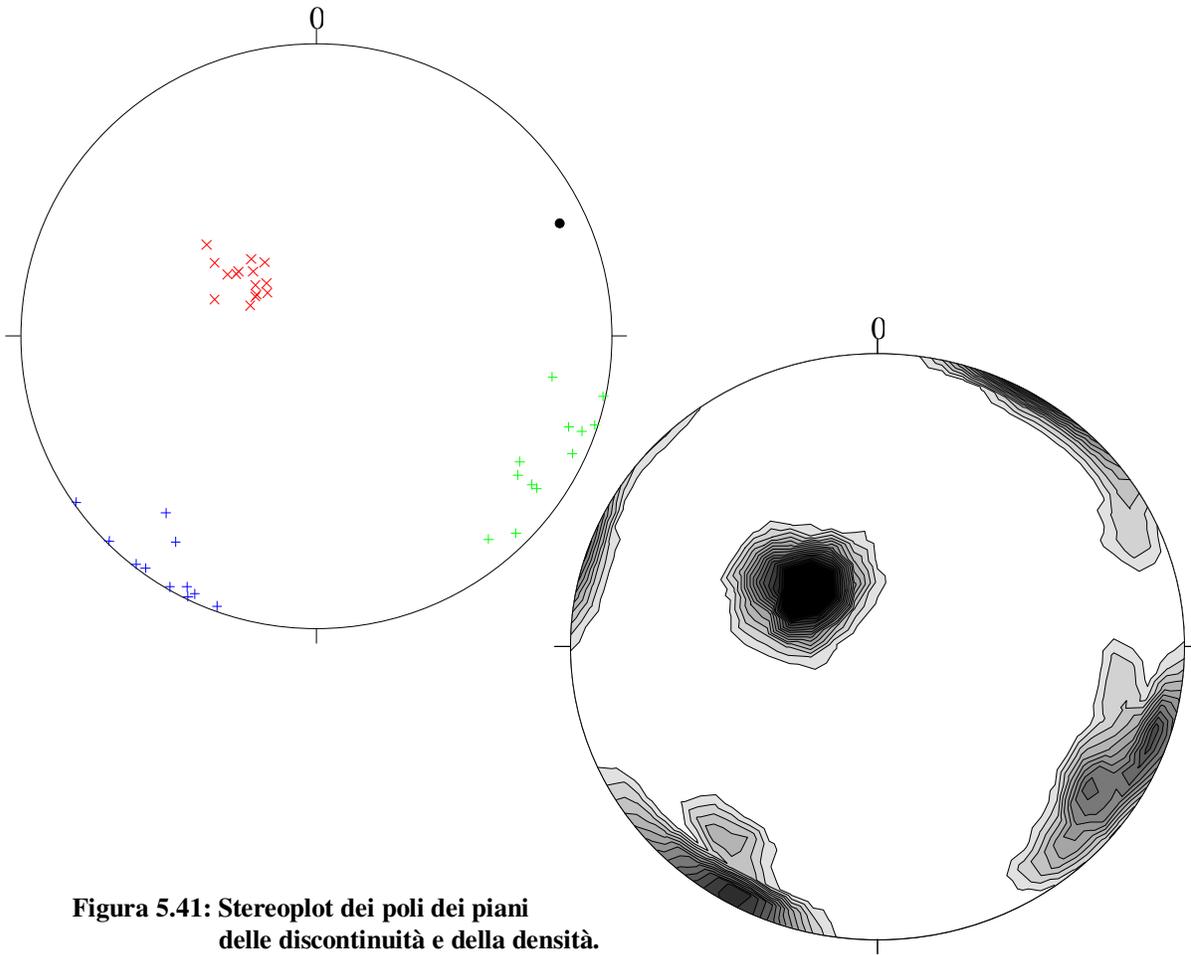


Figura 5.41: Stereoplot dei poli dei piani delle discontinuità e della densità.

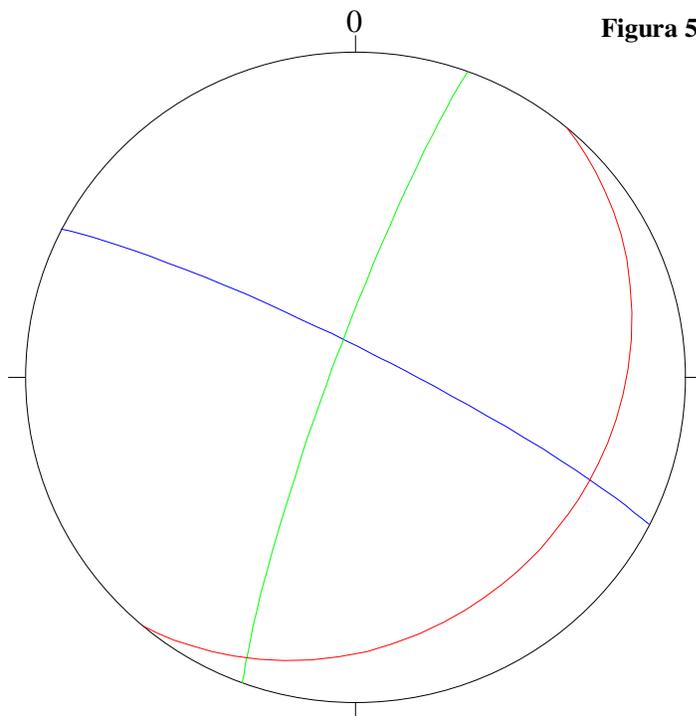


Figura 5.42: Famiglie di discontinuità individuate e relative giaciture.

Famiglie	
S	130/24
K1	290/84
K2	27/83

Adottando la relazione proposta da Palmström si determina un valore di J_v pari a 19.79 il quale porta ad un RQD di 50.

Dalla classificazione GSI si ottiene un valore compreso tra 52 e 57, indicante una struttura in transizione tra la categoria “*blocky*” e la categoria “*very blocky*” e una superficie di discontinuità in transizione tra la categoria “*good*” e la categoria “*fair*”.

Sintesi delle classificazioni adottate:

Geomechanics classification (Beniawski, 1989)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
Resistenza a compressione monoassiale	MPa	43	4
RQD	%	50	10
Spaziatura delle discontinuità	cm	16	8
Condizioni delle discontinuità	-	-	21
Acqua	-	asciutto	15
RMR_{89 basic}			58
Classe			III, Fair rock

Q-System (Barton et al., 1974)			
Parametro	Unità	Valore Medio	Punteggio
RQD	%	50	50
n. set di discontinuità (J_n)	-	3	9
Rugosità delle discontinuità (J_r)	-	-	2
Alterazione delle discontinuità (J_a)	-	-	2
Acqua (J_w)	-	-	1
SRF	-	-	1
Q			5.56
Classe			Fair

Slope Mass Rating System (Romana, 1985)			
Parametro	Valore	Indice	
F1	>30°	0.15	
F2	>45°	1	
F3	10°-0°	-6	
F4	-	15	
SMR		72.1	
Classe		II, Buona	

	RGM1	RGM2	RGM3	RGM4	RGM5	RGM6	RGM7	RGM8	RGM9	RGM10
RMR _{89 basic}	60	58	57	58	60	62	64	52	53	58
	III, Fair rock	II, Good rock	II, Good rock	III, Fair rock	III, Fair rock	III, Fair rock				
Q-System	0.67	4.90	0.67	0.50	1	2.87	7.67	1.11	0.67	5.56
	Very poor	Fair	Very poor	Very poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Very poor	Fair
SMR	67.5	73	29.5	56.2	58.2	57	19	16	26	72.1
	II, Buona	II, Buona	IV, Scadente	III, Discreta	III, Discreta	III, Discreta	V, Molto scadente	V, Molto scadente	IV, Scadente	II, Buona

Tabella 5.3: Sintesi delle classificazioni realizzate. RGM1→ rilievo geomeccanico n°1.

La *tabella 5.3* mostra in maniera sintetica ciò che è stato ottenuto per mezzo delle classificazioni geomeccaniche prese in considerazione.

Dai dati ottenuti si osserva che l'RMR₈₉ (Beiniawski, 1989) e il Q-System (Barton, 1974), fatta eccezione per i rilievi 6 e 7, risultano concordi nell'attribuire, relativamente a ciascun rilievo, caratteristiche scadenti all'ammasso roccioso, considerando che in media il Q-System attribuisce comunque classi di qualità peggiore rispetto all'RMR₈₉. Di contro si può osservare che tramite l'SMR (Romana, 1985) si ottengono, sempre relativamente ai singoli rilievi, delle classi migliori rispetto alle altre due classificazioni, fatta eccezione per i rilievi 7 e 8 che rientrano nella classe "molto scadente", determinando un netto peggioramento della qualità. Da evidenziare che per i due rilievi in cui l'RMR₈₉ determina caratteristiche "buone" dell'ammasso, il valore dell'SMR, in media elevato, risulta di classi notevolmente inferiori in termini di qualità, mostrando dunque un riscontro opposto tra le due classificazioni.

In conclusione l'RMR₈₉ mostra qualità discrete dal punto di vista geomeccanico per otto rilievi su dieci, l'SMR mostra che per sei rilievi su dieci il materiale roccia costituente le pareti dei versanti dell'area risulta essere parzialmente stabile (classe III) o stabile (classe II).

6. VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO

La suscettibilità da frana costituisce una stima quali-quantitativa del volume e della distribuzione spaziale delle frane che interessano una data area, anche potenzialmente.

Essa esprime dunque una pericolosità spaziale definibile come la propensione di un'area all'innescò di fenomeni franosi pericolosi, effettuando una stima del grado di instabilità di un versante rispetto ad un altro (pericolosità relativa), senza esprimere la probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi in termini assoluti o in senso temporale. Per la stima della suscettibilità è necessario valutare la scala del problema, la disponibilità, la qualità e la distribuzione dei dati. Una corretta valutazione implica la determinazione di “come” e “quanto” i diversi fattori influenzino i fenomeni pericolosi. Per la definizione della suscettibilità da frana nell'area di Villa Santina sono stati adottati due diversi approcci, uno deterministico e uno euristico.

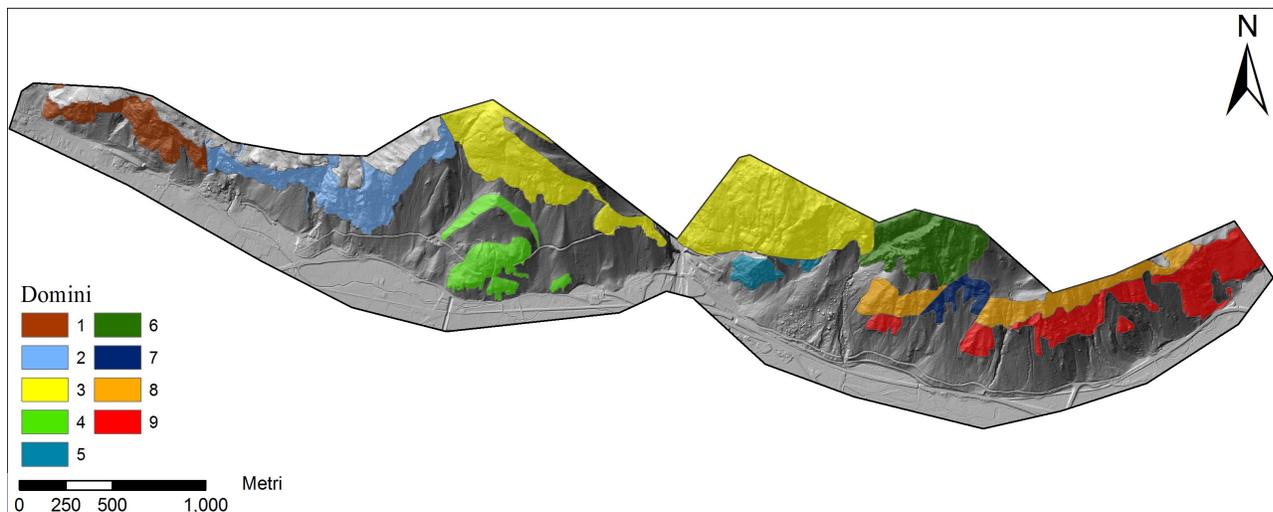


Figura 6.1: Domini omogenei identificati nell'area di Villa Santina.

Per potere affermare che una data area ha una certa suscettibilità è necessario suddividere il territorio in unità territoriali o domini, ovvero porzioni di spazio che risultino essere il più omogenei possibili dal punto di vista litologico, strutturale e geomeccanico.

Base di tale lavoro sono stati:

- la carta geologica (Carulli, 2006);
- il lavoro svolto sul terreno dal Dott. Geol. Fulvio Podda;
- i rilievi geomeccanici e le osservazioni fatte sul terreno;
- la carta della litologia superficiale realizzata nell'ambito del progetto.

Verificando una congruenza della litologia e delle strutture con la carta geologica unitamente al limite roccia determinato nella carta della litologia superficiale, si è provveduto ad integrare ed in parte modificare i domini identificati sul terreno dal Dott. Geol. Fulvio Podda,

Nel complesso sono stati tracciati 9 domini litologico-strutturali (*figura 6.1*) di cui le principali caratteristiche sono di seguito elencate:

- **DOMINIO 1:** Risulta essere costituito unicamente dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* con un'immersione compresa tra 340° e 20° e un'inclinazione tra 10° e 30° ; In precedenza tale dominio era stato suddiviso in due porzioni ma in seguito ai rilievi geomeccanici svolti sul terreno si è deciso di accorparle in uno solo.
- **DOMINIO 2:** Risulta, come il precedente, essere costituito unicamente dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* con un'immersione compresa tra 160° e 200° e un'inclinazione tra 10° e 30° ;
- **DOMINIO 3:** Costituito nella quasi totalità dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* fatta eccezione per alcuni lembi della *Formazione della Val Degano*; Presenta un'immersione compresa tra 20° e 70° e un'inclinazione tra 10° e 30° ; Originariamente esso era previsto in continuità con il dominio 2 ed una parte del dominio 1, ma sempre sulla base dei rilievi geomeccanici svolti si è ipotizzata una loro frammentazione.

- **DOMINIO 4:** Costituito unicamente dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* con un'immersione compresa tra 160° e 200° e un'inclinazione tra 10° e 30° ; Tale dominio non risultava contemplato dai precedenti lavori, in quanto era ipotizzato costituire un corpo di frana (*figura 6.2*), tuttavia da



indagini svolte sul terreno si è convenuto escludere tale possibilità (forma e volumetrie e presenza di roccia affiorante non concordano con un fenomeno franoso) e lo si è incluso nelle formazioni rocciose, dissociandolo per la sua complessità e per analisi successive dal dominio 2 di cui ha la stessa giacitura media.

- **DOMINIO 5:** Costituito unicamente dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* con un'immersione compresa tra 200° e 250° e un'inclinazione tra 30° e 50°; Esso risulta separato dal sovrastante dominio 3 dalla presenza di una faglia trascorrente.
- **DOMINIO 6:** Costituito in prevalenza dalla *Dolomia dello Sciliar*, appartenete al *Gruppo del M. Siera* e da alcuni lembi della *Formazione della Val Degano*; Presenta un'immersione compresa tra 110° e 160° e un'inclinazione tra 10° e 30°. Anche tale dominio era in precedenza suddiviso in più porzioni, tuttavia non avendo trovato un riscontro di tali differenze si è optato per un'unificazione.
- **DOMINIO 7:** Costituito dalla *Formazione della Val Degano* con intercalate le *Lutiti Verdi*. Presenta un'immersione compresa tra 290° e 340° con un'inclinazione tra 70° e 90°.
- **DOMINIO 8:** Costituito dalla *Formazione della Val Degano* con intercalate le *Lutiti Verdi* e porzioni della *Dolomia dello Sciliar*. Presenta un'immersione tra 290° e 340° con un'inclinazione tra 30° e 50°.
- **DOMINIO 9:** Costituito in prevalenza dalla *Dolomia dello Sciliar*; Presenta un'immersione tra 20° e 70° e un'inclinazione tra 10° e 30°. In questo dominio, come nel precedente sono state unificate porzioni di roccia precedentemente non considerate, sulla base ad un approccio geomorfologico.

Informazioni relativamente alla direzione di immersione e all'inclinazione della superficie topografica possono essere ottenute per mezzo del LIDAR, data la sua elevata risoluzione.

A tal fine è necessario realizzare due carte, in ambiente GIS, attraverso lo *Spatial Analyst* a partire dal LIDAR stesso:

- la carta dell'esposizione, rappresentante la direzione della pendenza per ogni pixel;
- la carta delle pendenze, che, sulla base di un algoritmo (metodo degli 8 vicini, Horn, 1981), calcola per ogni pixel il gradiente della pendenza sfruttando una finestra mobile (kernel) di 3x3 pixel.

La combinazione di queste due carte consente di individuare in modo approssimativo, data l'influenza dell'orientazione della topografia, le informazioni richieste.

6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA IN COLTOP 3D

Coltop 3D è un programma per l'analisi tridimensionale della topografia di un'area, per mezzo del quale è stato possibile ricavare in ciascun dominio, precedentemente identificato, la variazione dell'orientazione delle principali famiglie di discontinuità. Con questo programma è possibile mappare e misurare i maggiori lineamenti strutturali (faglie) e giungere ad una definizione preliminare dei domini omogenei per la caratterizzazione geomeccanica di una certa area.

All'interno di questo programma il modello digitale del terreno (DTM) dell'area di studio è stato importato in formato ASCII e generato tridimensionalmente con la risoluzione desiderata (figura 6.5). In base alla teoria è necessario dare due livelli di risoluzione come minimo, di cui uno è 2.5 la risoluzione iniziale (in questo caso, a differenza degli altri lavori, è stata utilizzata una risoluzione del Lidar a 2m in quanto la risoluzione a 1m presentava delle problematiche di gestione all'interno del software) e l'altro 5 volte tale risoluzione.

Ciò che si ottiene è una nuvola di punti (figura 6.3) in cui ogni punto ha uno specifico colore derivante dalla combinazione di immersione e inclinazione di ciascuna cella che costituiva il DTM. I punti colorati sono rappresentati come poli dei piani che modellano la topografia utilizzando il reticolo inferiore di Schmidt (figura 6.4). Quindi, il rosso rappresenta piani immergenti a sud e il ciano piani immergenti a nord, mentre il verde rappresenta piani immergenti a est e il viola piani immergenti a ovest.

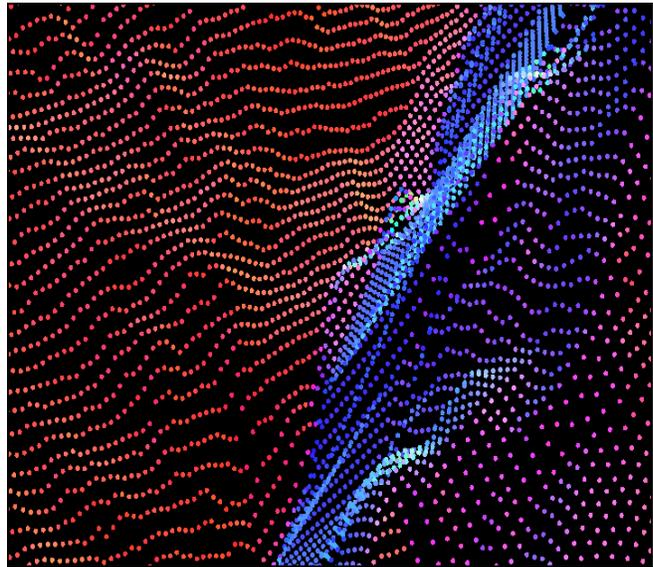


Figura 6.3: Dettaglio della nuvola di punti.

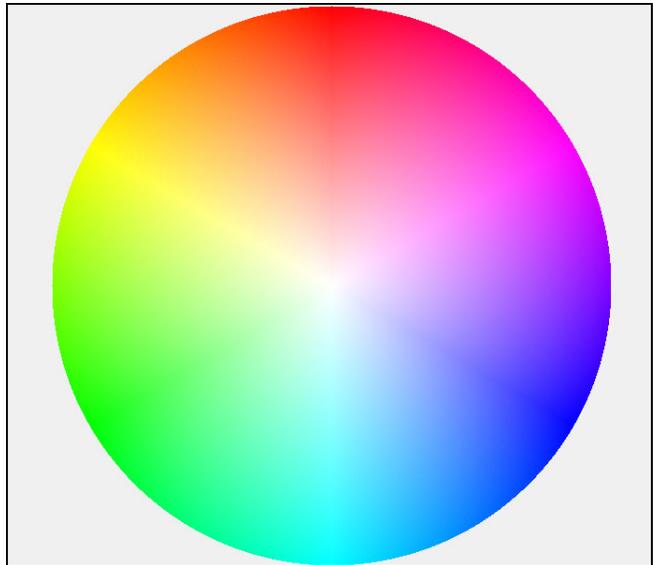


Figura 6.4: Rappresentazione del reticolo inferiore di Schmidt, ATTENZIONE: le colorazioni presenti si riferiscono ai poli dei piani e dunque per i piani stessi sono opposte.

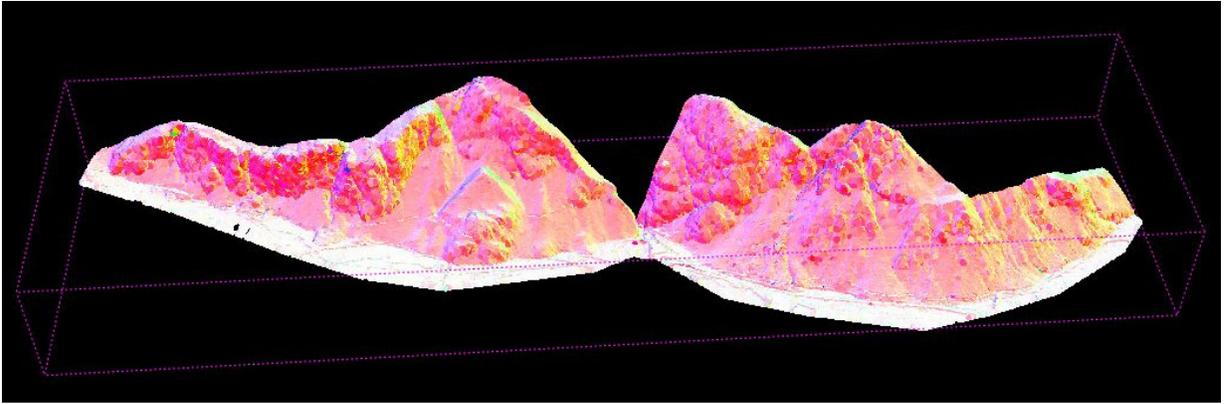
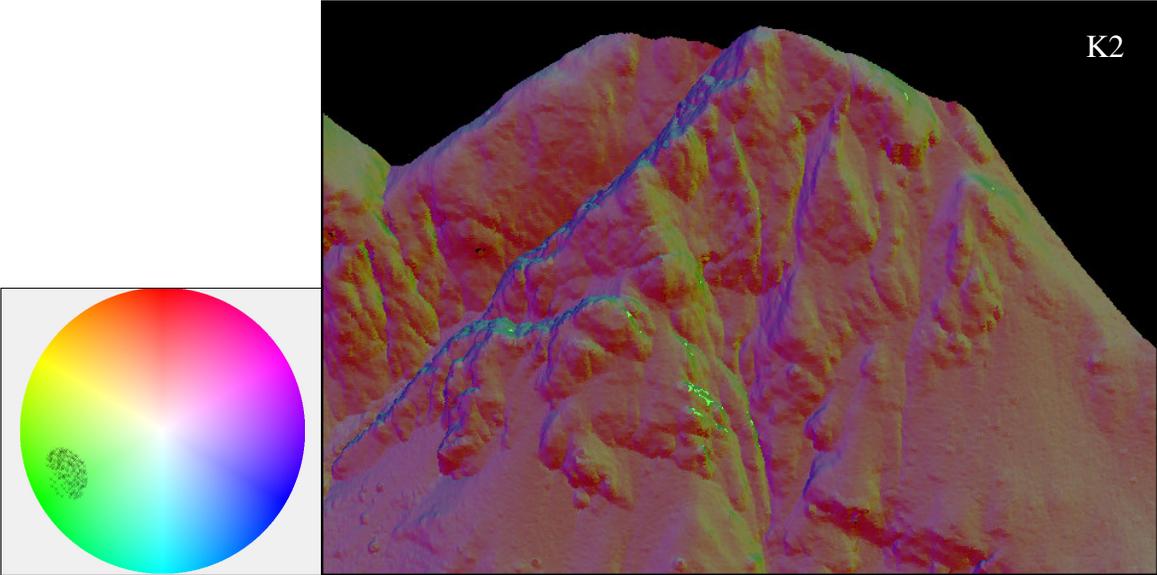
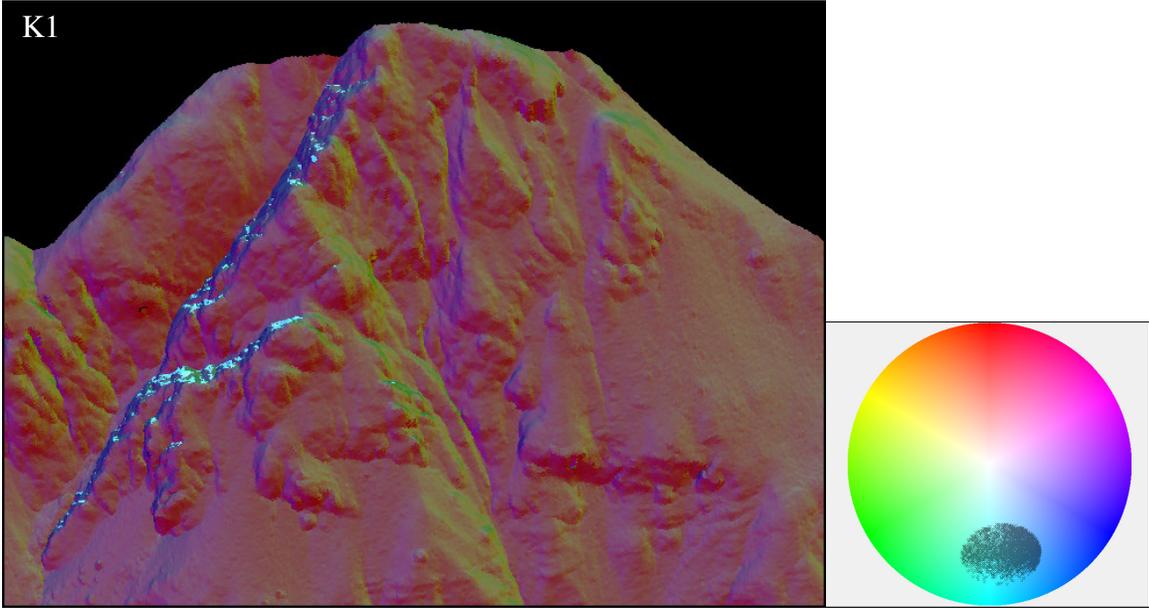


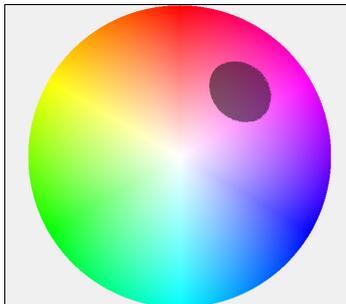
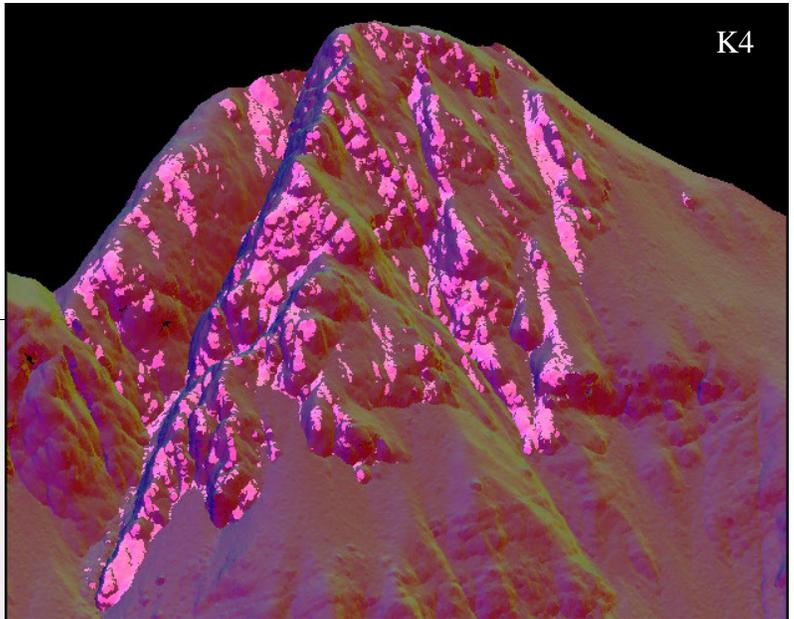
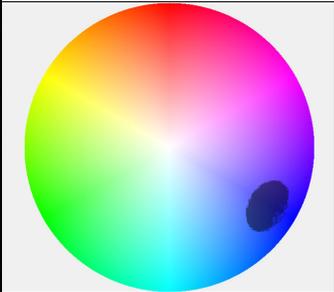
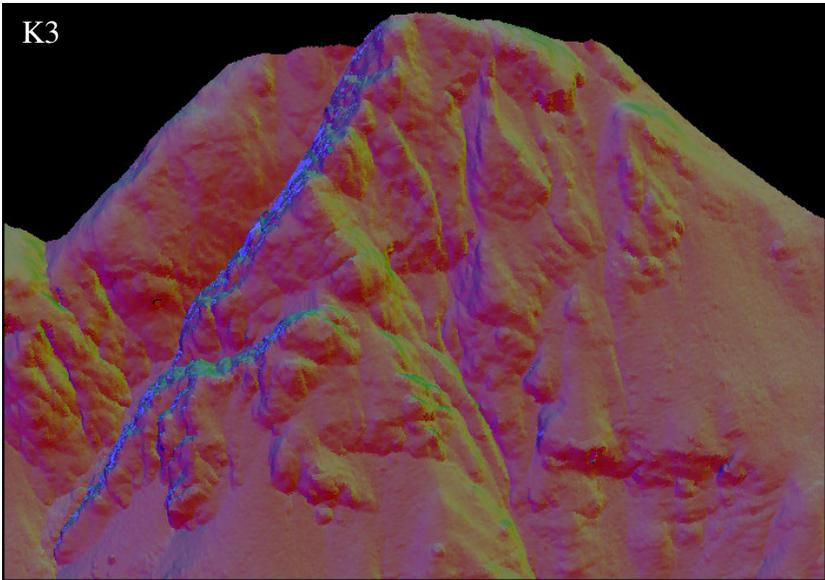
Figura 6.5: Modello tridimensionale in COLTOP 3D; come si può osservare la topografia ha un forte controllo sulla rappresentazione, infatti la gran parte delle tonalità si riferisce a piani immergenti verso sud, sud-ovest e sud-est.

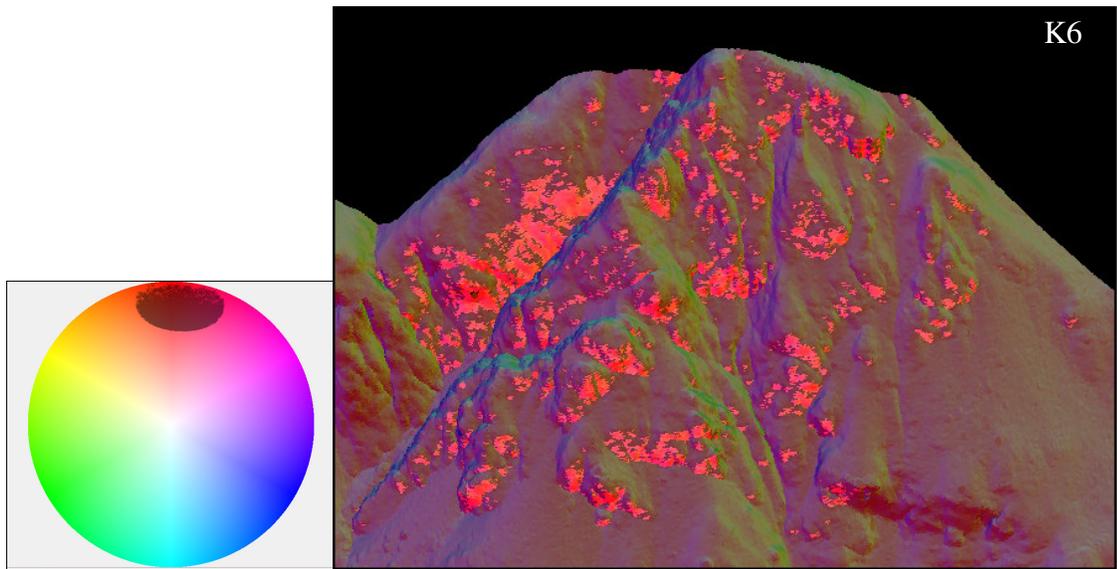
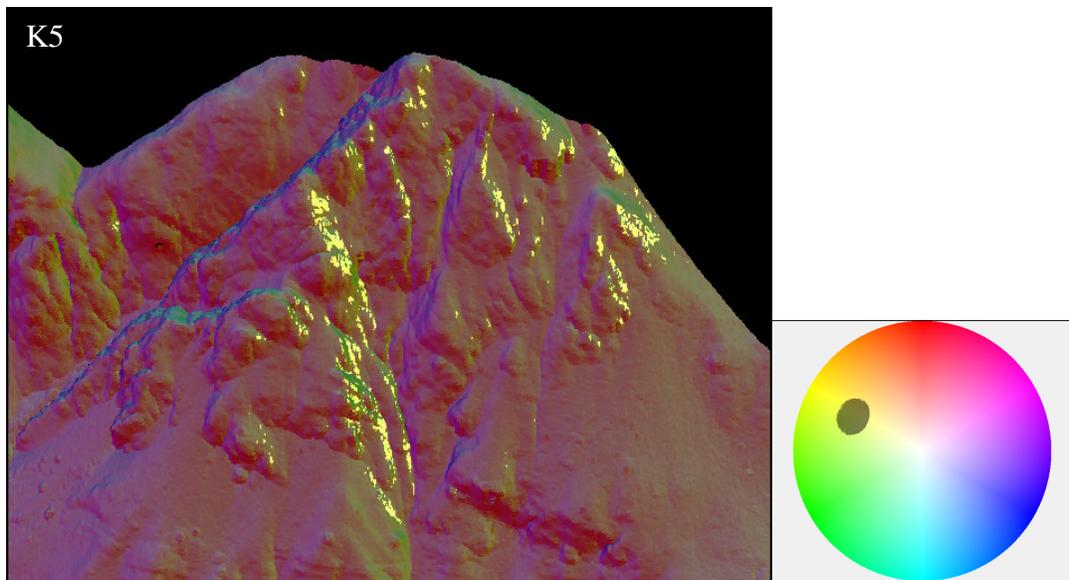
Per identificare l'orientazione delle discontinuità all'interno dei singoli domini sono state effettuate una serie di selezioni poligonali inglobanti la stessa colorazione e dunque la stessa giacitura lungo l'area di pertinenza del dominio in questione. Essi rappresentano piani di discontinuità ben evidenti alla scala del versante. Il numero di selezioni per ogni singola famiglia deve risultare il maggiore possibile in modo da costituire un campione significativo per le successive analisi andando ad identificare un valore di giacitura medio dei piani delle discontinuità indagate. A tale scopo le giaciture di questi punti sono state esportate in formato .txt (in *file* → *export selected points*; vengono così esportate le caratteristiche scelte nelle *option* → *point copy*) e analizzate con *Dips* della *Rocscience Inc.* Questo programma permette di trovare, appunto, la giacitura media e di stimarne la dispersione in gradi per ogni dominio (questa spuntando l'opzione *variability* nell'*edit sets*). I valori di giacitura e dispersione sono stati poi reinseriti in Coltop 3D unitamente ad un poligono rappresentante ogni dominio, in modo da ottenere che tutte le giaciture appartenenti alla famiglia identificata venissero evidenziate in modo automatico dal programma.

Attenzione va posta agli operatori che inglobano le varie selezioni: le selezioni riguardanti le singole famiglie devono essere poste sotto ad un “*union (or)*” mentre queste con il poligono del dominio sotto ad un “*common set (and)*”.

Esempio di selezioni eseguite, relative al dominio 6, qui tutte le famiglie individuate sono presenti:







Dominio	S		K1		K2		K3		K4		K5		K6	
	imm	incl												
1	30	20	183	79	227	57	120	45	91	59	298	63	-	-
2	190	15	183	78	231	66	116	41	77	60	299	69	-	-
3	50	20	183	76	224	54	125	41	79	57	292	66	-	-
4	190	15	179	71	225	56	120	56	76	50	298	62	360	50
5	217	48	183	74	228	58	123	44	-	-	301	70	357	58
6	130	25	184	75	223	49	116	50	66	63	301	68	353	55
7	340	80	187	79	225	39	115	46	-	-	-	-	-	-
8	290	30	185	74	219	51	118	44	67	55	-	-	-	-
9	30	30	182	70	223	46	117	42	65	66	-	-	-	-

Tabella 6.1

In *tabella 6.1* sono illustrati i risultati di questa analisi. Le celle vuote indicano che tale famiglia non è stata rilevata nel rispettivo dominio. Buona parte delle famiglie identificate mostrano una certa coerenza con quelle riscontrate sul terreno. L'assenza in questa analisi di alcune famiglie rilevate sul terreno può essere legata ad un forte controllo della topografia sulla rappresentazione in Coltop 3D oppure ad una loro scarsa persistenza nell'area di rilievo, identificando un contesto locale.

6.2 ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO CON APPROCCIO DETERMINISTICO

Tramite i dati ottenuti da Coltop 3D è stato possibile eseguire una valutazione della suscettibilità all'innesco secondo un approccio deterministico. Questo si basa su un'analisi cinematica distribuita della stabilità dei blocchi rocciosi. Tale analisi è stata realizzata per mezzo del *software* SlopeMap, un'estensione di ArcView sviluppata da Günther (2003). Il programma permette di effettuare una mappatura automatizzata delle proprietà geometriche e cinematiche di versanti rocciosi per i quali sono disponibili dati strutturali, geotecnici e idrogeologici.

6.2.1 VERIFICA DI FATTIBILITÀ CINEMATICA

Per valutare la stabilità di un pendio in roccia si ricorre spesso all'uso delle proiezioni stereografiche. Le proiezioni stereografiche sono lo strumento fondamentale per la rappresentazione dei dati riguardanti le discontinuità presenti entro un ammasso roccioso e allo stesso tempo consentono l'esecuzione di alcune analisi e verifiche. Esse rimuovono una dimensione nella rappresentazione del problema, di conseguenza i piani sono rappresentati da linee, linee da punti e considerano solo relazioni angolari tra linee, piani, linee e piani. Le verifiche di fattibilità cinematica studiano il movimento dei blocchi senza riguardo alle forze che li producono. I metodi cinematici considerano, oltre alle condizioni di rimovibilità dei blocchi, anche le possibilità di scorrimento lungo i piani di discontinuità per effetto del peso proprio dei blocchi. Questi metodi sfruttano il concetto di cono d'attrito (*friction cone*) che in questo lavoro, per via cautelativa, è stato posto pari a 30°.

Tale metodo prevede delle assunzioni quali:

- l'ammasso roccioso risulta costituito da discontinuità piane infinitamente estese;
- la resistenza al taglio lungo le discontinuità è puramente frizionale;

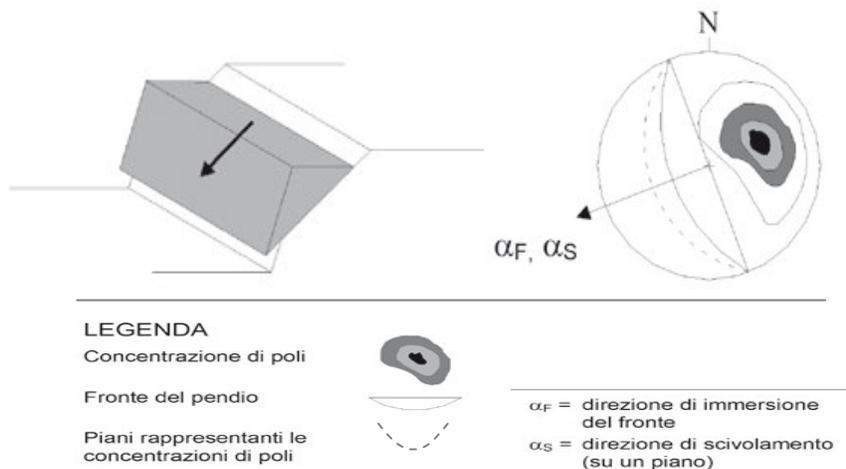
- il sistema dei blocchi è soggetto alla sola forza peso.

Di seguito vengono illustrati i possibili cinematismi instabili che si possono verificare in un pendio roccioso e che sono analizzati in SlopeMap:

~ SCIVOLAMENTO PLANARE

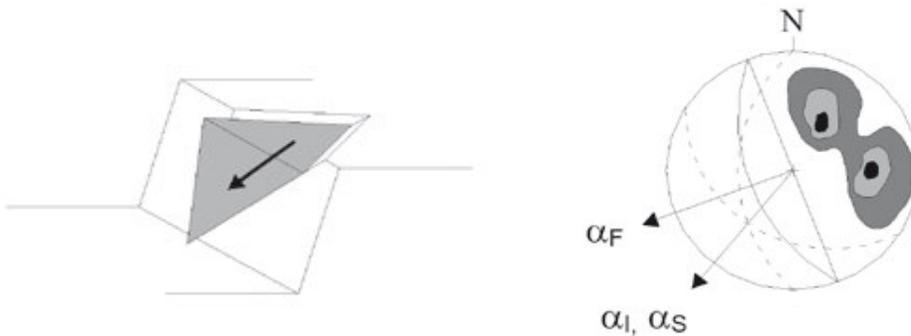
La superficie di rottura può essere costituita da una vera e propria superficie piana o da una fascia relativamente sottile di intensa deformazione a taglio. Dal punto di vista cinematico, il fenomeno si manifesta in pendii naturali o fronti di scavo artificiali in ammassi interessati da discontinuità aventi una direzione di immersione prossima a quella del fronte con un'approssimazione di 20°.

La seconda condizione fondamentale affinché si manifesti la possibilità cinematica di scivolamento planare è che l'angolo di inclinazione del piano della discontinuità sia inferiore all'angolo di inclinazione del fronte del pendio in roccia. Inoltre l'inclinazione della discontinuità deve essere maggiore dell'angolo di attrito posto (30°). Discontinuità addizionali sub-verticali possono definire l'estensione laterale del volume potenzialmente instabile, ma essendo considerate semplicemente come superfici di rilascio, il loro contributo ai fini della stabilità del pendio è nullo; nel caso non siano presenti superfici laterali, l'estensione laterale della massa potenzialmente scivolante può essere definita solamente quando la superficie planare sia localizzata su uno sperone di roccia. Il volume instabile può essere ulteriormente delimitato da una superficie sub-verticale posta a monte con il ruolo di giunto di trazione.



~ **SCIVOLAMENTO A CUNEO**

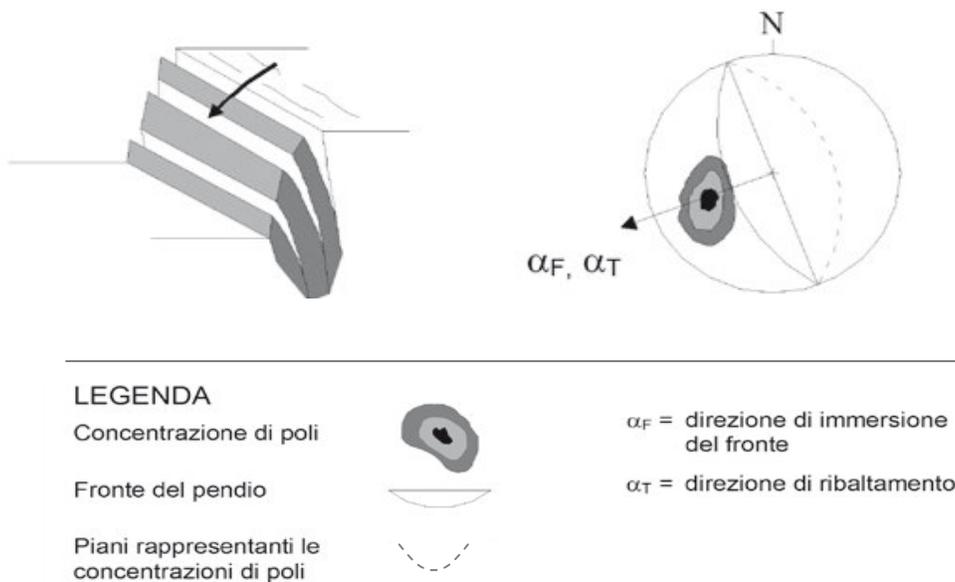
Avviene su due piani di discontinuità che si intersecano in una linea con angoli di immersione e di inclinazione compatibili con il fronte del pendio. Affinché sia verificata la possibilità cinematica di scivolamento a cuneo occorre infatti che la linea di intersezione rispetti due condizioni fondamentali: il suo angolo di inclinazione deve essere inferiore all'angolo di inclinazione del fronte del pendio ed il suo angolo di immersione deve essere compreso in un campo di variabilità di $\pm 90^\circ$ intorno al valore dell'angolo di immersione del fronte del pendio (la retta di intersezione deve cioè intersecare il fronte). Inoltre si deve avere che l'inclinazione della linea di intersezione deve essere maggiore dell'angolo di attrito medio (30°) sui due piani. Anche in questo caso il volume potenzialmente instabile può essere delimitato da superfici sub-verticali laterali o poste a monte (giunti di trazione), con il ruolo di superfici di rilascio. Nella stabilità dei cunei è rilevante anche il ruolo della forma che dipende dall'angolo di apertura del cuneo e dalla sua obliquità rispetto all'orizzontale.



LEGENDA		
Concentrazione di poli		α_F = direzione di immersione del fronte
Fronte del pendio		α_S = direzione di scivolamento (su un piano)
Piani rappresentanti le concentrazioni di poli		α_I = direzione di scivolamento (retta di intersezione tra due piani)

~ **RIBALTAMENTO**

Tale cinematico comporta la formazione di colonne alte e sottili che, per particolari condizioni geometriche, si distaccano dall'ammasso roccioso secondo un movimento rotatorio che ha il fulcro alla base della colonna. Goodman e Bray (1976) hanno individuato una serie di differenti tipi di crolli per ribaltamento, i quali possono essere classificati in due grandi categorie: il ribaltamento a blocchi ed il ribaltamento flessionale. In particolare, il ribaltamento a blocchi avviene in seguito alla formazione di blocchi prismatici generati dall'intersezione di due sistemi di discontinuità sub-ortogonali; il primo presenta una forte inclinazione, una ridotta spaziatura ed un'elevata persistenza, mentre il secondo è caratterizzato essenzialmente da una debole inclinazione e costituisce la base del blocco. Essendo il meccanismo di instabilità strettamente legato alla forma dei blocchi, le condizioni cinematiche sono in questo caso più incerte rispetto alle instabilità per scivolamento. Generalmente si considera che l'immersione dei piani che compongono il blocco sia simile, con un'orientazione di $\pm 180^\circ$ nel caso di piano sub-verticale a reggipoggio. Inoltre affinché si realizzi lo scorrimento interstrato, la normale al piano di ribaltamento deve avere un'immersione inferiore alla differenza tra l'inclinazione del pendio e l'angolo di attrito. Nel caso invece del ribaltamento flessionale, solo la famiglia di discontinuità a forte inclinazione è preesistente mentre la base del blocco è costituita da una superficie di rottura dovuta agli sforzi di trazione indotti nelle colonne inflesse.



6.2.2 ANALISI CINEMATICA SPAZIALMENTE DISTRIBUITA CON SLOPEMAP

In ArcGIS, i dati relativi alle discontinuità identificate in Coltop 3D sono stati uniti, per mezzo del *join*, allo shapefile che contenente i poligoni dei domini omogenei. I campi contenenti le informazioni relative all'immersione e all'inclinazione di ciascuna famiglia sono stati convertiti in formato raster col comando *Convert Feature to Raster* e importati in ArcView unitamente alle carte della pendenza (*slope*) e dell'esposizione (*aspect*) del Lidar.

All'interno del programma SlopeMap quello che si ottiene è che:

- combinando tra loro immersione e inclinazione di ogni famiglia con *slope* e *aspect* del Lidar è possibile sapere in quali celle possono avvenire scivolamenti planari (*Unifail*) e fenomeni di ribaltamento (*Toppling*); (rispettivamente con i comandi *unique plane/wedge failure* e *topples failures*); (figura 6.6 e 6.7);
- combinando tra loro a due a due tutte le famiglie di discontinuità si possono ricavare i valori giacitureali (*trend* e *plunge*) della linea di intersezione tra i due piani scelti; (per mezzo del comando *calculate angle/edges*);
- combinando tra loro *trend* e *plunge* della linea di intersezione tra due piani di discontinuità con *slope* e *aspect* del Lidar è possibile sapere in quali celle possono avvenire scivolamenti a cuneo; (tramite il comando *unique plane/wedge failure*); (figura 6.8).

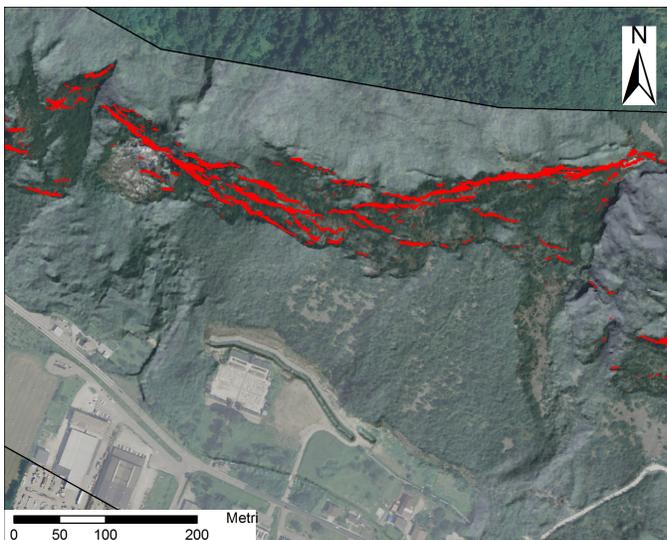


Figura 6.6: Scivolamento planare della famiglia K1 nell'area tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi.

Figura 6.7: Ribaltamento relativo alla famiglia K1 nell'area tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi.

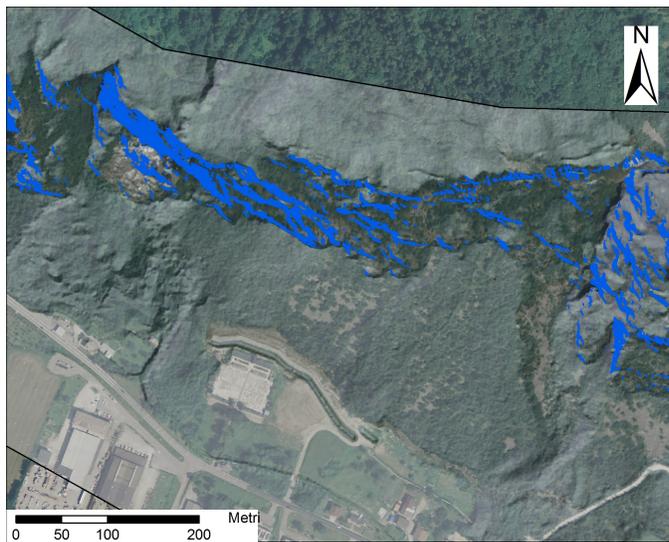
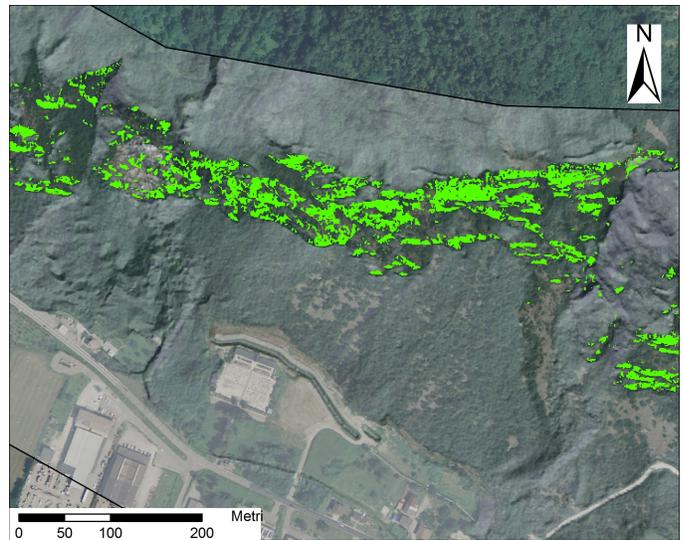


Figura 6.8: Scivolamento a cuneo relativo alle famiglie K1 e K2 nell'area tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi.

Attraverso i file ottenuti si esegue il *failure count* che restituisce un raster all'interno del quale pixel per pixel vengono indicati i cinematismi consentiti, in base alle caratteristiche delle discontinuità presenti (file denominato *failcoun*, figura 6.9). Il numero massimo registrato di cinematismi instabili reali in una stessa cella a Villa Santina è 14.

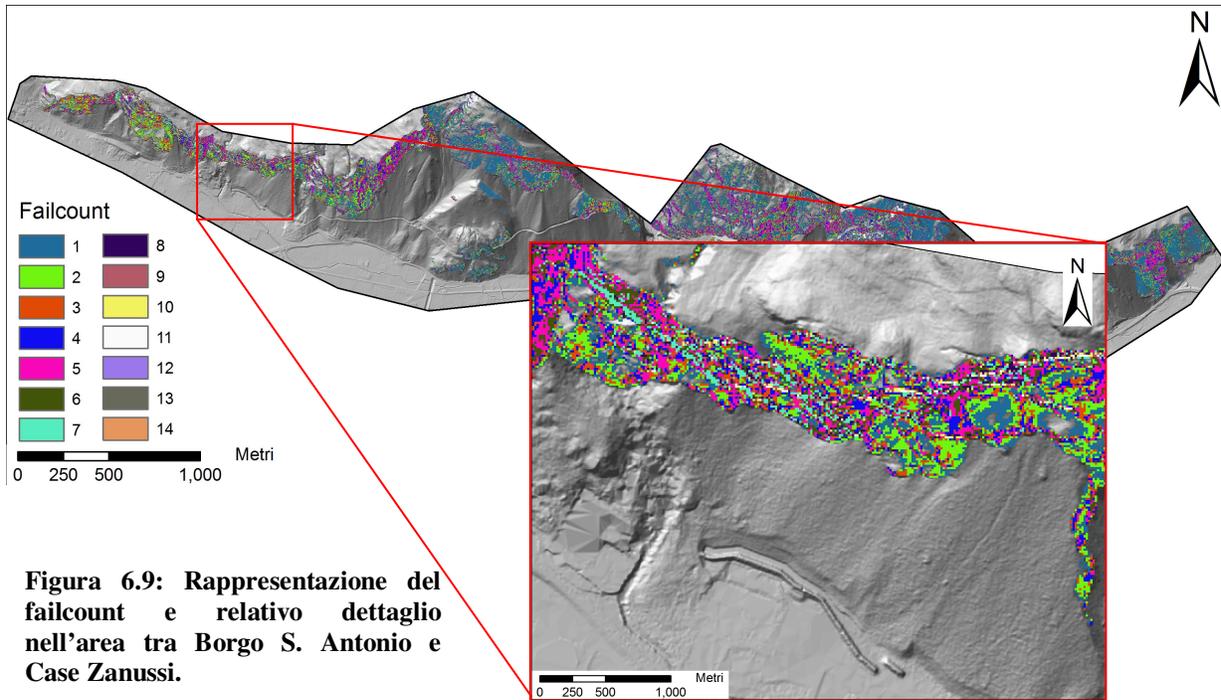


Figura 6.9: Rappresentazione del failcount e relativo dettaglio nell'area tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi.

Utilizzando il file *failcount* si può realizzare una carta di suscettibilità spaziale scalata per la probabilità d'innescio, ottenuta mettendo in relazione il numero di cinematismi instabili rispetto a quelli potenziali. Per realizzare questa carta si procede come segue:

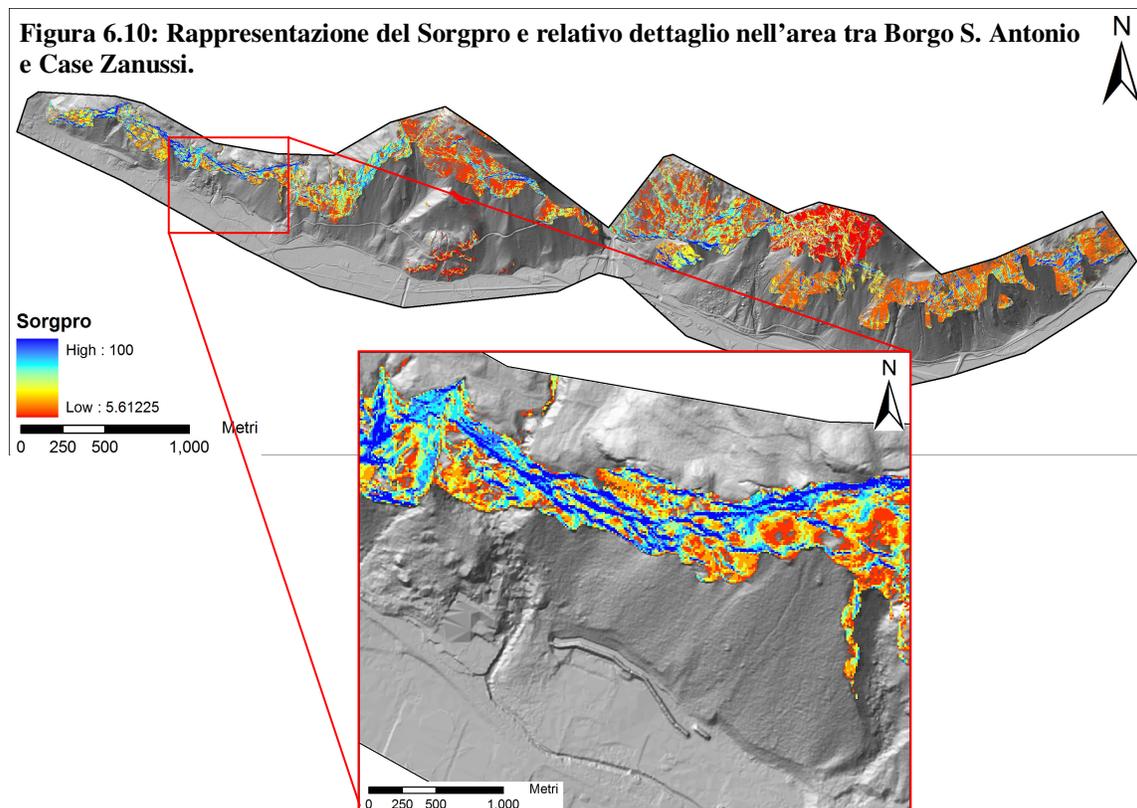
- aggiungere un campo chiamato N_{tot} , corrispondente al numero dei cinematismi instabili potenziali, alla tabella dello file dei domini. Se nel dominio sono presenti 7 famiglie di discontinuità, come avviene nei domini 6 e 7, i cinematismi potenziali sono 42. Questi si ottengono sommando 7 scivolamenti planari, 7 ribaltamenti e 28 scivolamenti a cuneo. Nella tabella a lato sono indicati i cinematismi potenziali per ogni dominio.

Dominio	Ntot
1	33
2	33
3	33
4	42
5	33
6	42
7	18
8	25
9	25

- Si converte in raster il campo della tabella appena generato, ottenendo il file denominato *Ntot_cinematismi* (abbreviato in *Ntot_cinema* per ragioni di lunghezza dei nomi).
- Tramite il *Raster Calculator* si divide il numero di cinematismi reali (*fail_count*, precedentemente reso in forma decimale) rispetto al numero di cinematismi potenziali (*Ntot_cinematismi*). In questo modo si ottiene la probabilità di innescio cioè la probabilità

che si verificano dei cinematismi instabili all'interno del dominio. Questo nuovo file consente di non considerare più la divisione in domini e di rapportare a 100 i dati in modo corretto, ovvero considerando le variazioni interne ai singoli domini legate al numero di discontinuità presenti.

- Infine, sempre con *Raster Calculator*, i valori ottenuti vengono normalizzati rispetto a 100. La carta di suscettibilità all'innesco così realizzata è stata chiamata *sorgpro* (figura 6.10).



6.3 ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO CON APPROCCIO EURISTICO

L'approccio euristico è un metodo indiretto, prevalentemente qualitativo, che dipende dalla capacità dell'investigatore di comprendere approfonditamente i processi geomorfologici in atto. Esso, infatti, si basa sulla una conoscenza a priori di tutte le cause e dei fattori d'instabilità in un'area indagata. I fattori predisponenti sono classificati e pesati secondo la loro importanza presunta o attesa nel causare i movimenti di versante.

I vantaggi del metodo consistono nel descrivere la pericolosità relativa di un'area attraverso l'identificazione di meccanismi generali di causa-effetto delle frane, essenzialmente dipendenti da parametri predisponenti tra cui la litologia, la pendenza dei versanti, la struttura e la giacitura dei terreni, l'uso del suolo. Questo approccio può essere applicato a qualsiasi scala.

Per garantire una migliore aderenza ai processi fisici, l'operazione di attribuzione dei pesi spesso viene rafforzata da procedure statistiche per una valutazione più oggettiva del contributo dei singoli parametri predisponenti allo sviluppo potenziale di frana.

Per la realizzazione della carta euristica di suscettibilità all'inesco sono state realizzate tre mappe, costituenti i fattori predisponenti all'inesco. Tali fattori sono:

- la carta della pendenza, riclassificata per valori superiori a 50°; in cui è stato attribuito valore 0 alla classe tra 0 e 50°, mentre 1 alla classe tra 50° e 90°;
- le sorgenti di crollo lineari, mappate attraverso LIDAR e fotointerpretazione; a cui è stato dato valore 1;
- le nicchie dei corpi da cauta massi con evidenze di attività, ovvero quelle presenti nella carta geomorfologica; a cui è stato dato valore 1.

Tramite il comando *Raster Calculator* si è provveduto a sommare le tre mappe ottenendo una carta raster avente unicamente tre valori: 1 se il pixel è interessato dalla presenza di uno solo dei tre fattori, 2 se il pixel è interessato dalla presenza di due dei tre fattori, 3 se in un pixel sono presenti tutti e tre i fattori predisponenti.

A questo punto, la carta è stata riclassificata assegnando ai valori 1, 2 e 3 nuovi pesi corrispondenti alla probabilità di innesco. In particolare, si è scelto di assegnare alla condizione "1" una probabilità del 50%, alla "2" una probabilità del 75% e alla "3" una probabilità del 100% (*figura 6.11*). Inoltre in previsione di un utilizzo all'interno del programma Hy-Stone è stata effettuata un'altra riclassificazione assegnando ai precedenti valori un unico valore, pari a 10 corrispondente al numero di blocchi lanciati da ciascun pixel sorgente.

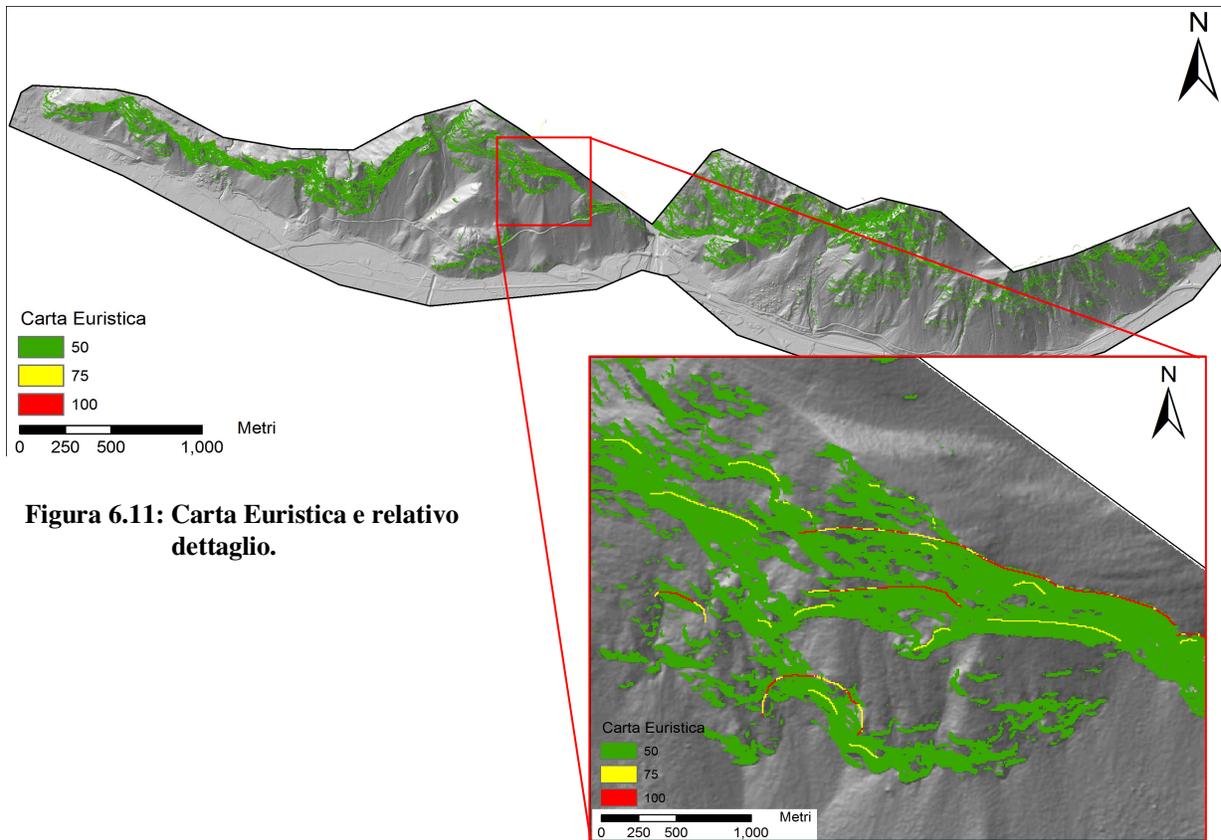


Figura 6.11: Carta Euristica e relativo dettaglio.

Da sottolineare che durante la generazione della carta delle pendenze si possono ottenere dei pixel che posseggono l'informazione richiesta, ovvero una pendenza superiore a 50° ma che non hanno alcun significato in termini di sorgente (figura 6.12). Essi possono essere legati ad imperfezioni del Lidar come ad esempio lungo strade o opere o ancora all'interno dell'area alluvionale. Per risolvere questo problema la carta delle pendenze è stata in primo luogo convertita in formato vettoriale. Una volta eliminati i poligoni non significativi il file è stato nuovamente convertito in raster ed utilizzato per la generazione della carta come indicato sopra.

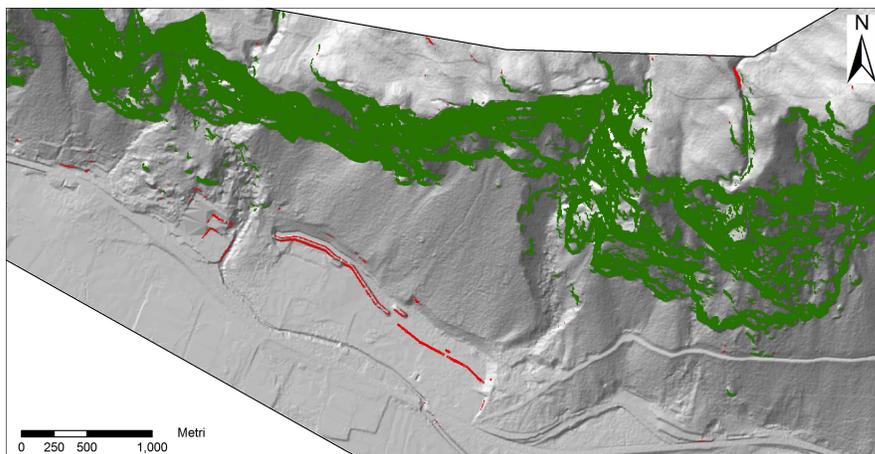


Figura 6.12: carta delle pendenze riclassificata con un angolo maggiore a 50° ; In rosso i pixel non significativi, da eliminare, in verde quelli corretti.

7. MODELLAZIONE DELLE FRANE DA CROLLO

La modellazione inerente alle frane da crollo persegue i seguenti obiettivi:

- calcolo dei parametri cinematici (posizione, velocità di traslazione e/o rotazione e altezza dalla topografia) e dinamici (energia cinetica) dei blocchi, e la loro distribuzione lungo il percorso di caduta;
- previsione delle traiettorie potenziali del blocco “di progetto” (blocco di dimensione massima o modale);
- previsione della massima distanza di espansione (runout), misurata a partire dal punto sorgente del blocco, costituente la nicchia del corpo;
- back analysis di eventi pregressi, finalizzata alla determinazione dei coefficienti di restituzione ed attrito per la calibrazione di modelli numerici in aree adiacenti o simili dal punto di vista geologico e geomorfologico.

La modellazione costituisce a sua volta, in base alla scala di riferimento, il punto di partenza per:

- la definizione delle aree soggette a fenomeni di caduta massi, del massimo espansione dei fenomeni e della possibile interazione con gli elementi a rischio. (scala regionale);
- la progettazione di opere di difesa passiva, quali: barriere paramassi elastiche o elastoplastiche, valli in terra sciolta o rinforzata, fossati e berme, gallerie paramassi, riprofilatura del versante. (scala locale);
- la valutazione e la zonazione della pericolosità indotta da crolli. (scala regionale e locale).

Lo sviluppo di metodi e modelli predittivi è legato al sempre maggiore interesse per le conseguenze dei fenomeni di caduta massi in termini di danni a esseri umani e infrastrutture. In letteratura, i modelli predittivi proposti differiscono per approccio (fisico-equivalente, empirico-statistico, matematico), assunzioni, dimensioni (2D e 3D) e formulazione fisico-matematica.

A causa del ridotto numero di codici di calcolo e algoritmi in versione tridimensionale, si rende necessaria la realizzazione di nuovi modelli per simulare crolli in 3D sulla base di dati topografici, geologici e di uso del suolo, sempre più disponibili per eseguire una modellazione spazialmente distribuita.

Teoricamente, considerando che la dinamica di un crollo è funzione delle condizioni iniziali, della posizione del punto di distacco e della geometria e delle proprietà meccaniche sia del blocco che del

pendio e delle relazioni che descrivono la perdita di energia per impatto e rotolamento, dovrebbe essere possibile calcolare la posizione e la velocità di un blocco in qualsiasi istante.

Nella realtà, quando si ha a che fare con pendii attuali (naturali o artificiali), la maggior parte dei parametri rilevanti è difficile da accertare sia nello spazio che nel tempo, anche dopo che una frana si è verificata. Infatti, la forma, la dimensione e le proprietà geomeccaniche dei blocchi e l'esatta ubicazione delle aree sorgenti spesso non è ben nota. Inoltre, si ha una variazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche della superficie del materiale lungo un pendio. L'energia dei blocchi persa per impatto e rotolamento è funzione della rugosità del versante, delle proprietà geotecniche del versante (distribuzione della grana, indice dei vuoti, moduli elastici, contenuto d'acqua) e della forma e dinamica del blocco (velocità angolare e di traslazione, angolo di impatto). Le relazioni che legano la perdita di energia alle variabili in gioco non risultano essere ben definite. In molti casi, tutti gli effetti dovuti alla deformazione plastica del substrato e alla configurazione geometrica dell'impatto sono presi in considerazione dalle "funzioni di contatto" che riguardano la cinematica del blocco (in termini di velocità) o la sua dinamica (in termini di energia) prima e dopo l'impatto. Tali funzioni sono espresse come coefficienti di restituzione e di attrito e sono assunte come costanti del materiale. Pfeiffer e Bowen (1989), e Jones et al. (2000) hanno sviluppato una gamma di funzioni relative ai coefficienti di restituzione alla velocità di impatto. Sfortunatamente, tali funzioni sono empiriche e sono basate su specifici dataset ottenuti da misure in situ eseguite in differenti condizioni. Per questo la calibrazione dei coefficienti di restituzione non è semplice a causa della limitata informazione disponibile.

La natura tridimensionale della geometria dei pendii reali, che cambiano lateralmente per la presenza di forre e canali, convessità e creste longitudinali, i quali influenzano le traiettorie e la partizione dell'energia cinetica in componenti traslative e rotazionali, complica ulteriormente la predizione affidabile di un crollo. Tra gli effetti della tridimensionalità del problema vi è la presenza della "dispersione laterale", ovvero il rapporto tra la distanza laterale che separa le due estreme traiettorie di caduta e la lunghezza del pendio. Essa rappresenta la deviazione delle traiettorie dalla direzione lungo cui il gradiente è più ripido, costituendo un fattore che rende complessa la definizione a priori del percorso del crollo nel caso in cui si adotti un approccio bidimensionale.

L'aspetto soggettivo connesso a tale scelta risulta essere sottostimato, mentre si presta molta più attenzione alla descrizione della geometria del blocco e all'attuazione di complessi modelli dinamici. Tuttavia, gli effetti tridimensionali della topografia costituiscono un fattore molto rilevante nella dinamica del corpo rigido del blocco che cade. Dunque una corretta descrizione della

topografia associata ad un approccio probabilistico fornisce la possibilità di modellare un maggior numero di impatti e di traiettorie considerando la variabilità spaziale dei parametri e l'occorrenza di traiettorie meno frequenti. Nella modellazione di crollo vale la pena sottolineare l'importanza del concetto di "evento inatteso", in quanto gli eventi più pericolosi sono costituiti da quelli meno probabili, specialmente quando si considera una topografia 3D. Di conseguenza, un approccio cosiddetto "conservativo" che considera solo la traiettoria di caduta più diretta qualche volta può essere non esauriente dal punto di vista di una corretta caratterizzazione dell'evento. Inoltre, l'influenza della topografia 3D diviene più rilevante quando la lunghezza del percorso di caduta aumenta, in quanto l'errore dovuto alla variabilità dei parametri si propaga a causa del crescente numero di impatti e dei cambiamenti morfologici che il blocco incontra. Eventualmente, l'uso della modellazione 3D potrebbe essere fondamentale nell'affrontare diversi tipi di problemi di rischio, ossia: puntiformi (elementi singoli, aree ristrette), lineari (*lifelines*, strade) e areali (aree urbane, aree soggette a pianificazione). Questi problemi sono caratterizzati da una difficoltà crescente nella valutazione del rischio. È dunque necessario identificare un compromesso tra i vari modelli per la modellazione delle frane da crollo. Spesso vengono adottati algoritmi semplificati che usano approcci ibridi o cinematici, sia a causa degli aspetti computazionali che dell'incertezza che riguarda i parametri di modellazione, i quali potrebbero col tempo introdurre un errore maggiore rispetto a quello inerente all'approccio con modellazione. Risulta quindi fondamentale un approccio probabilistico nella simulazione di un crollo, dato che la sua importanza dipende dalla quantità di caratterizzazione di ogni variabile coinvolta.

Il movimento di caduta può avvenire secondo i moti gravitativi di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento. Il principio fondamentale che regola la caduta dei massi è comunque quello secondo il quale ogni blocco, soggetto ad un movimento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le traiettorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica. Per analizzare il movimento di caduta ed individuare le aree maggiormente soggette a propagazione di massi si possono utilizzare diversi metodi atti ad approssimare la situazione reale. Tali metodi possono essere suddivisi in due gruppi fondamentali:

- I modelli di tipo morfologico (o empirici), indicati per una prima valutazione del massimo avanzamento dei massi. Essi dipendono dalla topografia del versante e si basano su analisi statistiche eseguite su crolli storici. Rappresentativi di questo tipo di modello sono i metodi

zenitali sviluppati da diversi autori (Onofri & Candian, 1979; Heinimann et al., 1998; Jaboyedoff & Labiouse, 2003).

- I modelli fisicamente basati (o cinematici), che affrontano il problema della delimitazione del massimo avanzamento dei blocchi in modo analitico considerando la fisica del moto e le relative equazioni pur con qualche necessaria semplificazione. Sono basati su diversi algoritmi che descrivono le relazioni esistenti tra tipo di movimento (caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), energia del blocco e coefficienti di restituzione del versante. Tali modelli hanno il vantaggio di consentire simulazioni che ricostruiscono il comportamento della frana determinando le traiettorie, le velocità e le energie cinetiche dei massi durante il loro moto di caduta, nonostante il numero limitato di variabili introducibili e l'aleatorietà insita nella determinazione dei parametri del moto. La determinazione di tali parametri risulta essenziale per la progettazione di opere di difesa e per la pianificazione del territorio.

7.1 MODELLI EMPIRICI

I modelli empirici si basano sull'analisi statistica delle relazioni che intercorrono tra morfometria del versante e distanza di massimo espandimento dei blocchi, e consentono di determinare l'estensione del "cono d'ombra", ovvero dello spazio che sottende la distanza di arresto dei blocchi (Fig. 7.3).

Dal punto di vista teorico, i metodi sono basati sui concetti di "linea di energia" e di "angolo di attrito equivalente".

Il metodo dello scivolamento equivalente è stato proposto per la prima volta dal fisico Muller-Bernet nell'analisi a posteriori della frana di Elm (Heim, 1882; 1932). Esso permette di calcolare la velocità della massa in frana, tramite un modello cinematico bidimensionale di puro scivolamento su una successione di piani inclinati scabri (modello "a slitta"), simulando il reale percorso della frana determinato sulla base osservazioni di campagna. Nell'applicazione di Muller-Bernet gli attriti dinamici attribuiti al sistema punto materiale-piano sono stati ricavati dall'inclinazione della congiungente il punto di massima quota della nicchia di distacco e il punto di massimo espandimento del corpo di frana a valle. Sulla base di tale linea, denominata "linea di energia" Shreve (1968) ha successivamente determinato il "coefficiente di attrito equivalente" della frana.

Heim riconobbe tramite osservazioni empiriche che la massima distanza percorribile da una frana è funzione dell'altezza di caduta, della regolarità del percorso e della massa del materiale mobilizzato.

Se la massa scivola, il legame tra distanza raggiunta (L) e altezza di caduta (H) è dato dalla legge di attrito di Coulomb ($H = \tan \alpha L$). Il valore di $\tan \alpha$ ricavato viene utilizzato come “coefficiente di attrito equivalente” della frana ed assegnato a tutti i segmenti rettilinei, di inclinazione β_1 , che discretizzano il versante. Ciò permette di calcolare la velocità della frana e le sue variazioni secondo la direzione longitudinale del versante. Il coefficiente di attrito equivalente che si ricava dalla “linea di energia” descrive realmente il fenomeno nel caso in cui si faccia riferimento a crolli di volumi di roccia limitati che secondo Rochet (1987) sono rappresentati da crolli in massa senza interazione con volumi inferiori a 10^5 m^3 .

Onofri e Candian (1979) hanno analizzato statisticamente i parametri L e H osservati in 98 frane di crollo, con blocchi di volume compreso tra 0.5 e 4 m^3 , innescate dal terremoto del 1976 in Friuli. Secondo tali autori, la “linea di energia” per una frana di crollo, che sottende un angolo β_i sull’orizzontale, congiunge il punto più alto della nicchia di distacco del crollo con il masso caratterizzato dalla maggiore distanza di espansione (*figura 7.1*). Ciò è spesso molto difficoltoso, specialmente nel caso di crolli frequenti e zone sorgenti estese.

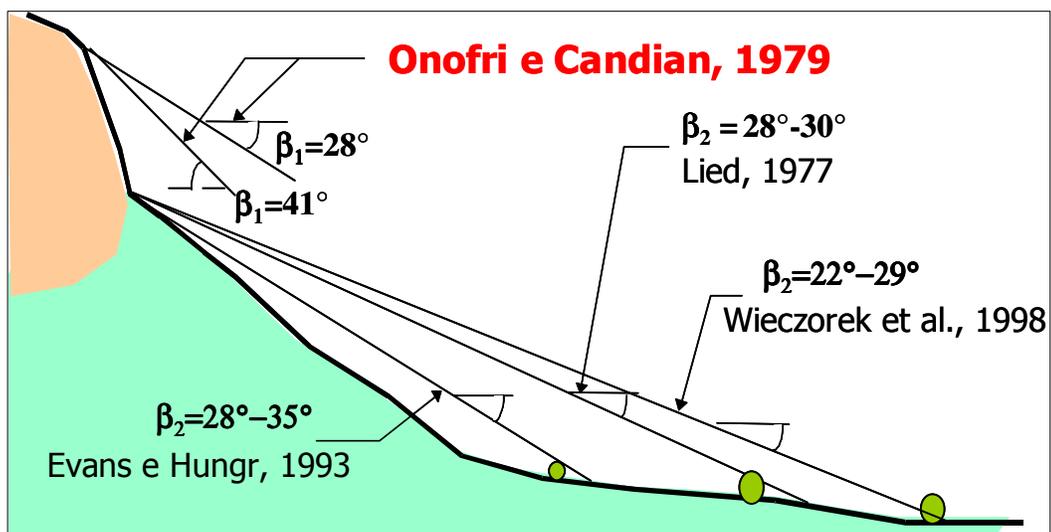


Figura 7.1: Definizione del cono d’ombra secondo diversi autori.

Onofri e Candian riportano valori di β_1 compresi tra 28° e 41° . Osservando che il 50% degli arresti è collocato entro un valore di β_1 pari a 33.5° mentre il 72% entro un valore pari a 32° . La conoscenza della distribuzione statistica dell'angolo β_1 (costituita da una distribuzione normale) valida in contesti morfoclimatici simili a quelli in cui tale distribuzione è stata definita, consente di costruire un “cono d'ombra” nel quale la probabilità di arresto di tutti i blocchi è nota.

Il cono d'ombra dipende da diversi fattori che controllano la dissipazione dell'energia a causa del rimbalzo e del rotolamento dei blocchi sulla superficie, quali ad esempio la litologia, l'uso del suolo, la copertura del suolo, ecc.

Evans e Hungr (1993) hanno proposto un approccio che definisce un angolo di massimo espandimento detto “angolo d'ombra minimo” definito dall'inclinazione della retta che congiunge l'apice del talus (e non la zona di distacco) col blocco più lontano (*figura 7.1*; β_2). Sulla base delle analisi effettuate in 16 località in British Columbia (Canada), questi autori hanno determinato un valore dell'angolo β_2 pari a 27.5° . Inoltre l'approccio presentato prevede che l'energia cinetica acquistata dal corpo nella fase di caduta libera viene dissipata in larga misura durante i primi impatti alla base della parete rocciosa. Di conseguenza, indipendentemente dall'altezza di caduta, ogni blocco inizia a rotolare sul pendio detritico, e la sua distanza finale di propagazione è determinata in modo approssimato proiettando la pendenza corrispondente al coefficiente di attrito al rotolamento dall'apice del talus.

7.1.1 CONEFALL

Conefall (Jaboyedoff e Labiouse, 2003) è un programma progettato per definire il potenziale di propagazione dei blocchi dalle aree sorgenti (zone soggette a crolli). Il programma sfrutta il concetto di “cono d'ombra” e si basa su metodi geometrici semplici (*figura 7.2*). Un blocco si propaga se il pendio è sufficientemente ripido. Dal punto di vista pratico il programma considera che se il pendio è più ripido dell'angolo φ_p , il blocco accelera, se è più basso, decelera. Il metodo dei coni si basa sulla definizione della distanza massima di percorrenza dei blocchi che si staccano dalle aree sorgenti. Il blocco percorre una distanza proporzionale all'angolo di inclinazione del pendio. L'angolo orizzontale tra la linea del punto di arresto e il punto sorgente non supera in genere un angolo limite φ_p , il cui range è compreso tra 27° e 38° , dipendente dal modo in cui vengono definite le aree sorgenti.

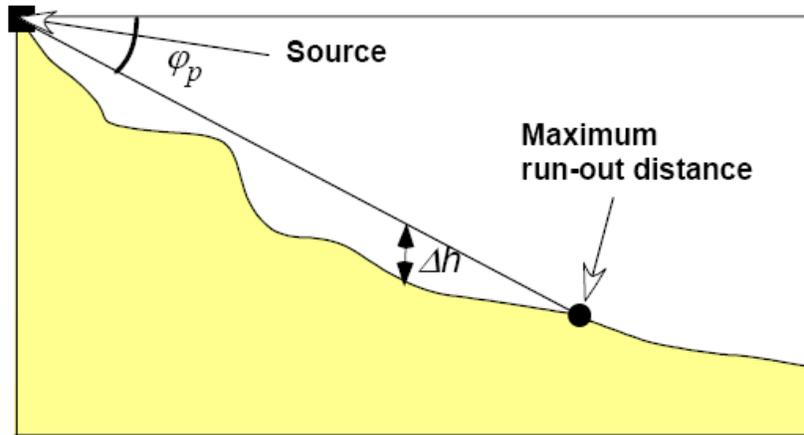


Figura 7.2: Relazione tra ϕ_p e la massima distanza di espansione. Δh è utilizzato per la stima dell'energia.

Tutto ciò porta ad una zona potenziale di propagazione corrispondente ad un cono per ogni singolo pixel sorgente. Molti pixel portano ad una superficie corrispondente di involuogo dei coni (massimo valore di tutti i coni in un punto della zona di propagazione) di tutte le aree sorgenti che contribuiscono oppure conducono al valore medio di altezza. Utilizzando queste superfici e le altezze topografiche possono essere effettuate delle stime relative all'energia cinetica o relative alla velocità.

La velocità media dei blocchi è funzione della differenza di altezza Δh tra il cono e la topografia. L'altezza Δh è proporzionale all'energia cinetica che può essere acquisita dal blocco durante la caduta secondo la relazione seguente:

$$\Delta h = \frac{v^2(x)}{2g}$$

dove g è l'accelerazione di gravità.

La velocità traslazionale si può stimare quindi con la seguente formula:

$$v_{trans}(x) = f_v \sqrt{2g\Delta h}$$

dove $f_v^2 = E_{translation}/E_{kinetic\ tot}$ è un fattore introdotto per tenere in considerazione l'energia cinetica rotazionale. Infine, se si fissa la massa media del blocco m si ottiene l'energia cinetica totale:

$$E = mg\Delta h$$

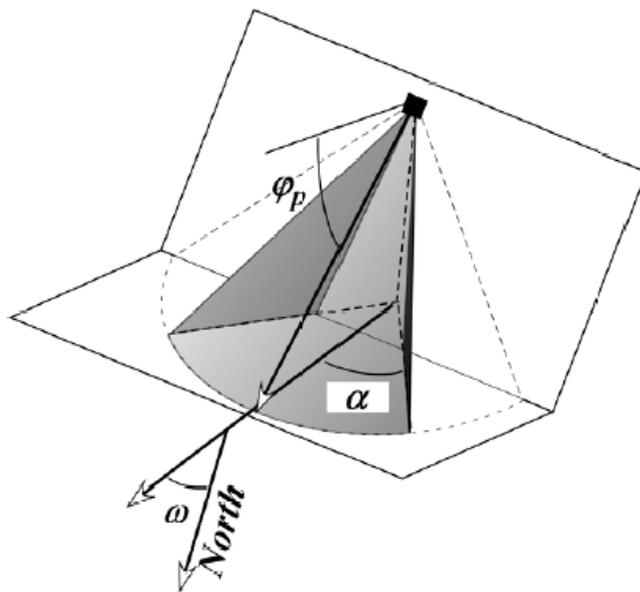


Figura 7.3: Illustrazione dell'angolo del cono φ_p , della direzione del cono ω e del range di apertura $\pm\alpha$.

Nel programma è possibile specificare alcuni parametri caratteristici del cono (*figura 7.3*). Tra questi vi è l'angolo ω che rappresenta la direzione di propagazione rispetto al nord, esso risulta variabile tra 0 e 360°. Nelle simulazioni realizzate si è preferito non porre alcuna condizione in questi termini, settando l'opzione *No limit angle* in *Cone angles definitions*, in modo da consentire la propagazione dei blocchi in qualunque direzione.

Un altro parametro è costituito dall'angolo di apertura α che delimita lateralmente il cono. Per utilizzare correttamente tale angolo i pixel delle sorgenti devono contenere l'informazione relativa all'esposizione. A tale scopo le sorgenti vengono intersecate con l'aspect, in ambiente Gis, utilizzando la funzione *Extract by mask* ponendo come file di input la carta dell'esposizione (aspect) e come maschera le sorgenti in formato raster.

7.1.1.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA

Dal punto di vista operativo, Conefall necessita dei seguenti file di *input* in formato GridAscii, facendo attenzione che l'estensione dei file sia la stessa:

- un modello digitale del terreno (DEM);
- un file delle aree sorgenti di crollo (lineari o areali).

Per quanto riguarda il modello digitale del terreno è stato utilizzato il LiDAR obliquo con dimensione della cella pari a 3m, associata al file delle sorgenti lineari ricavate da fotointerpretazione, mentre una cella di 10m per le sorgenti areali ottenute considerando una pendenza superiore al 50%. La variazione nella dimensione della cella del LiDAR è legata al fatto che il programma, in associazione alle rispettive sorgenti, incontrava delle difficoltà di elaborazione con celle inferiori a quelle utilizzate.

Gli angoli del cono φ_p utilizzati per la modellazione sono 28° e 33.5° , rappresentanti gli angoli ricavati da Onori e Candian sulla base delle analisi statistiche della propagazione dei blocchi causati dal terremoto del 1976 in Friuli. All'angolo di apertura orizzontale del cono $\pm\alpha$ è stato assegnato un range di $\pm 15^\circ$.

Come file di *output* (sempre in formato GridAscii) fornisce:

- frequenza di transito dei blocchi;
- velocità traslazionale media e massima (in m/s), specificando il fattore di moltiplicazione f_v ;
- energia cinetica totale media e massima (in kJ), specificando la massa media del blocco (in kg).

Per la determinazione dell'energia cinetica è necessario introdurre nell'elaborazione il valore della massa media dei blocchi previsti, determinato per mezzo del metodo degli *outliers* con coefficiente pari a 1.5 (*si rimanda al paragrafo 7.3.2.1*). Per l'area di studio il volume medio è risultato essere pari a 0.45m^3 e considerando una densità della roccia pari a 2600 kg/m^3 si ottiene una massa di 1170kg.

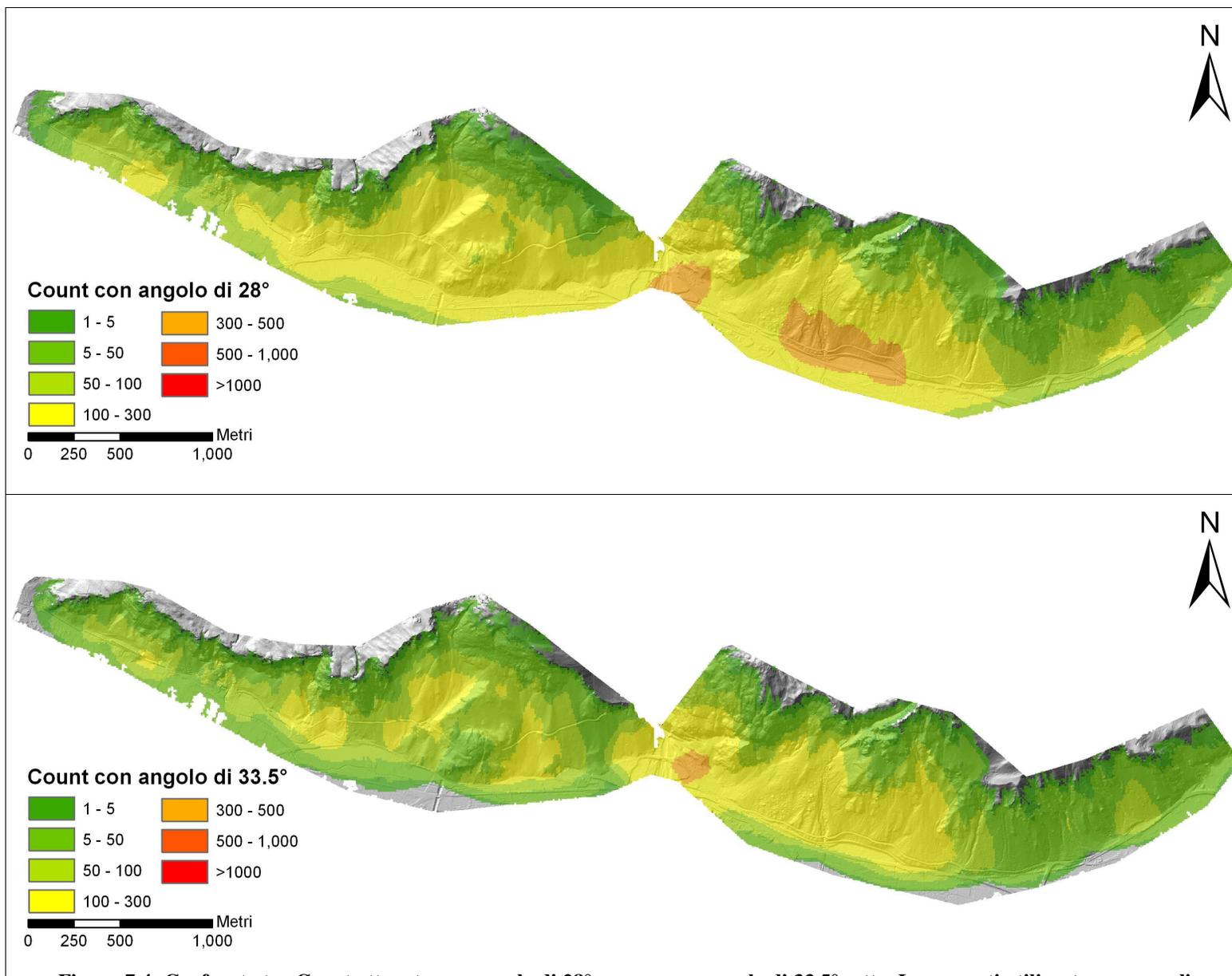


Figura 7.4: Confronto tra Count ottenuto con angolo di 28° sopra e con angolo di 33.5° sotto. Le sorgenti utilizzate sono areali.

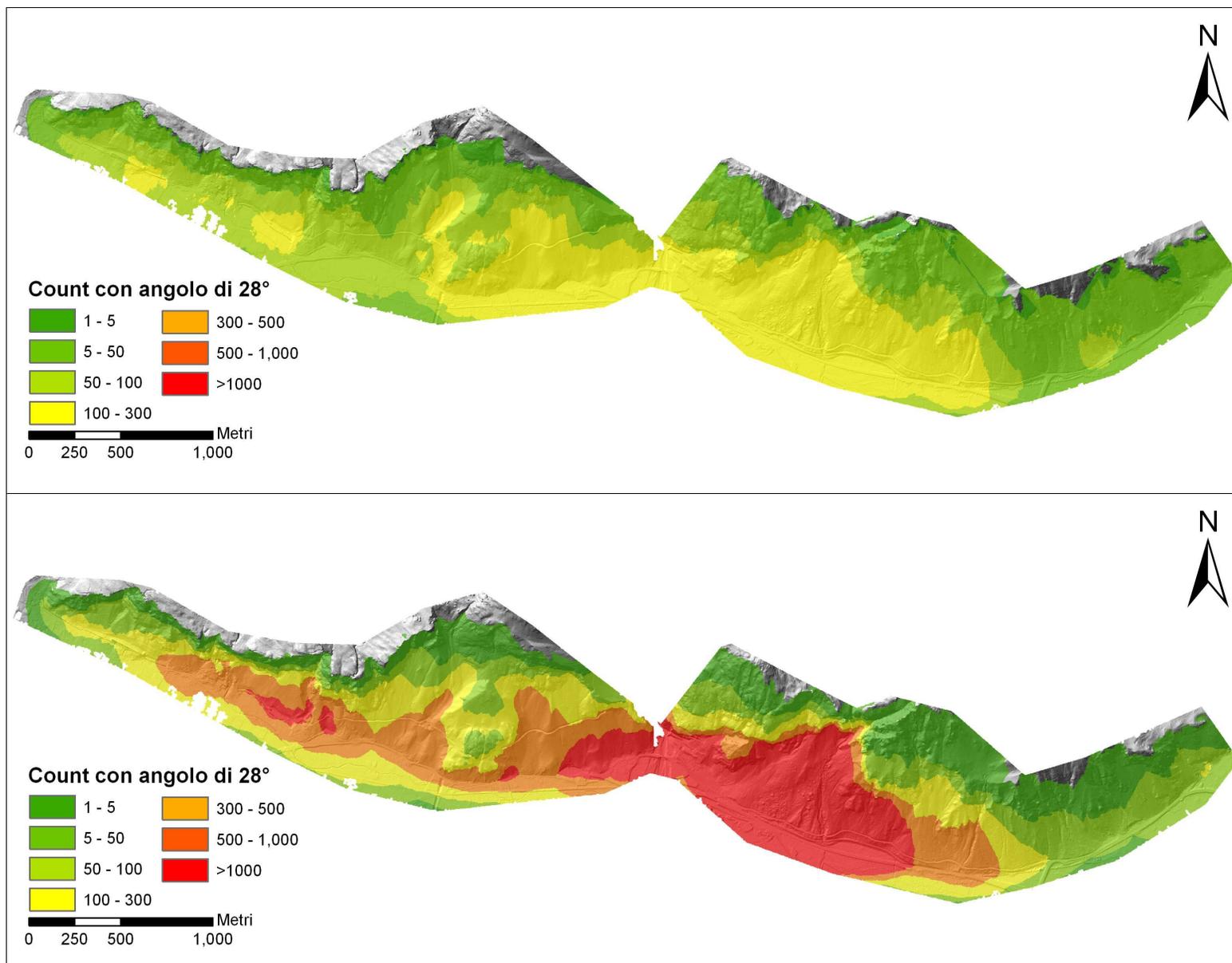


Figura 7.5: Confronto tra Count ottenuto con lo stesso angolo (28°) e sorgenti lineari, imponendo la condizione dell'angolo di apertura del cono (figura sopra) e senza tale parametro (figura sotto).

Occorre specificare che i valori di count identificati non sono riferiti al numero di blocchi che transitano per ciascuna cella del DEM, come accade in Hy_Stone (*vedere capitolo 7.3*), ma indicano il numero di celle contribuenti, quindi un “proxy” della probabilità di propagazione.

Analizzando i risultati ottenuti dalla simulazione, da un confronto tra angoli del cono differenti (*figura 7.4*), si osserva come tale parametro, com'è intuitivo pensare, determina un arresto della modellazione differente, in termini di estensione verso valle, il modello con angolo di 28° si propaga oltre quello a 33.5° . Inoltre si ha che considerando l'angolo di apertura del cono α il numero di celle contribuenti, a parità di ϕ_p , è drasticamente inferiore rispetto al caso in cui tale angolo non sia imposto (*figura 7.5*). In assenza dell'angolo α si ha un maggiore controllo nella frequenza di transito dei blocchi ad opera delle sorgenti più elevate, in quanto esse hanno la possibilità di interessare un'area notevolmente estesa, delimitata solo dalla topografia. Di contro in presenza dell'angolo α tutte le sorgenti risultano essere determinanti, in quanto la possibilità di propagazione è limitata. Questo porta a considerare che nel primo caso può non risultare necessaria una dettagliata mappatura delle sorgenti, che è invece determinate nel secondo caso.

Naturalmente il counting risulta influenzato dalla tipologia di sorgenti utilizzate, in quanto le areali avranno valori superiori alle lineari, dato appunto da un quantitativo di sorgenti nettamente superiore nel primo caso. Non si evidenziano grandi differenze in termini di energia cinetica individuata, indicando l'assenza di dipendenza dalla tipologia di sorgenti utilizzate, (*figura 7.6*).

Analizzando sempre i modelli relativi all'energia cinetica quello che si può osservare è che a parità di sorgente si ottengono valori di energia superiori in corrispondenza di un angolo ϕ_p di 28° , determinando dei valori quasi sempre superiori a 700 kJ, fatta eccezione per le aree più elevate o laterali, (*figura 7.7*). Si evidenzia inoltre l'influenza delle pareti coinvolte, infatti i massimi valori sono collocati al di sotto delle pareti verticalmente più estese in entrambi i casi.

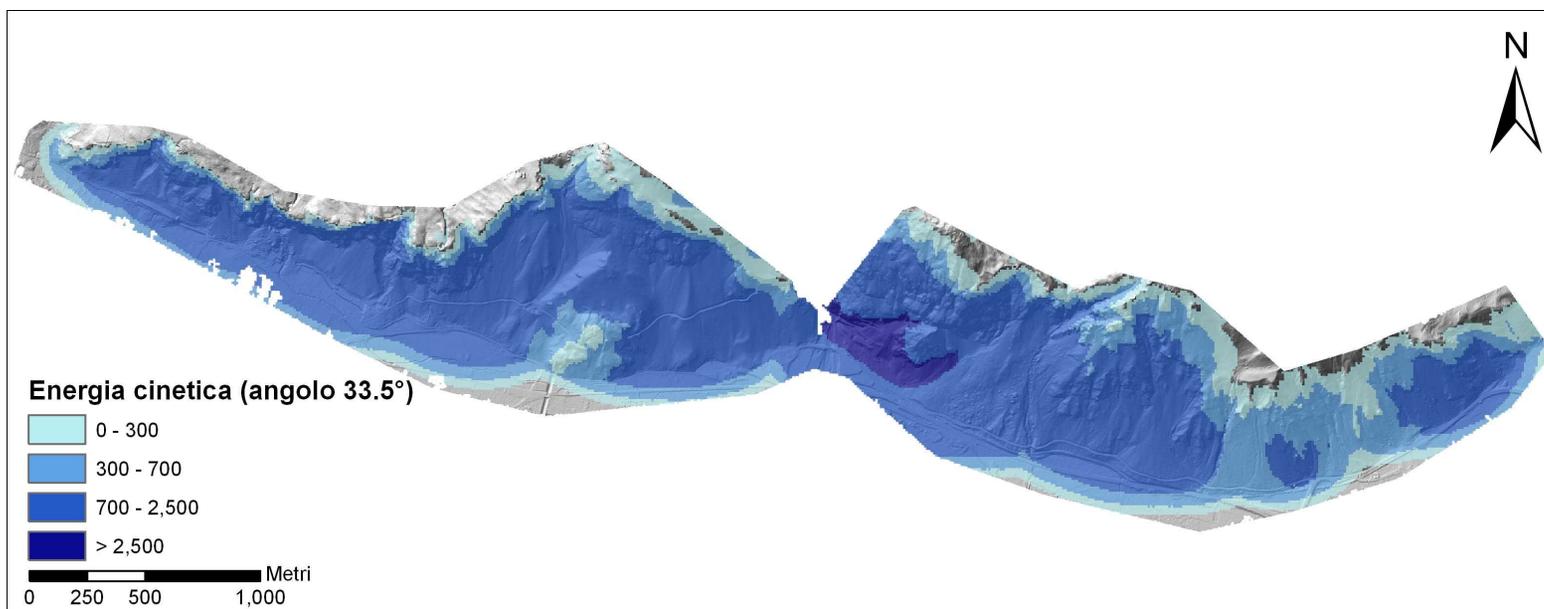
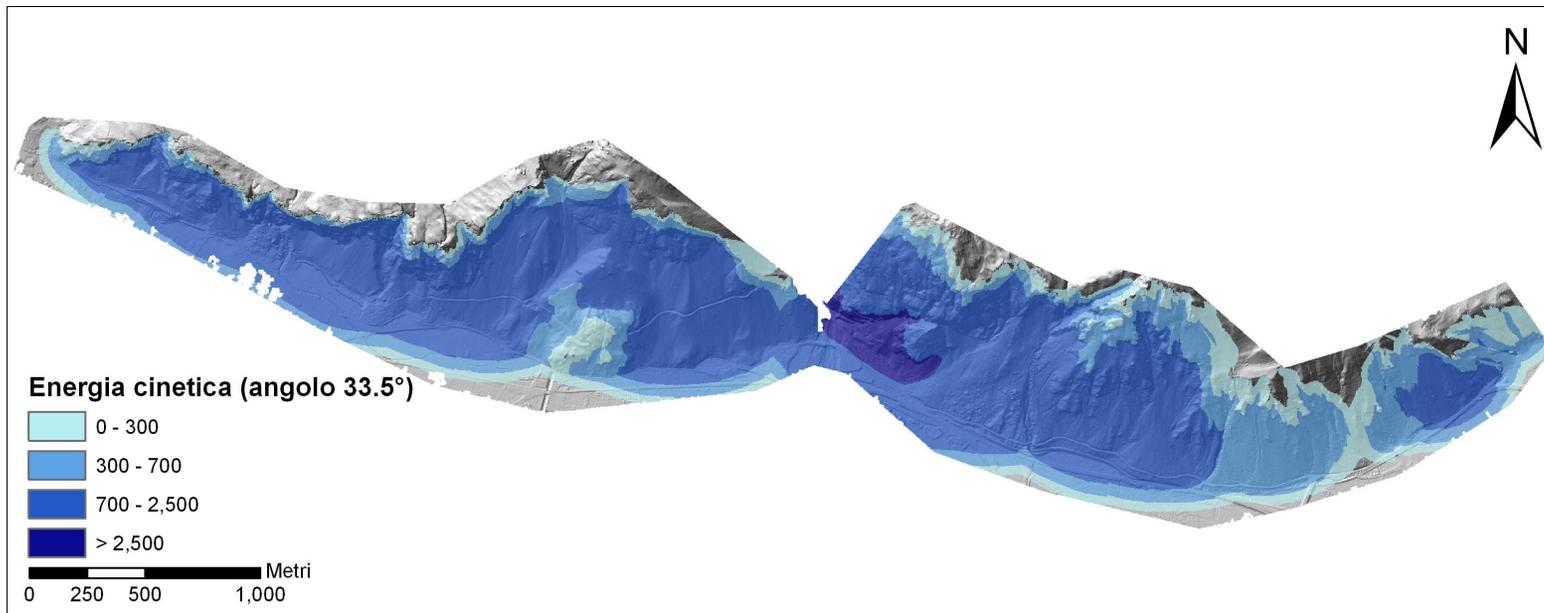


Figura 7.6: Confronto tra le Energie Cinetiche in kJ ottenute con un angolo di 33.5°, considerando sorgenti lineari sopra e areali sotto.

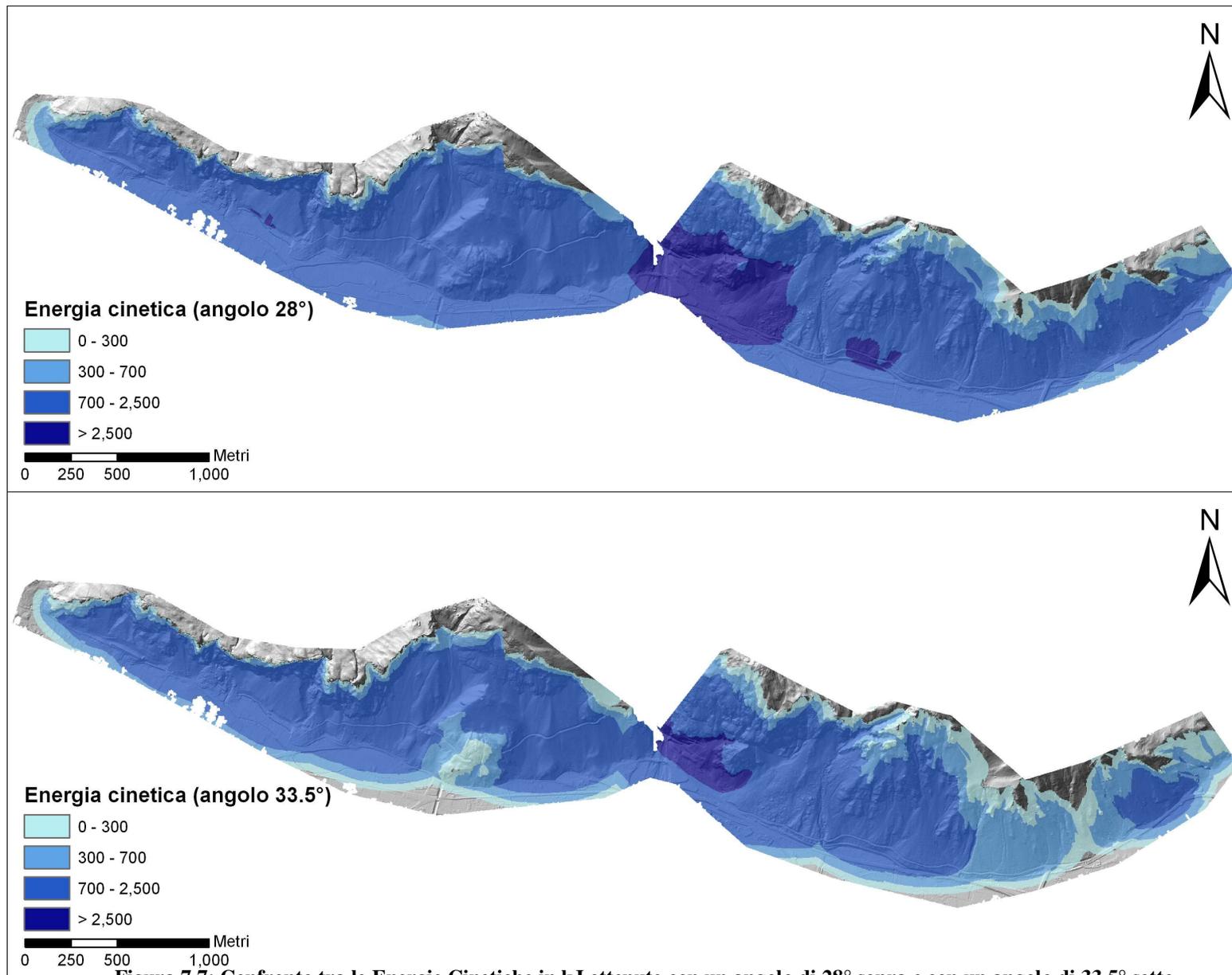


Figura 7.7: Confronto tra le Energie Cinetiche in kJ ottenute con un angolo di 28° sopra e con un angolo di 33.5° sotto. Le sorgenti utilizzate sono lineari.

7.1.1.2 CARTA DI PERICOLOSITÀ BASATA SU CONEFALL

Sulla base degli *output* generati per mezzo del programma Conefall si è realizzata una carta della pericolosità. Essa viene generata dalla combinazione dell'energia cinetica e della probabilità di propagazione. L'indice di pericolosità deriva quindi da una matrice 2D.

La probabilità di propagazione (p_p) è stata normalizzata rispetto al numero di celle sorgenti complessive ed è stata poi eseguita la seguente riclassificazione:

Classi	Nuovi valori
< 1	1
1 -10	2
> 1	3

Relativamente all'energia cinetica (e_c) sono state eseguite le seguenti riclassificazioni:

Classi (kJ)	Nuovi valori
0 – 300	10
300 – 700	20
700 – 2500	30

In un secondo tempo, si sommano i due file raster e si attribuisce l'indice di pericolosità, corrispondente alla colonna “vector” nella *tabella 7.1* calcolato per mezzo della seguente formula:

$$vector = \sqrt{p_p^2 + e_c^2}$$

Tabella 7.1: valore dell'indice di pericolosità calcolato per le diverse combinazioni di frequenza e energia cinetica.

Valore	Pp	Ec	vector
11	1	1	1.41
12	1	2	2.24
13	1	3	3.16
14	1	4	4.12
21	2	1	2.24
22	2	2	2.83
23	2	3	3.61
24	2	4	4.47
31	3	1	3.16
32	3	2	3.61
33	3	3	4.24

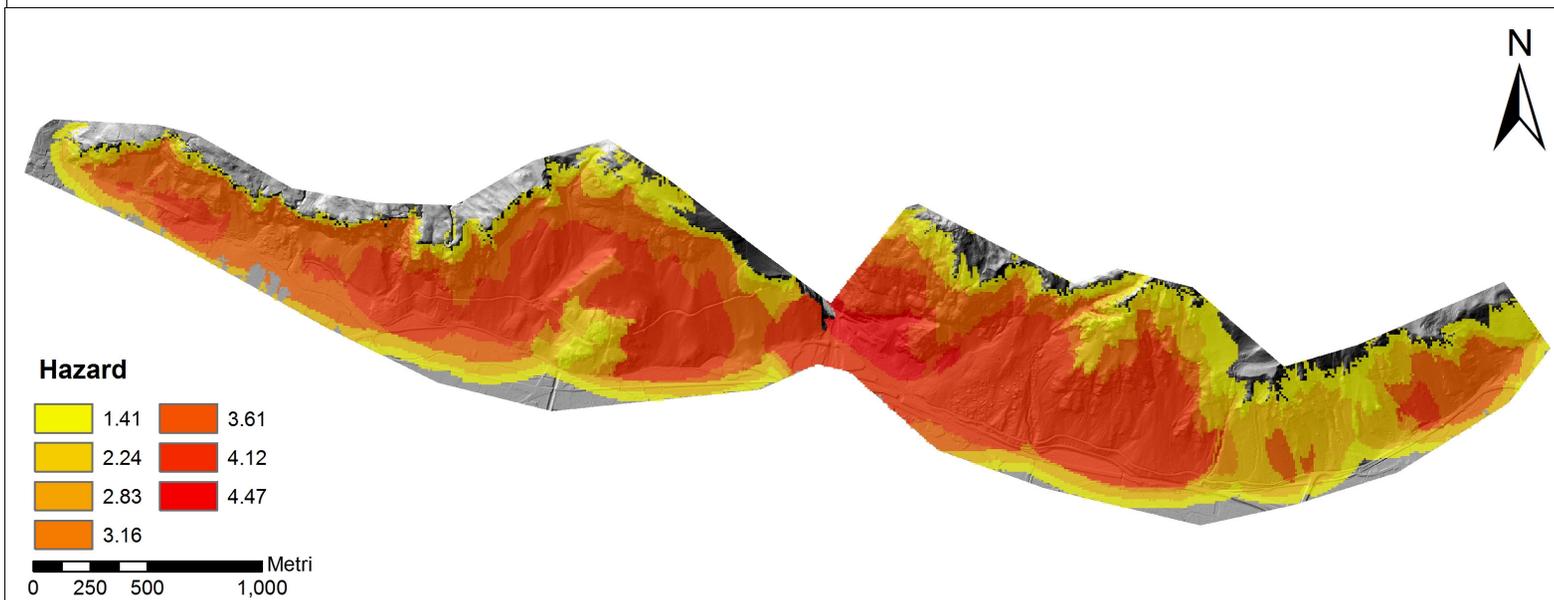
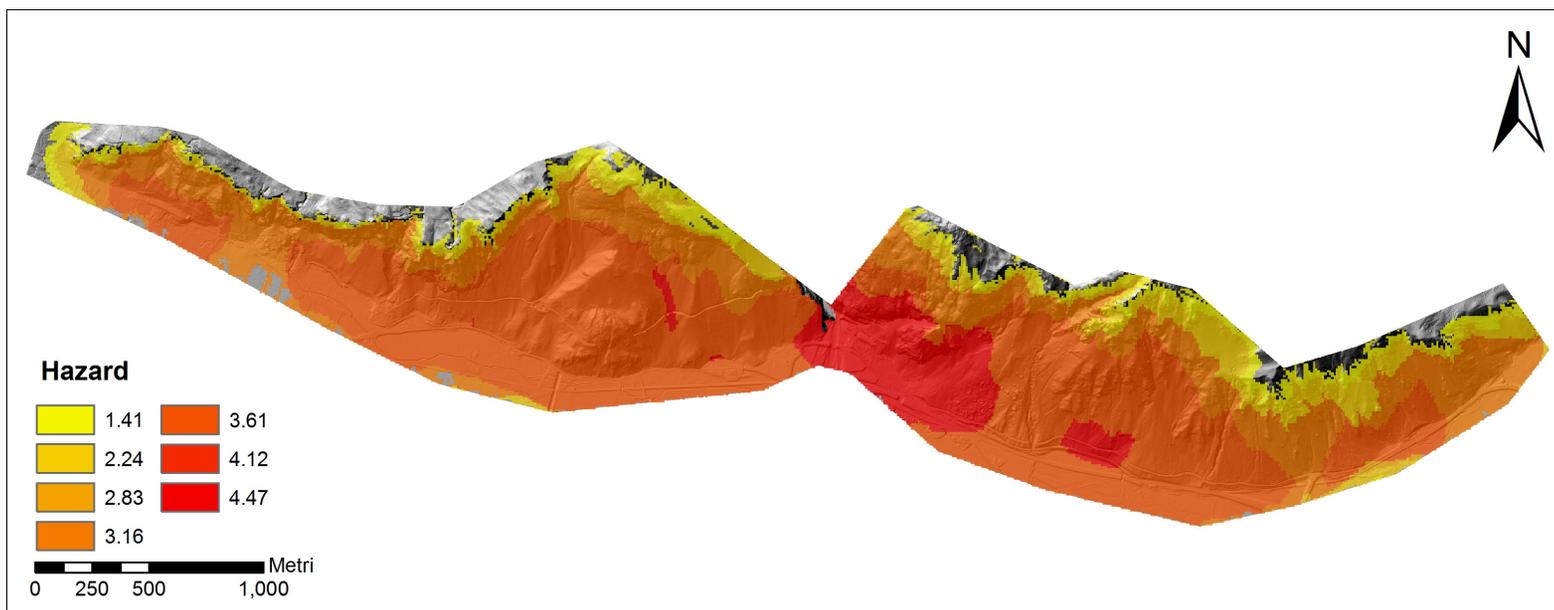


Figura 7.8: Confronto tra le mappe di pericolosità ottenute con un angolo di 28°, sopra e 33.5° sotto.

Dalle carte di pericolosità ottenute (*figura 7.8*) si può osservare come sia la carta dell'energia cinetica ad influenzare maggiormente la pericolosità identificata. Si può inoltre notare da un raffronto con la collocazione delle opere di difesa che le aree maggiormente pericolose identificate dalle carte di *figura 7.8*, non siano in alcun modo ad esse collegate. Nel complesso si ha quindi che l'approccio del cono d'ombra eseguito con i valori degli angoli di Onofri e Candian risulta essere non molto soddisfacente per la valutazione quantitativa della pericolosità in questa zona. Lo svantaggio principale di questo metodo riguarda il fatto che gli angoli di calibrazione siano stati definiti ed identificati per un'altra area (Venzone, UD), si ha poi l'impossibilità di assegnare la suscettibilità di innesco a ciascuna cella. Un eventuale possibilità di applicazione più coerente potrebbe essere data dalla calibrazione degli angoli del cono sull'area in esame.

7.2 MODELLO 2D: ROCFALL

Mediante il programma RocFall (Stevens, 1998) è possibile realizzare una valutazione del rischio di crollo lungo un pendio e la conseguente progettazione delle opere di difesa. Il programma, basato su un'analisi statistica, adotta un metodo di calcolo ibrido dove la massa dei blocchi viene trattata come puntiforme (*lumped mass*) nelle equazioni di moto e come dotata di dimensione nel calcolo delle energie e dei coefficienti di restituzione lungo il pendio. Tale programma consente di analizzare in modo probabilistico le traiettorie e le energie prodotte dai massi durante la caduta a valle, prendendo in considerazione l'alta complessità dell'ambiente reale. Risulta infatti complicato prevedere il percorso di un blocco di cui non sono noti a priori dimensione e forma ed interagente con un pendio non riproducibile nel dettaglio e continuamente in evoluzione. Tuttavia quello che si può valutare, attraverso tale programma, è il comportamento medio determinato attraverso la simulazione di un grande numero di scendimenti, ciascun dei quali possa fornire l'informazione relativa ad un percorso medio e più probabile tra tutti quelli fisicamente ammissibili. I parametri di calcolo (topografia, coefficienti di restituzione, volume del blocco roccioso e quantità di simulazioni eseguite) vengono trattati in modo probabilistico con possibilità di variazione entro un intervallo prestabilito. I vantaggi della modellazione 2D sono legati a una semplice implementazione del profilo del pendio; a una facile visualizzazione delle traiettorie di impatto e rimbalzo; alla possibilità di caratterizzare le proprietà dei materiali lungo il profilo e alla possibilità di eseguire modelli stocastici oltre che simulare la presenza di strutture difensive.

Gli svantaggi riguardano la difficoltà di interpolare i dati ricavati per i diversi profili e il fatto di non considerare l'aspetto tridimensionale del problema.

7.2.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA

Le simulazioni realizzate per mezzo di RocFall si sono concentrate in due soli settori dell'area in esame, in modo da consentire una conseguente possibilità di correlazione all'interno della metodologia RHAP. Le aree considerate sono:

- l'area collocata tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi; con la realizzazione di 3 profili, (figura 7.9);
- l'area collocata a Nord di Madonna del Sasso; con la realizzazione di 4 profili (figura 7.10).

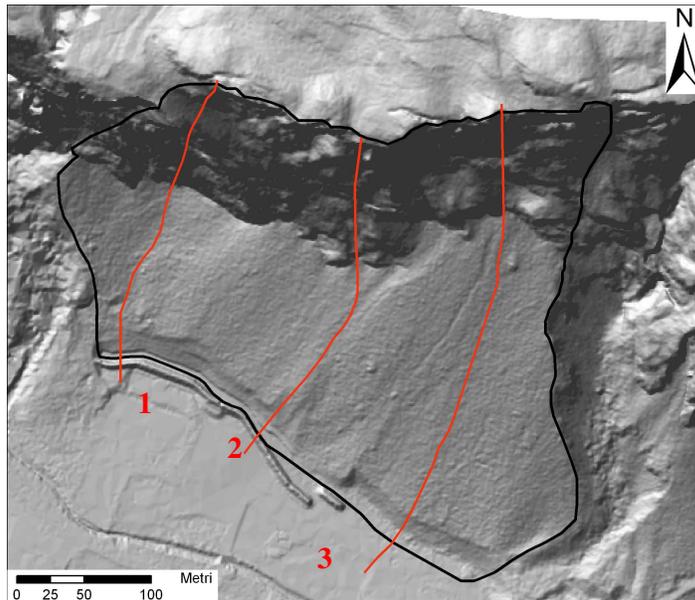


Figura 7.9: Profili realizzati tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi.

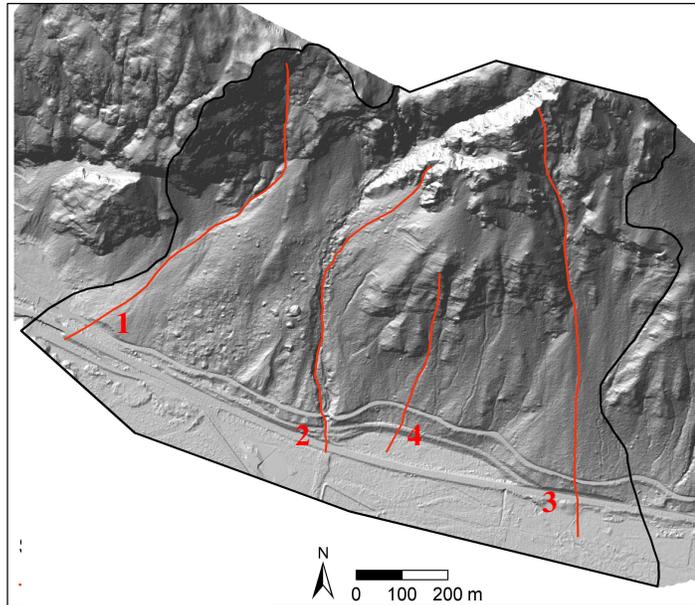


Figura 7.10: Profili realizzati a Nord di Madonna del Sasso.

I profili realizzati sono stati tracciati tenendo conto dei percorsi di discesa preferenziali dei blocchi. Per ciascun profilo sono stati campionati i valori di quota ogni 3 metri utilizzando l'estensione *Easy Profiler*, in ambiente GIS. Tale operazione prevede la definizione nel setting della dimensione dell'intervallo di campionamento, che è appunto 3 metri e l'utilizzo di multiple layers, in seguito attraverso il comando *Get Profile Chart from Selected Polyline* si deve introdurre il LIDAR in modo da aggiungere al profilo l'informazione della quota.

Questa operazione deve essere effettuata per tutti i profili ottenendo così per ciascuno una tabella contenente le coordinate dei punti che costituiscono il profilo, la quota e la distanza dall'origine del profilo. RocFall, lavora sulla base di file .cad costituiti da linee, di conseguenza è necessario creare un shapefile di linee e tracciare attivando gli snap l'andamento della topografia per i singoli profili e successivamente creare dei file .cad per mezzo del comando *export to CAD* (scegliendo poi *DXF_R14* come formato).

Prima di iniziare le modellazioni con RocFall si devono specificare i parametri da utilizzare nella simulazione:

- 1000 blocchi lanciati da ciascun segmento che costituisce la zona di distacco. I blocchi, lanciati attraverso un approccio casuale, hanno la stessa probabilità;
- la massa dei blocchi è assunta pari a 1170kg;
- la velocità orizzontale di partenza è assunta pari a 1,5 m/s considerando una deviazione standard pari a 0,1;
- la densità della roccia è stata considerata pari a 2100 kg/m³;

- il coefficiente di restituzione normale (R_n) viene scalato in base alla velocità del blocco, considerando $K = 9,144$ m/s.

Il concetto su cui si basa l'ultimo punto è quello secondo cui il valore di R_n dipende dalla velocità del blocco. Per esempio, a basse velocità ci si potrebbe aspettare che un blocco rimbalzi sull'erba, mentre ad alte velocità esso potrebbe affossarsi nel terreno prima di rimbalzare, oppure potrebbe frantumarsi. In questi casi il valore effettivo di R_n dovrebbe essere minore a velocità elevate, come evidente dalla seguente equazione:

$$R_n (scaled) = R_n \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{rock}}{K}\right)^2}$$

dove V_{rock} è la velocità del blocco subito prima dell'impatto sul versante misurata perpendicolarmente allo stesso e K è la velocità corrispondente ad un fattore di scalatura di 0.5.

Il valore di base della costante K è stato ricavato empiricamente.

È ora possibile attribuire ai singoli materiali i relativi coefficienti di restituzione. Nel caso di studio sono stati considerati tre principali materiali quali la roccia calcarea, il talus vegetato e il rilevato.

	Rn	Dev. Std.	Rt	Dev. Std.	Phi	Dev. Std.
Roccia	0.55	0.055	0.99	0.099	28	2.8
Talus Vegetato	0.4	0.14	0.87	0.3	20	7
Rilevato	0.2	0.1	0.7	0.1	25	2

Tabella 7.2: Valori dei coefficienti di restituzione normale, R_n , e tangenziale, R_t e dell'angolo di attrito, Φ associati alle rispettive deviazioni standard in funzione del materiale utilizzato nella simulazione.

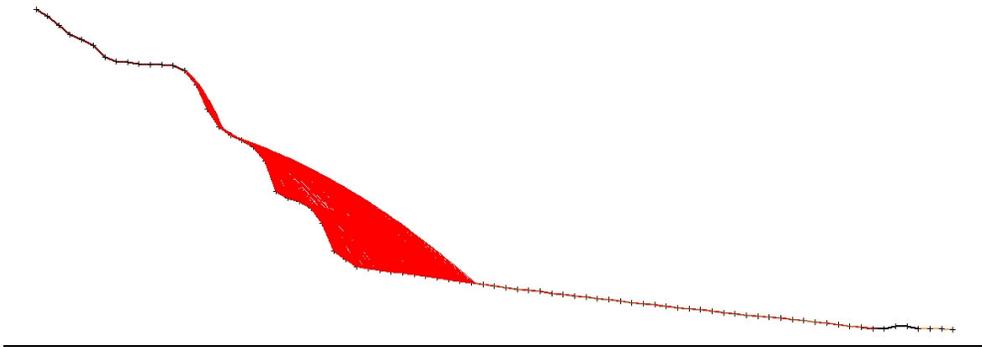
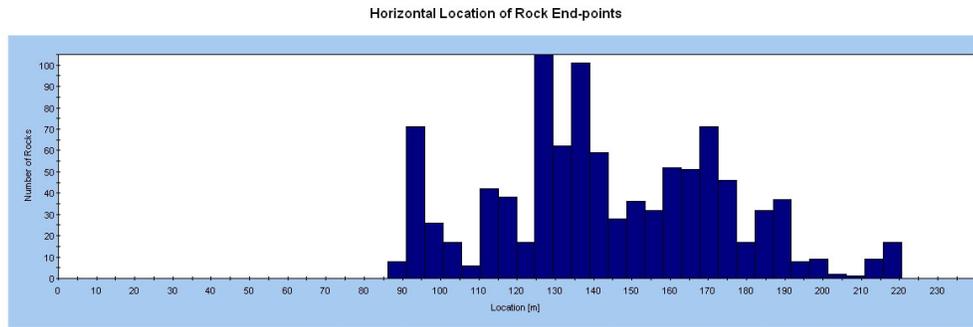
Il valore della deviazione standard è stato definito in base alla distribuzione dei punti di arresto, a tal riguardo si rimanda al paragrafo seguente (*paragrafo 7.2.2*).

Infine si selezionano le zone sorgenti dei blocchi e si procede con la simulazione.

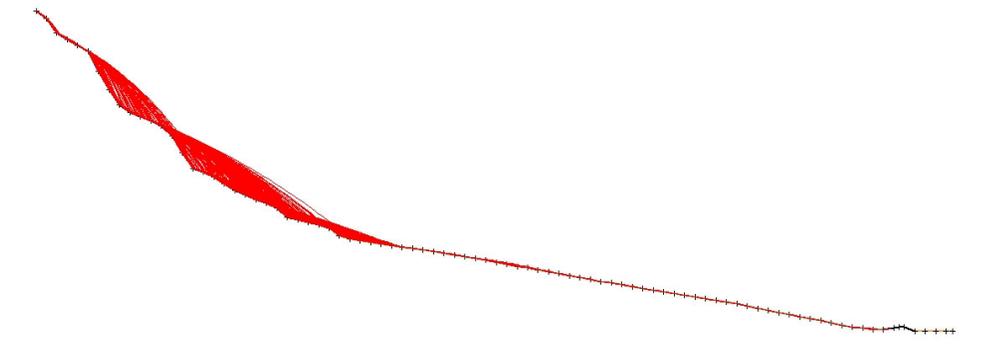
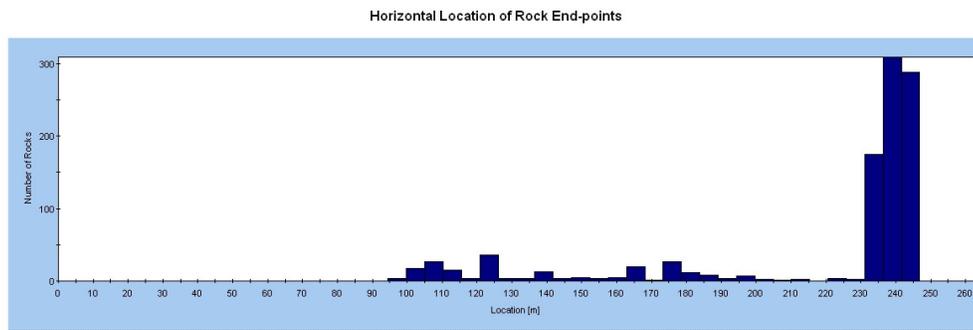
Per ciascun profilo simulato vengono di seguito riportati i risultati della simulazione e i grafici relativi alla posizione dei punti di arresto. Successivamente verrà implementata la procedura RHAP per la zonazione della pericolosità.

Profili tra Borgo S. Antonio e Case Zanussi:

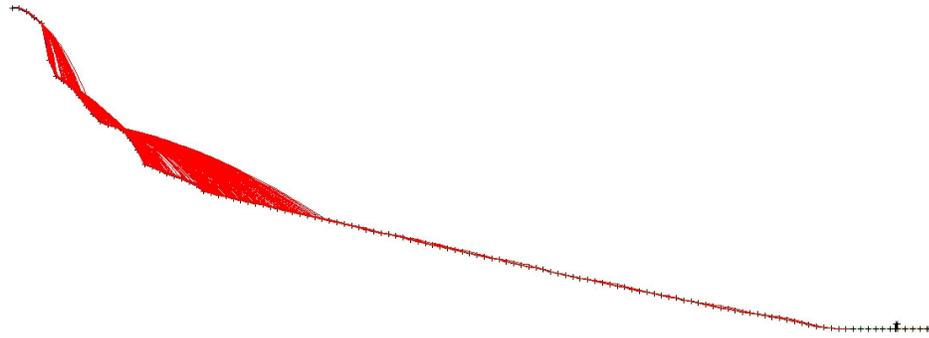
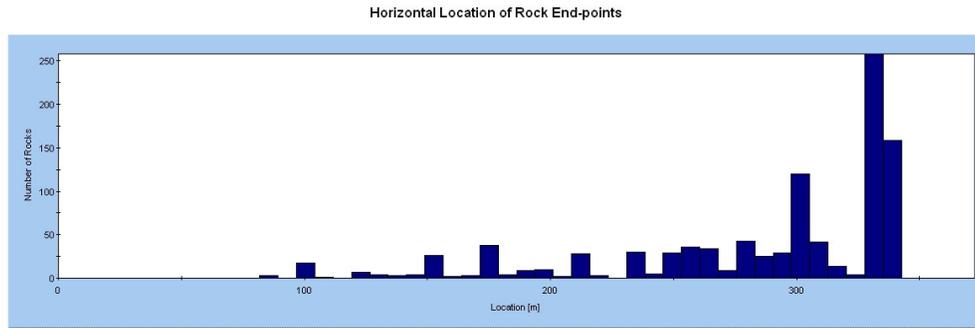
Profilo n°1



Profilo n°2

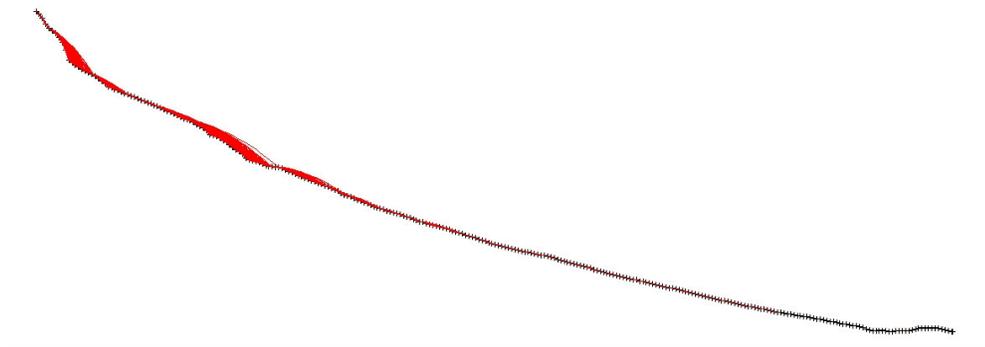
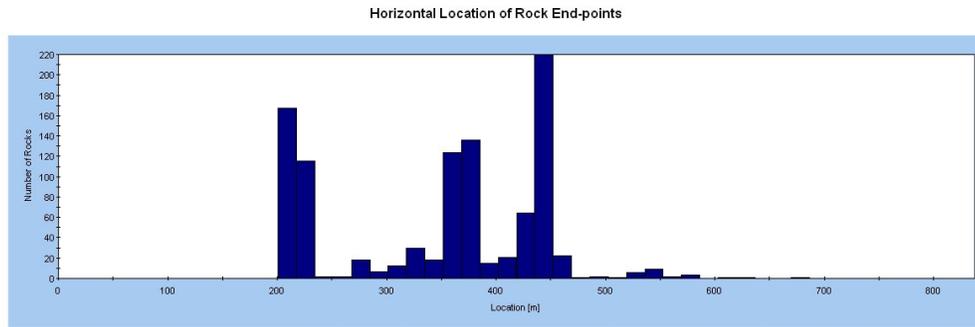


Profilo n°3

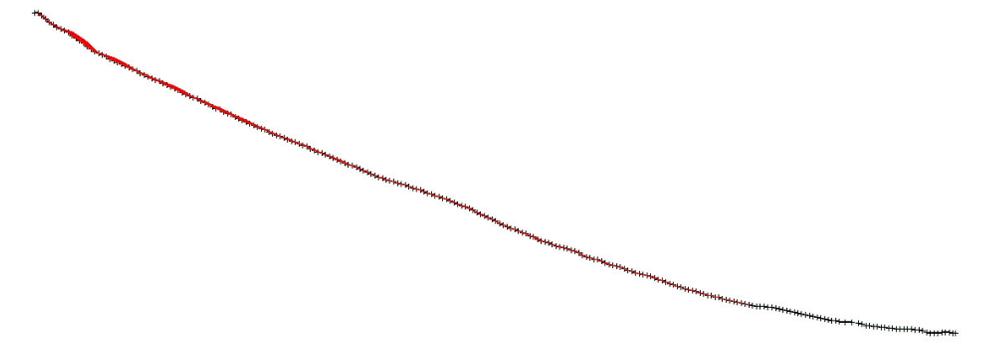
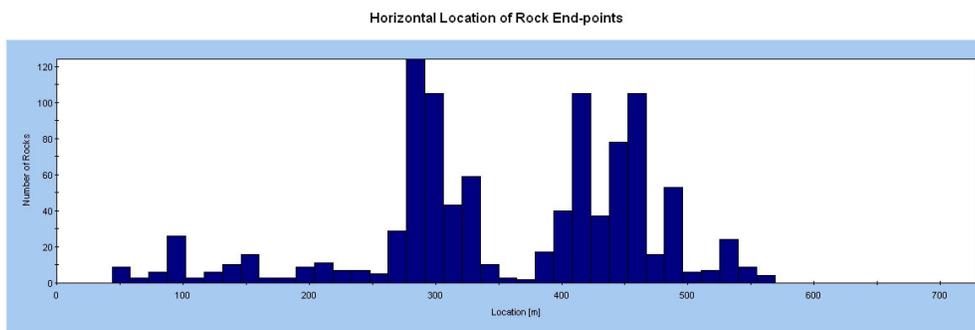


Profili Madonna del Sasso:

Profilo n°1

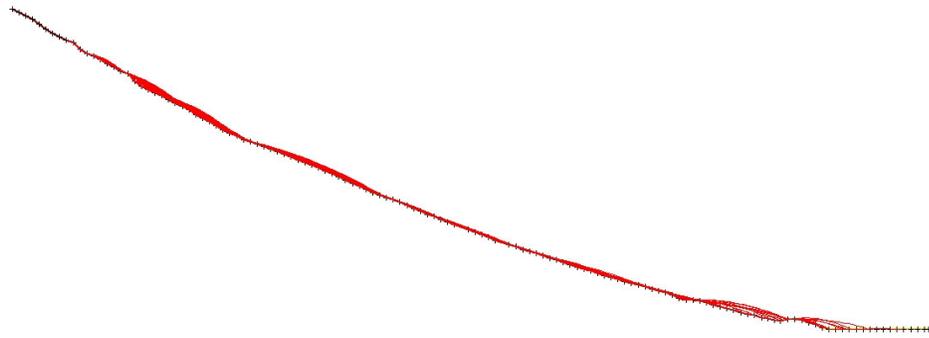
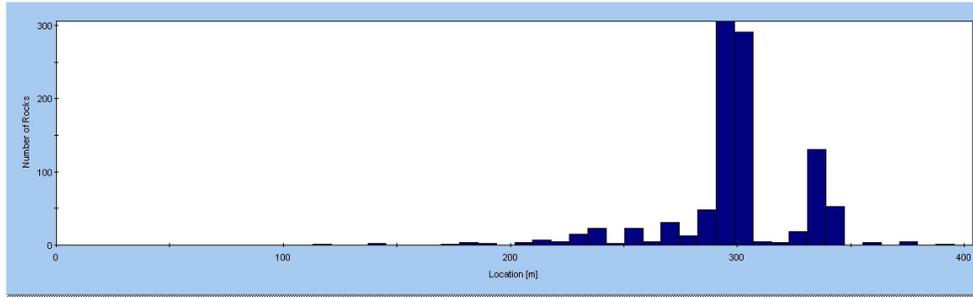


Profilo n°2



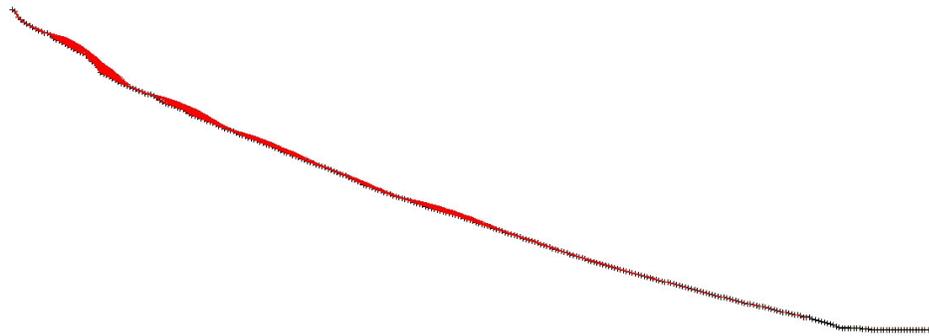
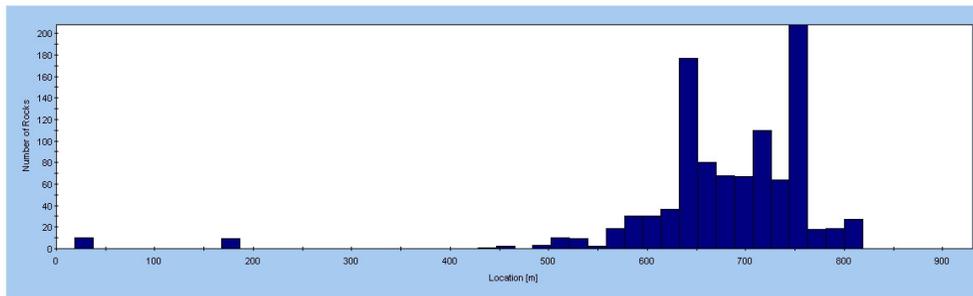
Profilo n°3

Horizontal Location of Rock End-points



Profilo n°4

Horizontal Location of Rock End-points



7.2.2 DEFINIZIONE DELLA VARIABILITÀ DEI PARAMETRI IN INGRESSO

Nelle simulazioni realizzate in RocFall si è valutata la possibilità di introdurre valori di deviazioni standard differenti in funzione del coefficiente di variazione, in modo da identificare la distribuzione migliore possibile degli *end points*.

Il coefficiente di variazione (*cov*) è definito dal rapporto tra la deviazione standard e la media campionaria. Tale parametro fornisce, dunque, un'indicazione della variabilità delle osservazioni rilevate.

$$\text{cov} = \frac{\sigma}{\chi}$$

A tal fine sono state eseguite differenti simulazioni in modo da verificare come il coefficiente di variazione andasse ad influire sulla distribuzione dei punti. Sono stati utilizzati quattro valori differenti quali: 10%, 30%, 35% e 50%.

Tale coefficiente è stato utilizzato per identificare il valore della deviazione standard da inserire all'interno del programma in relazione ai valori medi del coefficiente di restituzione normale (R_n), del coefficiente di restituzione tangenziale (R_t) e dell'angolo di frizione (ϕ).

Questo lavoro è stato mirato a calibrare i valori del detrito di versante, che possono presentare una maggior variazione rispetto, per esempio, alla roccia.

La calibrazione è stata realizzata sui profili appartenenti all'area posta a Nord di Case Zanussi (*figura 7.11*).

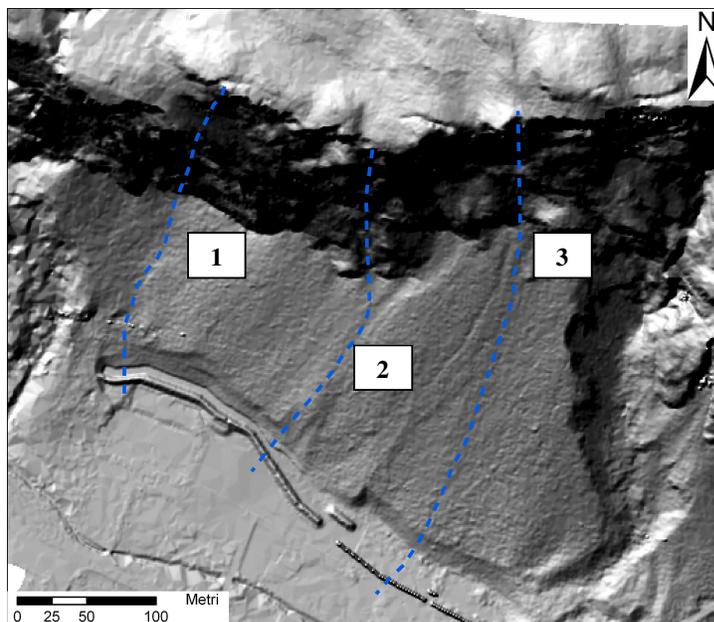
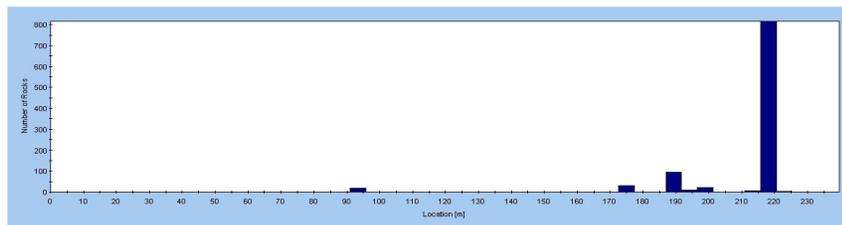
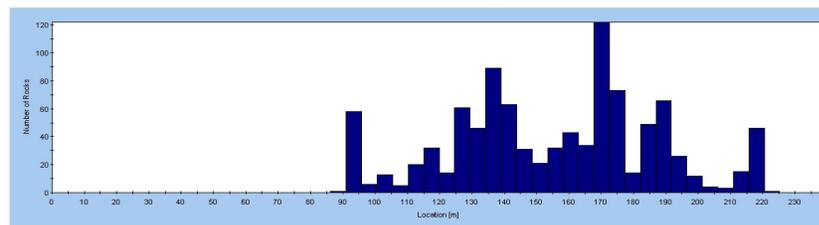
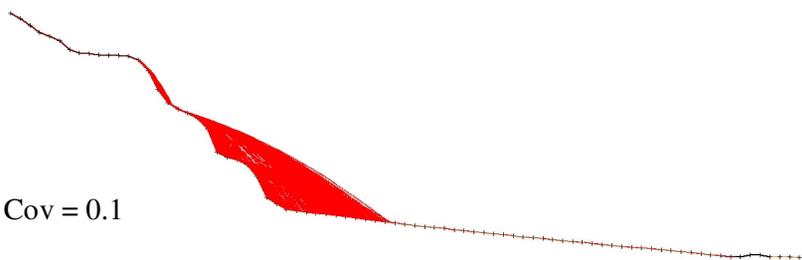


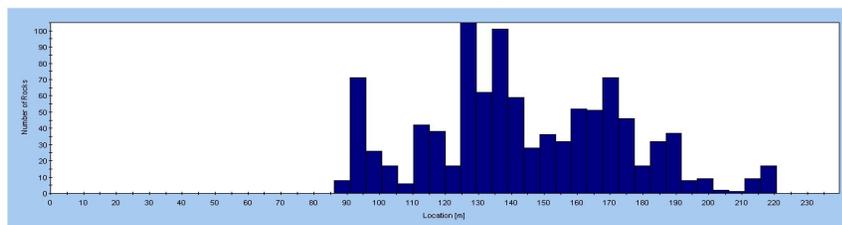
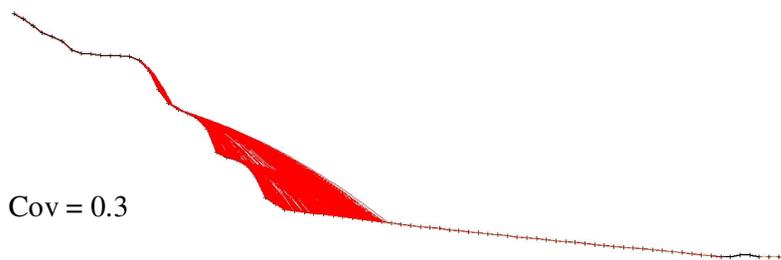
Figura 7.11: Profili realizzati nell'area a Nord di Case Zanussi.



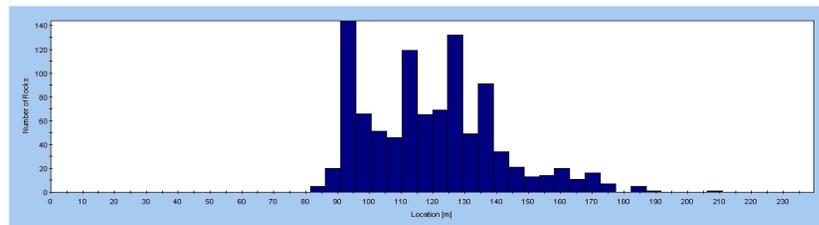
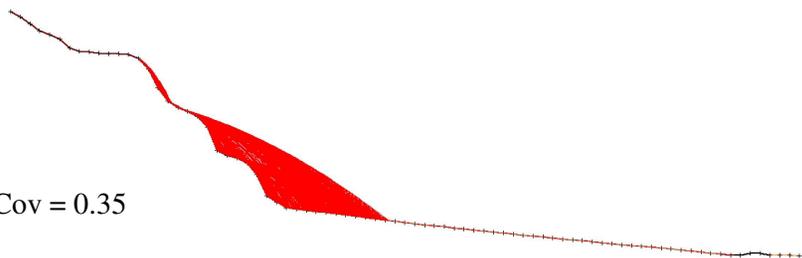
Cov = 0.1



Cov = 0.3



Cov = 0.35



Cov = 0.5

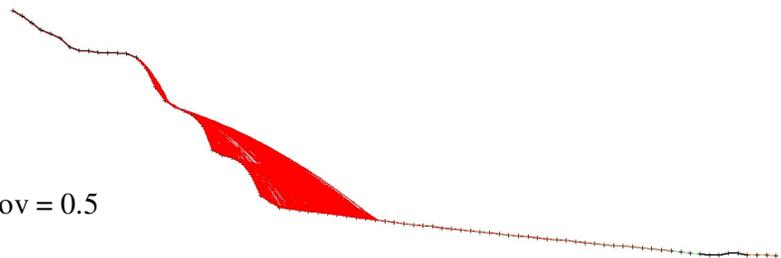
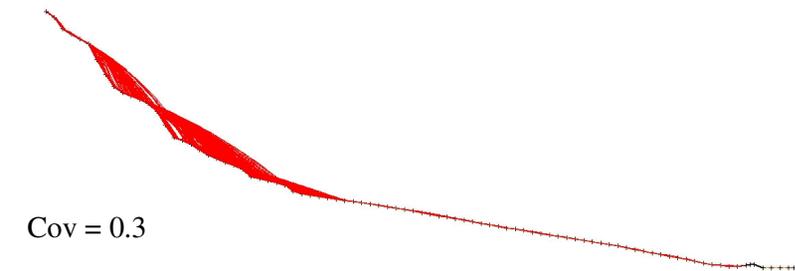
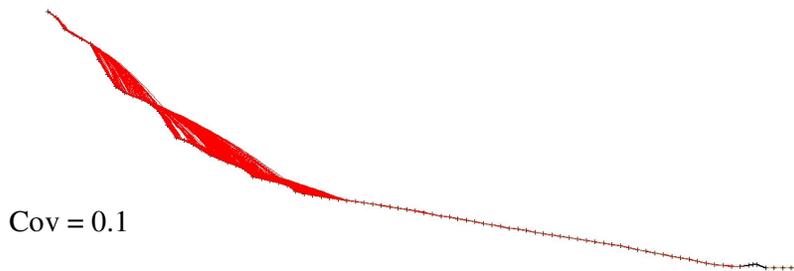
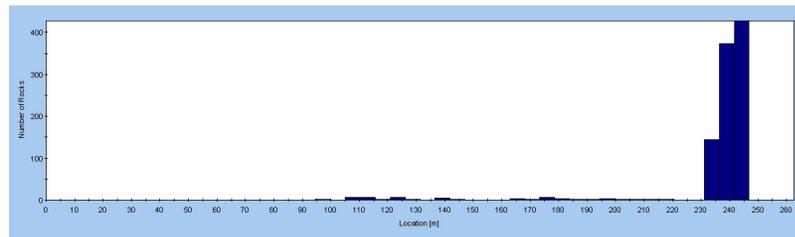
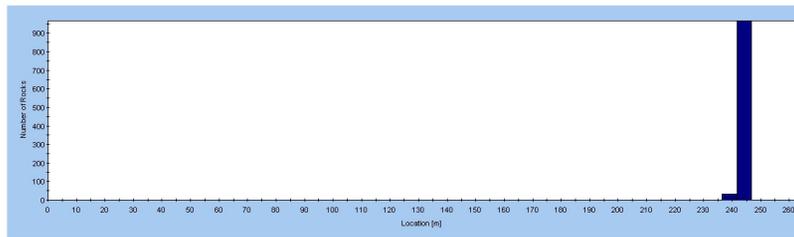
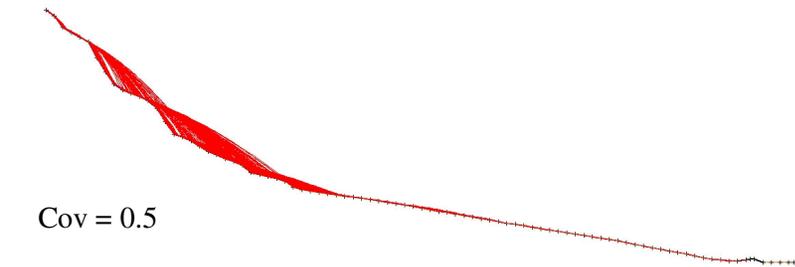
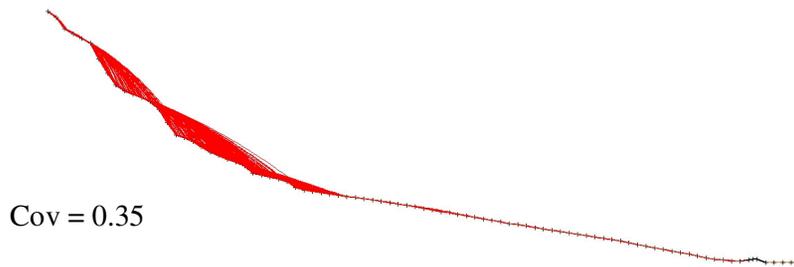
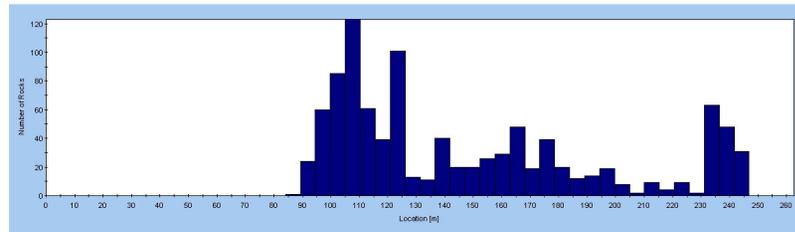
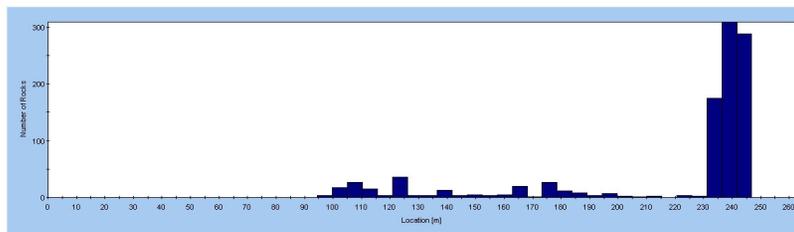


Figura 7.12: Confronto tra le distribuzioni degli *end points* relative al profilo 1.



Cov = 0.1

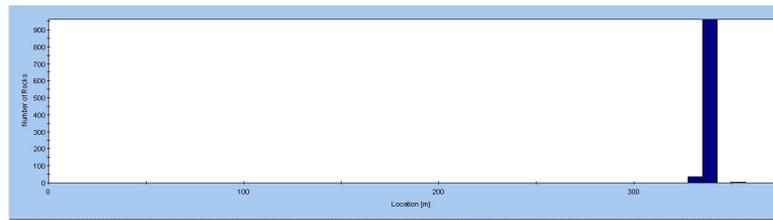
Cov = 0.3



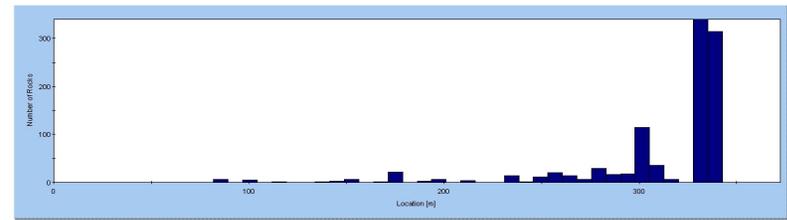
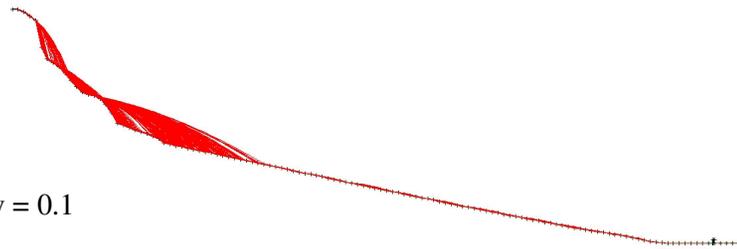
Cov = 0.35

Cov = 0.5

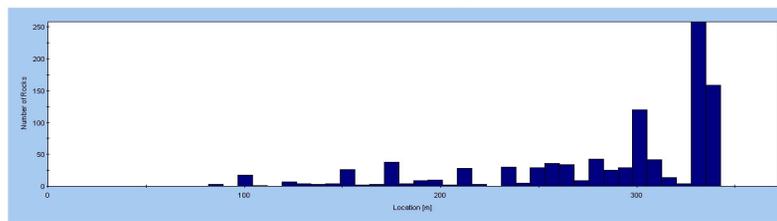
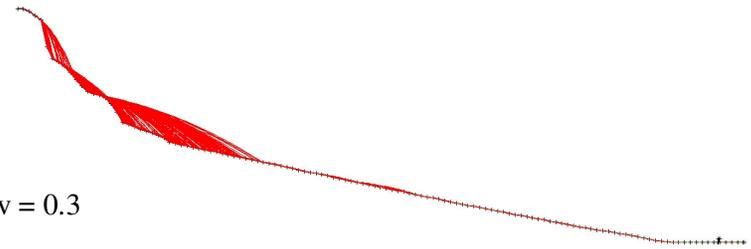
Figura 7.13: Confronto tra le distribuzioni degli *end points* relative al profilo 2.



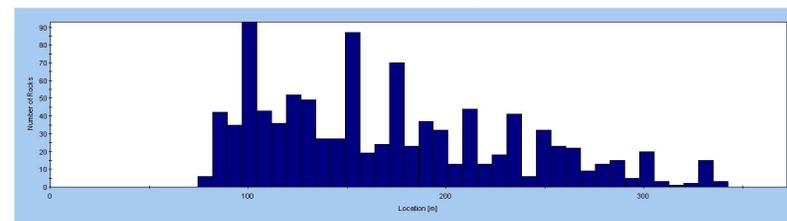
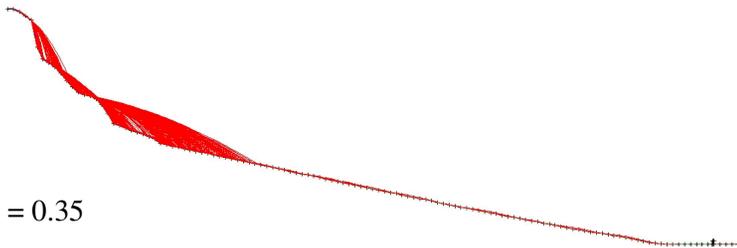
Cov = 0.1



Cov = 0.3



Cov = 0.35



Cov = 0.5

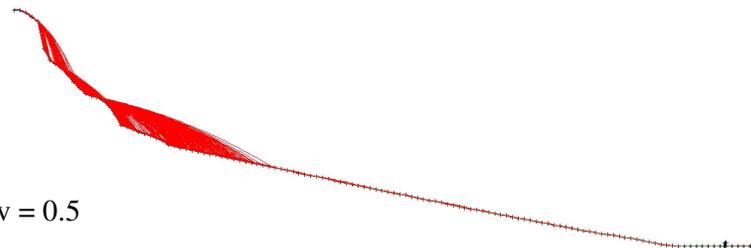


Figura 7.14: Confronto tra le distribuzioni degli *end points* relative al profilo 3.

Dalle distribuzioni ottenute si possono effettuare delle semplici considerazioni:

Prima di tutto i valori corrispondenti ad un coefficiente di variazione pari a 10% e 50% possono essere direttamente esclusi, in quanto nel primo caso si determina una deviazione standard eccessivamente ridotta che non consente di ottenere una corretta variabilità dei valori lungo il versante. Nel secondo caso al contrario la variabilità concessa risulta essere molto elevata determinando localmente valori che si discostano eccessivamente dal quello medio assegnato alla classe. Questo si ripercuote nella distribuzione degli *end points*, infatti nel primo caso si ottiene che la quasi totalità dei punti di arresto è collocata nella parte bassa del versante, nell'area di transizione con la piana alluvionale, mentre nel secondo caso si ottiene l'esatto opposto, ovvero si ha una maggiore concentrazione dei blocchi in corrispondenza della base delle pareti ed in media un progressivo calare degli arresti verso valle.

Di conseguenza entrambi gli scenari, considerando anche le osservazioni di campo effettuate, risultano poco realistici.

Relativamente agli altri due valori (30% e 35%), essi presentano una distribuzione più conforme alle aspettative, funzione anche delle caratteristiche dei versanti esaminati e dei dati di terreno. La scelta effettuata riguarda un valore di coefficiente di variazione pari al 35%, in quanto (soprattutto nei profili 2 e 3) determina un posizionamento dei punti di arresto più distribuito lungo il versante rispetto ad un valore pari al 30%. Inoltre, fatta eccezione per il primo profilo, la posizione dei punti di arresto necessari alla realizzazione della carta basata sulla metodologia RHAP (*paragrafo 7.2.3*) rientra in un massimo di variazione inferiore a 2m.

Alla roccia si è preferito invece dare una minore variabilità, insita nel materiale stesso, a tale scopo si è scelto un valore del coefficiente di variazione pari al 10%.

7.2.3 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ: LA PROCEDURA RHAP

La Regione Lombardia, a partire dall'anno 2000, ha sviluppato due metodologie per la zonazione della pericolosità legata ai crolli in roccia:

- una per crolli di singoli massi o per crolli di volumetria massima pari a 1000 m³,
- una per i crolli in massa (da 1000 m³ fino a migliaia di m³).

Nell'area oggetto di studio è stato adottato il primo metodo denominato RHAP, Rockfall Hazard Assessment Procedure.

La procedura si sviluppa in più fasi:

1. Individuazione dei settori di parete rocciosa potenzialmente origine di crolli e delimitazione di aree omogenee in funzione di:

- * caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso;
- * morfologia del versante lungo le traiettorie di discesa;
- * caratteristiche del blocco di progetto;
- * presenza di opere di difesa.

2. Simulazione numerica, con determinazione dei parametri per la modellazione numerica del fenomeno a partire dai dati di terreno; tra questi:

- * la zona di partenza dei blocchi;
- * il volume dei massi;
- * la forma dei massi;
- * i coefficienti di restituzione;
- * la rugosità del terreno;
- * il numero di simulazioni.

Essendo questa analisi di tipo probabilistico, è necessario effettuare numerose simulazioni di caduta (almeno 1000 cadute per ogni traiettoria).

3. Zonazione longitudinale preliminare, realizzata in base ai risultati delle analisi di rotolamento definendo:

A: la zona di transito e arresto del 70% dei blocchi simulati,

B: la zona di arresto del 95% dei blocchi;

C: la zona di arresto del 100% dei blocchi.

Queste percentuali sono valutate sulla totalità delle simulazioni effettuate, per ogni traiettoria, sui blocchi modali di qualsiasi forma considerata e verrà tenuta in considerazione la zonazione longitudinale più sfavorevole.

4. Determinazione della pericolosità relativa, per mezzo dell'assegnazione di una classe di pericolosità relativa:

- * Zona **A**: pericolosità 4
- * Zona **B**: pericolosità 3
- * Zona **C**: pericolosità 2

È possibile definire una zona a pericolosità 1 per le distanze superiori a quelle raggiunte dal blocco di dimensioni maggiori o in base a crolli reali.

5. Il passo successivo consiste nella valutazione della probabilità di accadimento del fenomeno per ciascuna delle aree omogenee identificate al primo punto, sulla base della propensione al distacco di blocchi. A tale scopo si suddivide la parete in maglie di lato compreso tra 5 e 20 m, in funzione degli aspetti geomeccanici dell'area in esame. Per ciascuna maglia deve essere verificata la presenza dei seguenti elementi di instabilità:

- * fratture aperte con evidenze di attività associate ai cinematismi possibili;
- * blocchi ruotati;
- * zone intensamente fratturate;
- * superfici non alterate (probabili blocchi recenti);
- * emergenza di acqua alla base dei blocchi.

Per ciascuna delle maglie della griglia viene indicato il numero di elementi di instabilità presenti. Successivamente per ogni area viene determinata la percentuale di attività in relazione al massimo ottenibile, ovvero dando a ciascuna maglia il valore 5. In base alle percentuali così ricavate, le aree omogenee vengono raggruppate in gruppi a pericolosità alta, media o bassa. La procedura non riporta percentuali di riferimento assolute per evitare che la maggior parte delle aree omogenee risulti avere lo stesso valore di pericolosità impedendo la zonazione. Esiste un'indicazione relativa al fatto che se le aree hanno percentuali inferiori al 10% non si ritiene necessaria una zonazione della pericolosità.

6. La zonazione finale è definita utilizzando classi di pericolosità (definite al punto 4) che vengono aumentate di 1, mantenuti costanti, o diminuite di 1, in funzione del fatto che le pareti sovrastanti appartengano ai gruppi di pericolosità alta, media o bassa. Si possono così avere in totale 5 classi di pericolosità da H1 a H5.

7.2.3.1 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA

Nelle aree scelte, per la definizione delle aree omogenee, previste dalla metodologia, si è ritenuto valido utilizzare i domini omogenei determinati per l'analisi di suscettibilità (*Capitolo 6*).

Nel seguito vengono illustrate un caso di applicazione della metodologia RHAP tradizionale e una sua variante determinata dall'impossibilità di avere a disposizione una foto dell'area indagata.

Nell'area tra Borgo S. Antonio e case Zanussi la valutazione della pericolosità è stata effettuata secondo la tradizionale procedura RHAP. Per mezzo della modellazione numerica bidimensionale effettuata con RocFall è possibile determinare i punti corrispondenti alla percentuale di arresto dei blocchi pari al 70%, 95% e 100%, per ciascun profilo. Procedendo con un'interpolazione dei punti presenti nei tre profili, al medesimo valore di arresto, si ottiene una zonazione preliminare della pericolosità. Si procede determinando la propensione al distacco dei blocchi della parete rocciosa, utilizzando una griglia con maglie di dimensioni 20x20 metri.

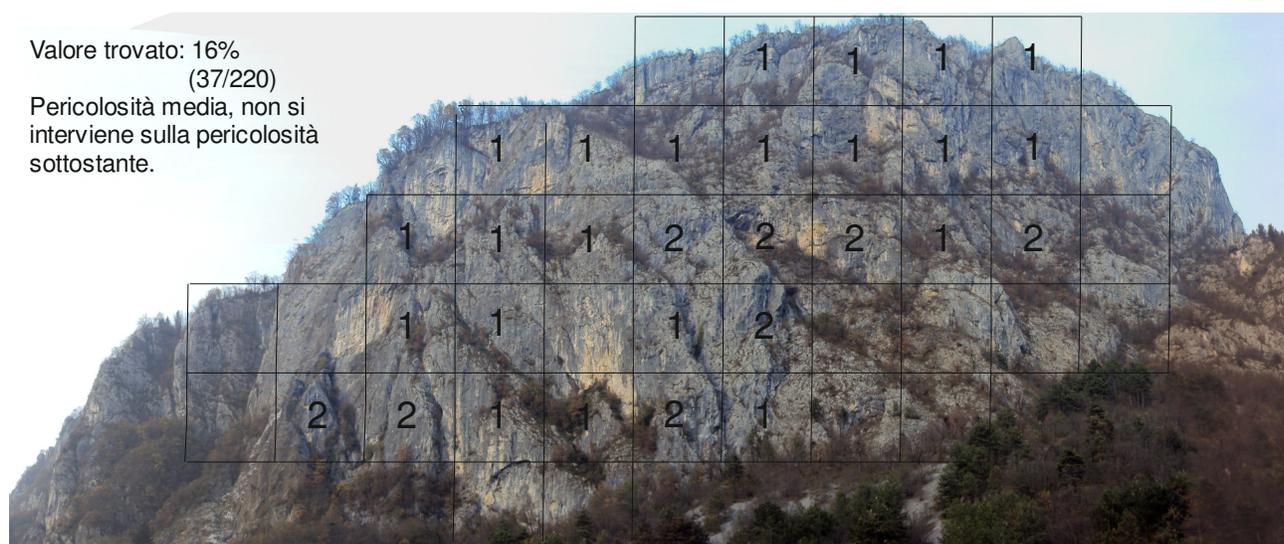


Figura 7.15: Griglia realizzata per la determinazione della propensione al distacco.

L'ammasso roccioso è caratterizzato da un unico domino dal quale risulta una probabilità pari al 16% di propensione all'innescò, interpretata come una pericolosità media e dunque non si interviene sulla precedente zonazione, che risulta confermata (*figura 7.16*).

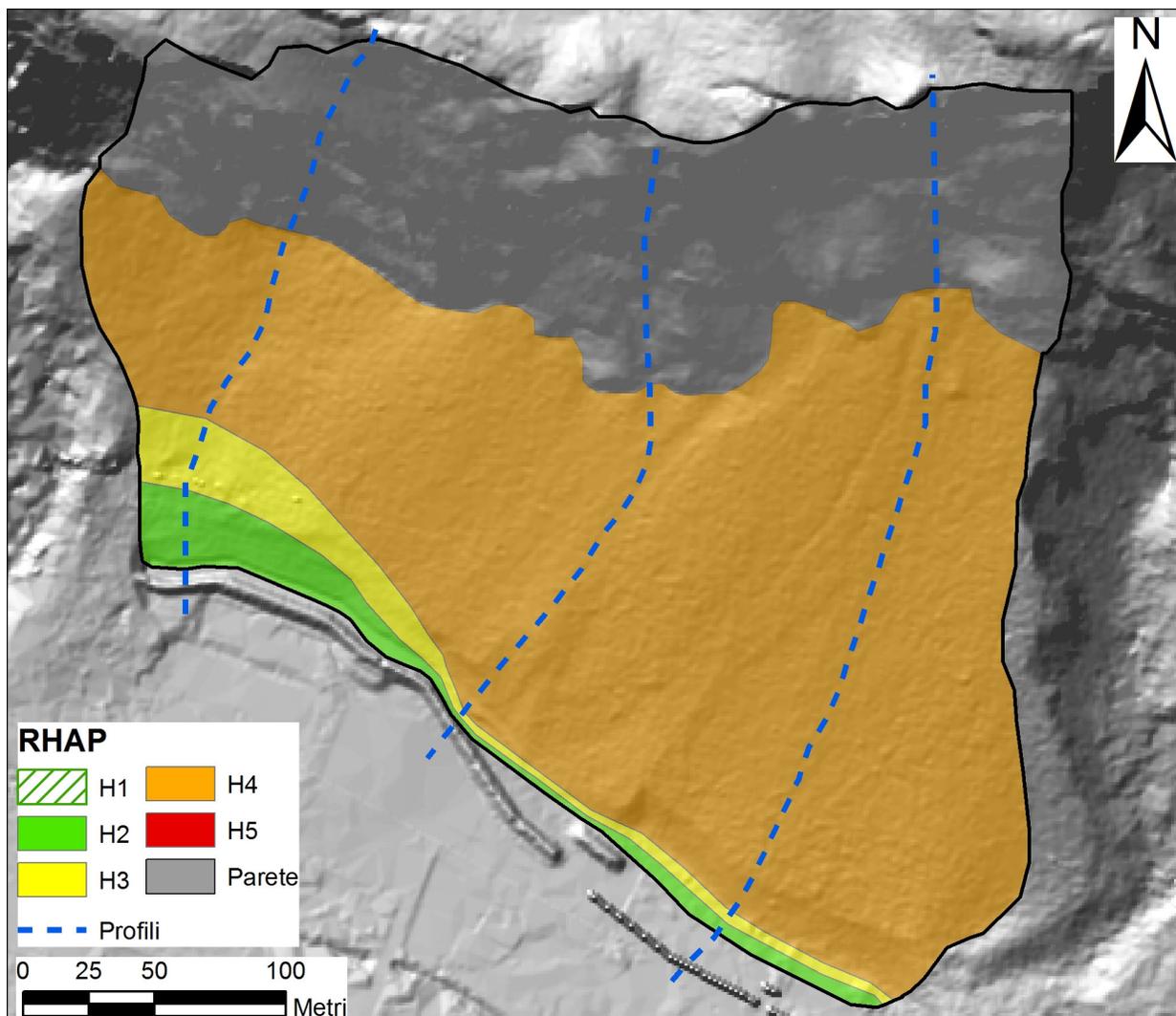


Figura 7.16: Mappa di pericolosità ottenuta per mezzo della metodologia tradizionale.

Nell'area a Nord di Madonna del Sasso la zonazione preliminare della pericolosità viene sempre realizzata interpolando le percentuali di arresto dei blocchi ottenute tramite RocFall per i quattro profili considerati. La probabilità di distacco dei blocchi, invece, non è stata analizzata con la classica procedura di assegnare alle celle della maglia con cui viene suddiviso l'ammasso roccioso, un numero pari alle evidenze di instabilità, ma è stata valutata utilizzando il sorgpro ovvero la carta della suscettibilità realizzata tramite l'analisi cinematica effettuata con Slopmap. La procedura adottata prevede di dividere il *sorgpro* per 100 ed effettuare sul file ottenuto uno *zonal statistics* (nella *spatial analyst*), in cui nello *zone dataset* si introduco i poligoni dei domini omogenei identificati, mentre nel *value raster* il *sorgpro* effettuando poi una selezione sulla media come

parametro da calcolare. In questo modo per ogni poligono dei domini sarà calcolata una media pesata del valore per il singolo dominio, restituendoci un valore di pericolosità per il dominio stesso. I valori ottenuti sono riportati in *figura 7.17*.

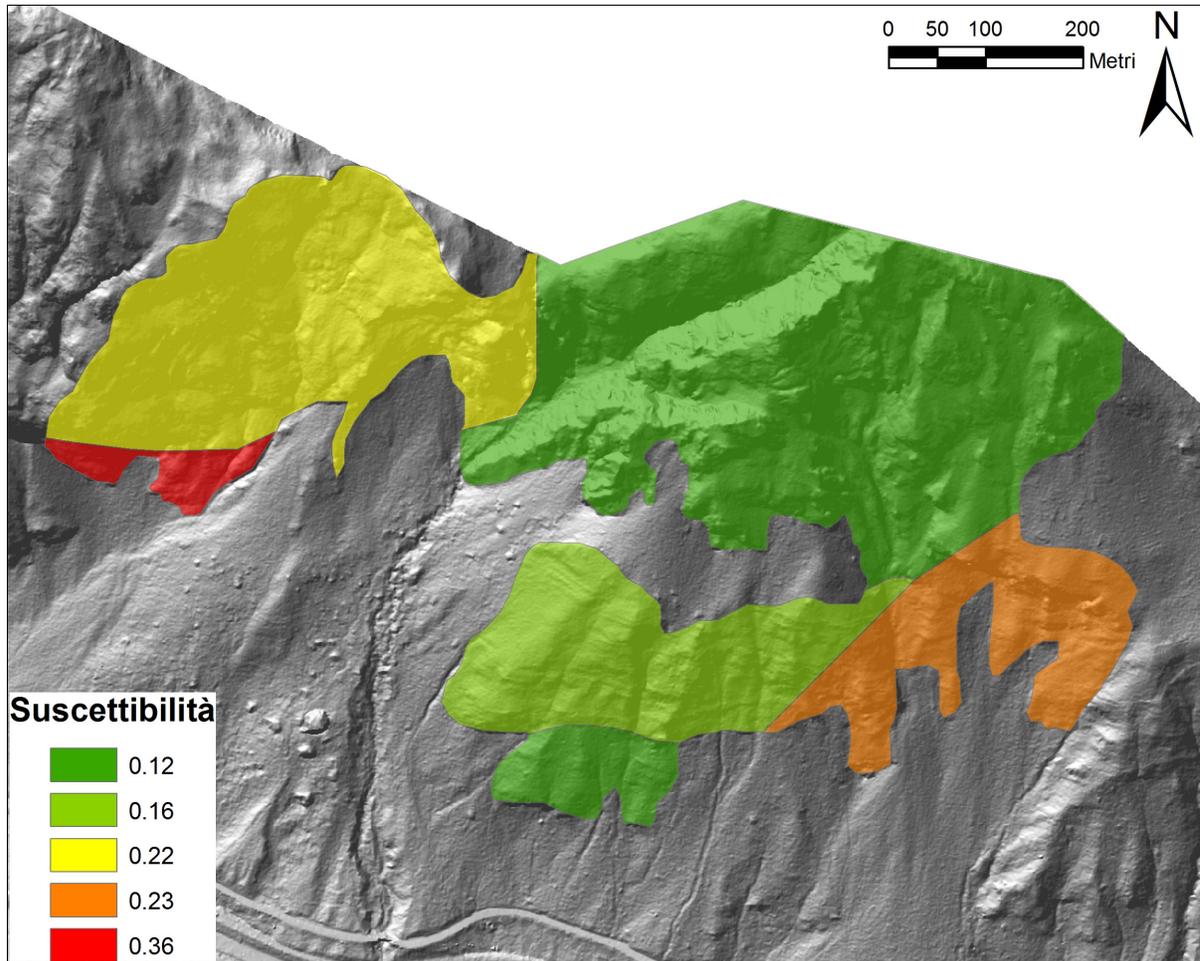


Figura 7.17: Media pesata ottenuta per i singoli domini omogenei a partire dal *sorpro*.

La conseguente zonazione ha portato ad identificare come valore medio 0.22 di conseguenza quelli superiori hanno portato ad un incremento della pericolosità dell'area ad essi pertinente, in termini di probabilità di propagazione dei blocchi che da tali domini possono distaccarsi, mentre un valore inferiore a 0.22 ha portato a una decrescita della pericolosità delle aree sottostanti tali domini. In presenza di una successione verticale dei domini si è data priorità al dominio collocato ad una quota inferiore a patto che la sua pericolosità risultasse maggiore a quella dei domini collocati a quote superiori. La mappa risultante è mostrata in *figura 7.18*.

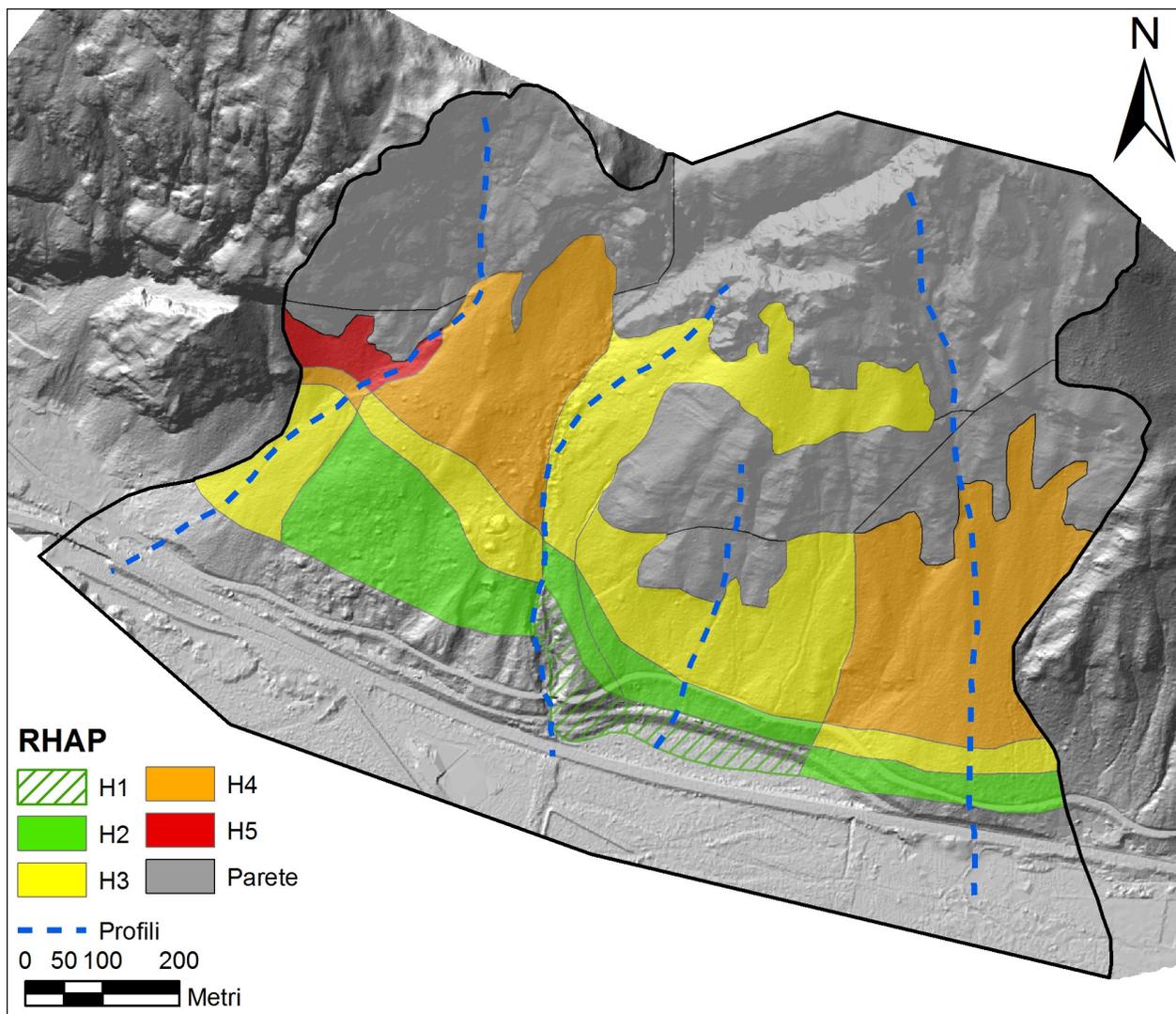


Figura 7.18: Mappa di pericolosità ottenuta per mezzo della metodologia modificata.

Nella valutazione dell'affidabilità delle carte ottenute per mezzo della metodologia RHAP è necessario ricordare che la simulazione bidimensionale, realizzata per mezzo di RocFall, della caduta massi è fortemente dipendente dalla scelta soggettiva del percorso di discesa lungo il quale si effettua la modellazione, dalla topografia del versante e quindi dalla rugosità del LIDAR, dai coefficienti di restituzione e angolo di attrito assegnati ai materiali, dal numero e dal volume dei blocchi lanciati e dalla natura probabilistica con cui viene eseguita la modellazione. Da tali presupposti e considerando i risultati ottenuti si può affermare che tali carte possono essere il punto di partenza per una successiva implementazione delle analisi ma da sole non bastano a dare una corretta caratterizzazione della pericolosità, che risulta essere in alcune aree, come ad esempio a Madonna del Sasso, piuttosto contenuta.

7.3 MODELLO MATEMATICI

I modelli matematici simulano il moto dei blocchi lungo un versante in un contesto bidimensionale o tridimensionale implementando in specifici algoritmi risolutivi le equazioni cinematiche e dinamiche relative ai diversi tipi di moto. I modelli di calcolo proposti in letteratura possono essere classificati in base all'approccio matematico, alle leggi fisiche utilizzate e alle assunzioni introdotte. I modelli matematici più semplici considerano il blocco come un punto materiale (*lumped mass*) nel quale la massa del corpo è concentrata. I modelli di questo tipo permettono di simulare moti di caduta libera, impatto-rimbalzo, rotolamento e scivolamento utilizzando equazioni orarie, che esprimono la posizione del punto materiale, la sua velocità ed accelerazione rispetto al tempo, secondo un approccio di tipo cinematico nel quale il legame tra le forze in gioco e i parametri del moto non è considerato esplicitamente: la massa e il momento di inerzia dei corpi, che esprimono tale legame rispettivamente per moti di traslazione e rotazione, non compaiono infatti nelle equazioni cinematiche. Inoltre, poiché il blocco è descritto come un punto privo di dimensioni finite, non è possibile includere nella modellazione i moti di rotazione del corpo attorno al centro di massa e il relativo contributo all'energia cinetica totale. L'energia cinetica può essere calcolata a posteriori introducendo la massa ai soli fini del calcolo dell'energia cinetica traslazionale dei singoli blocchi. I modelli cinematici permettono di simulare la dissipazione di energia cinetica in corrispondenza degli impatti tramite "funzioni di contatto" semplificate, ovvero i coefficienti di restituzione normale (e_n) e tangenziale (e_t) in termini di velocità. Questi coefficienti permettono di descrivere empiricamente il lavoro di deformazione, gli effetti di attrito e i moti di rotazione istantanei che si verificano in un impatto. Il comportamento tenso-deformativo dei corpi a contatto non può essere descritto, dal momento che il corpo non ha dimensioni finite. Quando il punto materiale entra in contatto col versante, la componente normale della velocità viene ridotta di un fattore e_n . Allo stesso modo, la velocità tangenziale viene ridotta di e_t . Analogamente, i modelli cinematici descrivono i moti di rotolamento secondo un approccio cinematico, simulando lo "scivolamento equivalente" tramite un coefficiente di attrito dinamico al rotolamento ($\tan\phi_r$).

I modelli cinematici presentano importanti limitazioni dal punto di vista teorico, a vantaggio di una maggiore efficienza computazionale, che permette di eseguire un elevato numero di simulazioni in breve tempo e facilita l'implementazione di un approccio probabilistico. Inoltre, questi modelli operano utilizzando pochi e semplici parametri di ingresso. Ciò semplifica la calibrazione dei modelli, che costituisce la fase più importante dell'intero processo di modellazione.

Modelli più sofisticati sono stati proposti per simulare il comportamento di blocchi indeformabili di dimensione e massa finite, caratterizzati da una forma semplice (sfera, disco, cilindro) o complessa (ellissoide, forma qualsiasi) tramite le leggi della dinamica del corpo rigido. I modelli dinamici simulano i moti di rotazione e il relativo contributo in termini di energia, e forniscono una descrizione completa dei fenomeni di impatto-rimbalzo e rotolamento (“puro” o costituito da una successione di rimbalzi ravvicinati).

I modelli dinamici permettono una modellazione deterministica rigorosa. D'altra parte, essi si prestano con difficoltà all'utilizzo di un approccio probabilistico, a causa della notevole complessità computazionale introdotta dalla descrizione fisica. Inoltre, un corretto utilizzo dei modelli dinamici implica la caratterizzazione di un elevato numero di parametri (caratteristiche meccaniche del corpo e del substrato, forma del corpo, ecc.) spesso difficili da acquisire in pratica e che, in ogni caso, introducono ulteriore incertezza nella modellazione di fenomeni già in buona parte “stocastici”. La necessità di introdurre una componente stocastica nella modellazione rende vantaggioso, in campo applicativo, l'utilizzo di modelli cinematici, mentre i modelli dinamici possono fornire un contributo importante nella modellazione di aspetti dinamici specifici quando sono disponibili dati di estremo dettaglio su singoli blocchi e sulle caratteristiche geotecniche di porzioni localizzate di versanti instabili.

L'introduzione di un approccio dinamico semplificato ha portato allo sviluppo di modelli ibridi. Tali modelli utilizzano un approccio cinematico nelle fasi di caduta libera e, talora, per la descrizione dello scivolamento, mentre le equazioni dinamiche simulano i fenomeni di impatto e rotolamento. I modelli ibridi permettono di ottenere simulazioni fisicamente rigorose senza rendere eccessivamente pesante il calcolo. In questo modo è possibile effettuare un gran numero di simulazioni per ogni caso di studio, introducendo una componente stocastica.

La modellazione numerica di caduta massi deve affrontare difficoltà legate a:

- geometria tridimensionale dei versanti naturali. La presenza di canali, creste concavità e convessità implica una serie di effetti meccanici (dissipazione dell'energia e direzioni di rimbalzo “fuori piano”, problemi nella simulazione del rotolamento, ecc.) che aumentano l'incertezza dei risultati e possono rendere inaffidabile una modellazione bidimensionale:
- aleatorietà e variabilità spaziale dei parametri in gioco (geometria del pendio, rugosità del versante e microtopografia, parametri cinematici e dinamici del blocco e del versante) che rendono necessario un approccio spazialmente distribuito con componenti stocastiche;

- conoscenza limitata dei fenomeni di impatto e delle leggi che descrivono la dissipazione di energia durante lo stesso;
- difficile descrizione del rotolamento, che nella realtà non è un moto puro, ma risulta dal concorso di fattori complessi necessariamente semplificati in fase di modellazione;
- scelta delle condizioni che determinano la transizione tra diversi cinematismi;
- fenomeni complessi (frammentazione del blocco all’impatto, proiezione di schegge) difficilmente modellizzabili;
- difficoltà di calibrazione dei modelli;
- difficoltà nella definizione del “blocco di progetto”.

Infine, è molto importante anche l’integrazione tra algoritmi di simulazione della caduta massi e ambienti GIS. Questi hanno potenzialità praticamente illimitate nella gestione dell’informazione geografica (topografia, caratteristiche dei materiali costituenti i versanti, ubicazione delle zone sorgenti). Di conseguenza, l’integrazione operativa tra GIS e modelli di simulazione può fornire uno strumento insostituibile per una modellazione spazialmente distribuita e “multiscala” dei crolli in roccia.

7.3.1 IL CODICE HY-STONE

Hy-Stone (Crosta et al., 2004; Frattini et al., 2008; Agliardi et al., 2009) è un codice di calcolo che permette di simulare il moto di blocchi rocciosi non interagenti in un sistema di riferimento tridimensionale, utilizzando un modello digitale del terreno (DTM) per descrivere la topografia del versante. Il codice utilizza un algoritmo di tipo ibrido in grado di simulare in modo cinematico il moto parabolico ed in modo dinamico i processi di rotolamento ed impatto. La perdita di energia ad impatti successivi è descritta tramite coefficienti di restituzione (normale e tangenziale, e_n ed e_t), mentre la perdita di energia per rotolamento è descritta tramite un coefficiente di attrito dinamico al rotolamento ($\tan\phi_r$). Il blocco è descritto da una forma geometrica solida (sfera, disco o cilindro) dotata di un certo volume e di una certa massa. Il modello è quindi in grado di simulare il moto di rotazione (Crosta et al., 2004). Il codice consente, inoltre, ove ritenuto necessario, la simulazione della presenza della vegetazione, di opere di difesa, dei processi di frammentazione dei blocchi. Per incorporare nel modello l’incertezza dei parametri e la loro variabilità spazio-temporale è possibile effettuare simulazioni di tipo stocastico, lanciando più blocchi da ogni area sorgente e variando

alcuni parametri secondo una certa distribuzione di probabilità all'interno di un certo range stocastico (con un approccio pseudo-casuale) specificato nel file dei parametri (stones.par).

7.3.1.1 I DATI DI INGRESSO (*INPUT*)

Il codice Hy-Stone necessita dei seguenti dati di ingresso, codificati in griglie raster caratterizzate dalla stessa dimensione e risoluzione:

- un DEM, che costituisce una rappresentazione discreta della topografia in formato cellulare;
- una griglia contenente la localizzazione delle sorgenti potenziali di crolli. Ogni cella è caratterizzata da un attributo numerico che la qualifica come “sorgente” e specifica il numero di blocchi che devono essere lanciati;
- due griglie contenenti, rispettivamente, i valori dei coefficienti di restituzione normale (e_n) e tangenziale (e_t) definiti cella per cella;
- una griglia contenente i valori del coefficiente di attrito dinamico al rotolamento ($\tan\phi_r$);
- un file di testo (stones.par) che definisce i parametri di controllo della simulazione. In particolare, il file di parametri permette al programma di riconoscere i nomi dei file GridAscii contenenti i dati di ingresso. Inoltre, esso definisce la velocità iniziale (in m/s), la velocità minima (soglia di arresto), la soglia di transizione tra moti di rimbalzo e rotolamento, la frequenza di calcolo e campionamento dei risultati lungo le traiettorie, la tipologia dei file di *output* e i parametri di controllo della simulazione stocastica.

Eventualmente, si può inserire nei file di *input* anche una griglia che rappresenta la probabilità di innesco, ovvero la probabilità spaziale relativa di innesco di crolli da ciascuna cella sorgente. I valori di questa probabilità sono usati dal codice per scalare il valore della frequenza di crollo calcolata dal modello per ciascuna cella. In questo lavoro la probabilità di innesco (variabile tra 0 e 100%) è stata valutata secondo un approccio deterministico e uno euristico.

La modellazione della caduta massi in Hy-Stone viene eseguita attraverso le seguenti fasi operative:

- importazione o creazione di un DEM in formato raster;
- digitalizzazione e georeferenziazione, attribuzione ed eventuale rasterizzazione dei dati di ingresso richiesti (geologici, geomorfologici e geomeccanici) in ambiente GIS;
- ricodifica dei dati di ingresso tramite un approccio “unique condition” e attribuzione dei parametri di restituzione ed attrito;
- conversione dei dati di ingresso in formato GridAscii (.asc);

- esecuzione e calibrazione del modello in Hy-Stone;
- importazione dei risultati (in formato raster e/o vettoriale) in ambiente GIS per la visualizzazione ed analisi dei risultati.

7.3.1.2 DESCRIZIONE DELLA TOPOGRAFIA

La fase più impegnativa della modellazione numerica della caduta massi consiste nel simulare l'interazione, discontinua nel tempo, del blocco con la topografia (impatto/rimbalzo, rotolamento). La descrizione di tale interazione necessita di una rappresentazione continua (vettoriale) della topografia. La descrizione della topografia fornita dal DEM in formato raster, tuttavia, non è adatta alla modellazione dei processi di impatto/rimbalzo e di rotolamento. Infatti, il DEM è costituito da una matrice quadrangolare (XY) di valori di quota (Z), attribuiti a celle di forma quadrata e dimensione finita, nell'ambito dei quali la quota è costante; il risultato è una superficie "a gradini", che non consente di rappresentare una morfologia continua. D'altra parte, l'utilizzo di una topografia vettoriale sotto forma di una TIN (*Triangulate Irregular Network*) basata sulla triangolazione di Delaunay renderebbe difficoltosa la localizzazione delle zone sorgente e l'attribuzione dei parametri di restituzione ed attrito alle diverse zone del modello.

Il codice Hy-Stone è invece concepito per effettuare una modellazione "cell-based", che consente di gestire senza limitazioni i parametri di ingresso come livelli informativi di dati spaziali in formato raster. I diversi livelli informativi devono essere forniti al codice come matrici congruenti, caratterizzate cioè dalla stessa dimensione e risoluzione. Poiché la topografia è uno di questi livelli informativi, essa deve essere rappresentata tramite un DEM raster. Il problema si risolve implementando un'apposita routine che, partendo dal DEM, costruisce una rappresentazione vettoriale della topografia definita "Rete Regolare di Triangoli" (*Triangulate Regular Network*, TRN). La figura 7.2 descrive il procedimento utilizzato da Hy-Stone per passare da una rappresentazione discreta della topografia (DEM) ad una continua (TRN).

La definizione della TRN permette di introdurre diversi sistemi di coordinate cartesiane, utilizzate dall'algoritmo di calcolo:

- un sistema di riferimento "inerziale" (globale) XYZ, che coincide con il sistema di coordinate del DEM e dei dati di ingresso;

- una serie di sistemi di riferimento “locali” $x_p y_p z_p$, vincolati ai singoli triangoli della TRN. Gli assi x_p e y_p così definiti sono paralleli al piano del relativo triangolo e le loro componenti nel piano XY hanno direzioni parallele agli assi inerziali X e Y, mentre l’asse z_p è perpendicolare al piano del triangolo e diretto verso l’esterno del pendio.

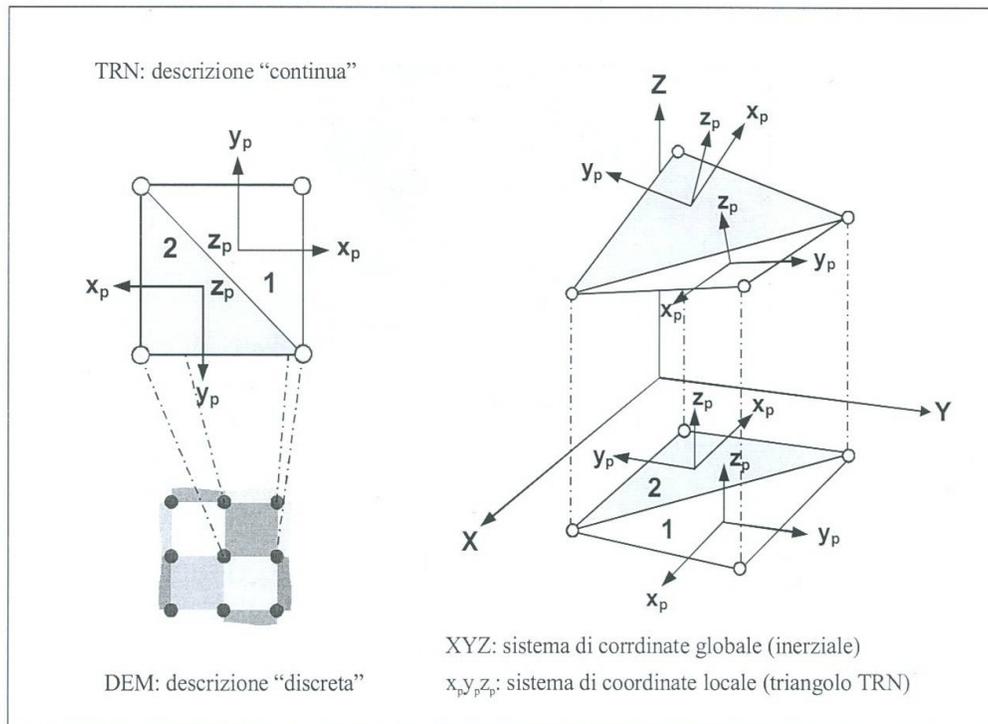


Figura 7.19: Rappresentazione continua della topografia (TRN) calcolata a partire da un DEM in formato raster (Agliardi, 2003)

Il programma calcola le traiettorie di caduta libera nel sistema di riferimento XYZ, trasformando in coordinate locali, tramite apposite matrici di rototraslazione, quando il punto materiale interagisce con la topografia (impatto o rotolamento).

7.3.1.3 I DATI DI USCITA (*OUTPUT*)

Il programma fornisce i risultati della simulazione come file in formato raster (2D) e vettoriale (3D). I risultati raster sono prodotti nello stesso formato (GridAscii) dei file di ingresso affinché possano essere agevolmente importati e gestiti in ArcGIS a scopo di visualizzazione ed analisi. Le griglie raster prodotte (dello stesso formato, dimensione e risoluzione delle griglie di ingresso) contengono le seguenti informazioni:

- numero cumulativo (*count*) dei transiti di traiettorie attraverso ogni cella. Questo valore permette di visualizzare in modo efficace il numero e il pattern delle traiettorie 3D, proiettate “in pianta” in una vista bidimensionale, e rappresenta un “proxy” della frequenza e, indirettamente, della probabilità di transito, fondamentale per la valutazione della pericolosità;
- numero cumulativo delle traiettorie di crollo attraverso ogni cella pesato per il valore della suscettibilità di innesco. A ciascun blocco che passa per una cella è dato un peso che dipende dalla probabilità di innesco relativa della cella sorgente da cui è partito;
- numero cumulativo degli impatti dei blocchi in ciascuna cella. Questo rappresenta un “proxy” della probabilità di impatto in una data cella;
- altezza di volo massima, media e minima (in m) dei blocchi rispetto alla superficie topografica calcolata per ogni cella;
- velocità massima, media e minima (in m/s) dei blocchi in ogni cella;
- energia cinetica totale massima, media e minima (in J) dei blocchi in ogni cella.

I risultati vettoriali sono file in formato Ascii contenenti dati istantanei del moto (massa e momento di inerzia di ciascun blocco), traiettorie tridimensionali, coordinate dei punti di arresto dei singoli blocchi. Nel caso in cui sia stata incorporata nella simulazione anche la presenza delle opere di difesa, il programma produce un ulteriore file Ascii contenente le coordinate dei punti di impatto dei blocchi contro le opere.

7.3.2 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA

Per la modellazione 3D nell'area di Villa Santina, realizzata per mezzo del codice di calcolo Hy-Stone, è stato utilizzato il LIDAR con dimensione della cella di 1 metro.

La carta utilizzata per l'attribuzione dei coefficienti di restituzione e di attrito deriva dalla sovrapposizione (*overlay*) della carta della litologia superficiale e dell'uso del suolo. Da questa operazione si ottiene una “*unique condition map*” costituita da 628 poligoni suddivisi in 32 classi alle quali sono stati associati i coefficienti di restituzione e di attrito riportati nella *tabella 7.3*. Per ricavare i valori dei coefficienti, per le diverse classi, si è partiti da dati di letteratura e in seguito si sono effettuate numerose calibrazioni confrontando i risultati della simulazione sia con i blocchi storici e che con i blocchi mappati sul terreno.

	At	En	Et
Alluvionale - Nudo	0.32	29	86
Alluvionale - Arbusti	0.34	27	86
Alluvionale - Bosco	0.35	25	80
Alluvionale - Bosco Rado	0.35	26	82
Alluvionale - Pascolo	0.32	27	86
Detrito fine - Bosco	0.35	25	77
Detrito medio - Arbusti	0.34	26	83
Detrito medio - Bosco	0.37	26	77
Detrito medio - Bosco Rado	0.35	27	83
Detrito medio - Nudo	0.32	29	84
Detrito medio - Pascolo	0.32	29	86
Detrito grossolano - Bosco	0.40	28	84
Detrito grossolano - Bosco Rado	0.39	30	87
Eluvium - Arbusti	0.32	35	91
Eluvium - Bosco	0.33	30	86
Eluvium - Bosco Rado	0.32	31	87
Eluvium - Pascolo	0.29	32	91
Eluvium - Nudo	0.29	34	91
Roccia debolmente fratturata - Arbusti	0.29	38	90
Roccia debolmente fratturata - Bosco	0.33	35	87
Roccia debolmente fratturata - Bosco rado	0.30	36	90
Roccia debolmente fratturata - Nudo	0.27	40	92
Roccia fratturata - Arbusti	0.30	38	91
Roccia fratturata - Bosco	0.33	33	86
Roccia fratturata - Bosco rado	0.32	34	88
Roccia fratturata - Nudo	0.29	38	91
Urbano - Case	2.00	10	10
Urbano - Cimitero	0.40	25	80
Urbano - Industrie	2.00	10	10
Urbano - Prato	0.31	24	85
Urbano - Rilevato	0.32	20	50
Urbano - Strade	0.27	35	90

Tabella7.3:
Calibrazione dati.

Le mappe dei coefficienti di restituzione, normale e tangenziale, e dell'attrito sono state estratte dalla "unique condition map", attraverso la rasterizzazione dei campi presenti nella tabella degli attributi mappa. Tale operazione viene effettuata tramite il comando *Convert Features to Raster*, *Spatial Analyst*, specificando il campo che si vuole estrarre (figura 7.20).

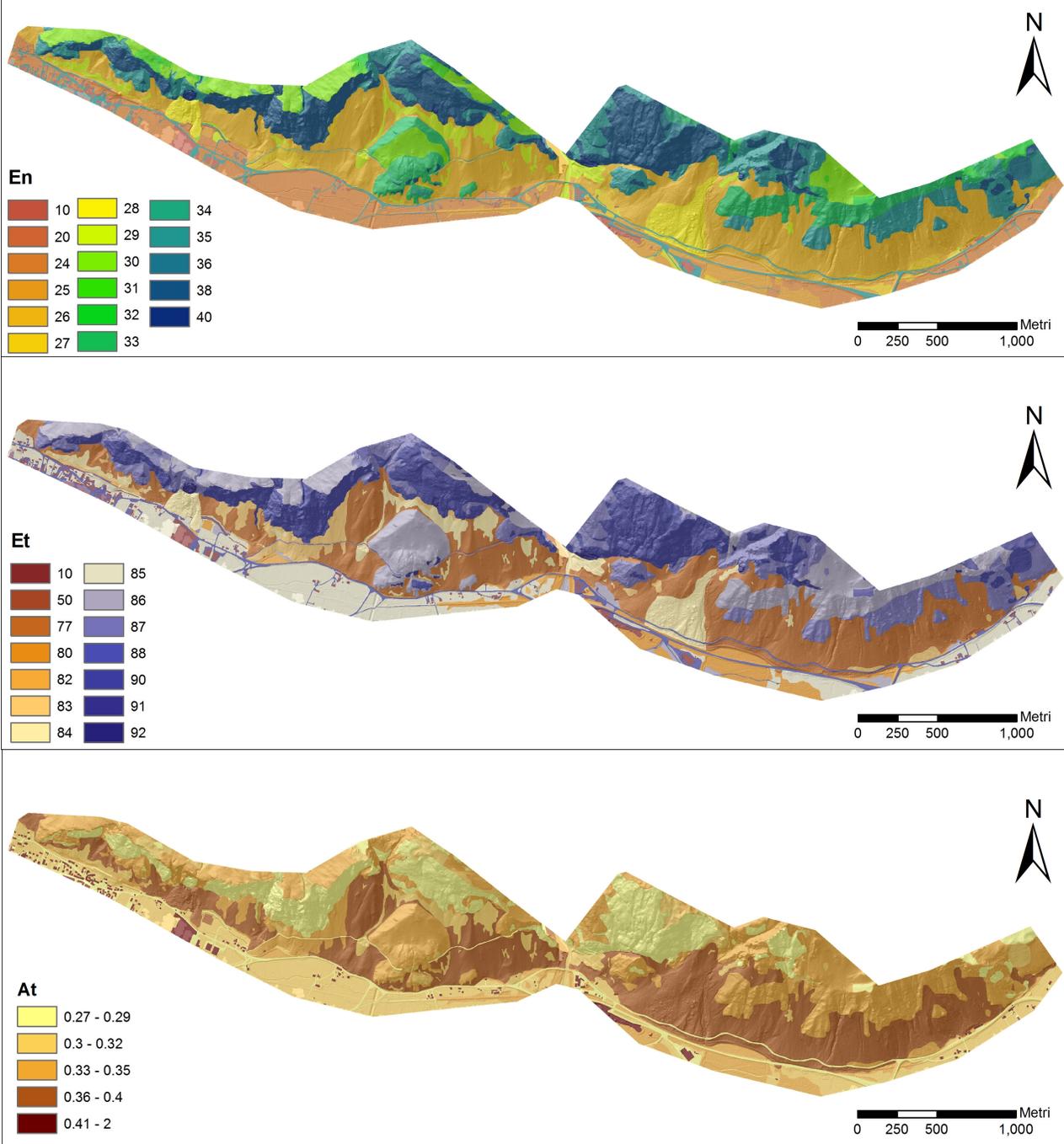


Figura 7.20: Rappresentazione delle mappe estratte dalla "unique condition map", rispettivamente: coefficienti di restituzione normale, tangenziale e l'attrito.

Le simulazioni eseguite nell'area di Villa Santina sono basate sui seguenti parametri in comune:

- i blocchi sono assunti di forma sferica ed aventi una densità pari a 2600 Kg/m^3 ;
- la velocità orizzontale di partenza è assunta pari a $1,5 \text{ m/s}$;
- la distribuzione statistica è esponenziale per il raggio dei blocchi mentre normale per i coefficienti di restituzione ed attrito;
- si considera la presenza delle opere di difesa di data altezza (m) e data energia di assorbimento (J); (tabella 7.4).

Per simulare la presenza delle opere di difesa si deve fornire un file in formato .txt in cui sono riportate le coordinate iniziali e finali dei segmenti che costituiscono le opere, l'altezza e la capacità di assorbimento espressa. Le opere considerate nella modellazione sono muri e barriere rigide, nella realtà sono presenti anche reti in aderenza che tuttavia Hy-Stone non è in grado di simulare e dunque sono omesse. Nel caso di presenza di opere poste al di sopra di rilevati o muri come accade per esempio nel settore occidentale dell'area, a Nord dell'abitato di Villa Santina, è bene effettuare una mappatura quanto più dettagliata possibile delle opere stesse. Questo al fine di simulare correttamente l'opera che altrimenti potrebbe risultare di un'altezza inferiore inficiando la sua efficacia, non fornendo dunque una rappresentazione corretta della realtà.

ID Opera	Height (m)	Energy (J)
3	4.60	40000
4	2.50	230000
6	4.50	500000
7	4.00	40000
8	4.50	2000000
9	4.60	40000
13	6.00	300000
14	3.80	3000000
15	2.60	40000
18	4.00	40000

Tabella 7.4: ID dell'opera e relative informazioni in base ai dati di terreno (altezza) e in base alla tipologia di opera (energia).

Dal punto di vista delle sorgenti sono state introdotte differenti tipologie quali:

- sorgenti lineari; ottenute per mezzo della fotointerpretazione e dell'analisi del LiDAR e tracciate all'interno della carta geomorfologica. Si necessita la realizzazione di un file raster a partire dallo shapefile;
- sorgenti areali, ne sono state utilizzate due tipologie:
 - sorgenti ottenute utilizzando le sorgenti considerate per la realizzazione della carta della suscettibilità all'innescò ricavata con approccio euristico, riclassificate per

attribuire a tutti i pixel lo stesso valore corrispondente al numero dei blocchi lanciati per ciascuna cella, ovvero 10 blocchi per ogni pixel.

- sorgenti ricavate utilizzando i cinematismi reali (*fail_count*) che sono stati calcolati per realizzare la carta di suscettibilità all'innesco basata su un approccio deterministico. Come nel caso precedente è stata realizzata una riclassificazione per ottenere una carta in cui da ogni pixel sorgente vengono lanciati 10 blocchi.

All'interno delle simulazioni, come vedremo nel seguito, vi è anche la possibilità di considerare la suscettibilità all'innesco ovvero la probabilità spaziale che ogni singola sorgente possa dar luogo a degli eventi di crollo. I valori di tale probabilità sono usati dal codice di calcolo per scalare il valore della frequenza di crollo calcolata dal modello per ciascun pixel sorgente.

Entrambe le tipologie di modelli, con e senza suscettibilità, sono stati realizzati nell'ambito dello studio dell'area di Villa Santina.

In particolare si parla di modelli uniformi quando i 10 blocchi previsti in ogni pixel costituente la sorgente hanno tutti la stessa probabilità, pari al 100%, non considerando dunque alcuna suscettibilità all'innesco. Si parla invece di modelli euristici e deterministici se la suscettibilità viene inclusa nella simulazione. Nel complesso sono state realizzate 7 simulazioni date dalle combinazioni tra le diverse sorgenti e i diversi modelli sopra citati (*tabella 7.5*).

Modellazione 3D		Valutazione della Suscettibilità all'Innesco		
		Uniforme	Euristica	Deterministica
Tipologia di Sorgenti	Lineari (13607 celle)	A	D	E
	Areali ^{*1} (609289 celle)	F	B	
	Areali ^{*2} (408216 celle)	G		C

Tabella 7.5: Schema delle simulazioni eseguite in Hy-Stone.

^{*1} → sorgenti da approccio euristico ^{*2} → sorgenti da approccio deterministico.

7.3.2.1 IL BLOCCO DI PROGETTO

Prima di proseguire con le modellazioni realizzate è bene fare una precisazione sulla determinazione del blocco di progetto.

Tale parametro rappresenta il blocco di dimensione modale per il quale si simula la traiettoria di caduta. La definizione del suo volume costituisce, pertanto, un passaggio determinante ai fini del calcolo dell'energia cinetica durante la modellazione. Una possibilità di determinazione si basa sulle tecniche di rilevamento di campo. Analizzando i dati relativi ai rilievi geomeccanici eseguiti in una certa area è possibile ricavare il valore di VRU medio. Tuttavia tale metodologia risulta essere valida alla scala del singolo versante, in quanto considerando un'area di diversi Km² i siti dei rilievi geomeccanici rappresentano un'informazione eccessivamente localizzata su cui basare la valutazione del volume del blocco di progetto per la modellazione dell'intera area.

Per questo motivo la determinazione di tale valore si è basata sulle informazioni derivanti dall'insieme dei blocchi mappati durante l'attività di terreno che dato l'elevato numero (1628) costituiscono un campione statistico sufficientemente rappresentativo.

Inizialmente, al blocco di progetto, era stato assegnato un raggio sferico di 0.25 m, ovvero il raggio calcolato dal volume modale dell'intero dataset dei blocchi (*vedere tabella 5.2*). Oltre a questo parametro la simulazione prevede anche la definizione del volume massimo che è possibile si distacchi dalle pareti, la scelta di tale valore è stata fortemente soggettiva, in funzione del volume che più frequentemente compariva all'interno del dataset acquisito sul terreno, pari ad un volume di 5m³.

I risultati delle simulazioni ottenute con tali parametri di forniscono una distribuzione dell'energia cinetica eccessivamente contenuta a causa, appunto, del ridotto volume del blocco modale. A tal fine è stato definito un nuovo blocco di progetto per mezzo di un metodo statistico più oggettivo. Considerando l'intero dataset dei volumi dei blocchi, è stato creato un *box-plot* col programma *OriginPro*. In statistica, il *box-plot* è una rappresentazione grafica utilizzata per descrivere la distribuzione di un campione tramite semplici indici di dispersione e di posizione, risulta costituito da un rettangolo diviso in due parti, da cui escono due segmenti. Il rettangolo è delimitato dal primo e dal terzo quartile, $q_{1/4}$ e $q_{3/4}$, e diviso al suo interno dalla mediana, $q_{1/2}$. I segmenti sono delimitati dal minimo e dal massimo dei valori. In questo modo vengono rappresentati graficamente i quattro intervalli ugualmente popolati delimitati dai quartili. Esistono scelte alternative per rappresentare il *box-plot*; tutte concordano sui tre quartili per rappresentare il rettangolo ma differiscono per la lunghezza dei segmenti, solitamente scelti più corti per evitare valori troppo "estremi" (*outliers*), che

vengono solitamente rappresentati solo come dei punti. Una delle alternative scelte prevede di delimitare i segmenti con i valori $(5q_{1/4}-3q_{3/4})/2$ e $(5q_{3/4}-3q_{1/4})/2$, in modo che entrambi i segmenti siano lunghi 1.5 volte lo scarto interquartile, il quale rappresenta l'indice di dispersione, dato dalla differenza tra il primo e il terzo quartile. Dopo aver costruito un primo *box-plot* di tutto il dataset, ne è stato creato un secondo contenente solo i volumi non considerati come *outliers* dal primo *box-plot*. In questo secondo *box-plot* (figura 7.21) gli *outliers* vengono individuati considerando un coefficiente di 1,5. Tale coefficiente controlla la lunghezza dei segmenti (*whisker*) del *box-plot*. Il volume medio calcolato in questo secondo *box-plot*, pari a 0.45m^3 , è stato considerato come volume modale dei blocchi e si è scelto di utilizzare tale valore per le modellazioni (raggio di 0.47m). Il volume massimo che viene ricavato con il metodo degli *outliers* con coefficiente di 1.5 risulta essere di 3m^3 pari ad un raggio di 0.9 m. Tale volume è stato considerato troppo piccolo considerando i blocchi di elevate dimensioni che sono stati mappati in sito (volume fino a 576m^3 , con un unico valore superiore pari a 5640m^3).

Si è reso dunque necessaria la realizzazione di un ulteriore *box-plot* (figura 7.22) per la definizione del volume massimo, in cui si pone l'estremità dei segmenti in corrispondenza del quinto e del novantacinquesimo percentile (*Whisker 5-95*). In tal modo il volume massimo dei blocchi risulta pari a 19m^3 ovvero ad un raggio di 1.65m. La combinazione ultima risulta essere un valore medio determinato con il metodo degli *Outliers* ed un valore massimo attraverso il metodo *Whisker 5-95*.

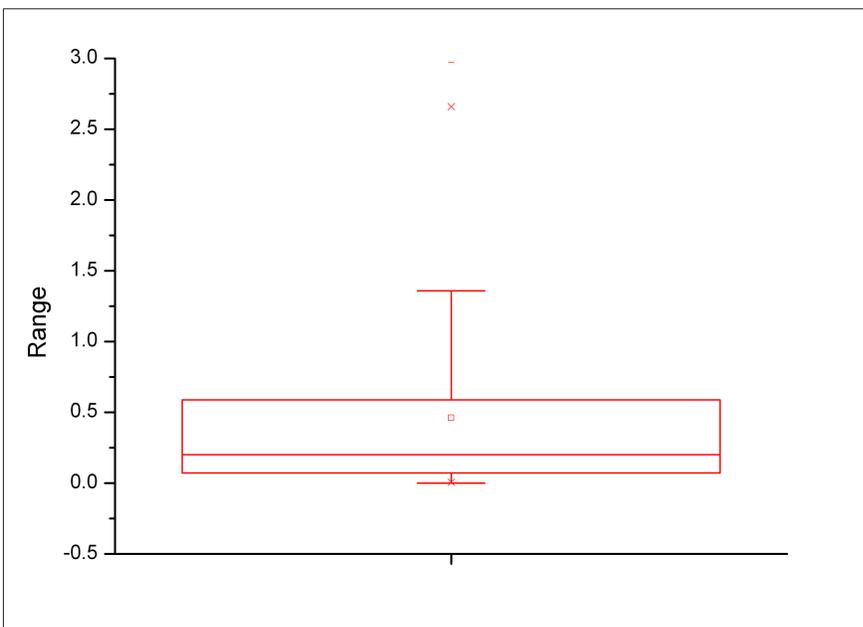


Figura 7.21: Box plot, realizzato con il metodo degli *outliers* con coefficiente 1.5. Il tratto indica il volume massimo, mentre il quadrato il volume medio.

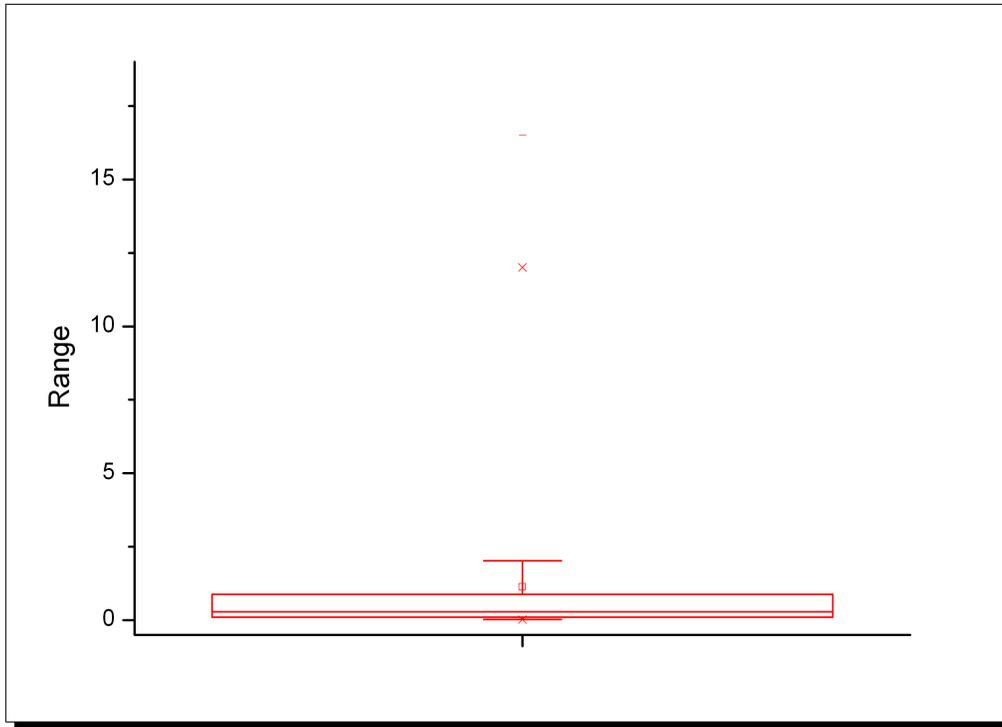
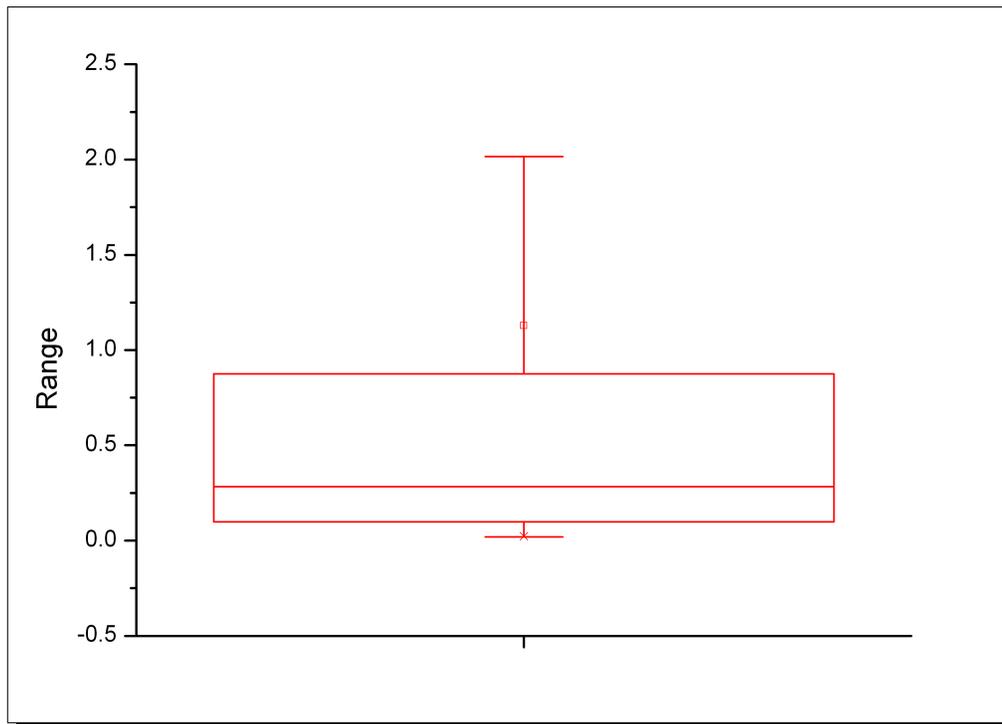


Figura 7.22: Sopra: è visibile il box plot realizzato con il metodo degli *Whisker 5-95*.
Sotto: un ingrandimento sul volume medio.
Simbologia come *figura 7.21*.



Come citato sopra l'effetto della modifica del blocco di progetto si ripercuote sulla carta dell'energia cinetica. Si può notare che nel primo modello (*figura 7.23a*) i valori di energia cinetica sono in gran parte collocati entro le prime due classi, dunque inferiori a 700.000 J; mentre nella secondo (*figura 7.23b*) superano i 2.500.000 J. L'energia cinetica costituisce uno dei parametri di ingresso nel calcolo delle carte di pericolosità, di conseguenza la pericolosità risulterà maggiore, e dunque più realistica, utilizzando un blocco di progetto di volumetria superiore al valore modale identificato sulla base del dataset raccolto sul terreno.

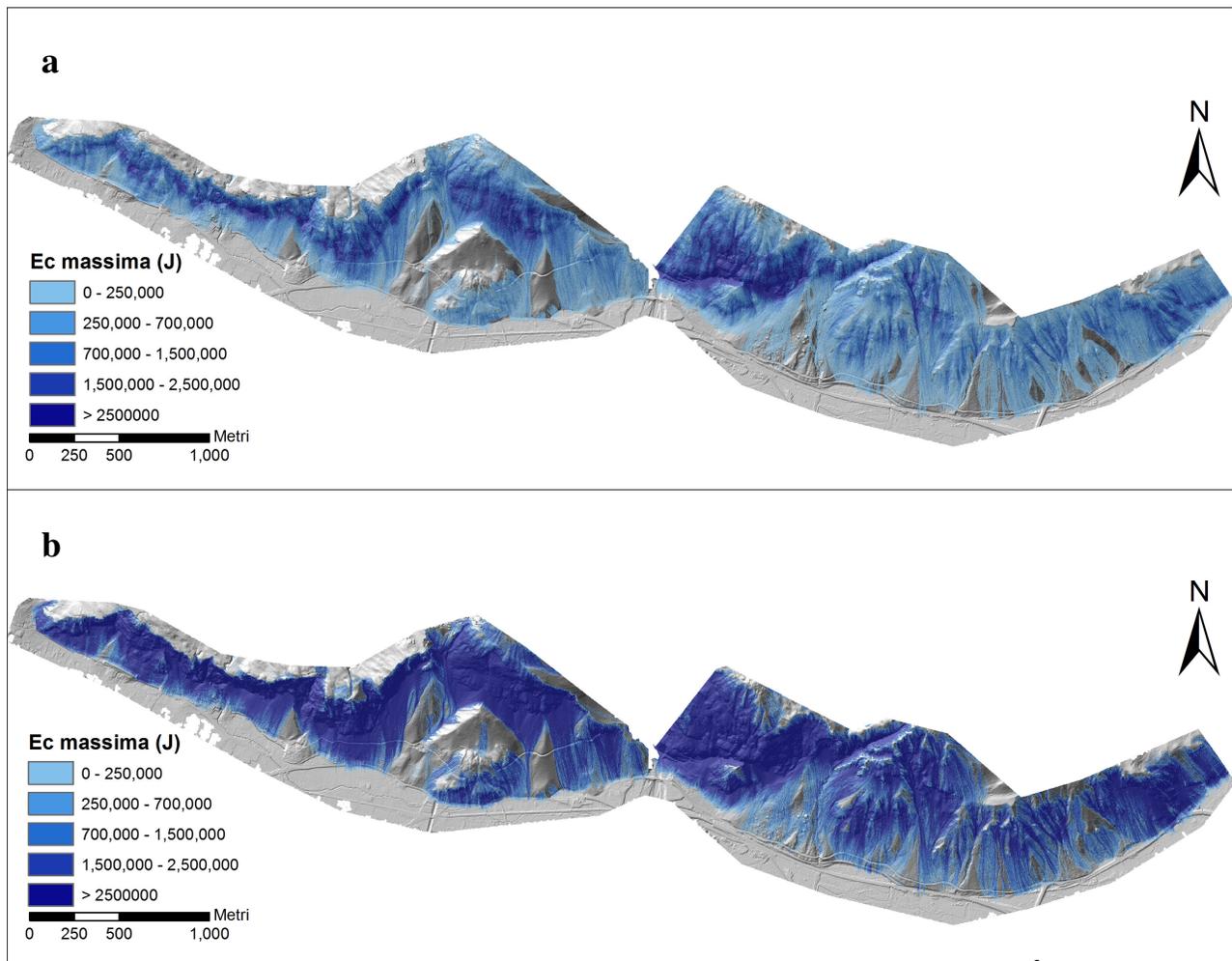


Figura 7.23: Confronto tra le energie cinetiche ottenute con il volume pari a 0.07m^3 (a) e con il volume medio con il metodo degli outliers pari a 0.45m^3 (b).

7.3.2.2 MODELLAZIONI ESEGUITE

Passiamo ora in rassegna le modellazioni eseguite (*tabella 7.5*).

➤ **SIMULAZIONE A: SORGENTI LINEARI CON SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO UNIFORME**

Il numero di lanci eseguito nelle modellazioni è dato dal numero di blocchi lanciati da ogni pixel sorgente moltiplicato per il numero di celle sorgenti. In questa simulazione dunque si avranno 136.070 lanci (13607 pixel x 10 blocchi da ognuno). Come già precisato in precedenza in tale tipologia di modellazione non è stata specificata alcuna probabilità di innesco, quindi i 10 blocchi partono da ciascun pixel sorgente con la stessa probabilità pari al 100%. Il risultato della simulazione è fortemente influenzato dal grado di dettaglio con cui le nicchie di distacco sono state digitalizzate. In presenza di una non corretta mappatura si può verificare il caso in cui la topografia può portare alla propagazione dei blocchi in direzioni differenti da quelle plausibili. Il basso numero di celle sorgenti rispetto al caso areale controlla fortemente i risultati.

Nelle seguenti immagini (*figura 7.24a/b*) sono riportate le mappe di output di questa simulazione.

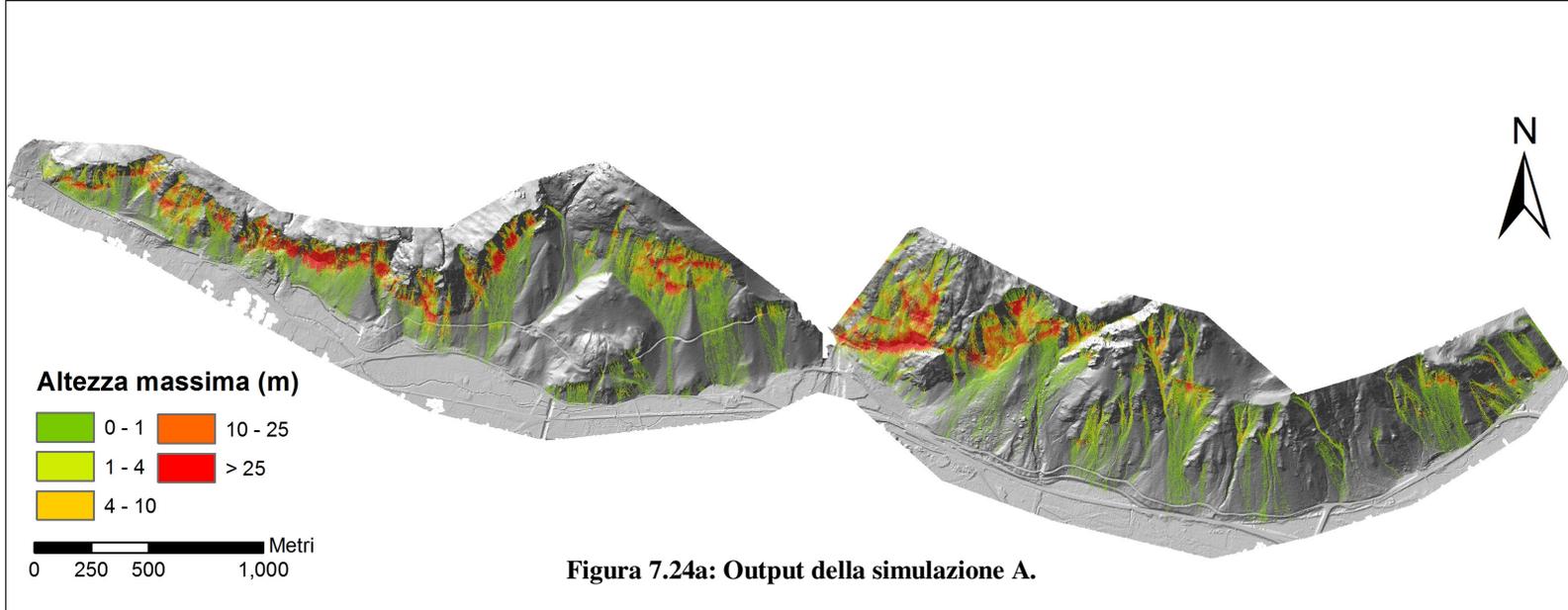
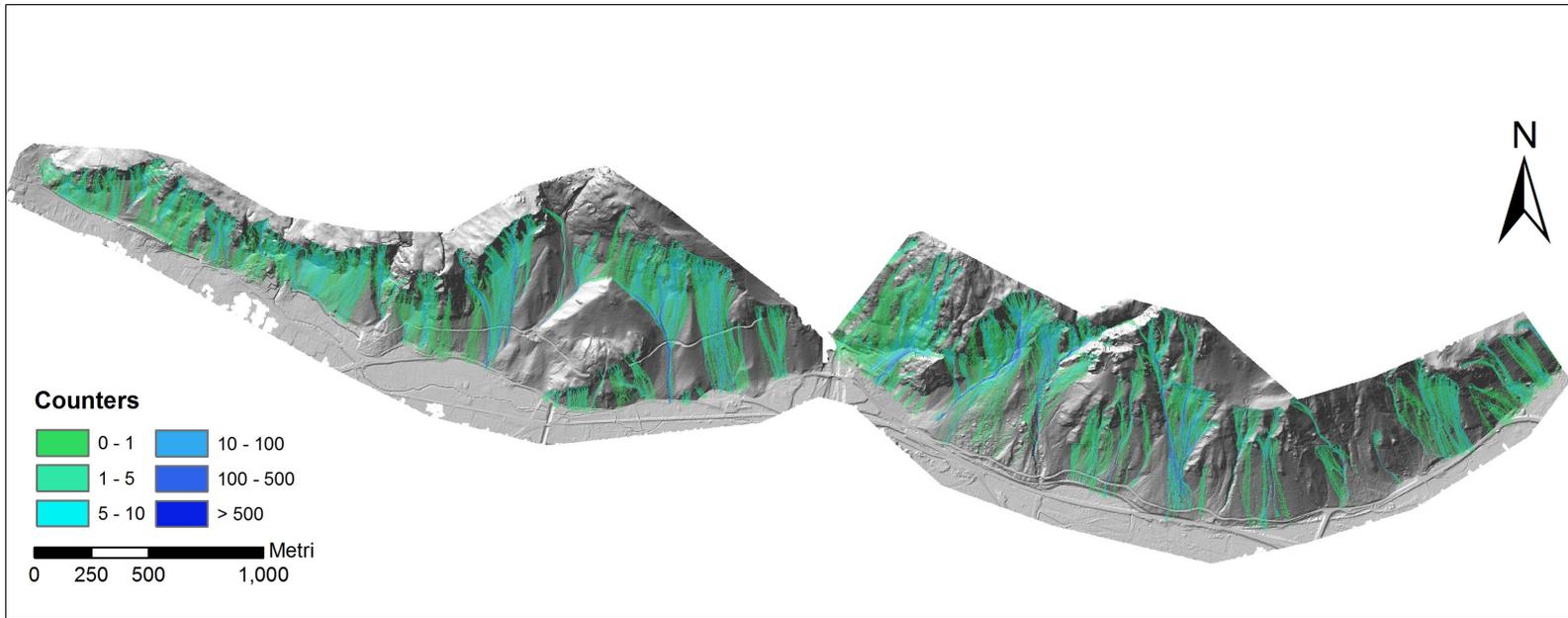


Figura 7.24a: Output della simulazione A.

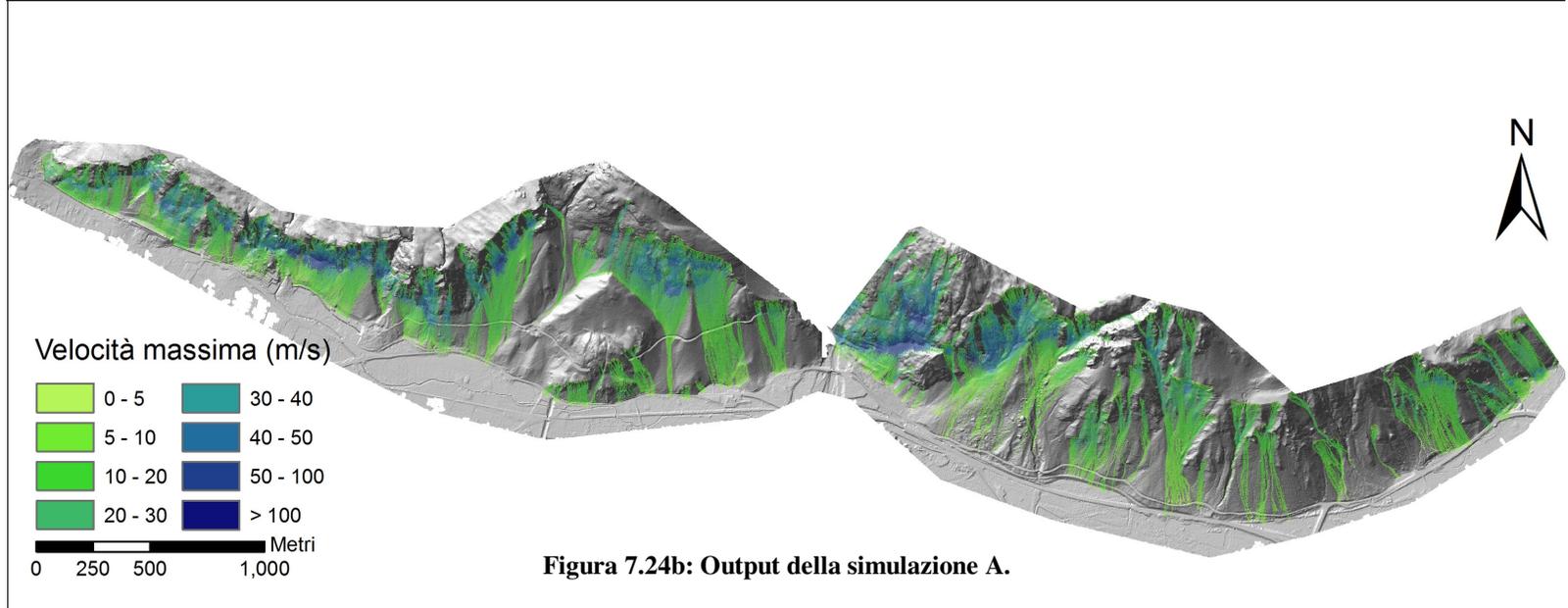
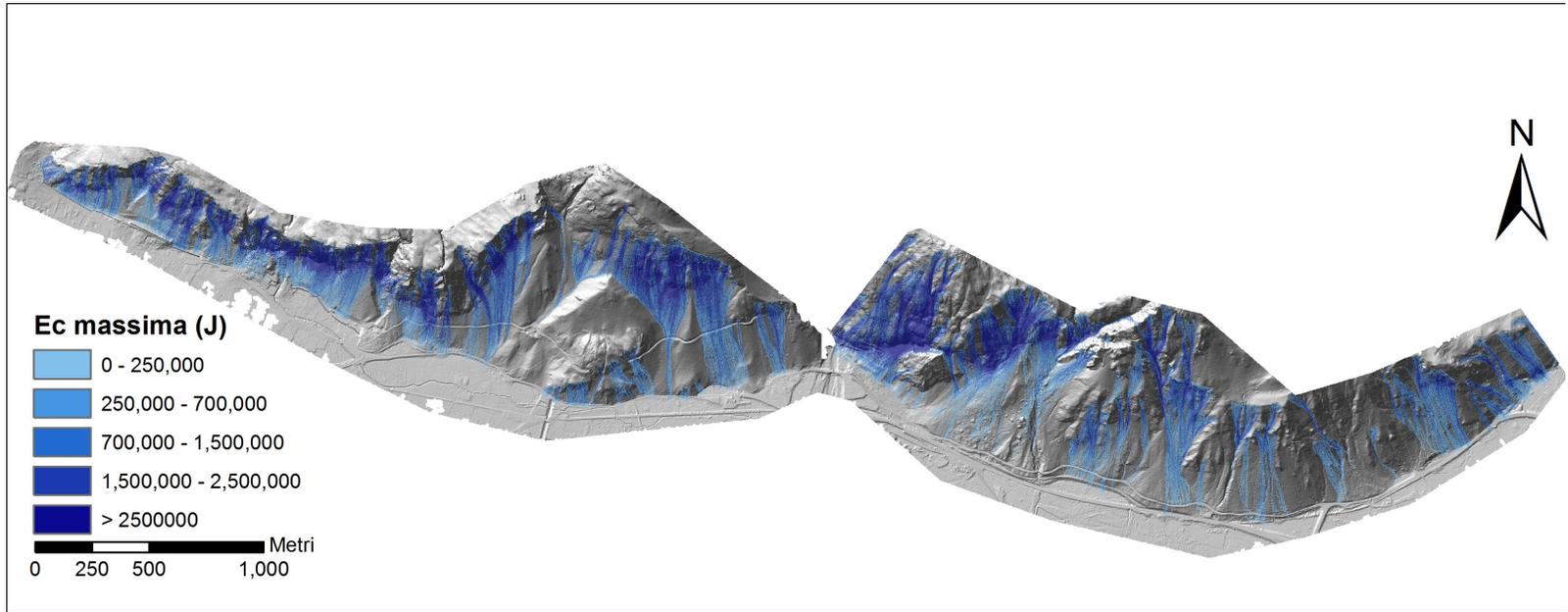


Figura 7.24b: Output della simulazione A.

➤ **SIMULAZIONE B: SORGENTI AREALI CON SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO VALUTATA CON APPROCCIO EURISTICO**

Le sorgenti utilizzate in tale simulazione occupano un'area pari a 0.6km^2 provocando un lancio di 6.092.890 di blocchi.

Dai risultati riportati può essere facilmente osservata la differenza rispetto alla simulazione ottenuta per mezzo delle sorgenti lineari. Per incorporare nel modello l'incertezza dei parametri utilizzati si effettuano simulazioni di tipo stocastico facendo variare alcuni parametri secondo una certa distribuzione di probabilità all'interno di un certo range stocastico, che nella simulazione è stato posto pari al 40%.

Si precisa che la simulazione **F** è identica alla simulazione **B** a patto di considerare il count invece che il count pesato, in quanto il modello **F**, essendo un modello uniforme, non presenta suscettibilità all'innesco.

Nelle seguenti immagini (*figura 7.25a/b*) sono riportate le mappe di output di questa simulazione.

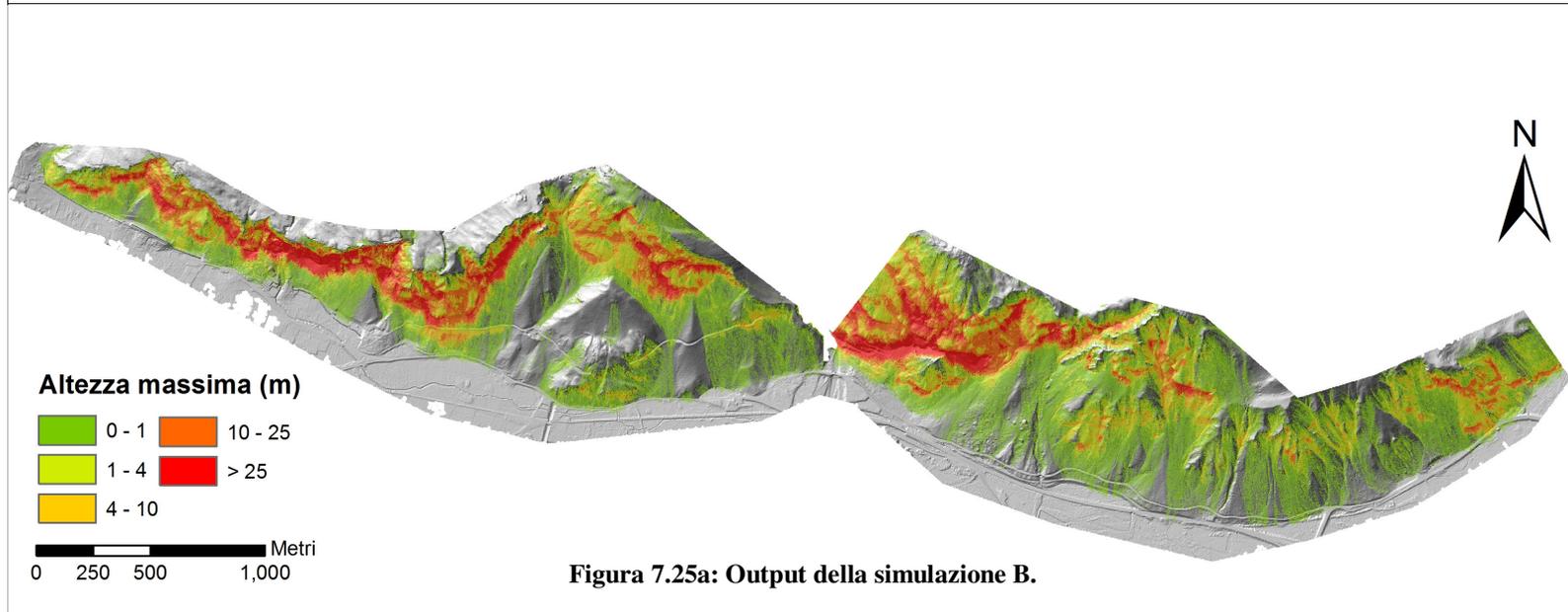
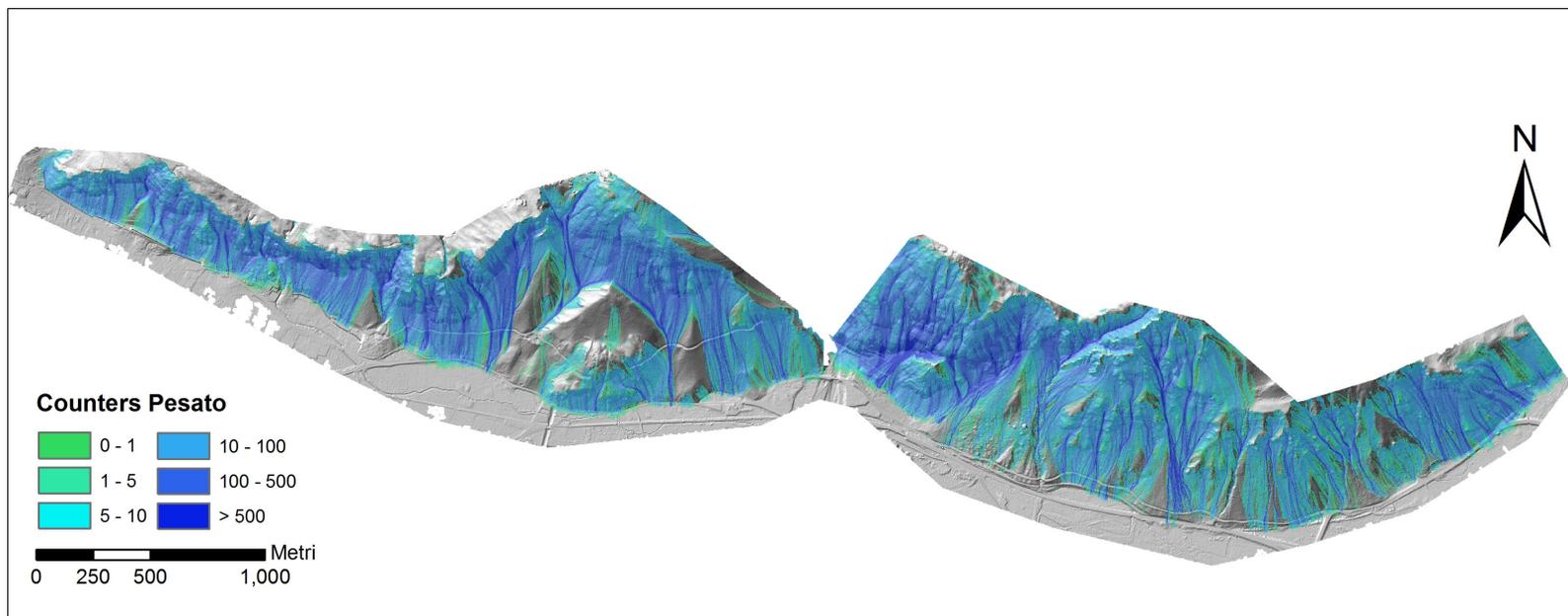


Figura 7.25a: Output della simulazione B.

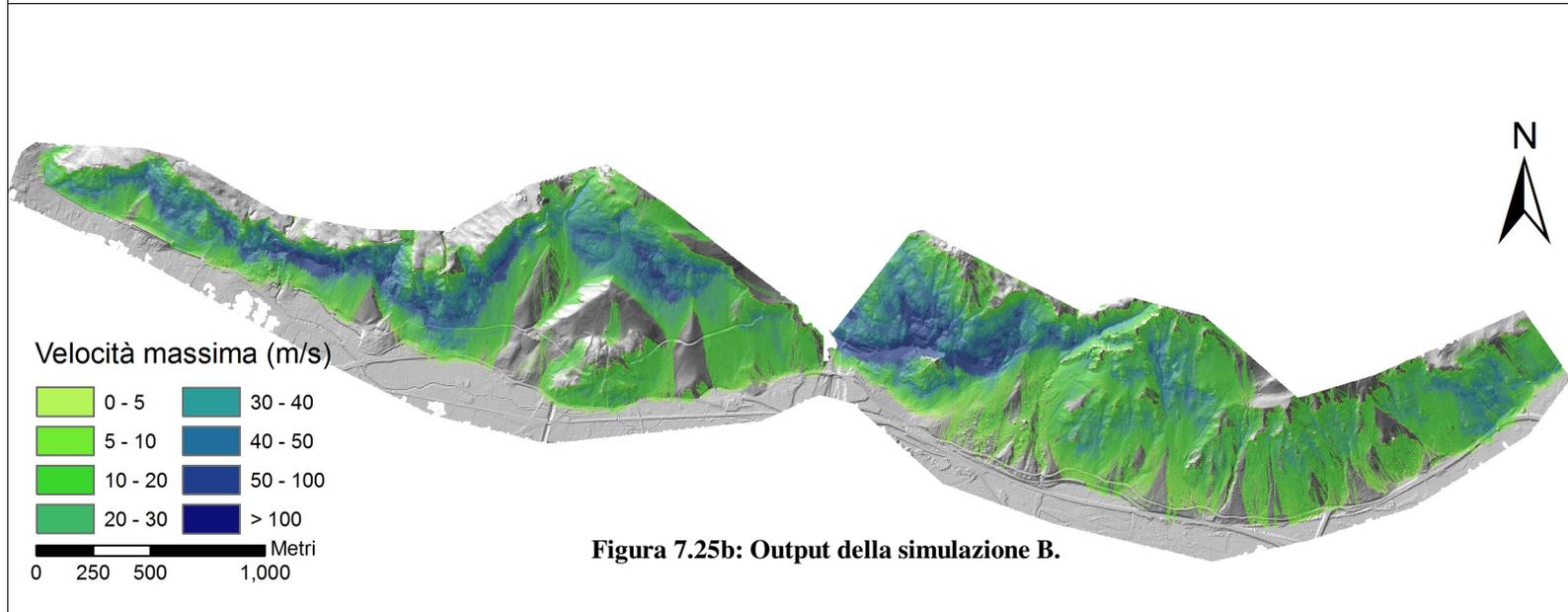
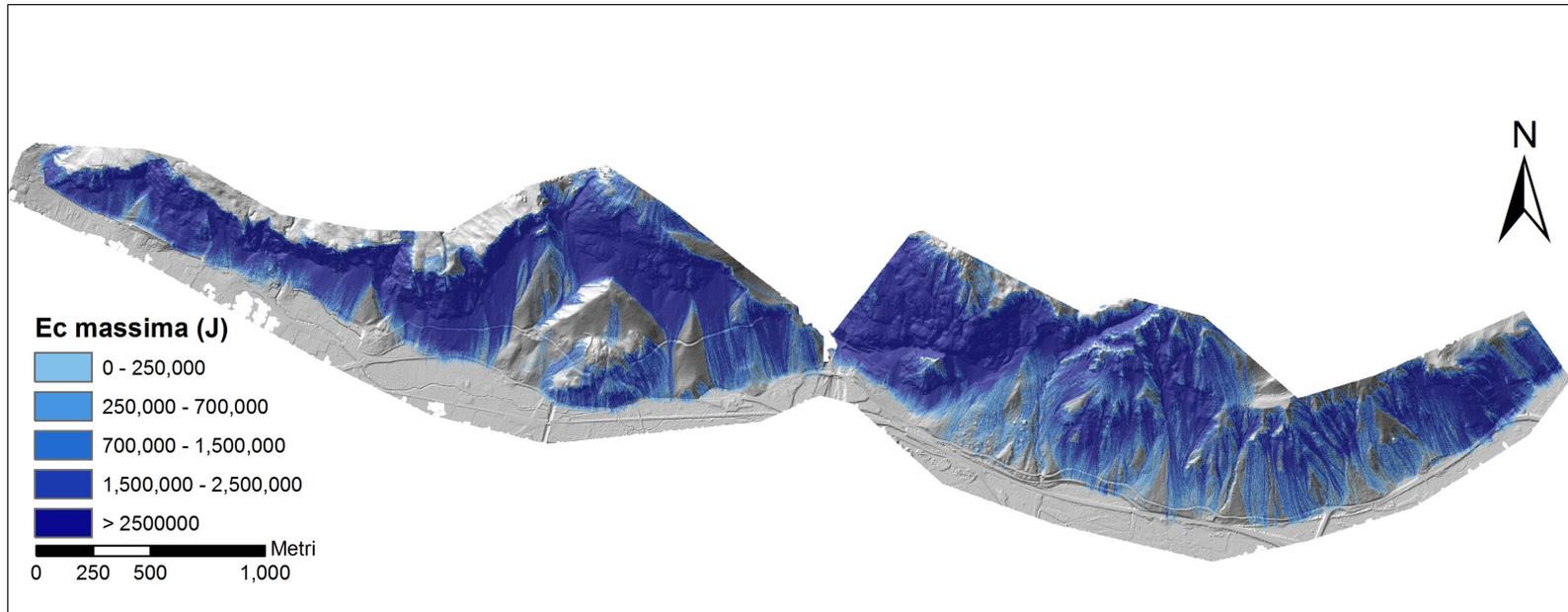


Figura 7.25b: Output della simulazione B.

➤ SIMULAZIONE **C**: SORGENTI AREALI CON SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO VALUTATA CON APPROCCIO DETERMINISTICO

Per la realizzazione di questo modello, considerando l'elevato tempo macchina (fino a due settimane per l'area in esame), sono state considerate solo le sorgenti areali e la suscettibilità all'innesco aventi una pendenza maggiore a 55°. Con tale accorgimento si è passati da un numero di celle sorgenti pari a 1.084.438 a uno di 408.216. L'aggiunta dell'informazione della pendenza alla modellazione ha avvalorato la veridicità del modello in termini di approssimazione della realtà, inquanto è più probabile un'instabilità superiore a pendenze maggiori.

Come nella simulazione precedente è stato posto uno *stochastic range* del 40%, in modo da considerare un certo grado di incertezza sui dati di ingresso.

Si precisa che la simulazione **G** è identica alla simulazione **C** a patto di considerare il count invece che il count pesato, in quanto il modello **G**, essendo un modello uniforme, non presenta suscettibilità all'innesco.

Nelle seguenti immagini (*figura 7.26a/b*) sono riportate le mappe di output di questa simulazione.

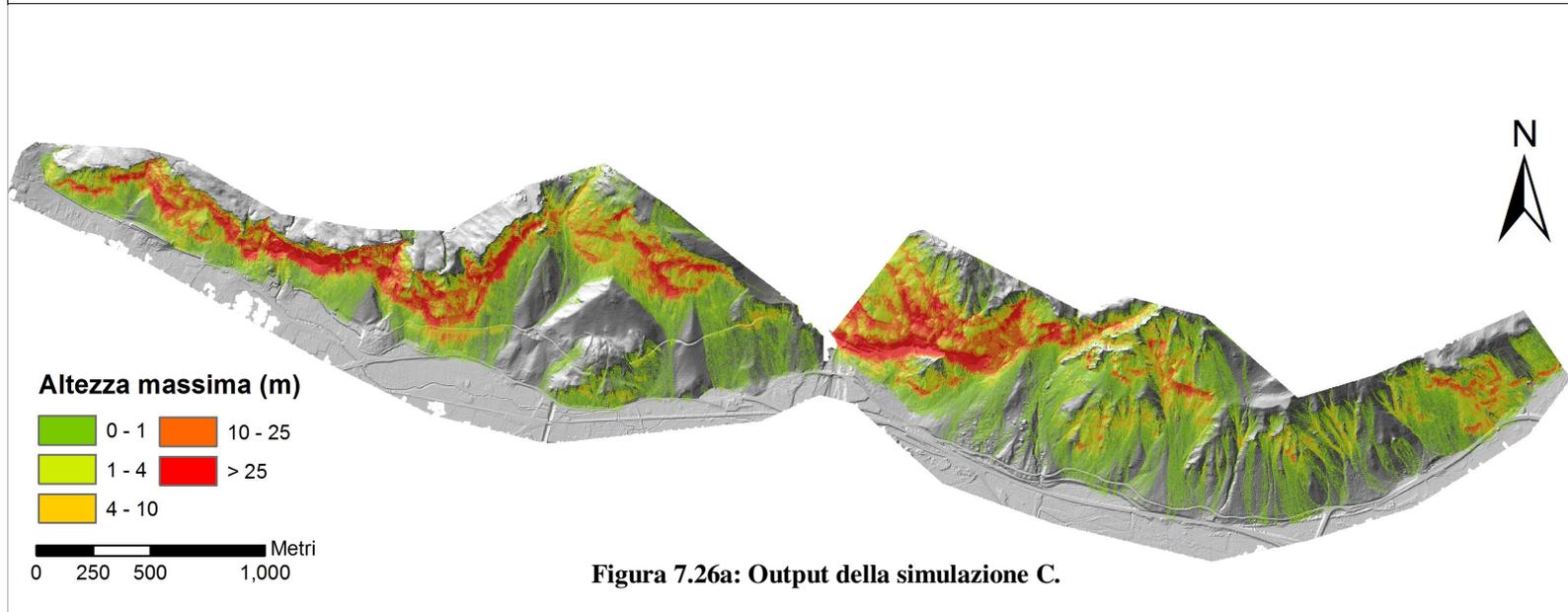
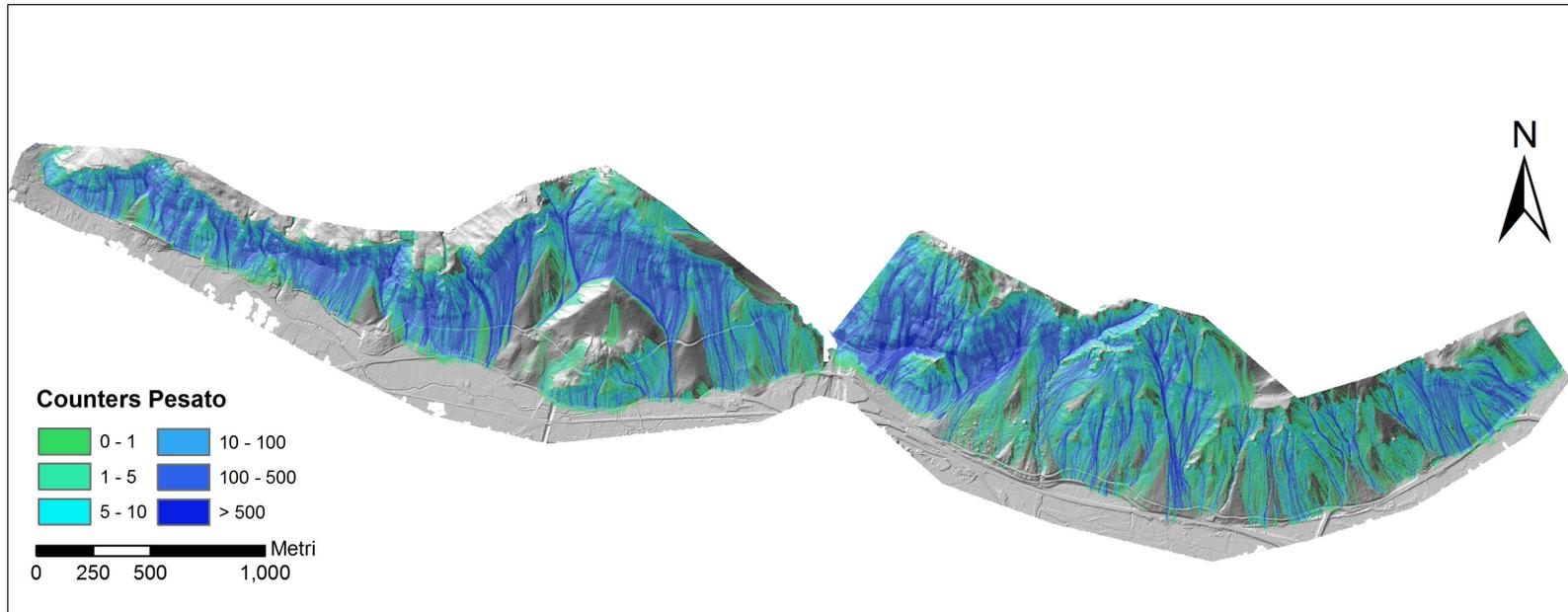


Figura 7.26a: Output della simulazione C.

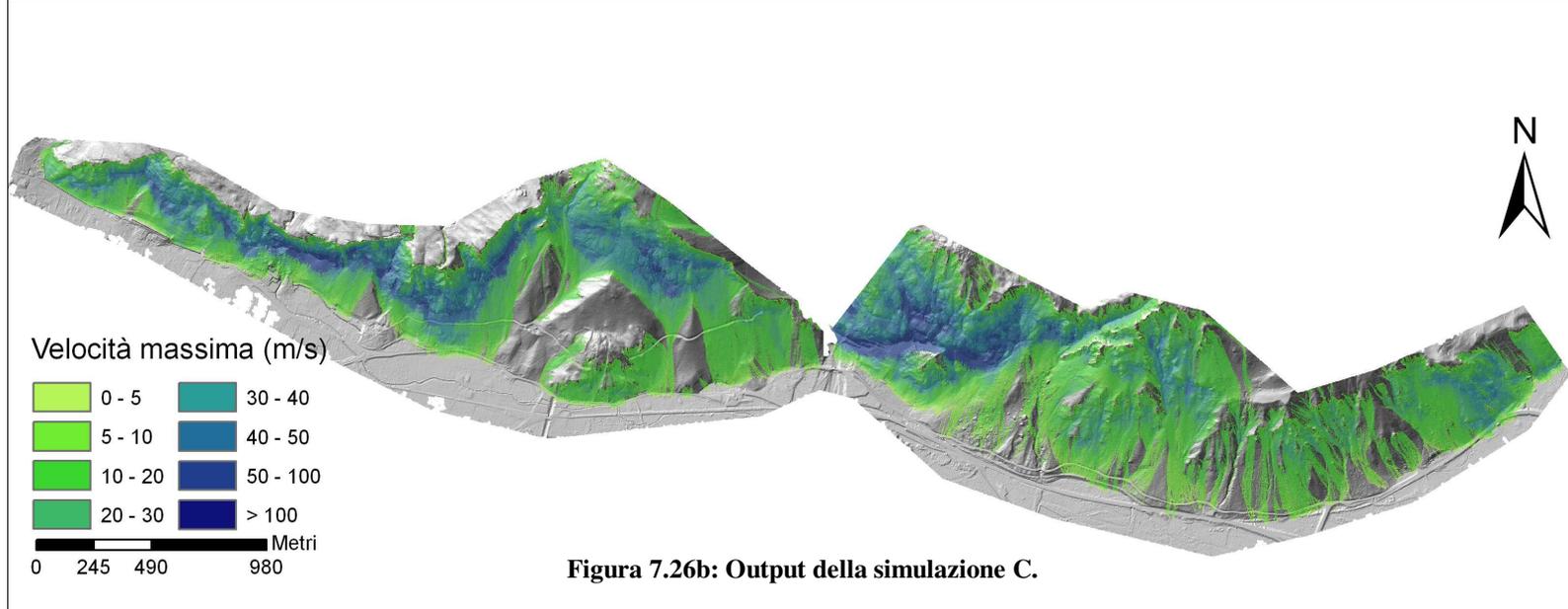
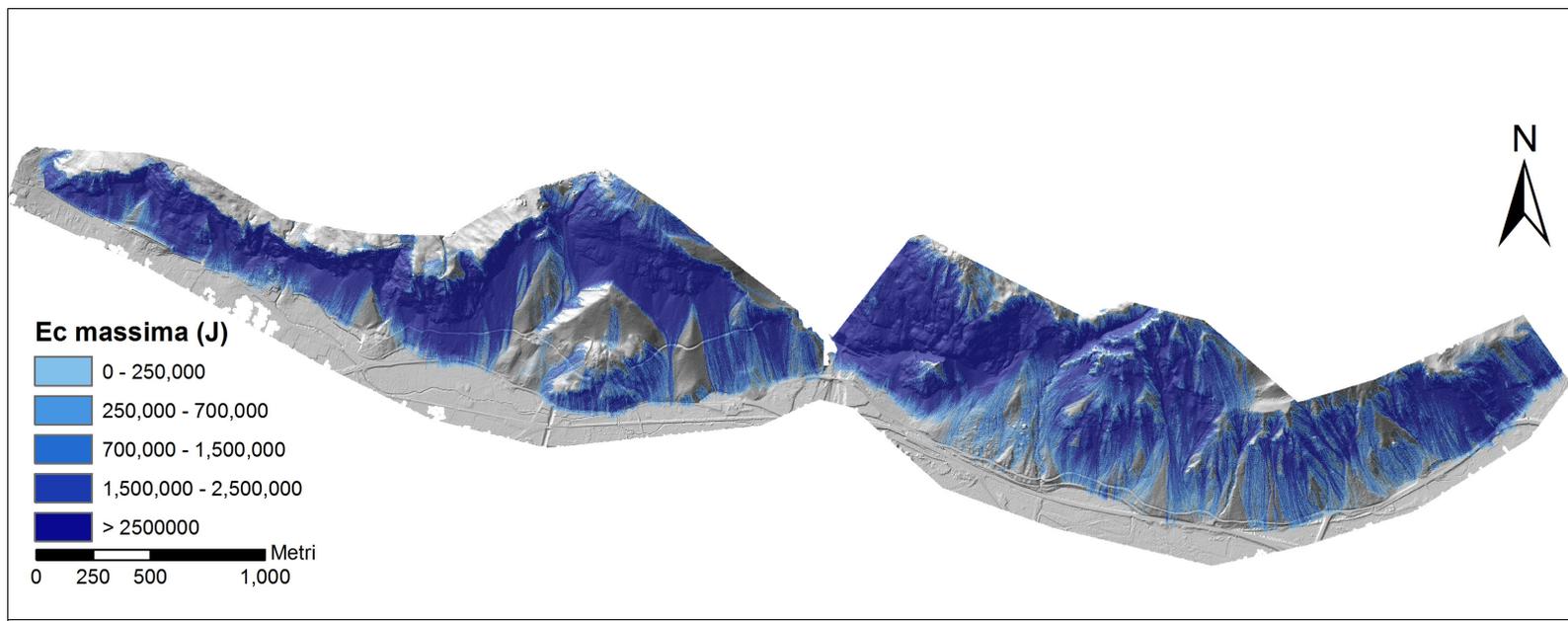
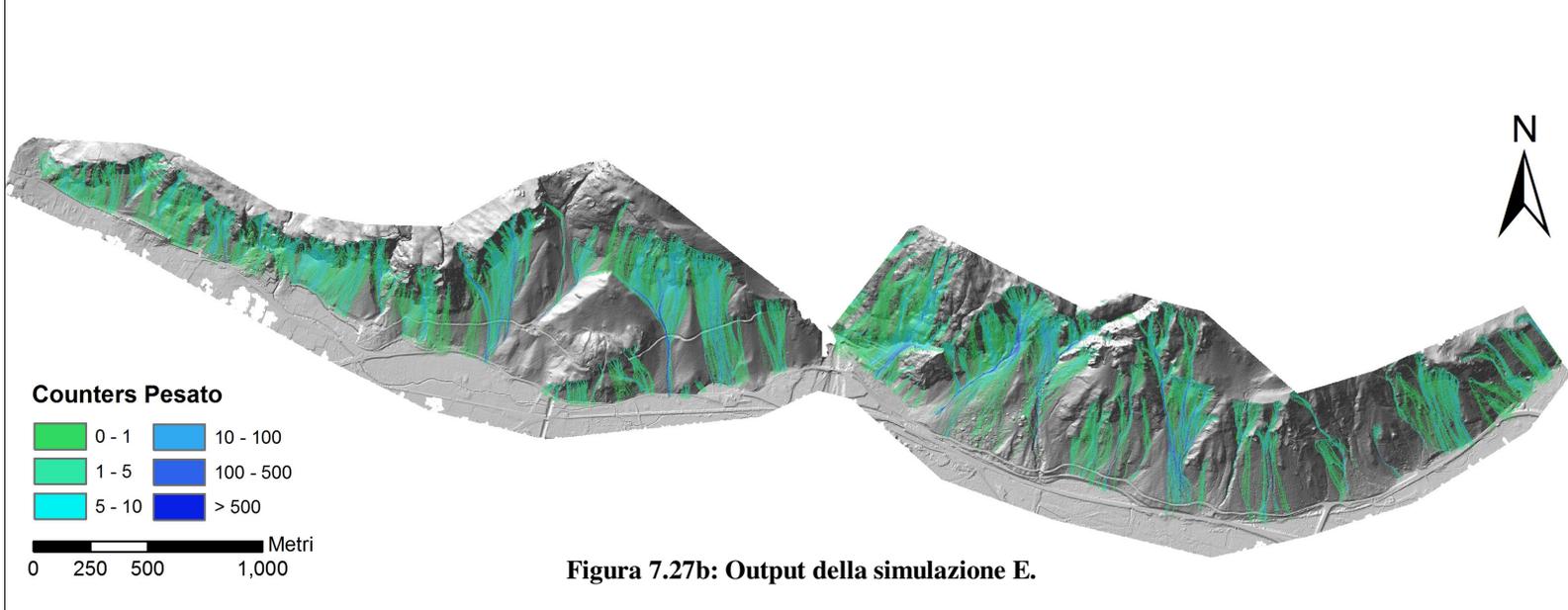
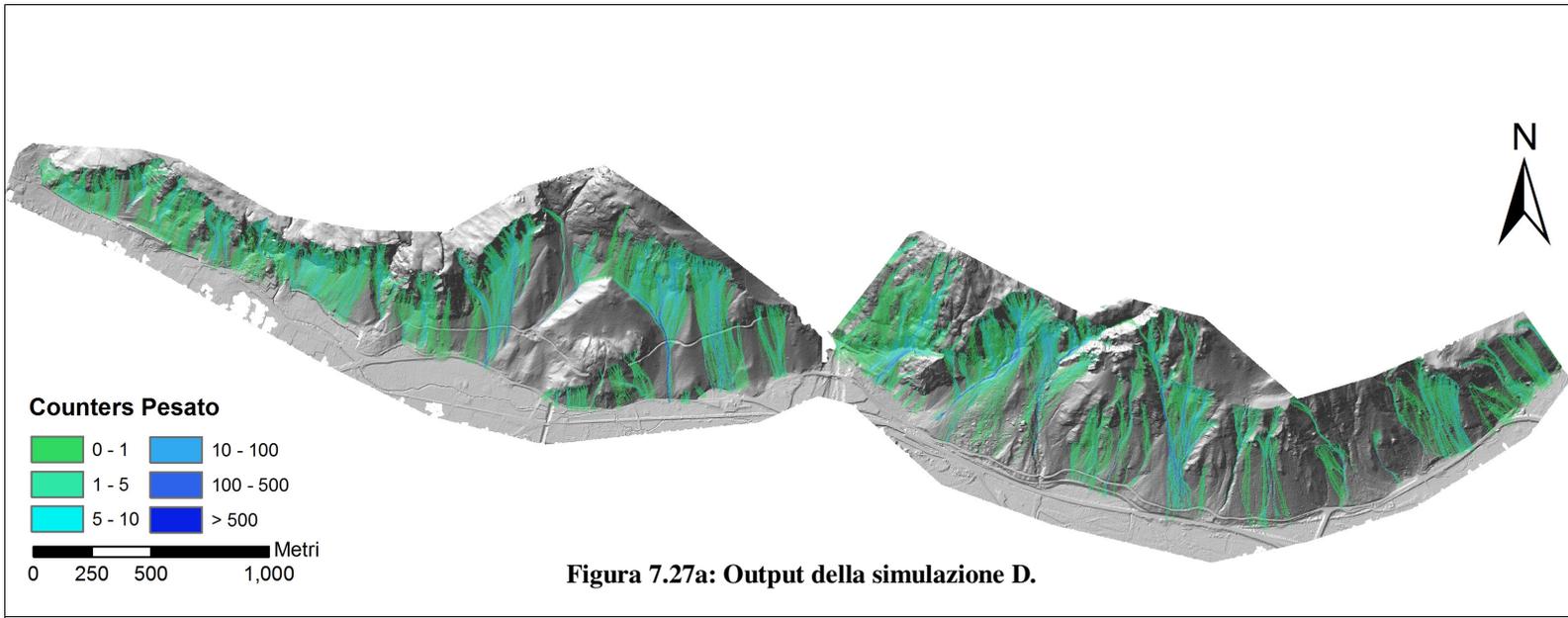


Figura 7.26b: Output della simulazione C.

➤ SIMULAZIONE **D** ED **E**: SORGENTI LINEARI CON SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO VALUTATA RISPETTIVAMENTE CON APPROCCIO EURISTICO E CON APPROCCIO DETERMINISTICO

Nelle simulazioni **D** ed **E** l'attribuzione della suscettibilità all'innesco alle sorgenti lineari è effettuata per mezzo del comando *Extract by Mask*, all'interno del quale il file di *input* è costituito dalla carta di suscettibilità all'innesco creata rispettivamente con i metodi euristico e deterministico e come *maschera* si pone il file in formato raster delle sorgenti di crollo lineari. Da sottolineare che nel caso deterministico non si ha sempre una completa sovrapposizione tra il file delle sorgenti ed il file della carta di suscettibilità, determinando in questo modo dei pixel privi di valore. Per poter assegnare una suscettibilità a tutti i pixel, si è scelto di attribuirgli la suscettibilità minima calcolata sull'intera area di studio. Una nota aggiuntiva che può essere fatta su questi modelli è che la massima distanza di propagazione, la velocità e l'energia cinetica dei blocchi non sono influenzate dalla suscettibilità all'innesco, di conseguenza esse sono le stesse per tutti e tre i modelli realizzati con le sorgenti lineari.

Nelle seguenti immagini (*figura 7.27a/b*) sono riportate le mappe di output (*counters pesato*) di questa simulazione.



In generale, oltre alle precisazioni fatte per i singoli modelli, i risultati indicano che:

- le celle caratterizzate da un elevato numero di transiti sono localizzate lungo canali e in corrispondenza di concavità dei versanti, che determinano la concentrazione delle traiettorie;
- la tipologia di sorgenti influenza notevolmente tutti gli output della simulazione, come evidente un numero maggiore di celle sorgenti determina un incremento dei valori di output;
- parte delle opere non sono in grado di contenere gli eventuali crolli che si verificano dalle sovrastanti pareti;
- le velocità massime e le energie cinetiche maggiori si riscontrano, come prevedibile, al di sotto delle pareti a maggior verticalità e con maggior altezza.

7.3.2.3 CONFRONTO TRA LiDAR OBLIQUO E NADIRALE

Una serie di simulazioni, svolta su un'area di dimensioni limitate, è stata condotta allo scopo di verificare se l'utilizzo di una base LiDAR acquisita con metodologie differenti possa dare dei riscontri diversi all'interno delle simulazioni in Hy-Stone.

A tale scopo si è dunque effettuato un confronto tra il LiDAR obliquo e quello nadirale. La verifica è stata realizzata in un'area ove le pareti risultano avere una pendenza elevata, prossima alla verticalità (area a Nord di Borgo S. Antonio). Ciò è legato al fatto che nell'acquisizione nadirale non vi è la possibilità di rilevare eventuali aggrottamenti lungo le pareti, che in linea di principio, salvo condizioni locali particolari, sono individuabili dalla seconda, inoltre l'acquisizione con la prima metodologia comporta la collocazione del ciglio della roccia in una posizione più esterna rispetto all'acquisizione obliqua. Di conseguenza si potrebbero verificare delle differenze a livello della rappresentazione tridimensionale della topografia in corrispondenza di pareti verticali che potrebbero influenzare i risultati della modellazione. Il confronto è stato realizzato con sorgenti lineari e con sorgenti areali caratterizzate da una pendenza superiore a 55°.

Confrontando i risultati tra le modellazioni effettuate con sorgenti lineari quello che si è riscontrato è che l'utilizzo di LiDAR differenti non determina una sostanziale modifica della risposta del programma in termini di count, energia cinetica, altezza e velocità.

Possibili differenze potrebbero evidenziarsi con l'utilizzo delle sorgenti areali, che basandosi sulla pendenza e dunque sulla base topografica del LiDAR potrebbero presentare discrepanze. Tuttavia le uniche differenze riscontrabili sono legate ai massimi, in quanto:

- il counters presenta un valore massimo di 41.079 nella simulazione con il LiDAR obliquo, mentre di 35.256 con quello nadirale (*figura 7.28*);

- l'energia cinetica ha un massimo di 70.358.787 J per il LiDAR nadirale e di 66.148.823 J per quello obliquo (figura 7.29).

Ciononostante tali valori costituiscono i massimi assoluti riscontrabili e non sono da soli sufficienti per identificare una risposta differente tra le due modellazioni, che di fatto non è riscontrabile. Dunque l'utilizzo di LiDAR acquisiti con tecniche differenti non influenza in modo rilevante la simulazione in Hy-Stone.

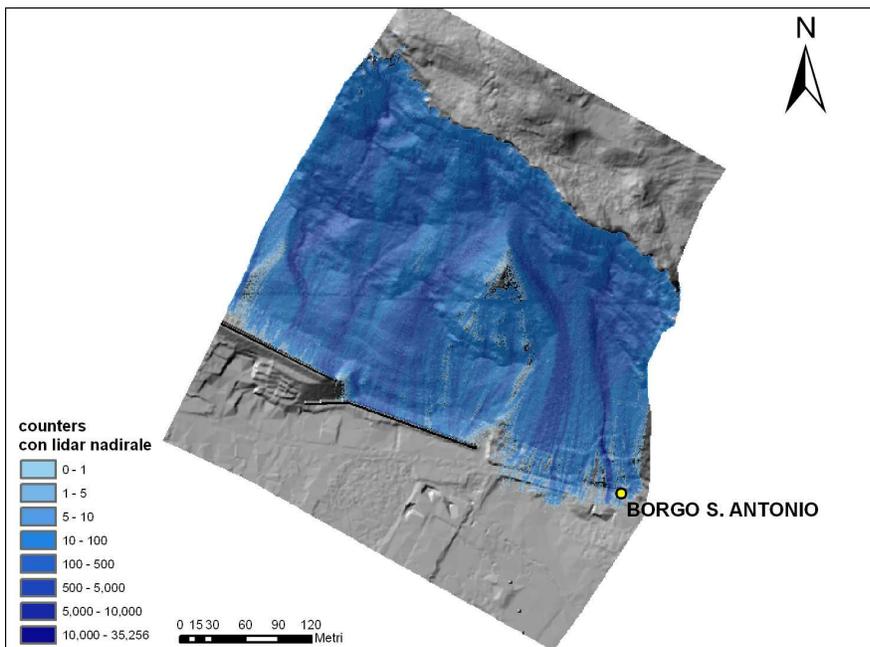
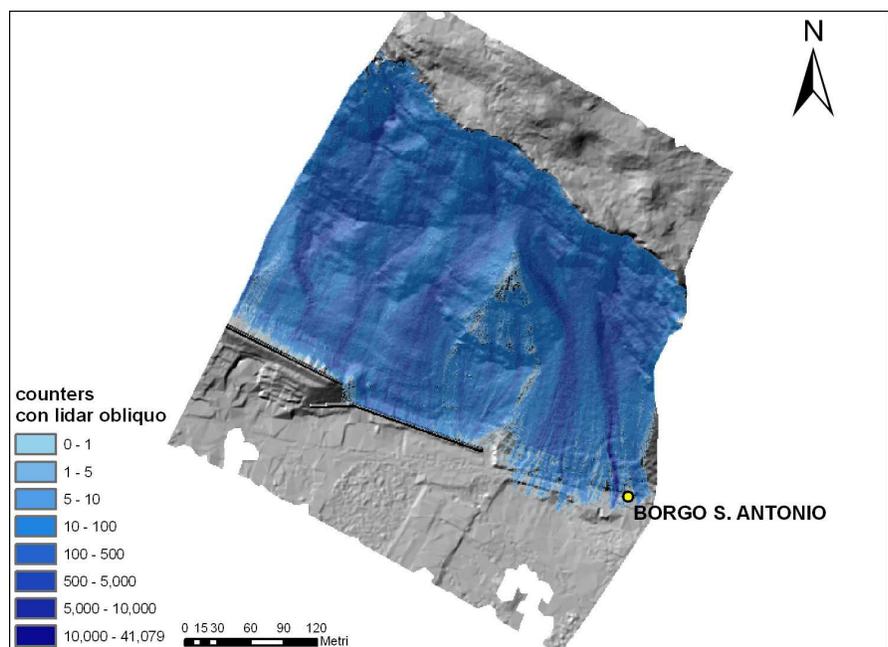


Figura 7.28: Confronto tra lidar nadirale (sopra) e obliquo (sotto) in termini di counters.



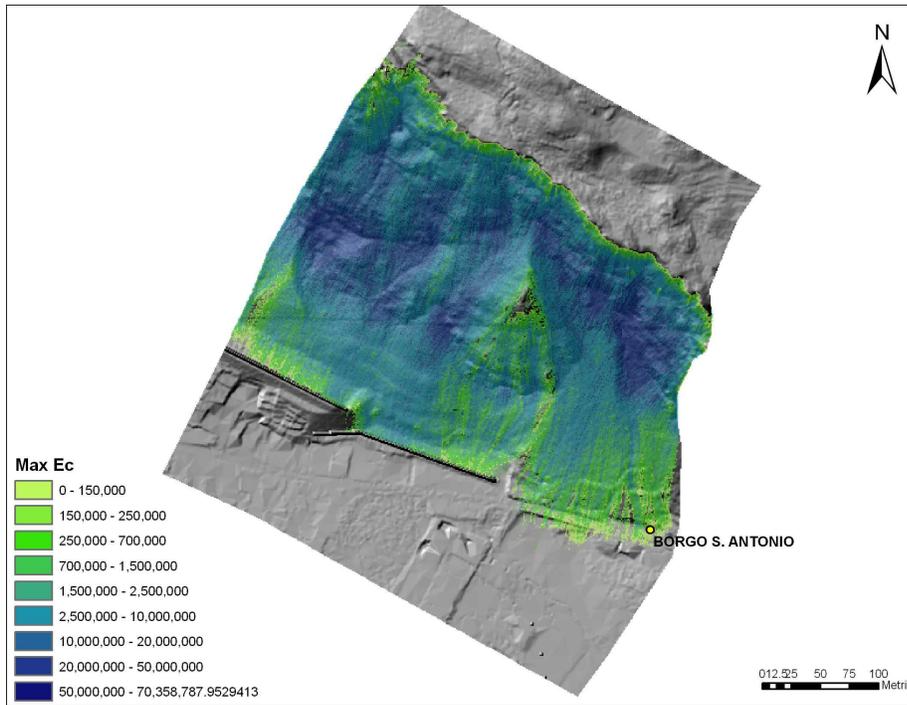
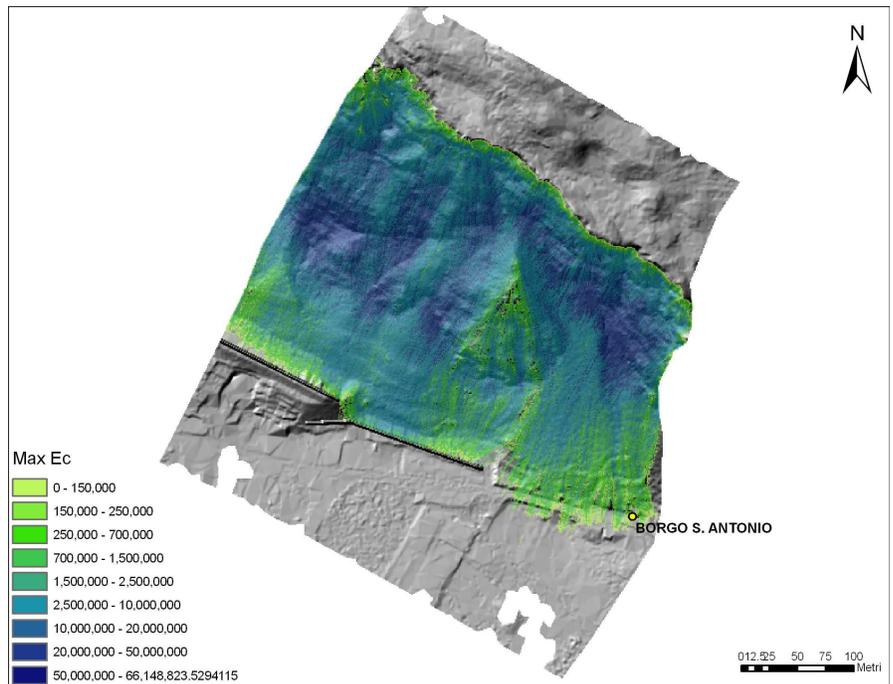


Figura 7.29: Confronto tra lidar nadirale (sopra) e obliquo (sotto) in termini di energia cinetica.



7.3.3 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ: PROCEDURA RHIV

La pericolosità indotta da crolli in roccia risulta essere funzione della probabilità di innesco, data dalla suscettibilità alla rottura dei versanti in roccia, e della probabilità di propagazione, funzione delle caratteristiche del moto dei blocchi, il tutto dipendente dall'intensità del fenomeno. Essa può essere definita come la “probabilità che un certo punto dello spazio sia interessato da un evento di caduta massi caratterizzato da una certa intensità in un certo intervallo di tempo”.

I prodotti delle elaborazioni eseguite in Hy-Stone consentono di definire le aree attraverso cui i blocchi si possono propagare e le loro caratteristiche cinematiche in termini di velocità e altezza. Ne consegue che tali risultati risultano adatti ad essere combinati al fine di ottenere una valutazione spazialmente distribuita della pericolosità da crollo.

Il “count” del numero cumulativo di blocchi transitati per cella può essere considerato come un “proxy” della probabilità di occorrenza. In ogni cella, la mappa del “count” rappresenta la probabilità, espressa in termini relativi, che una certa porzione dello spazio, ovvero l'area occupata dalla cella, sia interessata dal transito di blocchi, in funzione della suscettibilità alla rottura, espressa dal numero di blocchi lanciati da diverse aree sorgenti, della variabilità stocastica dei parametri di modellazione, della morfologia locale del versante e della risoluzione spaziale del modello. Le velocità e le altezze calcolate dal modello ad ogni cella e lungo ogni traiettoria forniscono invece separatamente informazioni sull'intensità dei fenomeni. In aggiunta, diversi valori di massa dei blocchi possono essere introdotti in modo distribuito e combinato con i valori della velocità calcolata, ottenendo mappe dei valori di energia cinetica traslazionali che permettono una valutazione dinamica dell'intensità.

La pericolosità legata a crolli in roccia può essere definita come combinazione di componenti indipendenti, che possono essere diverse in funzione della definizione di intensità adottata. In questo caso è stato adottato un approccio “dinamico” che definisce una matrice 3D che rappresenta la pericolosità in funzione del count (c), dell'energia cinetica (k) e dell'altezza (h). Ogni elemento della matrice 3D (o “cubo”) della pericolosità (*figura 7.28*) rappresenta una possibile combinazione delle tre componenti, caratterizzata da una specifica pericolosità. La pericolosità è espressa da un “indice di pericolosità da crollo” (*Rockfall Hazard Index*, RHI). Questo indice ha un significato “posizionale”: il grado di pericolosità è definito da una specifica posizione dello spazio tridimensionale dei parametri. Il massimo incremento della pericolosità si verifica lungo la diagonale spaziale dello spazio dei parametri.

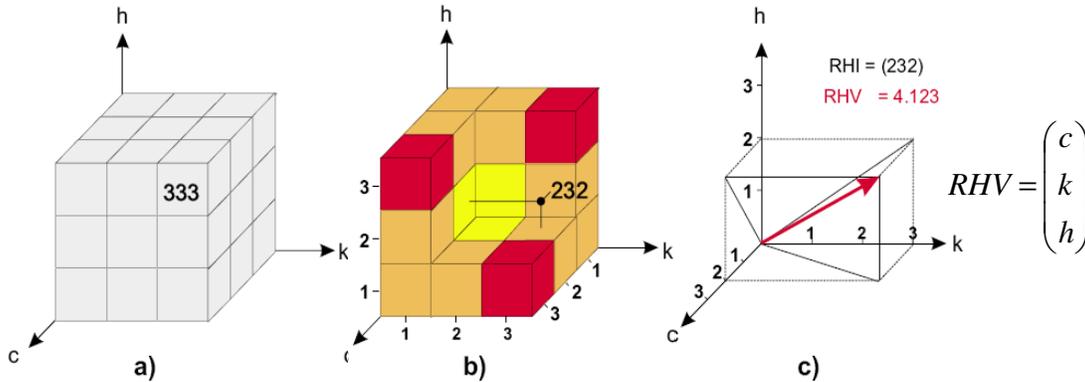


Figura 7.30: matrice tridimensionale “ckh”, utilizzata per la definizione della pericolosità. a) definizione generale dell’indice posizionale RHI; b) matrice cubica scomposta con valori di RHI classificati per grado di pericolosità; c) definizione concettuale del vettore RHV.

Gli altri valori possibili dell’indice RHI rappresentano condizioni di pericolosità intermedie. Da un punto di vista puramente geometrico, tutti i punti che giacciono su ideali piani perpendicolari alla diagonale spaziale dello spazio dei parametri rappresentano il medesimo livello di pericolosità. In realtà, dal momento che le componenti della pericolosità devono essere classificate in valori discreti (le cifre dell’indice RHI), anche l’indice posizionale RHI sarà rappresentato da valori discreti (cubetti della matrice 3D). L’utilizzo di un indice posizionale RHI permette di descrivere il grado di pericolosità evidenziando in modo chiaro il contributo di ciascuna componente. D’altra parte, la natura posizionale dell’RHI impedisce di fatto una classificazione e dunque una zonazione della pericolosità. Di qui la necessità che l’indice RHI sia tradotto in un indice “sequenziale”. Si introduce a questo punto il concetto di “vettore di pericolosità da crollo” (*Rockfall Hazard Vector*, RHV), il cui modulo verrà utilizzato per classificare il grado di pericolosità. La procedura utilizzata per valutare oggettivamente la pericolosità è quindi denominata RHIV (*Rockfall Hazard Index/Vector procedure*).

7.3.3.1 RICLASSIFICAZIONE DEI PARAMETRI

Poiché i valori dei tre parametri sono caratterizzati da diverse dimensioni e ordini di grandezza, essi sono convenientemente riclassificati in tre classi. La scelta di un piccolo numero di classi semplifica la classificazione finale dei valori calcolati dell’indice RHI (la classificazione dei parametri in 3 classi risulta in 27 possibili valori di RHI) e permette di ottenere mappe di pericolosità più chiare.

~ **Energia cinetica (k)**

I valori calcolati dell'energia cinetica traslazionale (k) sono riclassificati in tre intervalli corrispondenti alla massima capacità di assorbimento delle più comuni tipologie di barriere paramassi, ovvero:

- barriere elastiche, costituite da pannelli di rete metallica montati su una struttura rigida e caratterizzate da capacità di assorbimento fino a 700 kJ;
- barriere elastoplastiche, dotate di una struttura flessibile, di controventi ed elementi frenanti (dissipatori), caratterizzate da capacità di assorbimento fino a 2500 kJ.

L'idea fondamentale è che fenomeni di caduta massi più pericolosi sono in grado di danneggiare tipologie più efficienti di barriere paramassi. Questo tipo di riclassificazione permette di introdurre nella mappa di pericolosità utili indicazioni per la progettazione delle opere difensive. Di conseguenza, valori riclassificati di k pari a 1, 2 e 3 si otterranno per $0 < k \leq 700$, $700 < k \leq 2500$ e $k \geq 2500$ kJ, rispettivamente.

~ **Altezza (h)**

L'altezza h viene riclassificata in funzione della capacità del blocco simulato di superare tipologie specifiche di opere passive, in questo caso barriere paramassi (altezza: 4 m) e valli paramassi (altezza fino a 10 m). In questo caso, valori riclassificati pari a 1, 2 e 3 sono definiti per $0 < h \leq 4$, $4 < h \leq 10$ e $h \geq 10$ m, rispettivamente.

Il valore 0 è incluso nella classe 1 per il parametro h , diversamente da quanto accade per il parametro k . Infatti, un'altezza pari a 0 può indicare, nel modello numerico, una condizione di impatto o rotolamento, mentre un valore di energia cinetica pari a 0 kJ significa assenza di moto.

~ **Count (c)**

La riclassificazione del valore del count (c) è un compito più difficile, dal momento che non esistono criteri oggettivi e univoci per classificare la frequenza di transito. Infatti, il numero di blocchi che transitano per una singola cella dipende dalle caratteristiche della topografia, dal numero di blocchi lanciati da diverse aree sorgenti e dalla variabilità stocastica dei parametri della modellazione numerica. Il valore c varia quindi caso per caso in modo non definibile a priori. In questo caso il valore del count è stato normalizzato sulla base di criteri definiti su base morfometrica, che rappresentano la transizione da versanti a morfologia planare a versanti con zone incanalate.

A questo scopo si assume che, considerata una determinata cella su un versante, almeno 5 “celle contribuenti” disposte secondo un pattern a “ferro di cavallo” siano necessarie per iniziare un effetto di incanalamento delle traiettorie (figura 7.29). Il numero di 5 celle contribuenti costituisce una condizione limite minima perché si verifichino effetti di incanalamento, definita ignorando altre eventuali celle contribuenti. Secondo questo approccio, il valore di c ad ogni cella viene normalizzato rispetto a $5n$, dove n è il numero di blocchi lanciati da ciascuna cella contribuyente.

Questo approccio consente di normalizzare il count

indipendentemente dal suo valore assoluto (che rappresenta un descrittore poco efficace della pericolosità) e di caratterizzare in modo implicito le dimensioni dell’area contribuyente:

- valori normalizzati di c inferiori a 0.2 denotano una bassa frequenza di crolli in aree a geometria semplice (non incanalate);
- valori normalizzati di c compresi tra 0.2 e 1 denotano una frequenza crescente di crolli su versanti a geometria relativamente semplice;
- valori normalizzati di c maggiori di 1 identificano le aree più pericolose rispetto alla frequenza (aree canalizzate o altissima frequenza di transiti su versanti a morfologia planare).

Considerando che nelle modellazioni eseguite si è scelto di lanciare 10 blocchi da ciascuna cella sorgente, il count viene riclassificato secondo i valori soglia di 10 e 50, in quanto ponendo $c_{norm} = c/5n$ (dove $c_{norm} = 0.2$) si ottiene $c = 10$ dato che $n = 10$. Allo stesso modo, se $c_{norm} = 1$, si ottiene $c = 50$.

La riclassificazione dei parametri di ingresso (tabella 7.6) è finalizzata al possibile utilizzo delle mappe di pericolosità a fini di mitigazione.

Valore riclassificato	c (normalizzato)	k (kJ)	h (m)
-	-		
1	< 10	≤ 700	≤ 4
2	10 - 50	700 - 2500	4 - 10
3	> 50	≥ 2500	≥ 10

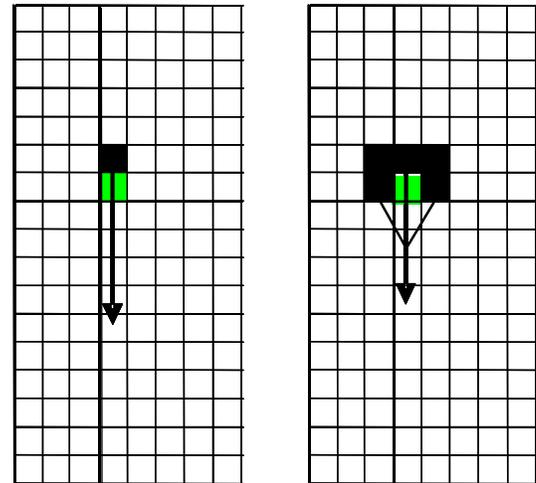


Figura 7.31: schema di normalizzazione del valore del count: a sinistra caso di morfologia planare; a destra caso di incanalamento.

Tabella 7.6: Schema di riclassificazione dei parametri per la valutazione della pericolosità.

I valori riclassificati dei parametri di ingresso c , k e h possono essere combinati in ambiente GIS, tramite semplici operazioni di *Raster Calculator*, al fine di ottenere una mappa di valori dell'indice posizionale RHI che, ad ogni cella, rappresenta un valore di pericolosità e identifica (attraverso le 3 cifre) i contributi dei parametri c , k e h . Le 27 classi risultanti sono difficili da ordinare secondo un grado crescente del livello di pericolosità. Di conseguenza, come già citato, l'indice posizionale necessita di essere tradotto in un indice sequenziale. Il criterio che permette tale traduzione è fornito dal modulo del vettore RHV definito semplicemente da:

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

Poiché c , k e h sono valori discreti, il valore del modulo del vettore RHV non varia in modo continuo, ma può essere suddiviso in 3 classi nella mappa finale della pericolosità.

La mappa finale della pericolosità è stata riclassificata in base ai valori calcolati del modulo del vettore RHV nelle seguenti tre classi:

- $1.732 \leq |RHV| \leq 3$: bassa pericolosità;
- $3 \leq |RHV| \leq 4.360$: media pericolosità;
- $4.360 \leq |RHV| \leq 5.196$: alta pericolosità.

È possibile inoltre definire una quarta classe di “pericolosità indefinita”, che include aree nelle quali fenomeni di crollo, in base ai risultati della modellazione numerica, non sono attesi. In queste aree, di conseguenza, il modulo del vettore RHV non è definito.

Vale la pena notare che, mentre la riclassificazione dei parametri di ingresso che contribuiscono alla pericolosità (c , k e h) è stata fatta secondo criteri oggettivi, una classificazione univoca della mappa finale di pericolosità è impossibile, poiché non esiste una definizione oggettiva di “alta”, “media” e “bassa” pericolosità.

7.3.3.2 APPLICAZIONE A VILLA SANTINA

La procedura ora presentata è stata applicata nell'area di villa Santina ai modelli realizzati per mezzo di Hy-Stone utilizzando una *toolbox* di ArcGIS appositamente realizzata.

Per la realizzazione di tali carte sono stati utilizzati i file relativi ai valori massimi di energia cinetica e altezza dei blocchi in quanto essi permettono di valutare lo scenario più conservativo, ovvero la situazione peggiore. Dato che la carta uscente da tale applicazione risulta essere eccessivamente frammentata e di difficile valutazione si procede a una sua omogeneizzazione tramite analisi statistica distribuita per mezzo di una *Neighbourhood statistics* attraverso cui i valori del vettore del RHV in una cella viene mediato dai valori delle celle più vicine, sia in termini di valori medi che di valori massimi. Ciò è stato realizzato considerando i valori presenti in un cerchio di 5m di raggio.

Consideriamo ora i valori di RHV ottenute per le simulazioni A, B e C, sia in termini di valori medi che massimi (*figura 7.32 e 7.33*).

Quello che è possibile notare in prima battuta è che la pericolosità minore, come prevedibile, è associata al modello realizzato con sorgenti lineari (**A**), questo è legato all'esiguo numero di sorgenti prese in considerazione rispetto ai modelli con sorgenti areali. Il numero di pixel sorgenti ha infatti un'influenza diretta sul count, ovvero il numero di blocchi che transitano da ogni singola cella. Confrontando invece i due modelli con sorgenti areali quello che si osserva è che la pericolosità maggiore, e dunque lo scenario più conservativo, è dato dal modello che prende in considerazione le sorgenti euristiche (**B**) rispetto al modello deterministico (**C**). Una delle ragioni di tale riscontro è da ricercare nella suscettibilità all'innescò, che presenta valori minimi superiori nel modello **B** rispetto al modello **C**; inoltre, a livello di numero di pixel sorgenti, la metodologia euristica ne ha un quantitativo superiore (*tabella 7.5*).

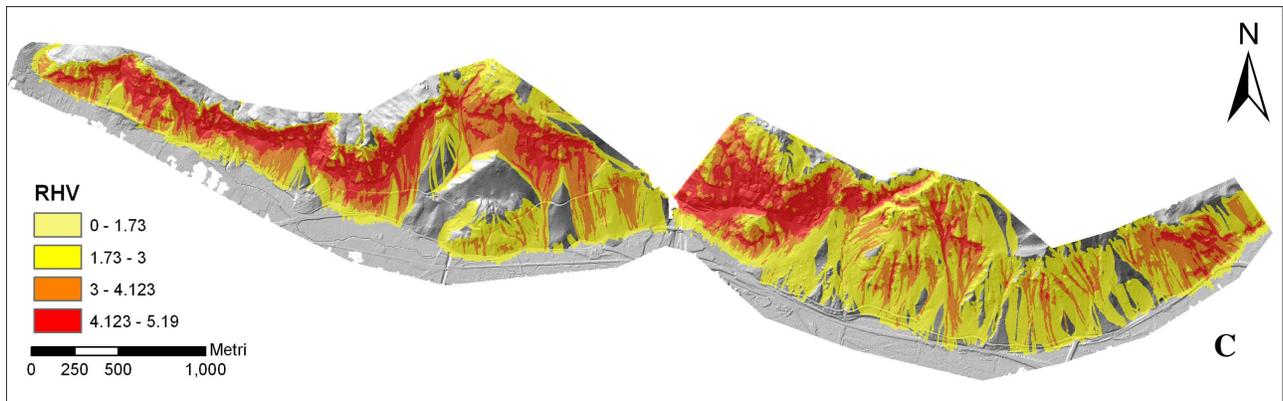
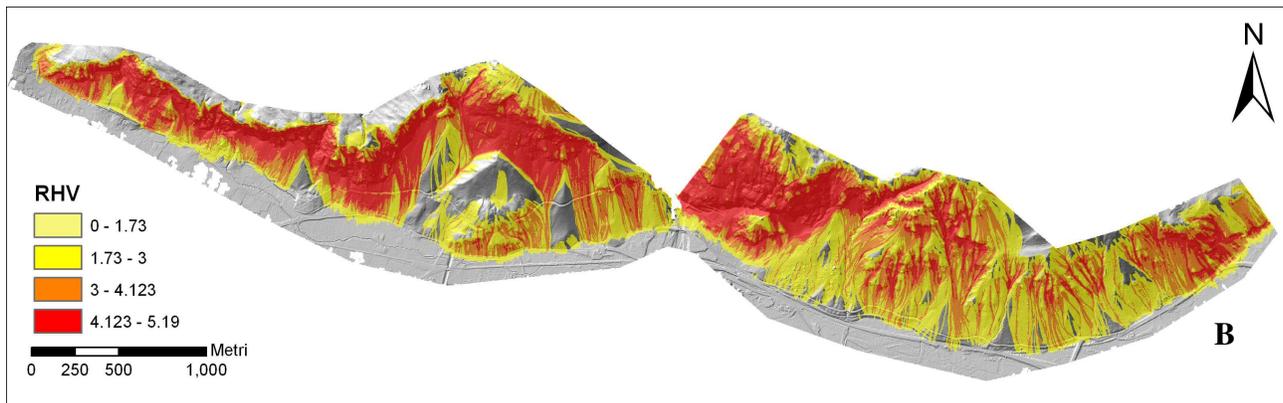
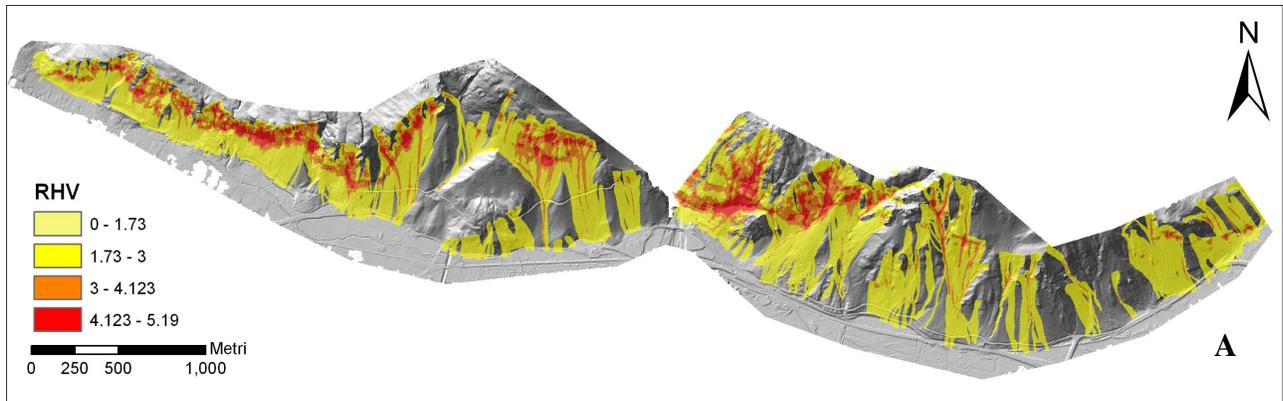
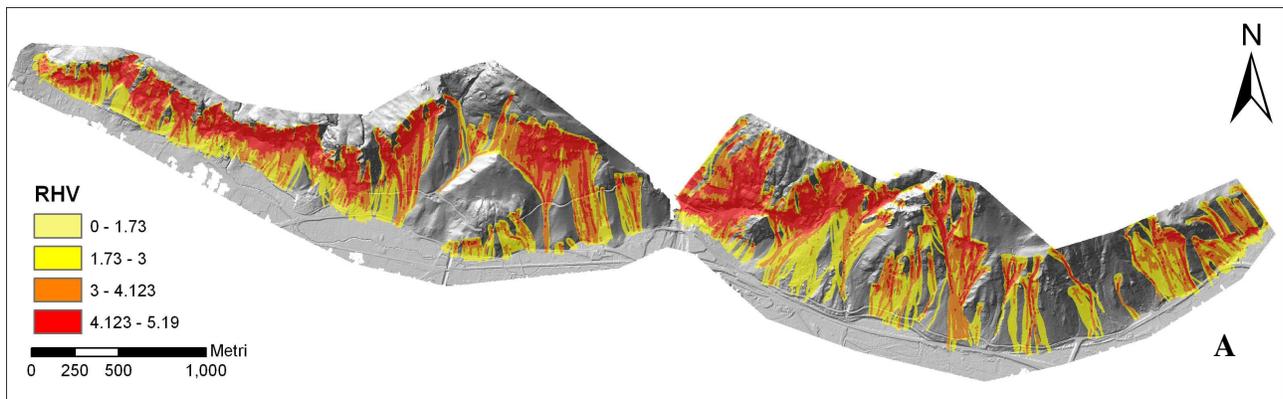


Figura 7.32: Mappe dell’RHV medio: a) modello uniforme con sorgenti lineari; b) modello con suscettibilità euristica e sorgenti da metodologia euristica; c) modello con suscettibilità deterministica e sorgenti da metodologia deterministica riclassificate con una pendenza maggiore a 50°.



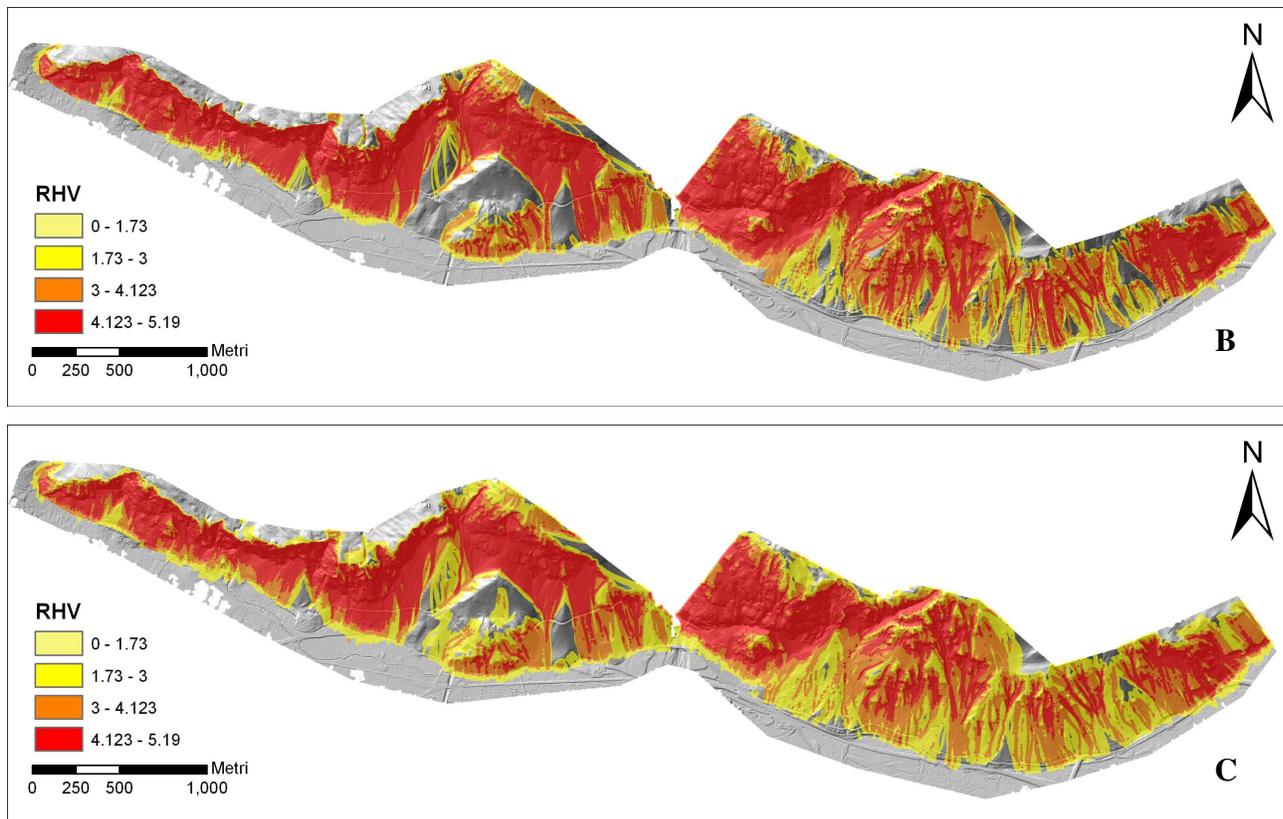


Figura 7.33: Mappe dell’RHV massimo: a) modello uniforme con sorgenti lineari; b) modello con suscettibilità euristica e sorgenti da metodologia euristica; c) modello con suscettibilità deterministica e sorgenti da metodologia deterministica riclassificate con una pendenza maggiore a 50°.

Confrontando ora le carte di pericolosità realizzate con la stessa tipologia di sorgente e lo stesso volume dei blocchi, ma con una suscettibilità all’innesco determinata con differenti approcci (modelli **A**, **D**, **E**) quello che è possibile riscontrare è che il modello costituente lo scenario più conservativo è rappresentato dal modello uniforme e ciò è dato dal fatto che in tale simulazione ad ogni pixel sorgente è data una probabilità di lancio pari al 100%. Confrontando il modello con suscettibilità all’innesco determinata con metodologia euristica (**D**) ed il modello con suscettibilità deterministica (**E**), quello che si ottiene è che come in precedenza il modello **D** presenta una pericolosità maggiore dettata da una suscettibilità minima superiore al modello **E** (figura 7.34).

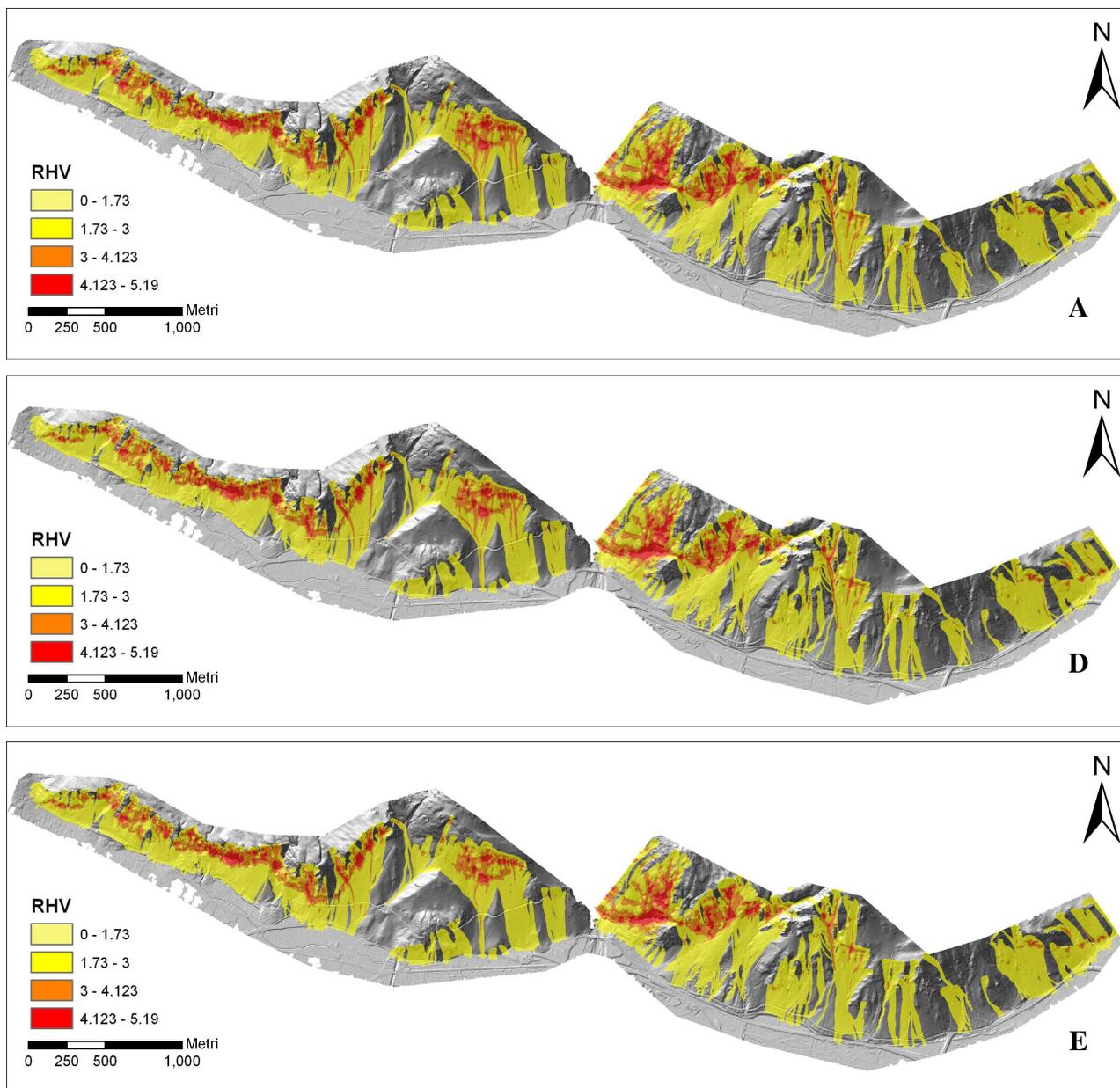


Figura 7.34: Mappe dell’RHV medio: a) modello uniforme con sorgenti lineari; d) modello con suscettibilità euristica e sorgenti lineari; e) modello con suscettibilità deterministica e sorgenti lineari.

Un ulteriore confronto può essere realizzato tra i modelli **A**, **F**, **G**, ovvero simulazioni presentanti la stessa suscettibilità all’innescò (modelli uniformi → probabilità del 100%), lo stesso blocco di progetto ma differente tipologia di sorgenti. In questo caso il parametro che più influisce sulla pericolosità è il numero di celle sorgenti da cui si fanno partire i blocchi. Poiché come già anticipato in precedenza questo implica un diverso valore del *count*. In quest’ottica, confrontando le modellazioni **A**, **F** e **G**, lo scenario più pericoloso risulta essere quello della modellazione **F**, ovvero il modello euristico, in quanto possiede il maggior numero di celle sorgenti (*figura 7.35*).

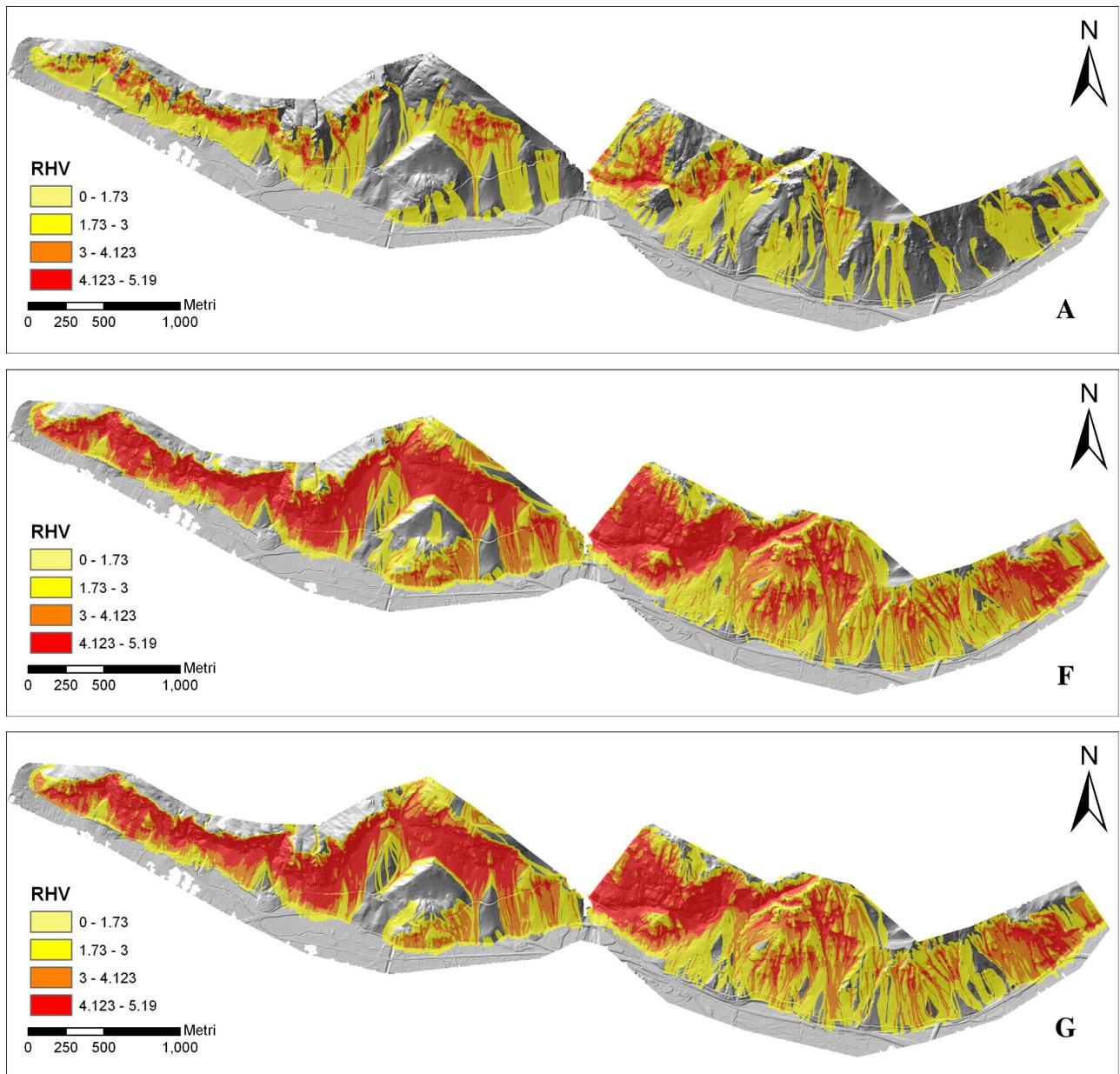


Figura 7.35: Mappe dell’RHV medio: a) modello uniforme con sorgenti lineari; f) modello uniforme e sorgenti da metodologia euristica; g) modello uniforme e sorgenti da metodologia deterministica riclassificate con una pendenza maggiore a 50°.

Un ultimo confronto può essere realizzato prendendo in considerazione un differente volume del blocco di progetto. Come si poteva facilmente intuire, aumentando il volume del blocco di progetto a parità di suscettibilità all'innescò si assiste anche ad un evidente aumento della pericolosità nell'area (figura 7.36). Questo, come già detto in precedenza, è causato dal maggior contributo dell'energia cinetica nel calcolo dell'RHV. Da sottolineare che le due carte hanno una differenza a livello di numero di aree sorgenti, in quanto la seconda presenta una riclassificazione a pendenze superiori ai 55°, dunque possiede un numero inferiore di celle sorgenti. Nonostante ciò la pericolosità risulta notevolmente superiore e questo è legato appunto al volume medio immesso nella simulazione.

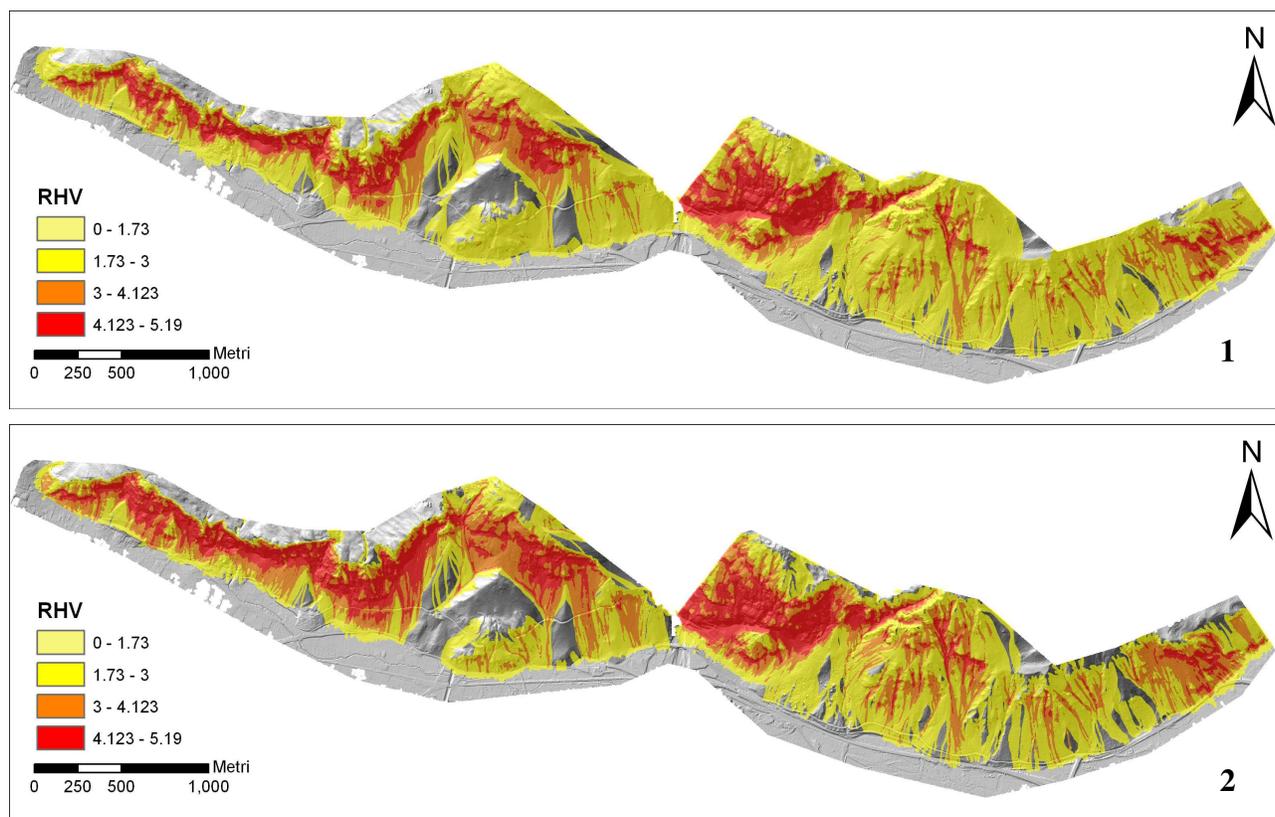


Figura 7.36: Mappe dell'RHV medio: 1) modello con suscettibilità deterministica e sorgenti da metodologia deterministica 2) modello con suscettibilità deterministica e sorgenti da metodologia deterministica riclassificate con una pendenza maggiore a 50°.

7.3.3.3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ LUNGO UN TRACCIATO STRADALE

Un'applicazione interessante dell'RHV consiste nell'analisi della pericolosità lungo una qualunque sezione di interesse. Nel caso in esame si è scelto di determinare la pericolosità lungo un tracciato stradale posto a Nord dei Casolari Piluc.

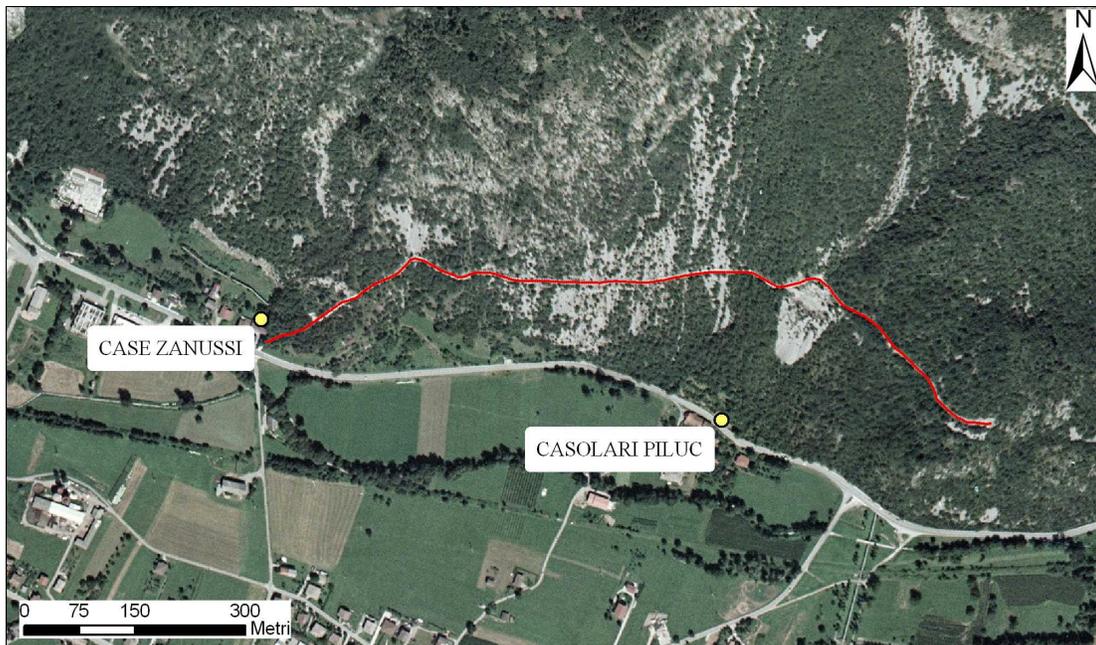


Figura 7.37: In rosso il tracciato della strada esaminata.

I valori dell'RHV massimo e medio calcolati per le simulazioni A, B e C sono stati campionati lungo il profilo in esame per mezzo dell'estensione *Easy Profiles* di ArcGIS, con un intervallo di campionamento di 3m. I dati ottenuti sono stati rappresentati in forma grafica rispetto alla distanza progressiva misurata lungo lo sviluppo della strada dalle quote più basse a quelle più elevate.

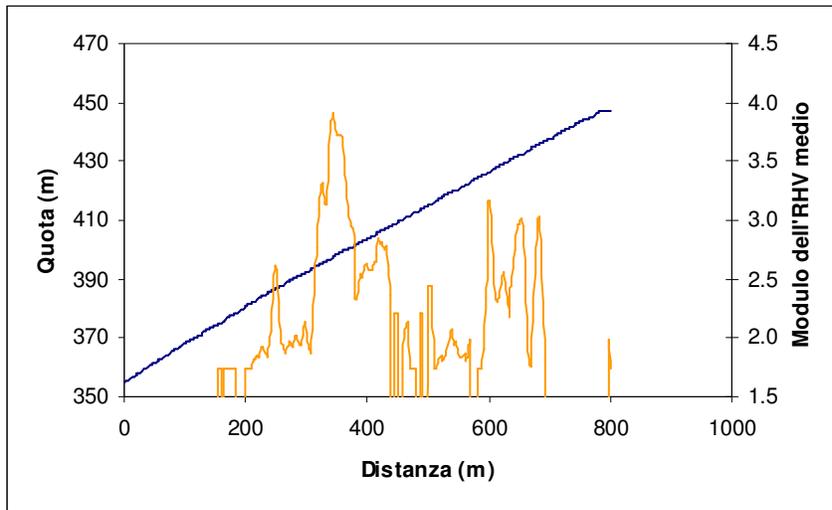
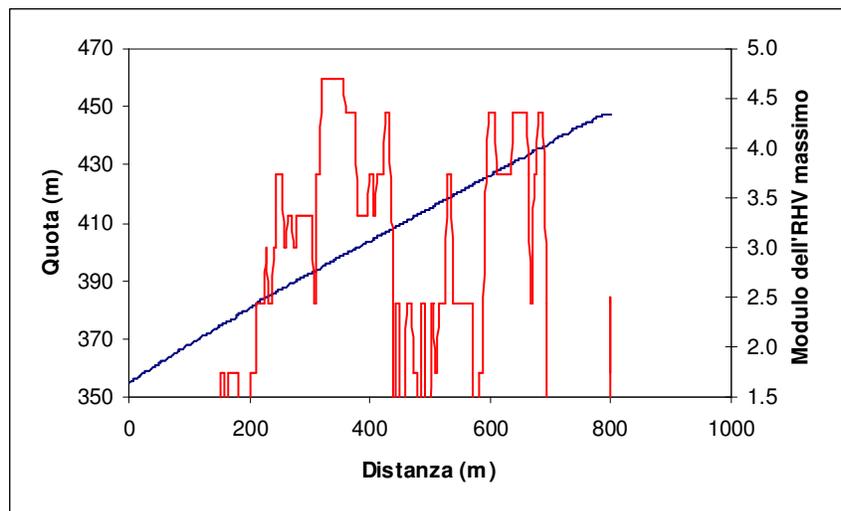


Figura 7.38: Modelli uniformi; Valori dell'RHW medio (sopra) e massimo (sotto). In blu i punti quotati del profilo della strada.



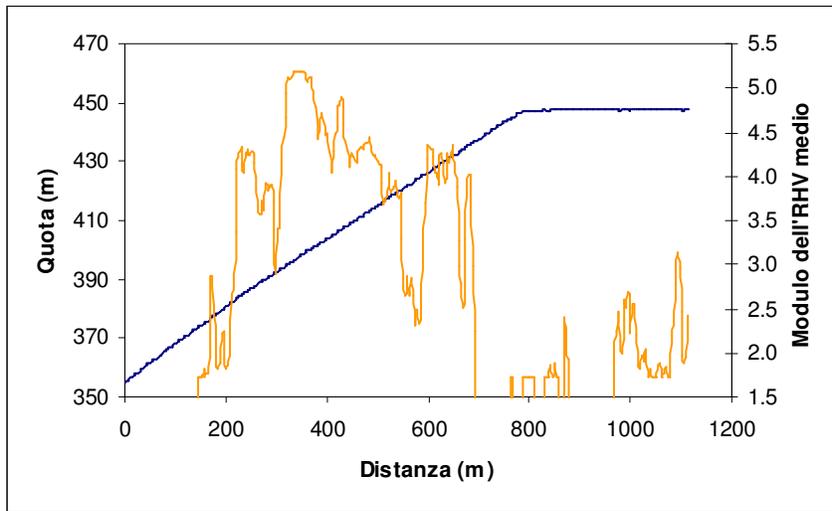
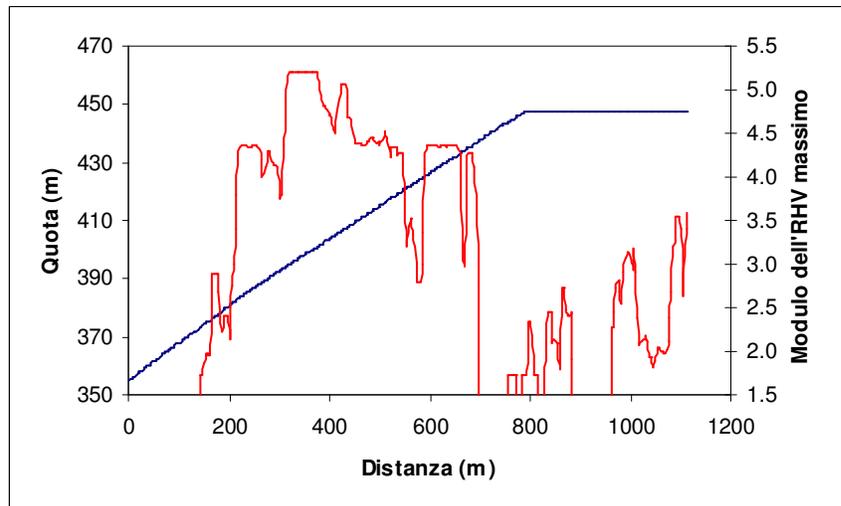


Figura 7.39: Modello Euristico; Valori dell'RHV medio (sopra) e massimo (sotto). In blu i punti quotati del profilo della strada.



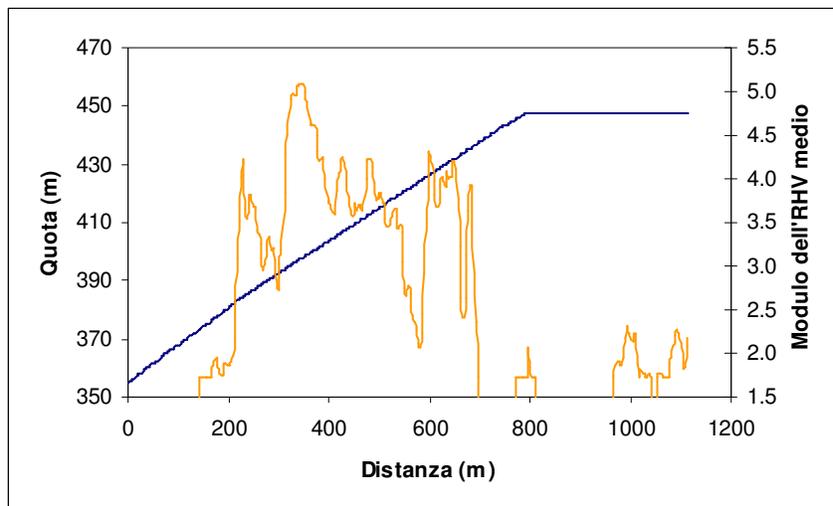
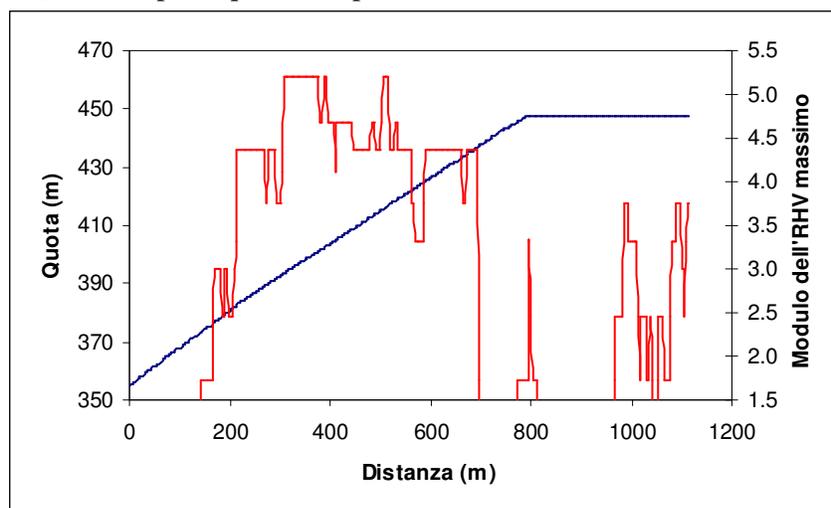


Figura 7.40: Modello deterministico; Valori dell'RHV medio (sopra) e massimo (sotto). In blu i punti quotati del profilo della strada.



Dall'analisi dei grafici ottenuti quello che si evince è che il tratto maggiormente esposto al rischio di caduta massi è quello collocato tra una distanza di 200m e una di 700m dall'inizio del profilo. Valori consistenti sono presenti anche nel tratto oltre gli 800m. Nonostante tali valori, a tutela di questa strada non è stata posta alcuna protezione, fatta eccezione di una rete in aderenza collocata nel tratto esterno alla galleria entro cui termina il profilo tracciato. Probabilmente ciò è dovuto al fatto che tale strada non risulta essere molto trafficata, dal momento che essa termina entro una seconda galleria qualche km più ad est. Analizzando il settore a valle di tale profilo si osserva la presenza di due barriere paramassi rigide a protezione della strada statale sottostante, indice che nel complesso la zona risulta essere comunque considerata soggetta a crolli. Nel complesso una valutazione di questo tipo può dunque risultare utile per la protezione delle infrastrutture viarie.

8. TERREMOTO DEL 6 MAGGIO 1976: TEMPO DI RITORNO

Sulla base del rapporto conclusivo per la redazione della mappa di pericolosità sismica dell'aprile 2004 si è cercato di dedurre un tempo di ritorno per il terremoto che il 6 maggio 1976 ha colpito l'area del Friuli Venezia Giulia.

L'attuale zonazione sismogenica, denominata ZS9, è stata sviluppata a partire dalla precedente zonazione ZS4 (Meletti et al., 2000), sulla base delle recenti valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisito negli ultimi anni.

Essa è stata elaborata in modo da soddisfare i seguenti requisiti minimi:

- essere coerente in linea di massima con il retroterra informativo di ZS4;
- recepire i più recenti avanzamenti delle conoscenze sulla tettonica attiva della penisola e sulla distribuzione delle sorgenti sismogenetiche;
- considerare le informazioni inerenti ai sismi di maggiore intensità sviluppatasi successivamente alla predisposizione di ZS4;
- avviare a superamento il problema delle ridotte dimensioni delle zone sorgenti e della conseguente limitatezza del campione di terremoti di ciascuna di esse;
- essere coerente con la base dei dati utilizzata per compilare il catalogo CPTI2 (1981-2002);
- fornire per ogni ZS una stima di profondità dei terremoti utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale;
- fornire per ogni ZS un meccanismo di fagliazione prevalente utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione modulate su tale meccanismo mediante i coefficienti proposti da Boomer et al. (2003). (per il Friuli il meccanismo prevalente è una fagliazione inversa).

In totale le zone sismogenetiche ZS sono 36, cui vanno aggiunte 6 zone non utilizzate per la redazione della mappa. Il Friuli Venezia Giulia rientra nella ZS905.

Le analisi svolte per la redazione della carta si basano sulla magnitudo momento (M_w) dei terremoti, per mezzo dell'identificazione di una scala suddivisa in 12 classi di $0.23M_w$, con classe inferiore $M_w 4.76 \pm 0.115$; In questo modo il catalogo di partenza degli eventi afferenti alle ZS contiene 1525 eventi con $M_w \geq 4.65$.

In base a tali valori sono stati identificati due intervalli di completezza, uno storico (CO_04.2) e uno statistico (CO_04.4). L'intervallo è espresso in termini di anno di decorrenza della completezza del relativo valore di intensità risentito al sito.

Per il Friuli considerano una magnitudo M_w pari a 6 si ottengono i seguenti valori:

- catalogo storico → 1300 - 2002 (anno di fine catalogo);
- catalogo statistico → 1530 - 2002.

Per la redazione della carta è stata adottata l'Mw max, costituente un elemento cautelativo adottato per garantire le determinazioni di a_{max} dalla possibilità che si verifichino eventi di magnitudo superiore a quella del catalogo.

In particolare ci si riferisce a due valori:

- Mw max1 → magnitudo osservata, data dal confronto tra la Mw max osservata e quella proposta su basi geologiche;
- Mw max2 → valore cautelativo, in questo caso si porta il valore di Mw max pari a 6.14Mw tutte quelle che posseggono una Mw max inferiore.

Per il Friuli l'Mw max1 è uguale all'Mw max2 ed è pari a 6.60.

Passo successivo è stata la determinazione del tasso di sismicità, ovvero una stima media di quanti terremoti di una certa classe di magnitudo accadono in una data zona in un prefissato periodo di tempo. Si distinguono:

- i tassi individuali (AR), calcolati dividendo il numero di terremoti presenti nella ZS, nella classe e nella finestra temporale ritenuta completa, per la lunghezza della finestra stessa.
- i tassi da relazioni G-R, in cui i parametri delle relazioni G-R sono determinati in base alla Mw (in particolare si ha che il parametro b è ottenuto interpolando il logaritmo dei tassi AR cumulati, mentre a è posto paria alla Mw min registrata nella ZS, che per la zona ZS905 è 4.76).

Nella seguente tabella sono illustrati i parametri fondamentali inerenti alla zona del Friuli ottenuti sulla base dei criteri sopra citati.

ZS	Mw max1	Tassi AR	Mw max2	b	Tasso da CO_04.2	Tasso GR	Tasso GR adottato
905	6.6	0.33	6.6	-1.05	0.11	0.37	0.37

Il tasso scelto nell'ultima colonna, pari al tasso GR, è legato al fatto che a parità di Mw max il tasso da catalogo storico (CO_04.2) è inferiore a quello determinato con il tasso AR.

Quello che è stato possibile rilevare da tali analisi è che mettendo a confronto la forma cumulata del catalogo CPTI2, dunque su tutta la penisola, con le distribuzioni degli eventi virtuali in 1000 anni determinati in base ai tassi di sismicità per ogni zona, quello che si ottiene è che le differenze tra numero totale di terremoti in CPTI2 e numero totale di terremoti virtuali è nettamente differente, in

particolare i virtuali superano i reali. Vengono ora presentati i riscontri ottenuti per le classi di magnitudo $M_w \geq 5.91$ e $M_w \geq 6.14$:

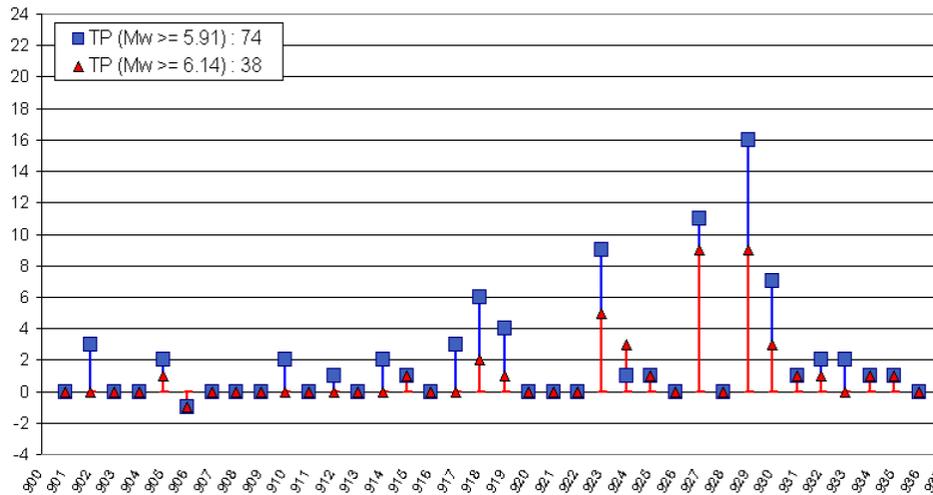


Figura 8.1: Distribuzione nelle ZS, per due classi di M_w , delle differenze fra numero di eventi in CPTI2 e numero di eventi virtuali stimato dai tassi (CO_04.2; tassi AR).

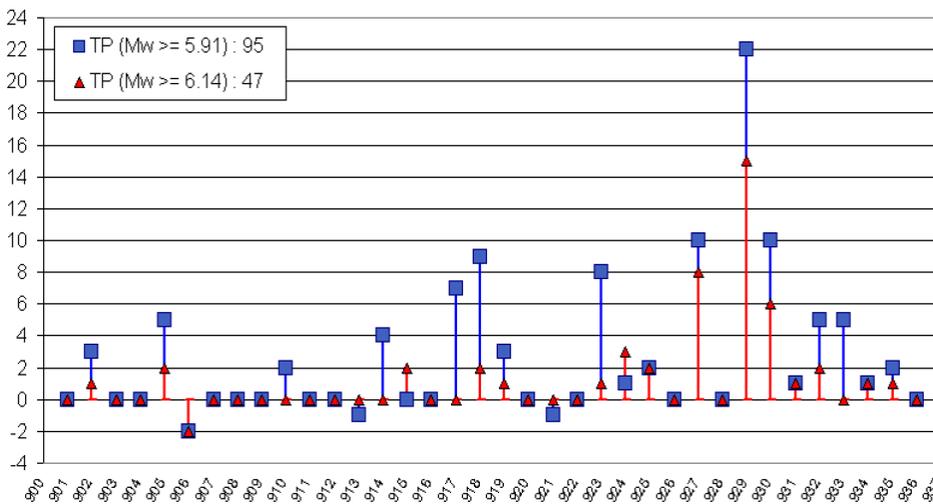


Figura 8.2: Distribuzione nelle ZS, per due classi di M_w , delle differenze fra numero di eventi in CPTI2 e numero di eventi virtuali stimato dai tassi (CO_04.4; tassi AR).

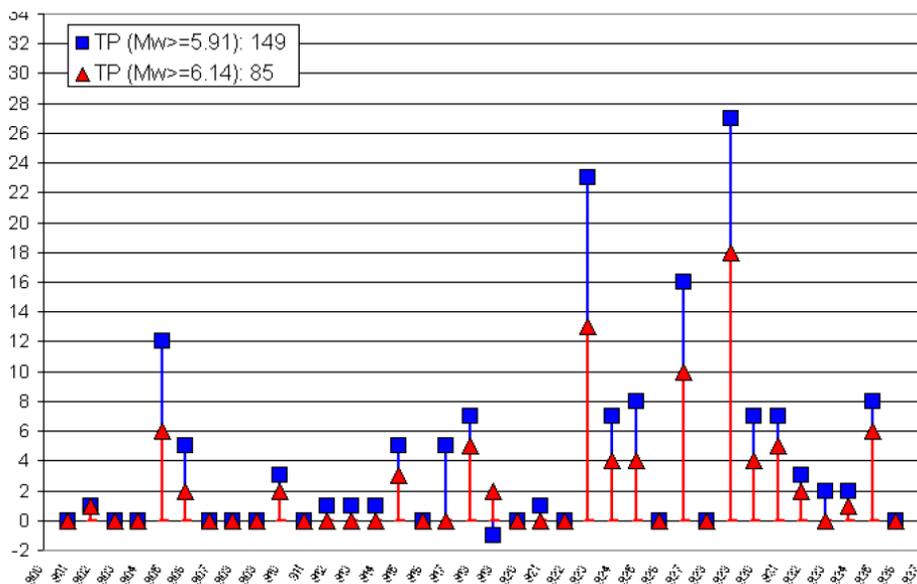


Figura 8.3: Distribuzione nelle ZS, per due classi di Mw, delle differenze fra numero di eventi in CPTI2 e numero di eventi virtuali stimato dai tassi (CO_04.2; tassi GR).

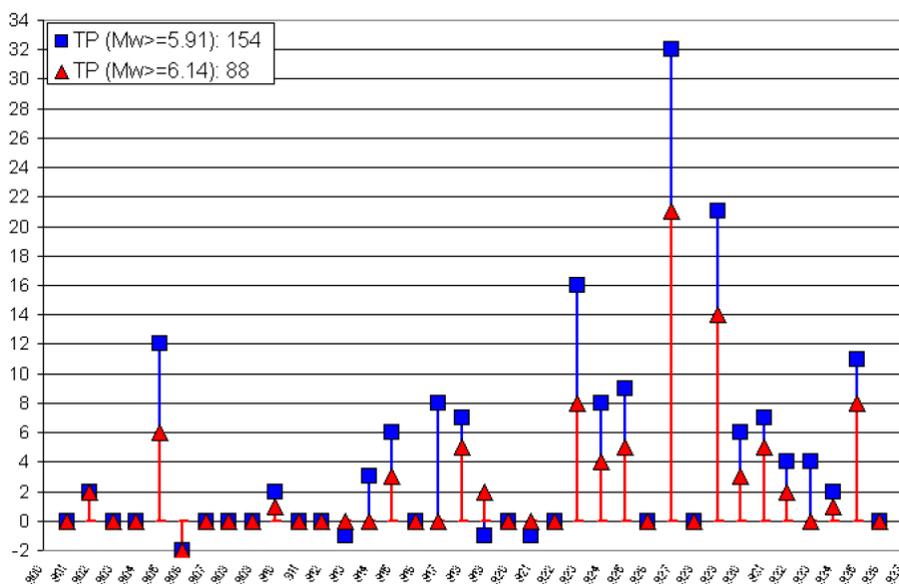


Figura 8.4: Distribuzione nelle ZS, per due classi di Mw, delle differenze fra numero di eventi in CPTI2 e numero di eventi virtuali stimato dai tassi (CO_04.4; tassi GR).

Per l'area del Friuli (ZS905) si ottengono le seguenti differenze rispetto al catalogo CPTI2:

Mw ≥ 5.91	CO_04.2	CO_04.4
Tasso AR	2	5
Tasso GR	12	12

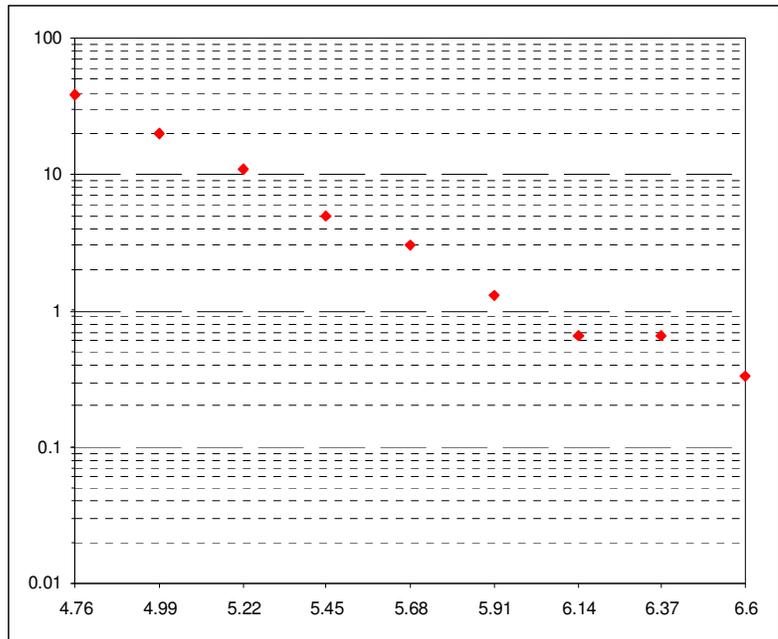
Mw ≥ 6.14	CO_04.2	CO_04.4
Tasso AR	1	2
Tasso GR	6	6

Indice che le assunzioni adottate vanno considerate particolarmente cautelative.

Per la determinazione del tempo di ritorno si è partiti dai dati forniti da tale carta, in particolare dai grafici dei tassi di sismicità espressi in funzione della magnitudo. Essi sono stati rielaborati, calcolando i tassi di sismicità individuali (AR) e da relazioni G-R, per ogni singolo valore di magnitudo previsto dalla metodologia (figure dalla 8.5 alla 8.8). A verifica di tali rielaborazioni si è appurato che siano mantenute valide le differenze presenti tra il catalogo cumulado CPTI2 e quello virtuale in 1000 anni, riportate nelle tabelle sovrastanti.

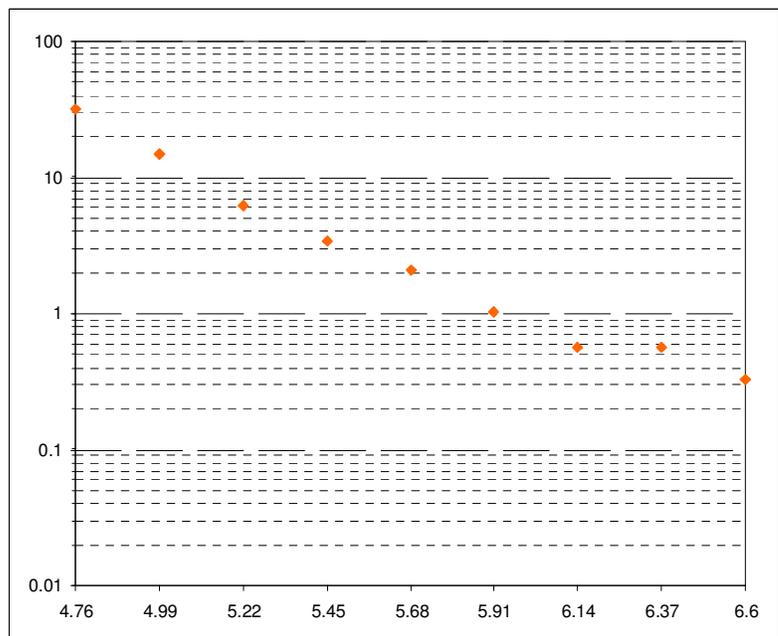
Mw	AR Statistico	
	100 anni	1000 anni
4.76	38	380
4.99	20	200
5.22	11	110
5.45	5	50
5.68	3	30
5.91	1.3	13
6.14	0.66	66
6.37	0.66	66
6.6	0.33	3.3

Figura 8.5: Tassi AR con intervallo di completezza statistico, calcolati in 100 anni e 1000 anni con relativo tempo di ritorno.



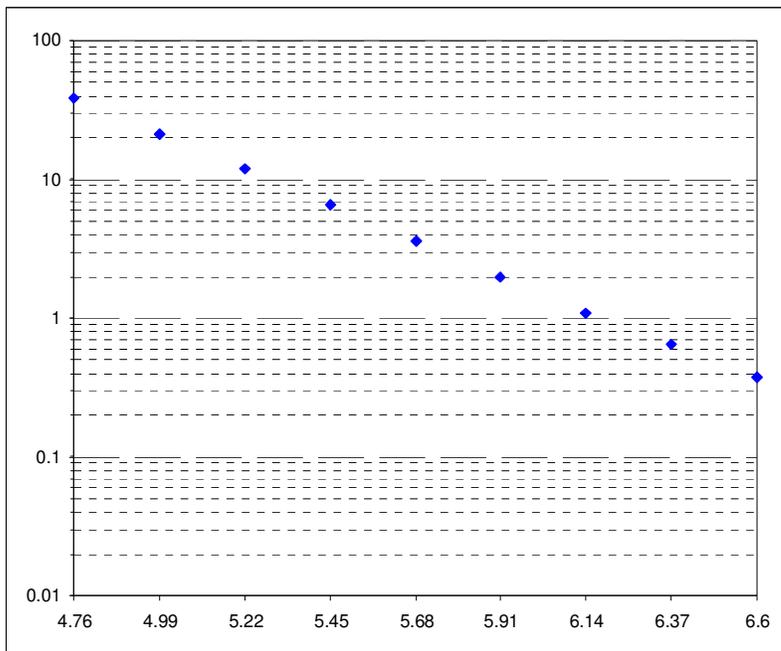
Mw	AR Storico	
	100 anni	1000 anni
4.76	32	320
4.99	15	150
5.22	6.2	62
5.45	3.4	34
5.68	2.1	21
5.91	1.02	10.2
6.14	0.57	5.7
6.37	0.57	5.7
6.6	0.33	3.3

Figura 8.6: Tassi AR con intervallo di completezza storico, calcolati in 100 anni e 1000 anni con relativo tempo di ritorno.



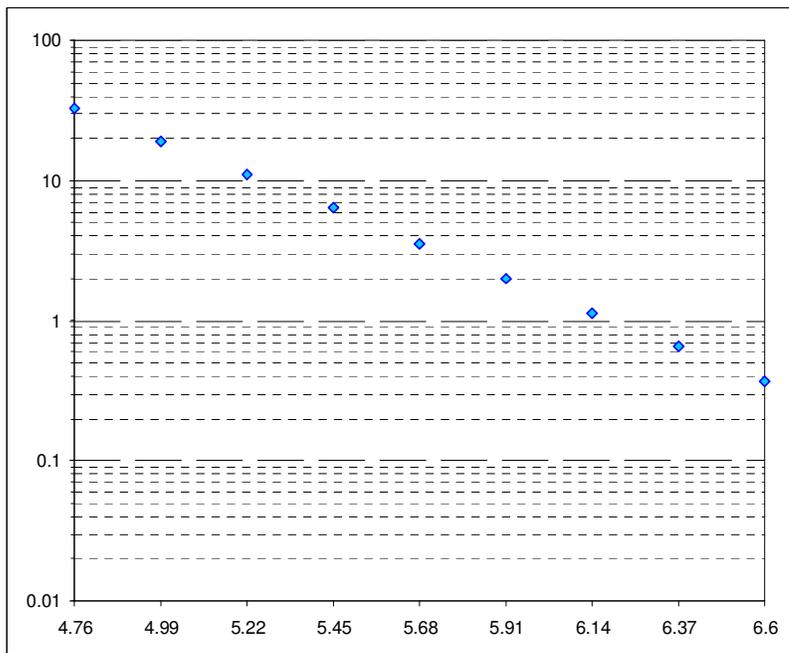
Mw	GR Statistico	
	100 anni	1000 anni
4.76	39	390
4.99	21	210
5.22	12	120
5.45	6.6	66
5.68	3.6	36
5.91	2	20
6.14	1.1	11
6.37	0.65	6.5
6.6	0.37	3.7

Figura 8.7: Tassi GR con intervallo di completezza statistico, calcolati in 100 anni e 1000 anni con relativo tempo di ritorno.



Mw	GR Storico	
	100 anni	1000 anni
4.76	33	330
4.99	19	190
5.22	11	110
5.45	6.4	64
5.68	3.5	35
5.91	2	20
6.14	1.13	11.3
6.37	0.65	6.5
6.6	0.37	3.7

Figura 8.8: Tassi GR con intervallo di completezza storico, calcolati in 100 anni e 1000 anni con relativo tempo di ritorno.



Considerando che i tassi di sismicità identificati rappresentano una frequenza è possibile, una volta ottenuta la frequenza annua (data per esempio dal tasso in 100 anni diviso i 100 anni), determinare il tempo di ritorno per mezzo della seguente formula:

$$Tr = \frac{1}{f}$$

Mw	Tr			
	AR Statistico	AR Storico	GR Statistico	GR Storico
4.76	2.63	3.13	2.56	3.03
4.99	5.00	6.67	4.76	5.26
5.22	9.09	16.13	8.33	9.09
5.45	20.00	29.41	15.15	15.63
5.68	33.33	47.62	27.78	28.57
5.91	76.92	98.04	50.00	50.00
6.14	151.52	175.44	90.91	88.50
6.37	151.52	175.44	153.85	153.85
6.6	303.03	303.03	270.27	270.27

Nella tabella è evidenziata la riga che meglio approssima la magnitudo del terremoto sviluppatosi nel 1976 in Friuli, con relativi tempi di ritorno determinati in funzione dei rispettivi intervalli di completezza.

9. CONCLUSIONI

Lo studio eseguito nell'area di Villa Santina è stato volto alla determinazione della suscettibilità e della pericolosità da frane di crollo.

La prima considerazione che è possibile fare è che sui risultati ottenuti dalle simulazioni ha un forte impatto la qualità e la quantità di dati disponibili in precedenza e rilevati durante il progetto, in quanto essi costituiscono parte dei dati di ingresso delle simulazioni stesse.

Prendiamo ora in considerazione le varie procedure di simulazione adottate cercando di porre in luce la validità o meno del metodo per l'area in questione.

Relativamente alla simulazione realizzata con ConeFall, quello che è possibile riscontrare è che tale metodologia non può essere ritenuta valida per l'area esaminata, questo considerando principalmente il fatto che gli angoli utilizzati nella simulazione sono inerenti ad un'altra zona. Di conseguenza per avvalorare l'utilizzo di tale procedura sarebbe necessario calibrare i valori dell'angolo del cono direttamente sull'area di Villa Santina. Questo programma consente la definizione del potenziale di propagazione dei blocchi dalle aree sorgenti, che risulta essere eccessivo rispetto a quanto esaminato sul terreno e da fonti storiche, soprattutto utilizzando un angolo del cono di 28°. Un'ulteriore limite di tale applicazione consiste nell'impossibilità di assegnare la suscettibilità di innesco a ciascuna cella. Una forte influenza sul valore del count è naturalmente data dalla tipologia di sorgenti in ingresso, in quanto le areali restituiranno valori superiori alle lineari, ciò dovuto al quantitativo in numero nettamente superiore. Questo porta a considerare che potrebbe risultare necessario effettuare una più approfondita analisi sulla scelta delle tipologie di sorgenti da utilizzare in funzione della scala del problema e degli scopi che ci si prefigge. Nell'ambito del progetto sono stati ritenuti più soddisfacenti i risultati ottenuti per mezzo delle sorgenti areali, pur considerando la limitata validità del metodo.

Per quanto riguarda RocFall, naturalmente l'applicazione a soli due settori dell'area in esame non consente una completa caratterizzazione dell'area stessa. In ogni caso si può verificare come esso si fortemente dipendente dalla rugosità del LiDAR e di conseguenza dal passo utilizzato per la realizzazione dei profili in ambiente GIS (3m). Un passo ristretto può portare anche a considerare eventuali artefatti dovuti alla risoluzione del LiDAR; d'altra parte, un campionamento più spazioso porterebbe all'introduzione di una morfologia fin troppo approssimata che invaliderebbe la

simulazione. Un altro parametro da considerare è la variabilità concessa ai dati che può portare all'introduzione di errori nel modello sia in eccesso che in difetto. Nel corso delle calibrazioni si è ritenuto utilizzare un coefficiente di variazione pari al 35%, che ha portato un'approssimazione più veritiera della realtà rispetto ad altri valori.

Considerando la mappa di pericolosità realizzata a partire dai dati forniti da RocFall, per mezzo della metodologia RHAP, si può evidenziare come tale mappa risulti essere forse troppo mitigata rispetto alla realtà. Quello che invece è emerso dalle elaborazioni è che la variante proposta in questo progetto, basata sull'assegnazione ai singoli domini di una media pesata dei valori relativi alla carta della suscettibilità realizzata tramite l'analisi cinematica effettuata con Slopmap, possa risultare una valida alternativa all'utilizzo della classica procedura. Questo infatti consente di evitare problematiche nell'assegnazione dei cinque parametri previsti, caratterizzati da una forte soggettività e dalla competenza dell'operatore.

In ultimo, per ciò che concerne Hy-Stone, quello che è possibile evidenziare è la forte dipendenza dei risultati dalla tipologia di sorgenti immesse e dalla suscettibilità utilizzata.

Come è stato possibile osservare le sorgenti areali consentono una più corretta caratterizzazione dell'area rispetto alle lineari, le quali determinano valori eccessivamente contenuti soprattutto in termini di frequenze di transito e di energie cinetiche.

Confrontando le due tipologie di sorgenti areali, è facile vedere come quelle euristiche, maggiori in numero, determinino una pericolosità superiore rispetto alle deterministiche riclassificate ad una pendenza maggiore a 55°. Dal punto di vista della suscettibilità all'innescò la metodologia uniforme risulta essere la meno adatta, in quanto non considera variazioni lungo il versante, il che non risulta essere realistico. La suscettibilità valutata con il metodo euristico risente della soggettività e dell'esperienza dell'operatore nel riconoscere i fenomeni di crollo, quindi la metodologia migliore risulta essere quella di valutare la suscettibilità per mezzo dell'approccio deterministico basato sul rapporto tra il numero di cinematismi reali e potenziali.

Per quanto riguarda il volume del blocco di progetto si ritiene valido quello determinato tramite il metodo degli *outliers* con coefficiente 1.5 e volume massimo determinato con il metodo *Whisker 5-95*. Per una più corretta e mirata caratterizzazione del volume da utilizzare potrebbe risultare utile l'applicazione di rilevamenti eseguiti con laser scanner terrestri, in modo da poter identificare differenti volumi inerenti a differenti aree omogenee. Questo consentirebbe di simulare il crollo di blocchi in ciascuna zona omogenea per mezzo del relativo volume identificato, rendendo forse più

verosimile la modellazione. Naturalmente si ha poi un ruolo determinate legato ai parametri di restituzione: l'uso di un coefficiente di restituzione normale troppo basso rispetto a quello tangenziale può invalidare la simulazione, determinando la perdita di molta energia cinetica a seguito dei primi impatti sul versante. Nel complesso si ritengono affidabili i valori utilizzati.

Valutando infine i risultati ottenuti per mezzo dell'RHV, si ha che lo scenario più pericoloso è quello ottenuto considerando sorgenti areali euristiche e suscettibilità all'innesco valutate con approccio euristico. Questo è dovuto essenzialmente al numero cospicuo di pixel sorgenti, come già detto, e al fatto che le percentuali di suscettibilità all'innesco utilizzate sono maggiori rispetto a quelle determinate con approccio deterministico. Tuttavia considerando la soggettività insita in tale metodologia si ritiene più corretto utilizzare i dati ottenuti dalla simulazione effettuata con sorgenti e suscettibilità identificate con approccio deterministico.

BIBLIOGRAFIA

Agliardi F. & Crosta G.B.: High resolution three-dimensional numerical modelling of rock falls, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sci.*, 40, 455–471, 2003.

Agliardi F.: Frane di crollo e caduta massi: modellazione numerica 3D e valutazione della pericolosità. Tesi di dottorato in Scienze della Terra (XV ciclo), Università degli Studi di Milano, 228 pp, 2003.

Agliardi F.: Zonazione della pericolosità connessa a fenomeni di caduta massi tramite l'approccio del "cono d'ombra", Esercitazione del corso di "Valutazione dei rischi geologico ambientali" A.A. 2006-2007.

Agostinacchio M., Olita S.: Elementi di ritenuta paramassi - Tecnica e progettazione per costruzioni stradali e ferroviarie. EPC Libri, 2002.

Baillifard F., Jaboyedoff M., Sartori M., 2003. Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 431–438.

Carulli G.B. (2006): Carta Geologica del Friuli-Venezia Giulia. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Università di Trieste e Università di Udine. Ed. SELCA, Firenze (carta a scala 1:150.000 e Note Illustrative).

CONEFALL 1.0 User's Guide. Open report – Soft 01, Quanterra. www.quanterra.org. 15p. 2003.

Crosta G.B., Agliardi F., 2003. A new methodology for physically-based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 407-422.

Crosta G. B. and Agliardi F.: Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2004) 4: 583–598.

Crosta G. B., Carrara A., Agliardi F., Campedel P., Frattini P.: Valutazione della pericolosità da caduta massi tramite un approccio integrato statistico e deterministico. *Giornale di Geologia Applicata* 4 (2006) 41-48, doi: 10.1474/GGA.2006-04.0-05.0133.

Dispense del corso di “Geomorfologia avanzata e stabilità dei versanti” del prof. Crosta, A.A. 2008-2009.

Dispense del corso di “Metodi di indagine geologico-tecnica, I e II modulo” del prof. Agliardi, A.A. 2008-2009.

Guide geologiche Regionali: Alpi e Prealpi Carniche e Giulie, Friuli Venezia Giulia a cura della Società Geologica Italiana.

Gunther A.: SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes. *Computers & Geosciences* 29 (2003) 865–875.

Hoek E.: *Practical Rock Engineering*, 2007. Disponibile su www.rocscience.com.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia: Redazione della mappa di pericolosità sismica, prevista dall’Ordinanza PCM del 20 marzo 2003, n. 3274, All.1. Rapporto Conclusivo; Bozza - Aprile 2004.

Jaboyedoff M.: Design of a pseudo-3D topographic analysis computer program: COLTOP-3D. Project Proposal, PROJECT – 01, 2003, Quanterra. www.quanterra.org.

Jaboyedoff M., Dudt J. P., and Labiouse V.: An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 621–632, 2005.

Jaboyedoff M., Couture R., Locat P.: Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: Toward a progressive failure. *Geomorphology* 103 (2009) 5–16.

Malagnini L., Montaldo V. (Marzo 2004): Relazione di attenuazione del moto del suolo. App.3 al rapporto conclusivo.

Manca P., Kranitz F., Oberti S., Piano C. (2006): Analisi del dissesto da frana in Friuli Venezia Giulia. Rapporto IFFI.

Meletti C., Montaldo V., Gulia L. (2004-2006): Task1 – Completamento delle elaborazioni relative a MPS04; Valutazioni sperimentali di amax provenienti da un albero logico più complesso di quello adottato per la redazione di MPS04.

Palmstrom A.: Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Published in *Tunnels and Underground Space Technology* 20 (2005) 362-377.

Pfeiffer T.J., and Bowen T.D., (1989): Computer Simulation of Rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* Vol. XXVI, No. 1, 1989 p 135-146.

Podda F.: Relazione sul rilevamento litologico e geologico-strutturale di n. 3 aree del Friuli Venezia Giulia (Timau, Villa Santina, Venzone). Progetto MASSMOVE.

Priest S. D. and Hudson J. A. Discontinuity spacings in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13, 135-148 (1976).

Stevens W., 1998. Rocfall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada, 105p.

Sturzenegger M., Sartori M., Jaboyedoff M., Stead D.: Regional deterministic characterization of fracture networks and its application to GIS-based rock fall risk assessment. *Engineering Geology* 94 (2007) 201–214.

ALLEGATI

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI												
Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	1	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore	tutti	DATA	13/11/2009	
INFORMAZIONI GENERALI												
Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento				CTR	Progressivo foto					859-860-861-864-865 AC
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE										
Tipologia dell'opera (2)	8	NOTE										
Quota minima (m. s.l.m.)	355											
Quota massima (m. s.l.m.)												
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	Areale	X								
CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE												
Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE										
Estensione massima (m, m2)		NOTE										
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi che non arrivano fino alla struttura									
CARATTERISTICHE DELL'OPERA												
Materiali costruttivi (4)	2-4	NOTE	con geosintetico									
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5)	3								
Descrizione dei danni												
DIMENSIONI	Lunghezza (m)	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)		1 QUANTITA'	cimitero							
	Larghezza media base (m)	6,5										
	Larghezza media sommità (m)	2										
	Altezza/prof. minima (m)											
	Altezza/prof. media (m)	4,5										
	Altezza/prof. massima (m)											
	Superficie (m2)											
ANNOTAZIONI E DISEGNI												
<p style="text-align: center;">Sezione AA</p>			<p style="text-align: center;">Sezione BB</p>									
			Rete metallica quadrata, al di sotto geogriglia (tessuto non tessuto)									
ATTRIBUTI												
(1)	1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base) 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza) 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione) 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base) 5: Fondovalle											
(2)	1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche) 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete) 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni) 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM) 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero) 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari) 7: Vallo paramassi (in scavo) 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)											
(3)	1: Parete rocciosa continua molto frantumata 2: Parete rocciosa continua mediamente frantumata 3: Affioramenti discontinui 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana 6: Altro (indicare)											
(4)	1: Legname 2: Metallo 3: Terra 4: Terra armata/rinforzata 5: CA			(5) 1: Pessimo 2: Discreto 3: Ottimo								
(6)	1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza) 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza) 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali) 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro) 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari) 6: Infrastrutture tecnologiche 7: Altro (indicare)											

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	2	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore	Tutti	DATA	13/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	-------	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	863-878-879 ac
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	8	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	Areale	X	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi che non arrivano fino al muro		

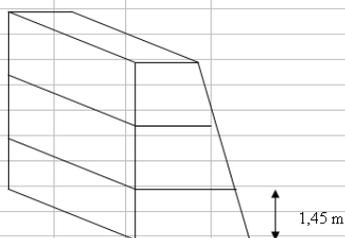
CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	5	NOTE			
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5)	3	
Descrizione dei danni					ASSENTI

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	1	QUANTITA'	abitazioni
	Larghezza media base (m)	1.6				
	Larghezza media sommità (m)	1				
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	5.6	un pannello	1.45		
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	3	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	14/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	da 142 a 154 AC
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)	340				
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE	
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	massi e cono detritico

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

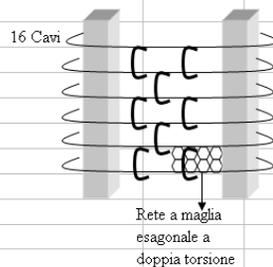
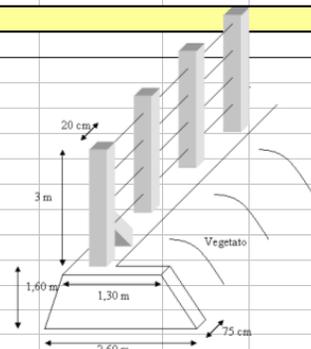
Materiali costruttivi (4)	2-5	NOTE	
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5) 3
Descrizione dei danni			

DIMENSIONI	Lunghezza (m)	83	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)					
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI

Buco tra le due di 3,60



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	4	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	16/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR
Ubicazione dell'opera (1)	4	NOTE	
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE	
Quota minima (m. s.l.m.)			
Quota massima (m. s.l.m.)			
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X
		Areale	

Progressivo foto	180-181 ac 184-5-6-7 av
------------------	----------------------------

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	3	NOTE	
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Blocchi

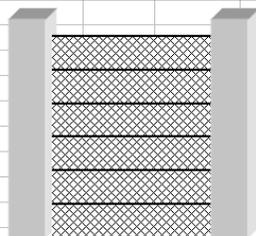
CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE	
Stato di efficienza (5)	2	NOTE	riparata (foto 186 AV)
Descrizione dei danni	Foro all'interno della rete con danni alle funi metalliche che risultano rilassate nell'area di impatto pannello di rete con bottoni saltati e risistemati		
DIMENSIONI	Lunghezza (m)	25	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)
	Larghezza media base (m)		1 QUANTITA'
	Larghezza media sommità (m)		abitazioni
	Altezza/prof. minima (m)		
	Altezza/prof. media (m)	2.5	
	Altezza/prof. massima (m)		
	Superficie (m2)		

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI

Barriera rigida con putrelle in acciaio



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	5	Inventario FVG (SI / NO)		Rilevatore		DATA	16/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	--	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	183, 190,191,192,195,196,197,201,202,203 AV 934-935-936-938-943 AC
----------------------	--------	----------------------------	-----	------------------	---

Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE		
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE		
Quota minima (m. s.l.m.)	265			
Quota massima (m. s.l.m.)				
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	Areale	X

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	2	NOTE
Estensione massima (m, m2)		NOTE
Evidenze di attività (SI / NO)		DESCRIZIONE

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

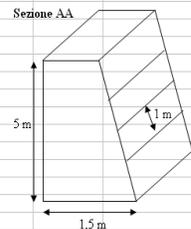
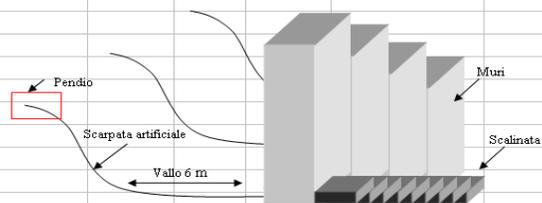
Materiali costruttivi (4)	5	NOTE
Stato di efficienza (5)	3	NOTE
Descrizione dei danni		

- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

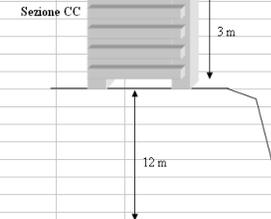
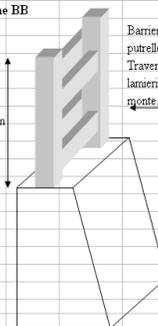
DIMENSIONI	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	1	QUANTITA'
Lunghezza (m)			
Larghezza media base (m)			
Larghezza media sommità (m)	0.8		
Altezza/prof. minima (m)			
Altezza/prof. media (m)	2.5 AA= 5m		
Altezza/prof. massima (m)			
Superficie (m2)			

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto frantumata
 2: Parete rocciosa continua mediamente frantumata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corno di frana

ANNOTAZIONI E DISEGNI



Sezione BB



MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	6	Inventario FVG (SI / NO)	No	Rilevatore	DATA	17/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	962/966-970 ac
Ubicazione dell'opera (1)	4	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	4	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

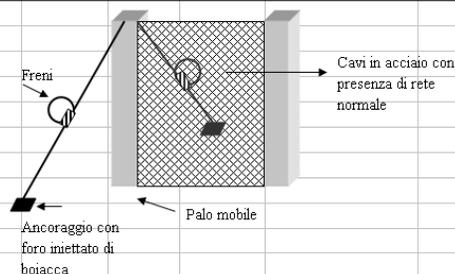
Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE			

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE	Pali + rete	Efficacia (5)	3
Stato di efficienza (5)	3	NOTE			
Descrizione dei danni					

DIMENSIONI	Lunghezza (m)	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	STRDA
Larghezza media base (m)					
Larghezza media sommità (m)	0.3				
Altezza/prof. minima (m)					
Altezza/prof. media (m)	4.5				
Altezza/prof. massima (m)					
Superficie (m2)					

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	UDINE	Comune	Villa Santina	ID opera	7	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	17/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	239-242 AV
Ubicazione dell'opera (1)	4	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)		NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

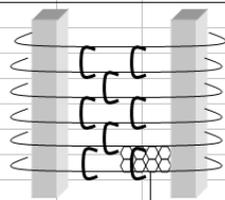
Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE			

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE			
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5)	3	
Descrizione dei danni	rete intatta				

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'
	Larghezza media base (m)	0,3 cm			
	Larghezza media sommità (m)				
	Altezza/prof. minima (m)				
	Altezza/prof. media (m)	4			
	Altezza/prof. massima (m)				
	Superficie (m2)				

ANNOTAZIONI E DISEGNI



Rete a maglia esagonale a doppia torsione

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	8	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	19/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1021-1022-1023-1024-1025-1026-1027-1
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	3-4	NOTE			
Quota media (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Blocchi		

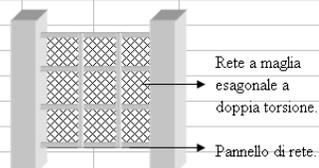
CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE			
Stato di efficienza (5)	3	NOTE		Efficacia (5)	3
Descrizione dei danni					

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)	20 Cm	palo		1	poche abitazioni
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	4.5				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	9	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	
-----------	-------	--------	---------------	----------	---	--------------------------	----	------------	--	------	--

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1032-1033-1034-1036 AC
----------------------	--------	----------------------------	-----	------------------	------------------------

Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE		
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE		
Quota minima (m. s.l.m.)				
Quota massima (m. s.l.m.)				
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	2	NOTE
Estensione massima (m, m2)		NOTE
Evidenze di attività (SI / NO)		DESCRIZIONE

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (gali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

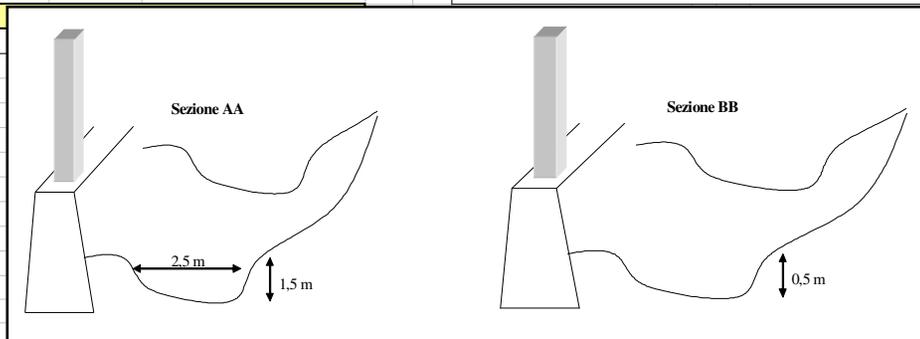
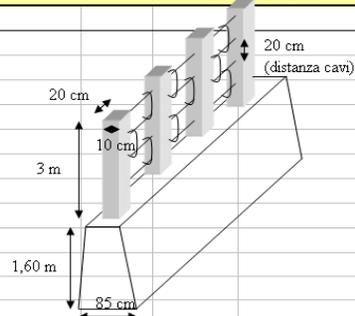
Materiali costruttivi (4)	2-5	NOTE
Stato di efficienza (5)	3	NOTE
Descrizione dei danni		

- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	4.6				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto frantumata
 2: Parete rocciosa continua mediamente frantumata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	10	Inventario FVG (SI / NO)	No	Rilevatore		DATA	19/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR
Ubicazione dell'opera (1)	1	NOTE	
Tipologia dell'opera (2)	10	NOTE	
Quota minima (m. s.l.m.)			
Quota massima (m. s.l.m.)			
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	Areale X

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	1	NOTE	
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Masso pericolante agganciato con fune metallica

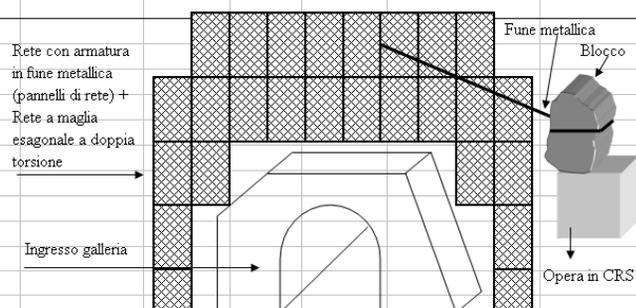
CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE	
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5) 3
Descrizione dei danni			

DIMENSIONI	Lunghezza (m)	10	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	2
	Larghezza media base (m)				+ galleria	
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	10				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	11	Inventario FVG (SI / NO)	No	Rilevatore		DATA	19/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1005 AC
Ubicazione dell'opera (1)		NOTE	Versante		
Tipologia dell'opera (2)	7	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare		Areale	X

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)		NOTE	Versante
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)		DESCRIZIONE	

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	3	NOTE		Efficacia (5)	3
Stato di efficienza (5)		NOTE			
Descrizione dei danni					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI

mancano i dreni



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	12	Inventario FVG (SI / NO)	No	Rilevatore		DATA	20/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1038-1040-1041 AC
Ubicazione dell'opera (1)	4	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	6	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

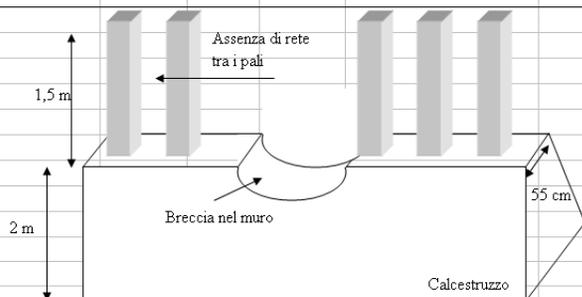
Tipologia dell'opera (3)	2	NOTE			
Estensione massima (m. m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi e il muro è rotto		

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	5	NOTE			
Stato di efficienza (5)	2	NOTE	Efficacia (5)	2	
Descrizione dei danni	Muro rotto				

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	1	QUANTITA'	Casolari Piluc
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)	0.55				
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)					
	Altezza/prof. massima (m)					
Superficie (m2)						

ANNOTAZIONI E DISEGNI



ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto frantumata
 2: Parete rocciosa continua mediamente frantumata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	13	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	20/11/2009
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1050-1051 AC
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
- 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

Tipologia dell'opera (3)	3	NOTE	
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi

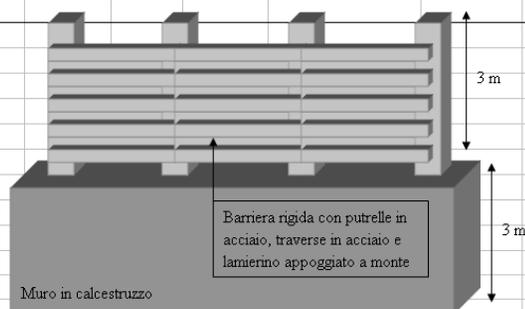
CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	5	NOTE	Muro in CA e presenza di rete
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5) 3
Descrizione dei danni			

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	1	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)	0.8				
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	3+3				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	14	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	05/02/2010
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1565/1577 AV
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	3	NOTE	Assenza di freni		
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

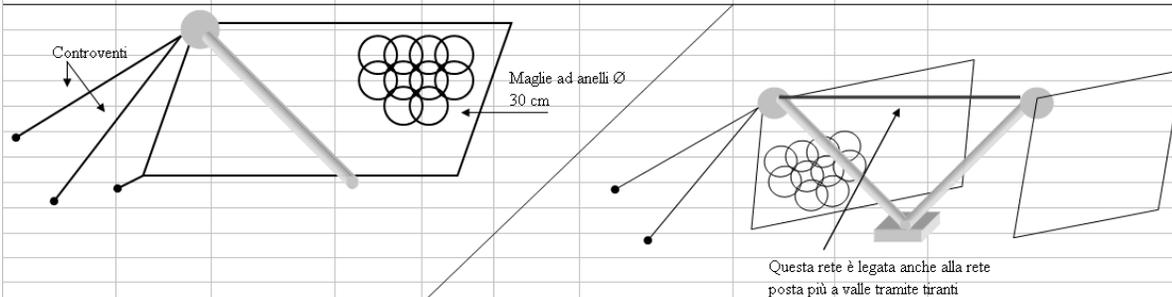
Tipologia dell'opera (3)	2-3	NOTE			
Estensione massima (m. m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE			

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE			
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5)	3	
Descrizione dei danni					

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	3,8				
	Altezza/prof. massima (m)					
Superficie (m2)						

ANNOTAZIONI E DISEGNI



ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
7: Vallo paramassi (in scavo)
8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)
- (3) 1: Parete rocciosa continua molto frantumata
2: Parete rocciosa continua mediamente frantumata
3: Affioramenti discontinui
4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
6: Altro (indicare)
- (4) 1: Legname
2: Metallo
3: Terra
4: Terra armata/rinforzata
5: CA
- (5) 1: Pessimo
2: Discreto
3: Ottimo
- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
6: Infrastrutture tecnologiche
7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	15	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	05/02/2010
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1565-1577 AV
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	2	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

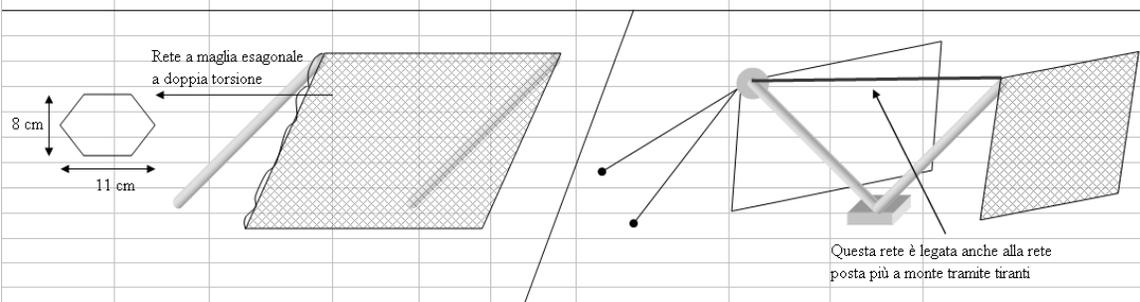
Tipologia dell'opera (3)	2-3	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE			

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE			
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5)	3	
Descrizione dei danni					

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	2.6				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

ANNOTAZIONI E DISEGNI



ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	16	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	05/02/2010
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE	
Tipologia dell'opera (2)	5	NOTE	2 file di gabbioni
Quota minima (m. s.l.m.)			
Quota massima (m. s.l.m.)			
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X
		Areale	

Progressivo foto	1588/89/90 AV
	1592 area retrostante

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

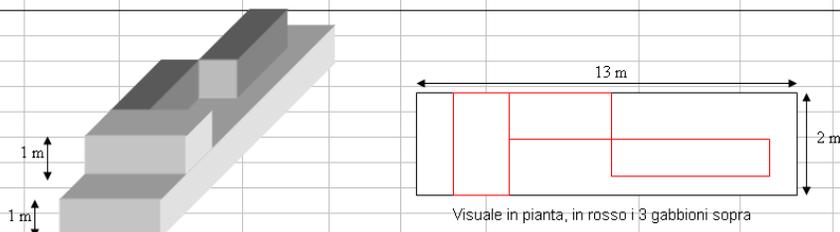
Tipologia dell'opera (3)	3-2	NOTE	
Estensione massima (m, m2)		NOTE	
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi dietro e vicino l'opera

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	4	NOTE	
Stato di efficienza (5)	3	NOTE	Efficacia (5) 2
Descrizione dei danni			

DIMENSIONI	Lunghezza (m)	13	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	2	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)	2				
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)	2				
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

ANNOTAZIONI E DISEGNI



MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	17	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	05/02/2010
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1593-1596 AV
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle
- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

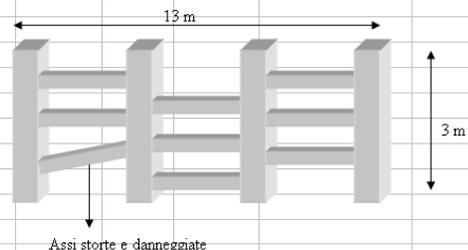
Tipologia dell'opera (3)	3-2	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	No	SCRIZIONE	Nell'area dell'opera non sono stati individuati blocchi né contro l'opera né alle sue spalle		

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2	NOTE			
Stato di efficienza (5)	1	NOTE	Efficacia (5)	1	
Descrizione dei danni	No, la struttura risulta comunque molto deteriorate e danneggiata				
DIMENSIONI	Lunghezza (m)	13	TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'
	Larghezza media base (m)				
	Larghezza media sommità (m)				
	Altezza/prof. minima (m)				
	Altezza/prof. media (m)	3			
	Altezza/prof. massima (m)				
	Superficie (m2)				

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

ANNOTAZIONI E DISEGNI



- (4) 1: Legname
 2: Metallo
 3: Terra
 4: Terra armata/rinforzata
 5: CA
- (5) 1: Pessimo
 2: Discreto
 3: Ottimo

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

MODULO DI RILEVAMENTO OPERE DI DIFESA PARAMASSI

Provincia	Udine	Comune	Villa Santina	ID opera	18	Inventario FVG (SI / NO)	SI	Rilevatore		DATA	05/02/2010
-----------	-------	--------	---------------	----------	----	--------------------------	----	------------	--	------	------------

INFORMAZIONI GENERALI

Scala di rilevamento	1:2500	Cartografia di riferimento	CTR	Progressivo foto	1597/1602/1606 AV
Ubicazione dell'opera (1)	5	NOTE			
Tipologia dell'opera (2)	1	NOTE			
Quota minima (m. s.l.m.)					
Quota massima (m. s.l.m.)					
Restituzione grafica dell'opera	Puntuale	Lineare	X	Areale	

CARATTERISTICHE DELLA ZONA SORGENTE

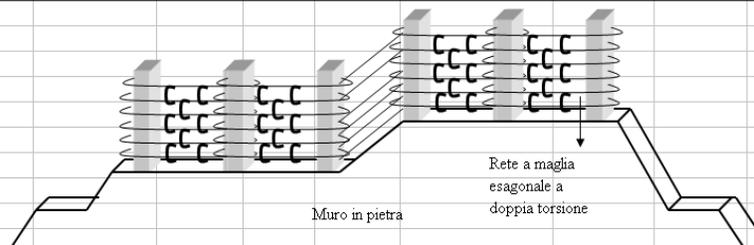
Tipologia dell'opera (3)	2-3	NOTE			
Estensione massima (m, m2)		NOTE			
Evidenze di attività (SI / NO)	SI	SCRIZIONE	Presenza di blocchi dietro l'opera		

CARATTERISTICHE DELL'OPERA

Materiali costruttivi (4)	2-3	NOTE	Muro in pietra e putrelle metalliche		
Stato di efficienza (5)	3	NOTE		Efficacia (5)	3
Descrizione dei danni					

DIMENSIONI	Lunghezza (m)		TIPO ELEMENTI A RISCHIO (6)	4	QUANTITA'	1
	Larghezza media base (m)					
	Larghezza media sommità (m)					
	Altezza/prof. minima (m)					
	Altezza/prof. media (m)					
	Altezza/prof. massima (m)					
	Superficie (m2)					

ANNOTAZIONI E DISEGNI



ATTRIBUTI

- (1) 1: Parete rocciosa (indicare altezza indicativa dalla base)
 2: Canale / impluvio (indicare larghezza/sezione/pendenza)
 3: Talus (indicare pezzatura/pendenza/vegetazione)
 4: Base del talus (indicare pendenza locale e distanza da base)
 5: Fondovalle

- (2) 1: Barriera paramassi rigida (in legname o putrelle metalliche)
 2: Barriera elastica a basso assorbimento (pali metallici e pannelli rete)
 3: Barriera deformabile - medio assorbimento (con controventi e freni)
 4: Barriera deformabile - alto assorbimento (+ pannelli o ASM)
 5: Muro in gabbioni (metallici riempiti di pietrame - NOTE: indicare numero)
 6: Muro in c.a. (NOTE: indicare spessore indicativo e particolari)
 7: Vallo paramassi (in scavo)
 8: Rilevato paramassi (in rilevato/riporto)
 9: Rete metallica in aderenza (maglia esagonale a doppia torsione)
 10: Rete metallica armata in aderenza (+ armatura in fune metallica)
 11: Pannelli di fune metallica in aderenza (maglia quadrata con rinforzi)
 12: Chiodature-bullonature-legature (specificare tipo)

- (3) 1: Parete rocciosa continua molto fratturata
 2: Parete rocciosa continua mediamente fratturata
 3: Affioramenti discontinui
 4: Rimobilizzazione da coperture detritiche
 5: Rimobilizzazione da nicchia o corpo di frana
 6: Altro (indicare)

- | | |
|----------------------------|----------------|
| (4) 1: Legname | (5) 1: Pessimo |
| 2: Metallo | 2: Discreto |
| 3: Terra | 3: Ottimo |
| 4: Terra armata/rinforzata | |
| 5: CA | |

- (6) 1: Edifici residenziali (indicare numero e consistenza)
 2: Edifici industriali (indicare numero e consistenza)
 3: Edifici di interesse pubblico (es. scuole, ospedali)
 4: Strade (indicare lunghezza tratto e calibro)
 5: Ferrovie (indicare lunghezza tratto e numero binari)
 6: Infrastrutture tecnologiche
 7: Altro (indicare)

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°1

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	425 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	15
Altezza (m):	4
Area (m ²):	30
Giacitura (imm./incl.):	200/90

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	195/13	4,5 (gs 4-5m)	-	2,5/5	ondulato	assente	umida	WD1-WD2	3	95
K1	155/88	12	50-90	chiusa o =1	planare/ondulato	assente	-	WD1-WD2	3	74
K2	48/78	10	50-90	chiusa o =1	planare/a scalini	assente	-	WD1-WD2	3	86
K3	301/25	metrica	50-90	1/2,5	planare	assente	-	WD1-WD2	-	-
K4	301/26	metrica	= 50	-	planare	assente	-	WD1-WD2	-	-

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R1-R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	20X20X10
	Massima	3X3X2
	Minima	200X200X100
	Forma	parallelepipedo
Jv	42.55	
VRU MEDIO (da Jv)	0.02	
RQD = 115 - 3,3*Jv	0	
GSI	70/78 --> B-M/G	

LOCALIZZAZIONE	
Località:	Villa Santina
Quota:	410 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO	
Lunghezza (m):	10
Altezza (m):	3
Area (m ²):	15
Giacitura (imm./incl.):	225/60

LITOTIPO	
Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'										
Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	188/17	35.5	50-90	2,5/5	planare	coesivo	-	WD2	2-4	60
K1	22/75	17	= 90	1/2,5	a scalini	assente	-	WD2	6-8	54
K2	254/80	20	50-90	1/2,5	a scalini	coesivo	-	WD2	6-8	67
K3	206/82	103	= 90	1/2,5	ondulato	coesivo	-	WD2	6-8	60
K4	106/37	18.6	50-90	1/2,5	ondulato	assente	-	WD2	6-8	54

AMMASSO ROCCIOSO		
CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	20X10X5
	Massima	2X2X2
	Minima	200X100X100
	Forma	parallelepipedo
Jv	20	
VRU MEDIO (da Jv)	0.05	
RQD = 115 - 3,3*Jv	49	
GSI	55/62 --> B-VB/G	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°3

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	405 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	-
Giacitura (imm./incl.):	180/85

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	29/20	35 (gs 2,5m)	= 90	= 5	ondulato	coesivo	-	WD2	8-10	62
K1	127/76	14	50-90	chiusa o = 1	planare/a scalini	assente	-	WD2	4-6	31
K2	243/69	17	= 50	chiusa o = 1	ondulato/a scalini	assente	-	WD1	2-4	74
K3	185/81	130	= 90	= 5	ondulato	coesivo	-	WD2	6-8	47
K4	115/24	12	= 50	chiusa	ondulato	assente	-	WD1	10-12	82
K5	335/55	10	= 50	chiusa	ondulato	assente	-	WD1	2-4	129

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	14X21X23
	Massima	4X3X3
	Minima	350X130X300
	Forma	parallelepipedo
Jv	34.9	
VRU MEDIO (da Jv)	0.03	
RQD = 115 - 3,3*Jv	0	
GSI	55 --> VB-G	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°4

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	455 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	-
Giacitura (imm./incl.)	190/60

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	6/17	43 (gs 5m)	= 90	1/2,5	ondulato	coesivo	-	WD2	3	82
K1	350/81	9	50-90	= 1	planare/ondulato	assente	-	WD2	5	63
K2	59/77	12	50-90	= 1	planare/ondulato	assente	-	WD2	3	86
K3	208/22	11	50-90	= 1	planare/ondulato	assente	-	WD2	3	60
K4	33/74	23	50-90	1/2,5	planare/ondulato	coesivo	-	WD2	7	57
K5	132/61	14	= 50	= 1	planare/a scalini	assente	-	WD2	3	44

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	15X10X7
	Massima	3X2X1
	Minima	150X150X100
	Forma	paralleloipedo
Jv	42.35	
VRU MEDIO (da Jv)	0.02	
RQD = 115 - 3,3*Jv	0	
GSI	47/53 --> VB-G	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°5

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	674 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	-
Giacitura (imm./incl.):	210/70

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiaro ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	55/6	5,2 (10m gs)	= 90 gs; = 50 ps	= 5 gs	ondulato	coesivo	-	WD2	2-4	86
K1	239/66	12.3	50-90	chiusa o = 1	ondulato	assente	-	WD2	8-10	57
K2	127/50	8	= 90	1/2,5	planare/ondulato	coesivo	-	WD2	4-6	111
K3	351/62	22	= 50	chiusa o = 1	ondulato	assente	-	WD2	12	70
K4	190/28	dai 5 ai 10	= 50	chiusa o = 1	ondulato	assente	-	WD2	8-10	27

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2
ALTERAZIONE A.R.	W2
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media Massima Minima Forma
	20X15X10 2X3X1 100X60X30 parallelepipedo
Jv	57.7
VRU MEDIO (da Jv)	0.02
RQD = 115 - 3,3*Jv	0
GSI	58/62 --> B/VB-G

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°6

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	512 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	-
Giacitura (imm./incl.)	170/75

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC
S	47/29	22,6 (da 1 a 4m gs)	= 90	1/2.5(ps) o = 5(gs)	planare(ps)/ondulato(gs)	coesivo (gs)	-	WD2	3
K1	289/80	17.3	= 90	1/2.5	planare	assente	-	WD2	3
K2	195/66	23.3	50-90	= 1	ondulato	assente	-	WD2	5
K3	50/65	13.5	= 50	= 1	ondulato	assente	-	WD2	3

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	17X9X7
	Massima	2X1.5X1
	Minima	75X40X40
	Forma	parallelepipedo
Jv	21.9	
VRU MEDIO (da Jv)	0.05	
RQD = 115 - 3.3*Jv	43	
GSI	52/58 --> VB-G	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°7

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	380 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	8
Altezza (m):	3.5
Area (m ²):	14
Giacitura (imm./incl.):	70/75

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	217/48	33.5	=90	1/2,5	planare/ondulato	coesivo	-	WD2	6	40
K1	293/78	25.6	50-90	1/2,5	ondulato	assente	-	WD2	12	42
K2	69/59	14.14	50-90	1/2,5 o =1	ondulato	assente	-	WD2	10	44

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	40X30X30
	Massima	5X5X5
	Minima	100X50X30
	Forma	parallelepipedo
Jv	13.9	
VRU MEDIO (da Jv)	0.07	
RQD = 115 - 3,3*Jv	69	
GSI	57/62 --> B-G	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°8

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	600 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	10
Altezza (m):	4
Area (m ²):	20
Giacitura (imm./incl.):	260/75

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	255/46	23.4	=90	2,5/5	a scalini	coesivo o assente	-	WD2	6	35
K1	344/87	7.6	50-90	2,5/5 o =5	planare/ondulato	assente	-	WD2	3	36
K2	123/50	6.3	50-90	=1	ondulato	assente	-	WD2	18	31

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	10X10X10
	Massima	4X5X3
	Minima	70X60X40
	Forma	parallelepipedo
Jv	33.3	
VRU MEDIO (da Jv)	0.03	
RQD = 115 - 3,3*Jv	5	
GSI	52/57 --> B-F	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°9

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	330 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	-
Giacitura (imm./incl.)	134/75

LITOTIPO

Formazione:	Dolomia dello Sciliar (Ladinico)
Descrizione Geologica:	Dolomie e calcari dolomitici grigio-chiari ben stratificati o a stratificazione indistinta: depositi di piattaforma carbonatica

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	292/30	10.93	50-90	chiusa o =1	ondulato	coesivo	-	WD2	2	38
K1	230/76	13.12	=50	chiusa	ondulato	-	-	WD2	8	36
K2	145/56	9	=50	chiusa	planare/ondulato	-	-	WD2	4	35
K3	327/68	16.4	-	=1	ondulato/a scalini	coesivo	-	WD2	14	33

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	35X30X20
	Massima	8X7X6
	Minima	100X140X150
	Forma	paralleloipedo
Jv	33.9	
VRU MEDIO (da Jv)	0.03	
RQD = 115 - 3,3*Jv	3	
GSI	63/67 --> B-G/F	

SCHEDA DI SINTESI - RILIEVO GEOMECCANICO n°10

LOCALIZZAZIONE

Località:	Villa Santina
Quota:	680 m
Coord. UTM	

DIMENSIONI AFFIORAMENTO

Lunghezza (m):	-
Altezza (m):	-
Area (m ²):	1700
Giacitura (imm./incl.):	245/80

LITOTIPO

Formazione:	Formazione della Val Degano (Carnico inf.)
Descrizione Geologica:	Calcari scuri ben stratificati alternati a marne in strati sottili con rare areniti tuffiche verdi; alla base sporadiche lenti di carbone: depositi di laguna

DISCONTINUITA'

Famiglia/Set	Piano Modale imm./incl.	Spaziatura cm	Persistenza %	Apertura mm	Ondulazione	Riempimento	Umidità	Alterazione Discontinuità	JRC	JCS (Mpa)
S	130/24	11.5	=90	1/2,5	planare/ondulato	coesivo	-	WD2	2	41
K1	290/84	16.9	50-90	=5	planare/ondulato	assente	-	WD2	10	42
K2	27/83	19.3	50-90	=5	ondulato/a scalini	assente	-	WD2	12	46

AMMASSO ROCCIOSO

CLASSE A.R.	R2	
ALTERAZIONE A.R.	W2	
DIMENSIONI BLOCCHI cm	Media	15X10X7
	Massima	3X2X1
	Minima	150X150X100
	Forma	parallelepipedo
Jv	19.79	
VRU MEDIO (da Jv)	0.05	
RQD = 115 - 3,3*Jv	50	
GSI	52/67 --> B/VB-G/F	



Università degli Studi di Milano Bicocca
 Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Geologiche

Carta Geologica

ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ
 E DELLA PERICOLOSITÀ
 DA FRANE DI CROLLO
 NELL'AREA DI VILLA SANTINA (UD).

ANDREA VALAGUSSA
 matr. 072715

Relatore: Dott. Paolo FRATTINI
 Correlatore: Dott. Federico AGLIARDI

Depositi del Quaternario

-  Alluvioni attuali
-  Coltre aluvio-colluviale
-  Deposito di frana
-  Detrito di falda attuale e recente
-  deposito di conoide alluvionale

Successione Sedimentaria

-  Dolomia dello Sciliar
-  Formazione della Val Degano
-  Lutiti verdi
-  Till indifferenziato





Università degli Studi di Milano Bicocca
 Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Geologiche

Carta Geomorfologica

ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ
 E DELLA PERICOLOSITÀ
 DA FRANE DI CROLLO
 NELL'AREA DI VILLA SANTINA (UD).

ANDREA VALAGUSSA
 matr. 072715

Relatore: Dott. Paolo FRATTINI
 Correlatore: Dott. Federico AGLIARDI

Orli

-  Orlo di scarpata di erosione inattiva
-  Orlo di scarpata di erosione torrenzializzata attiva
-  Orlo di scarpata di degradazione
-  Orlo di scarpata interessata da caduta massi
-  Orlo di scarpata morfologica
-  Orlo di scarpata incipiente

Depositi

-  Falda di detrito
-  Cono da debris flow
-  Cono di detrito
-  Corpo da debris flow
-  Conoide misto
-  Accumulo Antropico

Evidenze di fenomeni franosi

-  Accumulo/corpo di frana inattiva
-  Accumulo/corpo di frana attiva
-  Nicchia di frana attiva
-  Frana
-  Franosità diffusa
-  Aree di distacco
-  Punti di distacco

Morfologia legata all'idrografia

-  Alveo profondamente inciso con fondo in roccia
-  Alveo con evidenze di debris flow recenti
-  Alveo in detrito





Università degli Studi di Milano Bicocca
 Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Geologiche

Carta dell'Uso del Suolo

ANALISI DELLA SUSCETTIBILITÀ
 E DELLA PERICOLOSITÀ
 DA FRANE DI CROLLO
 NELL'AREA DI VILLA SANTINA (UD).

ANDREA VALAGUSSA
 matr. 072715

Relatore: Dott. Paolo FRATTINI
 Correlatore: Dott. Federico AGLIARDI

Classi dell'Uso del Suolo

- Vegetazione Arbustiva
- Bosco
- Bosco Rado
- Vegetazione Assente
- Prati e Pascoli
- Rilevato
- Strada
- Area Urbana

