



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

Analisi del pericolo da debris flow nella Pfitschertal (Bz) mediante il modello Flow-R

Relatore:

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatore:

Dott.ssa Tamara Michelini

Laureanda:

Roberta Pastorello

Matricola n.

1035588

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

INDICE

RIASSUNTO	9
ABSTRACT	11
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	13
1. DEBRIS FLOW	13
1.1. DEFINIZIONE DI DEBRIS FLOW	13
1.2. CLASSIFICAZIONE DEI DEBRIS FLOW	15
1.2.1. <i>Classificazione di Ancey</i>	15
1.2.2. <i>Classificazione di Jakob</i>	18
1.3. DINAMICA DEI DEBRIS FLOW	19
1.3.1. <i>Innesco</i>	19
1.3.2. <i>Trasporto</i>	20
1.3.3. <i>Deposito</i>	21
2. PREVISIONE DEL PERICOLO DA DEBRIS FLOW	23
2.1. CONCETTI DI PERICOLO E RISCHIO	23
2.2. STIMA A SCALA DI BACINO: IL CONOIDE	25
2.3. STIMA A SCALA DI MACROAREA: VALLE	26
2.4. NORMATIVA PER LA REDAZIONE DEL PIANO DELLE ZONE DI PERICOLO DELLA PROVINCIA DI BOLZANO	28
CAPITOLO 2 – MATERIALI E METODI	33
3. AREA DI STUDIO	33
3.1. VAL DI VIZZE	33
3.1.1. <i>Inquadramento geografico</i>	33
3.1.2. <i>Inquadramento geologico</i>	34
3.1.3. <i>Uso del suolo</i>	37
3.2. DESCRIZIONE DEI BACINI DI STUDIO	39
3.2.1. <i>Bacino del Rio Avenes</i>	39
3.2.2. <i>Bacino dell'affluente del Rio Avenes</i>	43
3.3. INQUADRAMENTO METEOROLOGICO	47
3.3.1. <i>Alto Adige</i>	47
3.3.2. <i>Alta Val d'Isarco</i>	48
3.3.3. <i>L'evento del 4 agosto 2012 in Val di Vizze</i>	49
4. MATERIALI E METODI	54
4.1. IL MODELLO BIDIMENSIONALE FLO-2D PER LA SIMULAZIONE A SCALA DI DETTAGLIO	54
4.2. IL MODELLO NUMERICO SEMI-EMPIRICO FLOW-R PER LA SIMULAZIONE A SCALA DI MACROAREA	58
4.2.1. <i>Identificazione delle celle sorgenti</i>	59
4.2.2. <i>Algoritmi di propagazione</i>	62
4.2.3. <i>Output del modello</i>	64
4.3. VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DI PREVISIONE DEI MODELLI NEI BACINI DEL RIO AVENES E DEL RIO TULVE	65
CAPITOLO 3 – RISULTATI E DISCUSSIONE	67
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE TRAMITE IL MODELLO FLO-2D	67

5.1.	IDROGRAMMA E DEBRISGRAMMA SEMPLIFICATI DEL RIO AVENES.....	67
5.2.	IDROGRAMMA E DEBRISGRAMMA SEMPLIFICATI DELL’AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	68
5.3.	SIMULAZIONE DELL’EVENTO DEL 4 AGOSTO 2012 SUI RII AVENES E TULVE	69
6.	CALIBRAZIONE DEL MODELLO FLOW-R A SCALA DI DETTAGLIO.....	71
6.1.	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DI SIMULAZIONE PER IL RIO AVENES.....	71
6.2.	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DI SIMULAZIONE PER RIO TULVE E “EVENTO BOSCO”	75
6.3.	RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE A SCALA LOCALE.....	77
6.3.1.	<i>Rio Avenes</i>	77
6.3.2.	<i>Rio Tulve e “evento bosco”</i>	86
6.4.	ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI A SCALA LOCALE.....	92
6.5.	CLASSIFICAZIONE DELLA PROBABILITÀ DI TRANSITO RISULTANTE DA FLOW-R.....	93
7.	SIMULAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ A DEBRIS FLOW A SCALA REGIONALE	97
8.	APPLICAZIONE DEL MODELLO REGIONALE E TRASPOSIZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ IN PERICOLOSITÀ....	109
8.1.	REDAZIONE DELLA CARTA DEL PERICOLO CON IL MODELLO FLO-2D.....	109
8.2.	TRASPOSIZIONE DEI VALORI DI SUSCETTIBILITÀ IN CLASSI DEL PERICOLO	111
	CONCLUSIONI	114
	BIBLIOGRAFIA.....	117

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: DIAGRAMMA DI UN'ONDA DI DEBRIS FLOW CON UN FRONTE IN MASSI (PIERSON, 1986).....	15
FIGURA 2: DIVERSE TIPOLOGIE DI ONDE DI DEBRIS FLOW.....	15
FIGURA 3: TIPI DI FLUIDO DISTINTI IN BASE ALLA LORO REOLOGIA.....	16
FIGURA 4: FORMA DEI DEPOSITI DEI TRE DIVERSI TIPI DI COLATE DETRITICHE.....	17
FIGURA 5: AREA D'INNESCO SITUATA NEI PRESSI DEL RIO AVENES (ARCHIVIO ED30).....	19
FIGURA 6: CANALE DI SCORRIMENTO DEL RIO TULVE (ARCHIVIO ED30).....	20
FIGURA 7: DEPOSITO IN CONOIDE NEI PRESSI DELL'ABITATO DI AVENES (ARCHIVIO ED30).....	21
FIGURA 8: FORME DI DEPOSITO DEI DEBRIS FLOW.....	22
FIGURA 9: MATRICE DI DEFINIZIONE DEI LIVELLI DI PERICOLO, MODIFICATA SECONDO BUWAL (1998), PER FRANE E PERICOLI IDRAULICI. .	31
FIGURA 10: VEDUTA AEREA DELLA VAL DI VIZZE (ARCHIVIO ED30).....	33
FIGURA 11: CARTA DELL'ALTO ADIGE. EVIDENZIATA IN ROSSO L'AREA IN CUI È COMPRESA LA VAL DI VIZZE.	34
FIGURA 12: CARTA GEOLOGICA DELLA VAL DI VIZZE.....	36
FIGURA 13: PORZIONE DELLA VALLE IN CUI SI DISTINGUONO I DIVERSI USI DEL SUOLO.	37
FIGURA 14: USO DEL SUOLO DELLA PORZIONE MEDIO-BASSA DELLA VAL DI VIZZE.....	38
FIGURA 15: BACINO IDROGRAFICO E CONOIDE DI DEIEZIONE DEL RIO AVENES.....	39
FIGURA 16: PROFILO LONGITUDINALE DEL RIO AVENES.....	41
FIGURA 19: CARTA DELLE PENDENZE DEL BACINO DEL RIO AVENES.....	42
FIGURA 17: CURVA IPSOGRAFICA DEL RIO AVENES.....	42
FIGURA 18: CURVA IPSOMETRICA DEL RIO AVENES.....	42
FIGURA 20: BACINO IDROGRAFICO E CONOIDE DI DEIEZIONE DEL PRINCIPALE AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	43
FIGURA 21: PROFILO LONGITUDINALE DEL PRINCIPALE AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	45
FIGURA 22: CURVA IPSOMETRICA DEL PRINCIPALE AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	45
FIGURA 23: CURVA IPSOGRAFICA DEL PRINCIPALE AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	45
FIGURA 24: CARTA DELLE PENDENZE DEL BACINO DEL PRINCIPALE AFFLUENTE DEL RIO AVENES.....	46
FIGURA 25: RIASSUNTO DEGLI EVENTI REGISTRATI PER ANNO NEL PERIODO 1998-2012 (DA ED30 REPORT ANNUALE).....	47
FIGURA 26: DISTRIBUZIONE TEMPORALE DEGLI EVENTI NELL'ANNO 2012 (DA ED30 REPORT ANNUALE).....	48
FIGURA 27: TIPOLOGIA E DISTRIBUZIONE DEGLI EVENTI 2012 (DA ED30 REPORT ANNUALE).....	48
FIGURA 28: PRECIPITAZIONE CUMULATA - ORE 20.00 04/08/2012.....	49
FIGURA 29: DIAGRAMMA PLUVIOMETRICO 04/05-08-2012.....	50
FIGURA 30: IMMAGINI RELATIVE ALL'EVENTO DEL 4/08/2012 RIGUARDANTI DIVERSE AREE DELLA VAL DI VIZZE (ARCHIVIO ED30).....	51
FIGURA 31: SCHEMA DI SEMPLIFICAZIONE DELL'ONDA DI COLATA DETRITICA.....	57
FIGURA 32: SCHERMATA INIZIALE DI FLOW-R.....	59
FIGURA 33: PARAMETRI CHE POSSONO ESSERE INSERITI PER IL CALCOLO DELLE AREE SORGENTE.....	59
FIGURA 34: LIMITE DI PENDENZA FISSATO RISPETTO ALL'AREA CONTRIBUENTE PER GLI EVENTI RARI ED ESTREMI. DOPO HORTON ET AL. (2008), HEINIMANN (1998) E RICKENMANN E ZIMMERMANN (1993) (HORTON ET AL., 2013).....	60
FIGURA 35: ILLUSTRAZIONE DELLA COMBINAZIONE DI DIVERSI SET DI DATI PER LA STIMA DELLE AREE SORGENTE (HORTON ET AL., 2013). .	61
FIGURA 36: ALGORITMI IMPLEMENTATI NEL SOFTWARE PER IL CALCOLO DELL'ESPANSIONE DELLA COLATA.....	63
FIGURA 37: PESI DELLE FUNZIONI DI PERSISTENZA IMPLEMENTATE NELLA STIMA DELLA PROPAGAZIONE (HORTON ET AL., 2013).	63
FIGURA 38: IDENTIFICAZIONE DELLE TRE SOTTOAREE X, Y E Z TRAMITE LA SOVRAPPOSIZIONE DELL'AREA PREDETTA E QUELLA OSSERVATA (DA SCHEIDL E RICKENMANN, 2010).....	66
FIGURA 39: IDROGRAMMA E DEBRISGRAMMA SEMPLIFICATI RELATIVI ALL'EVENTO DEL 4/08/12 CHE HA INTERESSATO IL RIO AVENES. ..	68
FIGURA 40: IDROGRAMMA E DEBRISGRAMMA SEMPLIFICATI RELATIVI ALL'EVENTO CHE HA INTERESSATO L'AFFLUENTE DEL RIO AVENES. .	69
FIGURA 41: ALTEZZE DI DEPOSITO DELLE SIMULAZIONI SUI RII AVENES E TULVE.....	70
FIGURA 42: VELOCITÀ DELLE COLATE SIMULATE SUI RII AVENES E TULVE.....	70
FIGURA 43: PARTICOLARE DI UN'ABITAZIONE POSTA POCO SOTTO L'APICE DEL CONOIDE IN CORRISPONDENZA DELL'ABITATO DI AVENES (ARCHIVIO ED30).....	70
FIGURA 44: AREE SORGENTE E DI DEPOSITO MAPPATE LUNGO IL CORSO DEL RIO AVENES E DEL SUO PRINCIPALE AFFLUENTE.....	72

FIGURA 45: AREE SORGENTE E DI DEPOSITO LUNGO IL RIO TULVE E IL SUO AFFLUENTE IN SINISTRA IDROGRAFICA.	76
FIGURA 46: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 1, EFFETTUATA CON EXP=01 E DH=1M E SIMULAZIONE 2 CON EXP=10 E DH=1M.	78
FIGURA 47: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 3, EFFETTUATA CON EXP=04 E DH=1M, SIMULAZIONE 4, CON EXP=06 E DH=1M E SIMULAZIONE 5, CON EXP=08 E DH=1M.....	79
FIGURA 48: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5, EFFETTUATA UTILIZZANDO EXP=08 E DH=1M E SIMULAZIONE 6 CON EXP=08 E DH=2M.	80
FIGURA 49: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5 EFFETTUATA CON "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°, SIMULAZIONE 8 CON "TRAVEL ANGLE" PARI A 20° E SIMULAZIONE 9 CON "TRAVEL ANGLE" PARI A 1°.	81
FIGURA 50: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5 EFFETTUATA CON "TRAVEL ANGLE" PARI A 11° E SIMULAZIONE 7 CON IL MODELLO DI PERLA ET AL. (1980).....	82
FIGURA 51: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5 EFFETTUATA CON UN LIMITE DI VELOCITÀ PARI A 20 M/S E SIMULAZIONE 10 CON LIMITE DI VELOCITÀ PARI A 15 M/S.....	83
FIGURA 52: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 11 EFFETTUATA UTILIZZANDO UN "TRAVEL ANGLE" PARI A 11° E SIMULAZIONE 12 CON IL MODELLO DI PERLA ET AL. (1980). ENTRAMBE SONO STATE CALCOLATE SENZA L'INSERIMENTO DELLE AREE SORGENTE PREDEFINITE.....	84
FIGURA 53: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5, EFFETTUATA CON LE AREE SORGENTE PREDEFINITE E SIMULAZIONE 11, EFFETTUATA SENZA LE AREE SORGENTE PREDEFINITE. I PARAMETRI UTILIZZATI PER IL CALCOLO DELLA PROPAGAZIONE SONO STATI SETTATI NELLO STESSO MODO.	85
FIGURA 54: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 1 EFFETTUATA CON EXP=08, DH=1M E "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°; SIMULAZIONE 2 CON EXP=08, DH=1M E MODELLO FRIZIONALE DI PERLA ET AL. (1980); E SIMULAZIONE 3 CON EXP=06, DH=1M E MODELLO FRIZIONALE DI PERLA ET AL. (1980).....	87
FIGURA 55: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 1 EFFETTUATA CON L'UTILIZZO DELLE AREE SORGENTE PREDEFINITE E "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°; SIMULAZIONE 4 EFFETTUATA SENZA LE AREE SORGENTE PREDEFINITE E "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°; E SIMULAZIONE 5, SENZA LE AREE SORGENTE PREDEFINITE E CON MODELLO FRIZIONALE DI PERLA ET AL. (1980).	88
FIGURA 56: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 1 EFFETTUATA CON EXP=08 E "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°; SIMULAZIONE 2 CON EXP=06 E "TRAVEL ANGLE" PARI A 11°; E SIMULAZIONE 3 CON EXP=08 E MODELLO FRIZIONALE DI PERLA ET AL. (1980).	90
FIGURA 57: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 4 EFFETTUATA CON "TRAVEL ANGLE" PARI A 11° E SIMULAZIONE 5 CON MODELLO FRIZIONALE DI PERLA ET AL. (1980).	91
FIGURA 58: ESEMPIO DI MAPPA DEL PERICOLO NEI CONFRONTI DEI DEBRIS FLOW CLASSIFICATA IN CINQUE CLASSI DA BLAHUT ET AL. (2010).....	93
FIGURA 59: RAPPRESENTAZIONE CLASSIFICATA DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SUL RIO AVENES CON IL MODELLO FLOW-R.	95
FIGURA 60: RAPPRESENTAZIONE CLASSIFICATA DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SUL RIO TULVE CON IL MODELLO FLOW-R.	96
FIGURA 61: RAPPRESENTAZIONE CLASSIFICATA DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SULL'AFFLUENTE DEL RIO TULVE CON IL MODELLO FLOW-R.....	96
FIGURA 62: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 1 RAPPRESENTATA MEDIANTE I DIVERSI VALORI DI PROBABILITÀ DI TRANSITO E SIMULAZIONE 2 DI CUI VENGONO EVIDENZIATI SOLAMENTE I MARGINI DEI DEPOSITI (RISOLUZIONE 30 M).	100
FIGURA 63: PARTICOLARE DELLA PARTE PIÙ ALTA DI FIGURA 62.....	100
FIGURA 64: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 3 EFFETTUATA UTILIZZANDO IL PARAMETRO DEGLI EVENTI ESTREMI E SIMULAZIONE 5 IN CUI SI È INVECE UTILIZZATA LA CURVA DEGLI EVENTI RARI.	101
FIGURA 65: CONFRONTO TRA: SIMULAZIONE 5 EFFETTUATA UTILIZZANDO IL "TRAVEL ANGLE" E SIMULAZIONE 6 EFFETTUATA UTILIZZANDO IL MODELLO DI PERLA ET AL. (1980).....	102
FIGURA 66: PARTICOLARE, TRATTO DA FIGURA 65, DELLE POTENZIALI COLATE LUNGO IL RIO DI CAMINATA E IL RIO DI SALENTO.....	103
FIGURA 67: MAPPA DI PROBABILITÀ DI TRANSITO, SVILUPPATA PER LA VAL DI VIZZE, CON RISOLUZIONE DI 2.5 M.	104
FIGURA 68: SIMULAZIONE EFFETTUATA SU TUTTA LA VAL DI VIZZE, RAPPRESENTATA SECONDO 5 DIVERSE CLASSI DI PROBABILITÀ DI TRANSITO.	105
FIGURA 69: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DELL'ABITATO DI QUINZO.	105
FIGURA 70: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DEGLI ABITATI DI RIVA E FOSSE.....	106
FIGURA 71: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DEGLI ABITATI DI SAN GIACOMO E DI PIAZZA.	106
FIGURA 72: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DEGLI ABITATI DI CAMINATA E FOSSA TRUES.....	106
FIGURA 73: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DEGLI ABITATI DI BORGONE E NOVALE.....	107
FIGURA 74: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DELL'ABITATO DI AVENES.....	108

FIGURA 75: PARTICOLARE DELLA VALLE IN CORRISPONDENZA DELLE LOCALITÀ TULVE E "CENTRALE IDROELETTRICA".	108
FIGURA 76: CARTA DEL PERICOLO DEL RIO AVENES, SECONDO LO SCENARIO CARATTERIZZATO DA TEMPO DI RITORNO COMPRESO TRA 100 E 300 ANNI (SIMULAZIONE FLO-2D).	110
FIGURA 77: CARTA DEL PERICOLO DEL RIO TULVE, SECONDO LO SCENARIO CARATTERIZZATO DA TEMPO DI RITORNO COMPRESO TRA 100 E 300 ANNI (SIMULAZIONE FLO-2D).	110
FIGURA 78: CARTA DI SUSCETTIBILITÀ DELL'ALTA VAL DI VIZZE, RAPPRESENTATA SECONDO LE CLASSI DEL PERICOLO STABILITE DALLA NORMATIVA PROVINCIALE DI BOLZANO.	111
FIGURA 79: CARTA DI SUSCETTIBILITÀ DELLA MEDIA VAL DI VIZZE, RAPPRESENTATA SECONDO LE CLASSI DEL PERICOLO STABILITE DALLA NORMATIVA PROVINCIALE DI BOLZANO.	112
FIGURA 80: CARTA DI SUSCETTIBILITÀ DELLA BASSA VAL DI VIZZE, RAPPRESENTATA SECONDO LE CLASSI DEL PERICOLO STABILITE DALLA NORMATIVA PROVINCIALE DI BOLZANO.	112

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: CLASSIFICAZIONE DI JAKOB.	18
TABELLA 2: CLASSIFICAZIONE DELL'INTENSITÀ DEL FENOMENO DI DEBRIS FLOW (D'AGOSTINO, 2013).	24
TABELLA 3: PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO ESPRESSA IN TEMPO DI RITORNO, MODIFICATA SECONDO BUWAL (1998).	30
TABELLA 4: VALORI DI SOGLIA E DELL'INTENSITÀ PER I PERICOLI IDRAULICI, MODIFICATI SECONDO BUWAL (1998).	31
TABELLA 5: PRINCIPALI PARAMETRI MORFOMETRICI CALCOLATI PER IL BACINO DEL RIO AVENES.	40
TABELLA 6: PRINCIPALI PARAMETRI MORFOMETRICI CALCOLATI PER IL BACINO DELL'AFFLUENTE DEL RIO AVENES.	44
TABELLA 7: PRECIPITAZIONI DI MASSIMA INTENSITÀ MISURATE DAL PLUVIOGRAFO DI VIPITENO A PARTIRE DAL 1921, DISTINTE NEGLI INTERVALLI DI 1, 3, 6, 12 E 24 ORE.	52
TABELLA 8: ESEMPI DI FORMULE PER LA DETERMINAZIONE DELLA PORTATA TRATTE DALLA LETTERATURA.	56
TABELLA 9: PORTATE E VOLUMI DEL RIO AVENES CALCOLATE CON IL METODO SEMPLIFICATO.	67
TABELLA 10: PORTATE E VOLUMI DELL'AFFLUENTE DE RIO AVENES CALCOLATE CON IL METODO SEMPLIFICATO.	68
TABELLA 11: LEGGI FRIZIONALI E RISPETTIVI PARAMETRI UTILIZZABILI IN FLOW-R PER IL CALCOLO DELLA RUNOUT DEL DEBRIS FLOW.	73
TABELLA 12: RIASSUNTO DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SUL RIO AVENES. SONO EVIDENZIATE IN GRASSETTO LE DUE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON IL SET DI PARAMETRI RITENUTO MIGLIORE.	77
TABELLA 13: RIASSUNTO DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SUL RIO TULVE. SONO EVIDENZIATE IN GRASSETTO LE DUE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON IL SET DI PARAMETRI RITENUTO MIGLIORE.	86
TABELLA 14: RIASSUNTO DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SULLA COLATA SVILUPPATASI IN UN BOSCO, LUNGO L'AFFLUENTE DEL RIO TULVE. SONO EVIDENZIATE IN GRASSETTO LE DUE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON IL SET DI PARAMETRI RITENUTO MIGLIORE.	89
TABELLA 15: VALORI DI ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SUL RIO AVENES E SUL RIO TULVE.	92
TABELLA 16: VALORI DI PROBABILITÀ UTILIZZATI DA BLAHUT ET AL. (2010) PER CLASSIFICARE LA MAPPA DEL PERICOLO.	93
TABELLA 17: CLASSI DI PROBABILITÀ DI TRANSITO UTILIZZATE PER LA RAPPRESENTAZIONE DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE CON FLOW-R A SCALA LOCALE.	94
TABELLA 18: RIASSUNTO DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SULL'INTERA VAL DI VIZZE. È EVIDENZIATA IN GRASSETTO LA SIMULAZIONE EFFETTUATA CON LA RISOLUZIONE E CON IL SET DI PARAMETRI RITENUTI MIGLIORI.	98
TABELLA 19: RANGE DELLE DUE CLASSI DI SUSCETTIBILITÀ OTTENUTE DALLA TRASPOSIZIONE DEI VALORI DI PROBABILITÀ DI TRANSITO IN PERICOLOSITÀ.	111

RIASSUNTO

In questa tesi è stato testato il modello numerico semi-empirico Flow-R per l'analisi a scala regionale della suscettibilità nei confronti delle colate detritiche. Il programma è stato inizialmente calibrato a scala di dettaglio su tre bacini campione di cui si avevano a disposizione i dati riguardanti le aree d'innescò e di deposito relative all'evento di debris flow che ha colpito la Val di Vizze in data 4 agosto 2012. Le aree di deposito risultanti dalle simulazioni sono state messe a confronto con quelle mappate in conoide dai Tecnici della Provincia di Bolzano, in modo da verificare l'efficacia della taratura dei diversi parametri. Si è cercato, per queste aree, di far corrispondere il più possibile i depositi stimati con quelli reali. Infatti, essendo il programma sviluppato per le simulazioni a scala regionale, lo scopo era di ricercare il set di algoritmi e parametri in grado di fornire successivamente delle buone simulazioni sull'intera Val di Vizze. L'accuratezza dei risultati a scala di singolo bacino è stata valutata utilizzando il metodo proposto da Scheidl e Rickenmann (2010), in modo da individuare il set di parametri in grado di fornire l'area di deposito simulata, maggiormente coincidente con i depositi reali misurati in campo. Con questi parametri è quindi stata fatta la simulazione sull'intera Val di Vizze e si è così ottenuta una mappa di suscettibilità nei confronti dei debris flow. Questa è un importante strumento di analisi preliminare per identificare le aree a maggiore rischio potenziale in cui eseguire i successivi studi a scala di dettaglio.

In un secondo momento, sono state fatte delle simulazioni applicando il modello FLO-2D ai due casi studio del Rio Avenes e del Rio Tolve. A questo proposito per quanto riguarda quest'ultimo torrente, sono stati utilizzati i risultati ottenuti da Andretto (2013) nel suo studio "*Analisi dell'evento del 4 agosto 2012 nel bacino del torrente Tolve (Val di Vizze, Bolzano) e proposta di mitigazione del rischio sul conoide*". Per le successive simulazioni sul Rio Avenes, sono stati utilizzati gli stessi valori settati per il Rio Tolve riguardanti la reologia il tempo di ritorno e gli altri parametri da inserire come input nel modello. Per la creazione dell'idrogramma e del debrisgramma di progetto da inserire come input del modello, avendo a disposizione i dati forniti dalla Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano riguardanti i volumi di deposito relativi all'evento del 4 agosto 2012, è stato utilizzato il metodo empirico che mette in relazione la portata al picco con il volume mobilitato dal debris flow. Dalle aree di deposito risultanti da questo studio di dettaglio, attraverso l'applicazione delle norme in vigore per la Provincia Autonoma di Bolzano, sono state ottenute due mappe del pericolo, una per ognuno dei due bacini studiati. In queste carte è stato considerato solamente lo scenario con tempo di ritorno compreso

tra 100 e 300 anni, in quanto la simulazione effettuata con FLO-2D, per individuare le diverse aree di pericolo, è stata fatta utilizzando i dati relativi all'evento del 4 agosto 2012, che si è stimato avere un tempo di ritorno di 200-300 anni.

ABSTRACT

A distributed empirical model named Flow-R, developed for regional susceptibility assessment of natural hazards, was tested in this dissertation. The Autonomous Province of Bozen supplied data about the source and deposition areas of the debris flow event which occurred on 4th August 2012 in the Pfitschertal (Bz) and the program was initially calibrated at a local scale in three watershed samples. The deposition areas derived from the simulations were compared with those mapped on the alluvial fan by the technicians of the Autonomous Province of Bozen so as to prove the calibration effectiveness of the various parameters. The aim was to match as carefully as possible the results from the simulations with the real deposition areas. In fact the program was developed for regional scale simulations and its purpose was to find the set of algorithms and parameters which could provide an accurate simulation of the whole Pfitschertal.

The results accuracy at a local scale was evaluated with the procedure described by Scheidl and Rickenmann (2010) so as to find the best set of parameters. Thanks to these parameters the simulation on the whole Pfitschertal could be carried out in order to obtain the final susceptibility map.

After that the model FLO-2D was applied to the two case studies of Rio Avenes and Rio Tolve. It is to be noted that the results of rheology, return time and other parameters from Andretto's study (2013) "Analysis of the 4th August 2012 event in the Tolve stream (Vizze valley, Bolzano) and proposal for the hazard mitigation of the alluvial fan" were used for both cases. In addition, for the creation of the Rio Avenes hydrogram, the empirical method that links the peak discharge and the total volume of the debris flow was used.

Two hazard maps, one for each studied watershed, were created from the deposition areas results, following the existing rules of the Autonomous Province of Bozen. The only considered scenario is the one with return time between 100 and 300 years because the data used for the simulation had a return time of 200-300 years.

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE

1. DEBRIS FLOW

1.1. Definizione di debris flow

I debris flow sono dei fenomeni catastrofici che interessano i torrenti di zone montane e provocano ogni anno ingenti danni a cose e persone. Sono dei flussi formati da una fase solida e una fase liquida caratterizzati da trasporto di massa, cioè tutto il materiale si muove ad una velocità quasi uniforme, indipendentemente dal peso e dalla grandezza dei sedimenti. La fase solida è caratterizzata da sedimenti di dimensioni molto diverse che possono andare dalla ghiaia ai ciottoli fino ai massi. La fase liquida invece è formata dal fluido interstiziale che riempie lo spazio tra i sedimenti ed è composta da acqua e granuli di dimensioni ridotte quali sabbia, limo e argilla.

Secondo la definizione di Takahashi (2007) un debris flow è un flusso misto di sedimenti e acqua, tale da essere assimilabile ad un fluido mosso dalla gravità, che raggiunge un'elevata mobilità grazie agli spazi vuoti saturati da acqua o fango. Si tratta quindi di una massa costituita da aria, acqua e sedimenti che ha una viscosità molto superiore rispetto a quella dell'acqua pura e il cui moto dipende dalla pendenza del letto, dalla reologia del fluido, dalla geometria del canale e dalla concentrazione solida volumetrica (C_{sv}).

Quest'ultima è il rapporto tra il volume dei sedimenti (V_s) e il volume totale (V_{tot}):

$$C_{sv} = \frac{V_s}{V_s + V_l} = \frac{V_s}{V_{tot}}$$

con V_l volume liquido.

Le colate detritiche hanno una C_{sv} che può variare tra il 20-25% e il 70%; per concentrazioni inferiori al 20% si ha trasporto solido di fondo o in sospensione, mentre per concentrazioni superiori al 70% si hanno frane o colamenti lenti (D'Agostino, 2013).

Le colate detritiche possono essere innescate da diversi tipi di fenomeni, ma dipendono sempre da una certa disponibilità di sedimento nel bacino e dalla presenza di una quantità d'acqua abbastanza elevata da poter movimentare la parte solida. L'acqua può arrivare da diverse fonti: ad esempio un evento temporalesco, oppure lo scioglimento nivale o il collasso improvviso di un invaso. Alcune tra le tipologie di innesco più frequenti sono: frane superficiali con una certa estensione che vengono innescate da uno scroscio ed, essendo ben connesse al reticolo idrografico, si trasformano in debris flow. Un secondo caso riguarda la formazione dei cosiddetti dam-break cioè delle ostruzioni di origine naturale che tappano temporaneamente l'alveo. Esse

causano un accumulo sempre maggiore di sedimento che può iniziare a muoversi o per effetto del proprio peso o per il cedimento improvviso del “tappo”, a causa di una elevata portata d’acqua. Un altro tipo di innesco riguarda i bacini in cui la pendenza del canale collettore è molto ripida (almeno 20-25%) infatti, in caso di piena, la corrente ha una forza tale da erodere le sponde e il letto del torrente provocando la formazione della colata.

I debris flow hanno una tipica forma ad onda che può essere suddivisa in tre parti: la testa il corpo e la coda (Figura 1). Nelle colate granulari, la testa o fronte del debris flow è di solito rialzata rispetto al resto dell’onda ed ha una C_{sv} più elevata perché qui si concentrano i massi di dimensioni maggiori ed eventuali tronchi o altri detriti legnosi. In alcuni casi non è visibile nessun fronte perché esso è stato assorbito dal corpo (molto frequente quando la colata raggiunge il conoide), oppure i materiali sono ben assortiti e non è riscontrabile nessuna variazione significativa nella composizione dei sedimenti (Ancy, 2001). Nel caso di colate granulari di dimensioni ridotte o di colate fangose, normalmente il fronte ha una tipica forma a cuneo e non c’è nessuna selezione granulometrica dei sedimenti. Infine, nel caso di colate fangose che si muovono su un fondo liscio, l’onda assume una forma particolare con un rialzamento nella testa che viene chiamato cresta (Figura 2).

Per quanto riguarda il corpo della colata, esso è un flusso più omogeneo di acqua e sedimenti in cui i massi più piccoli sembrano galleggiare in superficie, mentre i blocchi più grossi vengono semplicemente fatti rotolare dalla colata stessa.

La coda infine ha una C_{sv} molto più bassa rispetto al resto dell’onda, è caratterizzata da sedimenti di piccole dimensioni e un maggior contenuto d’acqua che la fa assomigliare ad un debris flood.

Gli eventi di debris flow possono essere caratterizzati da un’unica ondata, ma più frequentemente comprendono più onde, distinte nel tempo, che sono intervallate tra loro da flussi più liquidi con minore concentrazione di sedimenti. Il numero di ondate può andare da uno a varie decine. La formazione di queste onde può avvenire in diversi modi: ad esempio a causa della distribuzione dei sedimenti lungo il profilo longitudinale della colata che porta alla formazione del classico fronte ricco di massi, oppure a causa dell’innesco non simultaneo di frane separate, o a causa di un temporaneo blocco o rallentamento del flusso nel letto, seguito da una rottura del “tappo” da parte di un fronte di massi che rimette in moto l’onda (Jakob e Hungr, 2005).

La velocità dei debris flow, normalmente, varia tra 1 m/s e 10 m/s, ma quelli più rapidi raggiungono anche velocità superiori a 20 m/s.

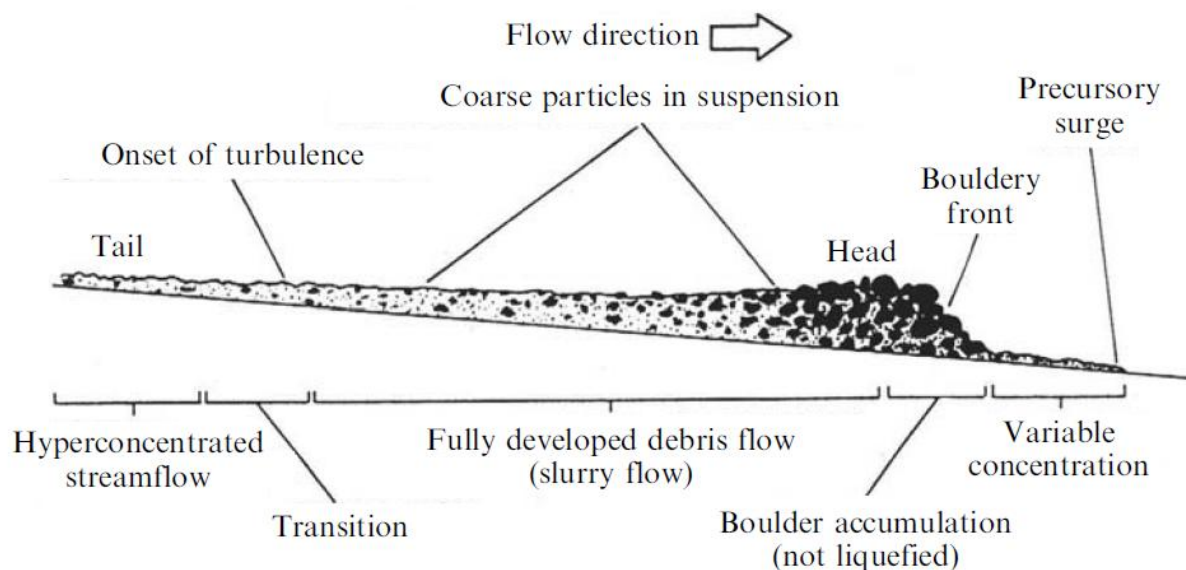


Figura 1: Diagramma di un'onda di debris flow con un fronte in massi (Pierson, 1986).

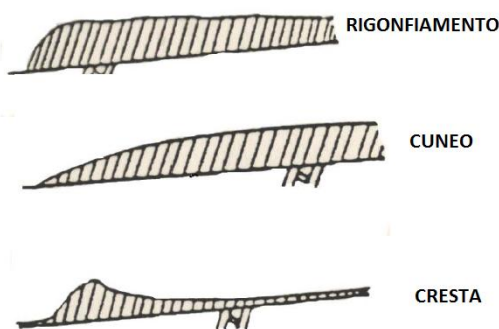


Figura 2: Diverse tipologie di onde di debris flow.

1.2. Classificazione dei debris flow

La classificazione delle colate detritiche è un argomento molto discusso e in cui non è stata ancora fatta piena chiarezza, a causa della complessità del fenomeno. Per questo esistono vari tipi di classificazioni che si basano su diversi parametri. Di seguito vengono riportate le principali.

1.2.1. Classificazione di Ancy

Questa classificazione si basa sul comportamento meccanico e sulle proprietà reologiche del fluido. I due parametri utilizzati per distinguere i vari tipi di reologia sono lo sforzo tangenziale (τ) e la deformazione angolare (dv/dy). In base a questi parametri, i principali tipi di fluido che si possono distinguere sono: newtoniano, di tipo Bingham, pseudo-plastico e dilatante (Figura 3).

Nei fluidi di tipo newtoniano lo sforzo tangenziale si calcola come segue:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Dove μ è la viscosità. In questi tipi di fluido, come ad esempio l'acqua, basta che lo sforzo tangenziale non sia nullo per avere movimento.

Nei fluidi del tipo Bingham, invece, lo sforzo tangenziale è calcolato in questo modo:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dy}$$

In questo caso se lo sforzo tangenziale (τ) non supera un certo valore limite (τ_0) non c'è movimento, mentre nel momento in cui τ supera τ_0 , la massa si muove come un fluido di tipo newtoniano.

Nel modello di tipo pseudo-plastico lo sforzo tangenziale viene calcolato come segue:

$$\tau = \tau_0 + v \left(\frac{dv}{dy} \right)^{1/n}$$

Dove n è un coefficiente che ha valore superiore a 1. In questo tipo di fluidi il comportamento è tale che all'aumentare della deformazione la viscosità non rimane costante.

Infine nei fluidi di tipo dilatante lo sforzo tangenziale si calcola come nel caso precedente, ma il coefficiente n è inferiore a 1.

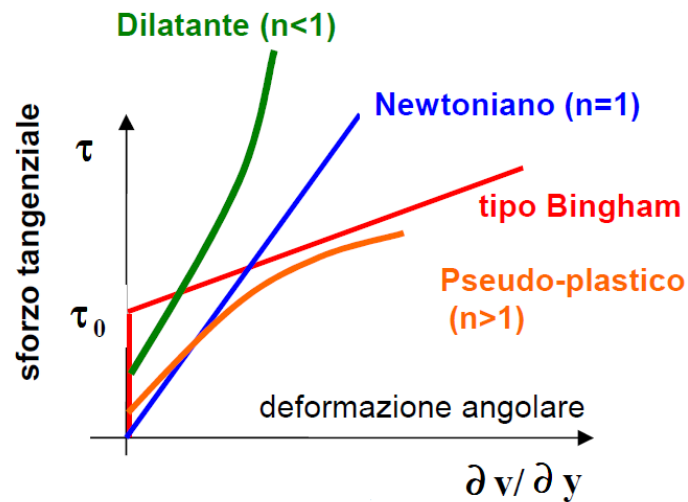


Figura 3: Tipi di fluido distinti in base alla loro reologia

Secondo la classificazione di Ancy di vengono distinti tre tipi di colate detritiche:

- *Muddy debris flow*: sono colate di tipo visco-plastico il cui comportamento è ben rappresentato dal modello di Bingham o, nel caso di contenuto di argilla molto elevato, da quello pseudo-plastico. Queste colate sono di tipo fangoso e sono costituite da una notevole quantità di sedimenti, i quali hanno dimensioni molto variabili, e da una grande quantità di materiali argillosi che costituiscono a loro volta la matrice. Questi tipi di

colate si muovono fino a pendenze attorno al 5-6% e formano depositi levigati, di forma regolare che possono essere facilmente distinti grazie ai loro confini ben delineati (Figura 4). Questi, inoltre, sono molto coesivi una volta asciutti.

- *Granular debris flow*: sono colate detritiche con comportamento di tipo collisionale-frizionale, in cui prevalgono quindi gli sforzi dovuti agli urti e all'attrito tra i grani. Sono costituite da una grande quantità di sedimenti di dimensioni elevate, mentre hanno poca matrice e un basso contenuto di argille. Questo tipo di debris flow si muove di solito più lentamente rispetto a quelli di tipo fangoso e si ferma su pendenze più elevate, di solito sotto al 15-20%. La forma dei depositi è molto irregolare con contorni non ben stabiliti e formati da materiale che rimane sciolto anche una volta asciutto (Figura 4). Solitamente i detriti di dimensioni maggiori formano la massa principale del deposito, mentre quelli a grana più fine vengono dilavati dalla corrente.
- *Lahar-like debris flow*: sono chiamati anche *fluid debris flow* e hanno comportamento frizionale-viscoso che varia in base alla velocità del fluido: con basse velocità gli sforzi di attrito tra le particelle sono più elevati e il comportamento della massa può essere descritto attraverso l'equazione frizionale di Coulomb; mentre se le velocità sono elevate il fluido è di tipo newtoniano. Queste colate sono tipiche di terreni di origine vulcanica, ma possono svilupparsi anche su suoli di tipo diverso formati da materiale a grana molto fine come ad esempio gesso o loess. Sono formate da un'elevata quantità di particelle costituenti la matrice, una buona quantità di limo e scarso contenuto di ghiaia e argilla. Questi debris flow sono molto pericolosi, infatti, muovendosi come un fluido newtoniano si arrestano solo su pendenze molto basse, anche inferiori all'1%. La forma dei depositi è piatta, molto simile a quella dei depositi alluvionali e, come nel caso dei *muddy debris flow*, sono molto coesivi una volta asciutti (Figura 4).




Tipo di colata	muddy debris flow	granular debris flow	lahar-like debris flow
Forma dei depositi			
	sezioni trasversali di sponda		sezione trasversale dell'intero corpo della colata

Figura 4: Forma dei depositi dei tre diversi tipi di colate detritiche

1.2.2. Classificazione di Jakob

Una classificazione che si differenzia rispetto alle altre è quella proposta da Jakob nel 2005. Questa classificazione non fa riferimento alla reologia, alla morfologia o al tipo di moto, ma si basa su alcune caratteristiche dimensionali delle colate. I parametri distintivi utilizzati da Jakob sono: volume totale, portata al picco e area inondata. A questi viene aggiunta anche una breve descrizione delle conseguenze potenziali che il debris flow può avere nei confronti di infrastrutture o persone. Per le colate detritiche riguardanti i bacini montani, la classificazione arriva fino alla classe numero 6, infatti, colate di magnitudo più elevata sono state osservate solo per debris flow vulcanici. La classificazione viene riportata nella Tabella 1.

Tabella 1: Classificazione di Jakob

Classe	Volume totale (m ³)	Portata al picco (m ³ /s)	Area inondata (m ²)	Conseguenze potenziali
1	<10 ²	<5	<4x10 ²	Danni molto localizzati, potenziale pericolo per operatori forestali in piccoli impluvi, danni a piccoli edifici.
2	10 ² -10 ³	5-30	4x10 ² -2x10 ³	Seppellimento di automobili, distruzione di piccoli edifici in legno, danneggiamento di alberi, ostruzione di tombini, deragliamento di treni.
3	10 ³ -10 ⁴	30-200	2x10 ³ -9x10 ³	Distruzione di edifici più grandi, danneggiamento di pilastri di ponti in calcestruzzo, blocco o danneggiamento di strade e condutture.
4	10 ⁴ -10 ⁵	200-1500	9x10 ³ -4x10 ⁴	Distruzione di parti di villaggi, distruzione di parti di infrastrutture di attraversamento, ponti, ostruzione di piccoli torrenti.
5	10 ⁵ -10 ⁶	1500-12000	4x10 ⁴ -2x10 ⁵	Distruzione di parti di paesi, distruzione di foreste con estensione fino a 2 km ² , blocco di rii e piccoli fiumi.
6	10 ⁵ -10 ⁶	non osservato	>2x10 ⁵	Distruzione di paesi, vallate o conoidi con estensione di diverse decine di km ² , ostruzione di fiumi.

1.3. Dinamica dei debris flow

Il fenomeno della colata detritica è formato da tre fasi distinte: innesco, trasporto e deposito. Queste tre fasi caratterizzano a loro volta le tre differenti parti in cui viene suddiviso il bacino: zona d'innesco, canale di scorrimento e conoide di deiezione.

1.3.1. Innesco

L'innesco di un debris flow avviene quando diversi fattori vengono a coincidere; questi sono: pendenze piuttosto elevate, sufficiente disponibilità di sedimento e ingente apporto idrico.

La presenza di pendii ripidi caratterizza tutte le Alpi italiane e i range entro cui vengono innescate le colate detritiche sono stati discussi nei paragrafi precedenti.

L'apporto di sedimento dipende dal tipo di roccia e dalla morfologia del pendio. I processi erosivi che provocano l'accumulo di materiale detritico non consolidato possono essere lenti ma continui, producendo un volume

annuo non molto elevato; oppure ci possono essere vecchi depositi non consolidati, il cui volume è di dimensioni molto maggiori. Anche la presenza della vegetazione gioca un ruolo importante, infatti, essa svolge due diverse funzioni: intercetta le precipitazioni, facendo diminuire la quantità d'acqua che raggiunge il suolo e, grazie agli apparati radicali, aumenta la coesione del terreno



Figura 5: Area d'innesco situata nei pressi del Rio Avenes (Archivio ED30).

(Ancey, 2001). Generalmente, i bacini da colata vengono suddivisi in due categorie: quelli con alimentazione solida limitata e quelli ad alimentazione solida illimitata. I primi non hanno un forte apporto solido, e quindi, perché si sviluppi un debris flow, hanno bisogno che venga raggiunto un valore soglia di sedimento disponibile, definito “soglia intrinseca”. Quindi, se la quantità di sedimento presente nel bacino in un dato momento è al di sotto della soglia intrinseca, anche in caso di un forte apporto idrico non ci sarà l'innesco di colate detritiche. Il tempo che il bacino impiega a raggiungere questa soglia dipende dal tasso di ricarica, il quale a sua volta, varia in funzione del tempo trascorso dall'ultimo evento, della geologia, della dimensione del bacino e della presenza o meno di vegetazione. Il secondo tipo di bacini, invece, è suscettibile a colate detritiche ogni volta che le precipitazioni superano un valore limite chiamato “soglia

estrinseca”. In questo caso quindi, c’è sempre una quantità di sedimento disponibile per l’innesco di una colata e l’unico fattore limitante è il deflusso idrico. Normalmente, i bacini ad alimentazione solida illimitata hanno una frequenza di accadimento più elevata rispetto a quelli condizionati dalla disponibilità di sedimento; però questi ultimi, in genere, sono caratterizzati da magnitudo molto più alte.

L’apporto idrico, infine, dipende dalle condizioni atmosferiche. Wieckzoreck e Glade (2005) distinguono i fattori climatici primari, come temporali intensi o scioglimento nivale, dai fattori climatici secondari, che sono le precipitazioni antecedenti il momento in cui si verifica la colata detritica. La presenza di un abbondante quantità d’acqua svolge un ruolo fondamentale nell’innesco di un debris flow perché mobilita la massa solida che, altrimenti, rimarrebbe ferma. Quest’acqua può provenire da forti temporali (una delle principali cause d’innesco), oppure dallo scioglimento nivale, o anche dalla rottura del fronte di laghi glaciali o per i cosiddetti dam-breaks, cioè l’improvvisa rottura di dighe naturali che si formano nel letto del torrente.

1.3.2. Trasporto

Il trasporto avviene nella parte centrale del bacino, all’interno del canale di scorrimento. Le modalità con cui questo avviene differiscono a seconda delle caratteristiche della colata stessa. Infatti, negli eventi innescati da piogge intense, solitamente si verifica un forte accumulo di sedimenti nel fronte durante la fase di formazione, mentre nella successiva fase di trasporto, non ci sono grossi fenomeni erosivi e il debris flow si muove in maniera abbastanza uniforme.

La colata detritica, altre volte, può erodere in profondità il fondo e gli argini laterali del canale, aumentando in questo modo il volume di sedimenti trasportato e lasciando dietro di sé tracce evidenti del passaggio. L’alveo può essere scavato fino alla roccia madre, la forma della sezione trasversale del torrente può essere modificata e ci può essere l’accumulo di depositi laterali lungo le sponde. Dagli studi svolti da Gregoretto (2000), si può affermare che il moto di una colata detritica dipende dal valore



Figura 6: Canale di scorrimento del Rio Tolve (Archivio ED30).

del rapporto h/d , dove h rappresenta la profondità della corrente e d il diametro degli elementi più grossi. Per valori di $h/d < 3$ gli elementi costituenti il fronte saranno soggetti ad azioni di

strisciamento e per valori di $h/d > 7$ ad azioni di rotolamento; per valori intermedi c'è una combinazione dei due tipi di azioni (Ferro, 2006).

Durante la fase di trasporto, i debris flow assumono la tipica forma ad onda, già descritta precedentemente, con una coda, un corpo e una testa. In quest'ultima si concentrano i sedimenti di maggiori dimensioni e Bagnold (1968) spiega questo comportamento col fatto che il loro moto avviene nello strato superiore della corrente, cioè quello animato dai valori più rilevanti di velocità (Ferro, 2006). Ed è per questo motivo che le colate detritiche hanno una forte energia d'impatto che le rende estremamente pericolose.

1.3.3. Deposito

Il deposito dei debris flow può caratterizzare tutto il canale, e in questo caso si parla di depositi laterali, però la maggior parte del materiale depositato interessa solitamente il conoide di deiezione. L'apice del conoide è il punto in cui solitamente inizia la fase di deposito, infatti è caratterizzato da una decisa diminuzione della pendenza rispetto al canale di scorrimento. In altri casi il deposito può avvenire in corrispondenza di punti di discontinuità topografica (intersezione del torrente con la rete viaria), oppure in corrispondenza di un allargamento della sezione del canale, o anche in tratti caratterizzati da una forte



Figura 7: Deposito in conoide nei pressi dell'abitato di Avenes (Archivio ED30).

scabrezza del letto (D'Agostino e Cesca, 2009). Tutte queste situazioni provocano una separazione tra la fase solida e la fase liquida della colata detritica che perde così gran parte del suo contenuto d'acqua e per questo si ferma. Normalmente nel conoide, il flusso della colata non segue più un andamento confinato, ma tende ad espandersi lateralmente e di conseguenza si può verificare un repentino arresto del fronte della colata, con un conseguente aumento della profondità del flusso nel corpo (Ancy, 2001). La morfologia dei depositi varia a seconda del materiale che compone il debris flow: per le colate fangose i depositi sono di forma lobata, con una morfologia abbastanza regolare e ben definita e sono ricchi di matrice fine. Mentre per le colate granulari i depositi sono molto più eterogenei, caratterizzati dalla presenza di grossi massi, e possono assumere forme diverse (Figura 8):

- Lobi (*sheets*) nel conoide,
- Plugs di detriti depositati nel letto del torrente,
- Cordoni laterali (*debris levee*) lungo il tracciato del canale.

I primi occupano di solito una porzione del conoide, i secondi possono riempire parzialmente o completamente la sezione trasversale del canale, provocando in certi casi dei fenomeni di avulsione, infine le barre si trovano negli argini del torrente e possono raggiungere altezze di alcuni metri e lunghezze di diverse decine di metri (Van Dine, 1996).

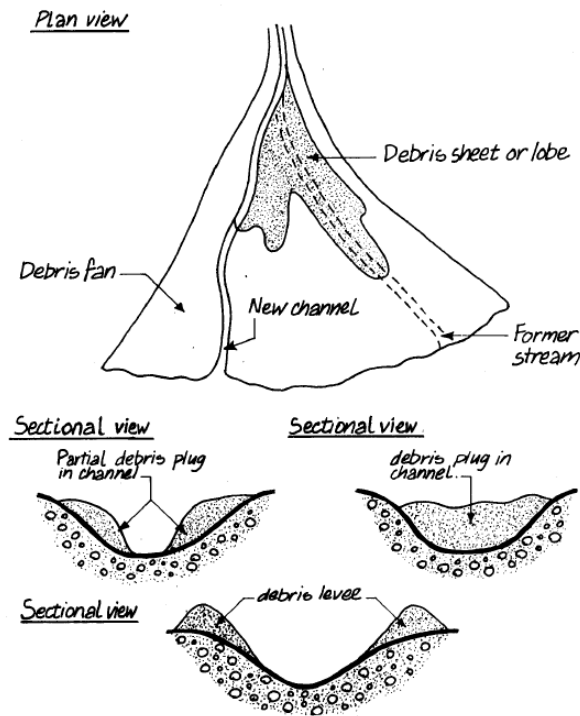


Figura 8: Forme di deposito dei debris flow

2. PREVISIONE DEL PERICOLO DA DEBRIS FLOW

Le colate detritiche sono un fenomeno naturale che rappresenta un pericolo in particolare nelle aree montane di conoide. Questa forma di movimento di massa, costituito da acqua, sedimento, aria e materiale organico di diversa dimensione, è una delle minacce più concrete in numerose valli alpine a causa dell'intenso sviluppo urbano e della rete viaria, soprattutto a scopo turistico, occorso negli ultimi decenni (Cavalli e Grisotto, 2006).

Sono molti i fattori che insieme contribuiscono a rendere le colate detritiche un fenomeno naturale così pericoloso. Tra questi un ruolo rilevante è svolto dalle caratteristiche stesse del bacino: esso presenta normalmente pendenze piuttosto elevate, sia dei versanti che delle aste torrentizie; inoltre, avendo tipicamente un'estensione ridotta, ha tempi di risposta molto rapidi agli eventi meteorici, che si traducono in tempi di corrivazione molto brevi con la conseguente formazione repentina delle onde di piena. La pericolosità delle colate detritiche dipende anche dalla quantità e dalla dimensione del materiale trasportato, che può variare dalle argille ai grandi massi con diametro di qualche metro. A seconda delle caratteristiche della colata i danni possono essere di diverso tipo: dal seppellimento alla completa distruzione di ciò che viene colpito lungo il tragitto della colata.

Altri elementi che contribuiscono alla pericolosità di questo fenomeno sono il deflusso idrico irregolare, o addirittura la presenza di piccoli impluvi privi di deflusso e la periodicità irregolare degli eventi che presentano una frequenza di accadimento a volte molto ridotta. Ciò contribuisce a far diminuire la percezione del pericolo da parte della popolazione che vive nella zona.

Le aree maggiormente a rischio sono quelle situate sui conoidi di deiezione, che si localizzano nei fondovalle, subito sotto la sezione di chiusura del bacino. Infatti, a parità di precipitazione caduta, i debris flow spesso producono delle portate al picco più elevate rispetto alle piene ordinarie. Questa portata al picco spesso eccede la capacità del canale, risultando in un'ampia deposizione di sedimento sul conoide, con un conseguente pericolo per edifici, infrastrutture e persone (Rickenmann, 1999).

2.1. Concetti di pericolo e rischio

Pericolo e rischio sono due concetti strettamente collegati che hanno però un diverso significato. Il pericolo è definito come la probabilità che accada un fenomeno particolarmente dannoso entro uno specifico intervallo temporale e una certa area (Varnes, 1984). Esso si lega al concetto di rischio attraverso la vulnerabilità. Quest'ultima esprime il grado di perdita atteso per un elemento, o un insieme di elementi a rischio, a causa del verificarsi di un dato fenomeno

caratterizzato da una determinata magnitudo. Essa dipende pertanto sia dalle caratteristiche dell'elemento a rischio, sia dalla tipologia e dalla magnitudo del fenomeno in questione, che dalla sua probabilità di accadimento (tempo di ritorno). Il rischio, quindi, è definito come l'atteso numero di perdite umane, feriti, danni alle proprietà, etc.. conseguenti ad un particolare evento di dissesto ed è dato dal prodotto della pericolosità per la vulnerabilità. Esso implica perciò un'analisi economica dei possibili effetti diretti e indiretti del fenomeno considerato sul territorio e sul tessuto socio-economico dell'area (Progetto CARG-Veneto, 2007).

Alla base dell'analisi del rischio vi è quindi lo studio della pericolosità che consente di individuare le aree di pericolo potenzialmente soggette ad un determinato processo, indipendentemente dalla presenza o meno dell'uomo. Per stimare la pericolosità normalmente si fa riferimento alla combinazione di tempo di ritorno e intensità dell'evento. Per le colate detritiche, quest'ultima è spesso valutata considerando velocità del flusso e altezza di deposito. A questo proposito Buwal (1997) e Rickenmann (2001) hanno proposto due diversi intervalli di valori per stabilire l'intensità del fenomeno e, a questi, Petrascheck e Kienholz (2003) hanno associato tre diverse classi di pericolo (Tabella 2).

Tabella 2: Classificazione dell'intensità del fenomeno di debris flow (D'Agostino, 2013).

	Classificazione dell'intensità del fenomeno di debris flow		
Criterio	Intensità bassa	Intensità media	Intensità alta
BUWAL (1997)¹	Nessun flusso	$h < 1 \text{ m}$ oppure $V < 1 \text{ m/s}$	$h > 1 \text{ m}$ oppure $V > 1 \text{ m/s}$
Rickenmann (2001)¹	$h < 0.5 \text{ m}$ e $V < 0.5 \text{ m/s}$	$h < 1.5 \text{ m}$ o $1 \text{ m/s} \leq V \leq 1.5 \text{ m/s}$	$h > 1.5 \text{ m}$ oppure $V > 1.5 \text{ m/s}$
¹ da applicarsi in alternativa	Classificazione delle zone di pericolo da debris flow Intensità del fenomeno combinata con la probabilità di accadimento dell'evento: tempo di ritorno compreso fra 100 e 300 anni		
Petrascheck e Kienholz (2003)	Pericolo basso	Pericolo moderato	Pericolo alto

Comunemente la previsione del pericolo viene fatta su piccola scala, a livello di singolo bacino, effettuando studi di dettaglio a cui vengono associate modellazioni numeriche impiegando programmi uni o bi-dimensionali. Lo svolgimento di uno studio così dettagliato per intere vallate alpine richiede perciò tempi molto lunghi nonché elevati costi ed è quindi difficilmente attuabile. Un approccio più efficace ed efficiente invece, prevede una prima stima della pericolosità a scala regionale per individuare le zone che presentano una maggiore suscettibilità ad essere soggette a fenomeni di dissesto idrogeologico. Uno studio di questo tipo diventa quindi un importante punto di partenza per i successivi studi di dettaglio (singolo bacino), che porteranno alla

redazione della carta del pericolo, consentendo una prima definizione delle priorità di analisi. A questo proposito, alcuni studi recentemente effettuati (es. Cavalli e Grisotto, 2006), dimostrano come sia sempre maggiore l'importanza di disporre di programmi che aiutino ad effettuare una stima del pericolo a scala regionale. Per delle modellazioni di questo tipo però, l'approccio deve essere per forza di cose semplificato, rispetto a quello che si ha a livello di singolo bacino. Non è possibile infatti, con gli strumenti odierni, sviluppare delle simulazioni ad ampia scala che comprendano tutte le variabili geomorfologiche, fisiche e reologiche collegate ai debris flow. A questo scopo, negli ultimi anni, si vedono sempre più contrapposti i modelli semi-empirici a quelli basati fisicamente, nel loro comune obiettivo di simulare la propagazione delle colate (Mammoliti, 2011). In questo contesto si inserisce il modello Flow-R che permette una stima qualitativa della probabilità che una certa area sia interessata da un determinato pericolo naturale, utilizzando pochi dati di input facilmente acquisibili.

2.2. Stima a scala di bacino: il conoide

A scala di singolo bacino, per l'individuazione delle aree che possono essere soggette a debris flow in conoide, si ricorre solitamente all'applicazione, spesso in combinazione, di due approcci: l'analisi storico-geomorfologica e la modellazione matematica (Cavalli e Grisotto, 2006).

L'analisi storico-geomorfologica è molto importante in quanto permette di apprendere se il bacino di studio sia stato interessato in passato da colate detritiche, osservando le eventuali tracce di eventi passati. In questo contesto è stato introdotto il metodo di Aulitzky (1973), chiamato anche "metodo dei testimoni muti", che permette di individuare in maniera qualitativa le aree di pericolo in corrispondenza dei conoidi. Rispondendo a diverse domande riguardanti il materiale trasportato e le caratteristiche geomorfologiche del bacino, si arriva alla stima finale della pericolosità, da cui si ottiene la mappa del pericolo. Questo metodo però presenta dei limiti: l'eccessiva influenza degli eventi passati e la scarsa considerazione dell'uso del suolo e delle eventuali sistemazioni idrauliche presenti, oltre che la soggettività. Per questo motivo esso si presta bene soprattutto all'analisi di conoidi non urbanizzati e poco disturbati.

Il secondo tipo di approccio, invece, prevede una serie di analisi dettagliate a scala di bacino che comprendono anche l'utilizzo di modelli numerici in grado di simulare l'evento di debris flow a partire da specifici dati di input.

A livello generale, l'analisi di dettaglio dovrebbe essere sempre correlata da una approfondita ricerca storica che permetta di capire quale sia stata in passato la suscettibilità dell'area studiata; successivamente si studiano le portate liquide e solide e la reologia del miscuglio; queste

vengono supportate dalle analisi riguardanti la geomorfologia dell'area esaminata, le caratteristiche idrauliche del canale e l'area di deposito. Infine, solo dopo aver acquisito una quanto più profonda possibile conoscenza del bacino di studio, si procede alla modellazione attraverso specifici programmi di calcolo. Quest'ultimo passaggio dovrebbe essere solo un supporto per la valutazione della bontà dei risultati ottenuti dalle analisi precedenti. D'Agostino (2013) propone di sviluppare l'analisi secondo i seguenti punti:

1. Rilievo di campo della micro-topografia (direttrici di deflusso);
2. Osservazione della presenza di eventuali paleo-alvei e/o paleo-depositi (testimoni muti);
3. Studio del modello digitale del conoide e uso del suolo;
4. Carta delle pendenze del conoide;
5. Individuazione delle sezioni critiche del canale e verifiche "idrauliche" di queste;
6. Valutazione integrata della distanza di arresto;
7. Assegnazione di un'area di deposito;
8. Verifica della congruenza degli spessori di deposito;
9. Eventuale ricalibrazione dell'area;
10. Valutazioni più raffinate con modelli numerici: 1-D o 2-D.

2.3. Stima a scala di macroarea: valle

Per le indagini a scala regionale il discorso è reso più complicato dalla complessità del fenomeno, legata alla notevole variabilità geomorfologica e topografica, che si ha considerando una scala così ampia. Inoltre, la simulazione richiederebbe tempi molto lunghi. Per tali motivi, a scala regionale è impensabile l'applicazione degli stessi modelli numerici utilizzati a scala di singolo bacino. Bisogna affidarsi, di conseguenza, ad analisi meno dettagliate che permettano di individuare su larga scala quali siano le aree potenzialmente suscettibili al pericolo naturale (nel presente caso di studio rappresentato dai debris flows).

Considerando un'intera vallata le variabili in gioco aumentano notevolmente e parametri come la pendenza dei versanti, il tipo di roccia, la disponibilità di sedimento o la precipitazione caduta, non possono più essere considerati in maniera univoca perché variano notevolmente proprio a causa della scala spaziale considerata. Si rende quindi necessario l'utilizzo di metodi che permettano di individuare empiricamente le aree potenzialmente soggette a debris flow. Cavalli e Grisotto (2006) affermano che a scala più ampia rispetto a quella locale, le zone di pericolo da colata detritica possono essere indagate con metodologie quali l'analisi di dati storici, utili specialmente dove sono stati registrati danni, foto-interpretazione ed osservazioni di terreno e

modellazione spazialmente distribuita, volta a identificare i possibili punti di innesco e le aree interessate dal deposito della colata. Per quest'ultimo tipo di analisi sono stati sviluppati alcuni programmi basati su semplici formule empiriche che permettono di individuare le zone potenzialmente suscettibili nei confronti dei debris flow. Il principale vantaggio di questi modelli è che con una minima richiesta di dati input, permettono l'identificazione delle aree prioritarie di analisi. Analizzando un'area così ampia, i parametri da prendere in considerazione non possono, per forza di cose, essere troppo specifici. In questo contesto si inserisce il modello Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale) sviluppato da Horton et al. (2008) presso l'Università di Losanna, in Svizzera.

Il modello Flow-R consente la stima della propagazione di diversi processi naturali, tra i quali i debris flows, effettuando un semplice bilancio energetico ed assegnando una probabilità di espansione, unendo diversi approcci fisici e di tipo GIS (Baumann et al., 2011). L'unico dato input strettamente necessario è il modello digitale del terreno (DTM), anche se altre mappe digitali, come pendenza e area drenata, possono essere inserite facoltativamente per migliorare il risultato finale. Si tratta di un'analisi di tipo energetico-topografica infatti, implementa formule empiriche che permettono di calcolare l'espansione della colata, utilizzando solamente informazioni di tipo topografico (pendenza, curvatura, quota..) e la massima runout, attraverso un calcolo dell'energia cinetica sviluppata durante la propagazione del flusso da una cella a quelle adiacenti.

Questo tipo di analisi ovviamente, non è in grado di fornire dei risultati di dettaglio come quelli forniti da un modello come FLO-2D, infatti non vengono fornite informazioni su velocità del flusso o altezza del deposito. A questo proposito è importante notare come il modello Flow-R non consideri il volume mobilitato perché una sua stima a larga scala è impossibile a causa dei significativi cambiamenti sulle masse che avvengono a causa dei fenomeni di deposizione ed erosione (Iverson et al., 2001) che sono eccessivamente difficili da stimare (Horton et al., 2008). Un'analisi di questo tipo ha lo scopo di fornire un supporto oggettivo per una stima preliminare di suscettibilità a scala regionale (Horton et al., 2011), diventando la base di un successivo studio di dettaglio delle aree risultate più suscettibili. Le mappe di suscettibilità al pericolo risultanti infatti, forniscono un'eccellente visione d'insieme per indicare dove dovrebbero essere condotte delle analisi di campo dettagliate che mirino allo sviluppo di una mappa del pericolo (Horton et al., 2011).

2.4. Normativa per la redazione del Piano delle Zone di Pericolo della Provincia di Bolzano

Le norme che regolano la redazione del PZP (Piano delle Zone di Pericolo) della Provincia Autonoma di Bolzano sono attuate ai sensi della “Legge urbanistica Provinciale” dell’11 agosto 1997 e del “Regolamento di esecuzione concernente i piani delle zone di pericolo” contenuto nel Decreto del Presidente della Provincia del 5 agosto 2008.

Le “Direttive per la redazione dei Piani delle Zone di Pericolo (PZP) e per la Classificazione del Rischio Specifico (CRS)” individuano tre gruppi di pericoli naturali: frane, pericoli idraulici e valanghe. Le frane comprendono crolli, scivolamenti, sprofondamenti e colate di versante; tra i pericoli idraulici si trovano invece alluvioni, alluvioni torrentizie, colate detritiche e fenomeni di erosione. Viene quindi fatta una netta distinzione tra “colate di versante” e “colate detritiche”: le prime sono definite come movimenti di massa superficiali costituiti da una miscela di detrito (terreno o vegetazione) e una grande quantità d’acqua, difficilmente prevedibili, generalmente legate a pendii ripidi con circolazione di acque e senza una superficie di scivolamento ben identificabile; le seconde sono dei processi innescati da forti precipitazioni nel bacino imbrifero e/o occlusioni (frane laterali, ponti..) e caratterizzati da elevata energia, nel quale in un alveo si muove verso valle una miscela non omogenea di detriti, sabbia, limo, legname ed acqua.

Nel presente lavoro, visto che gli eventi analizzati sono stati innescati in seguito alle forti precipitazioni cadute il 4 agosto 2012, e considerate anche le caratteristiche reologiche e dinamiche dei flussi, si è deciso di afferirli al gruppo dei debris flow.

Per la redazione del PZP vengono distinte due fasi di lavoro: la prima prevede l’individuazione dei vari fenomeni di dissesto idrogeologico e l’acquisizione delle informazioni e della documentazione; mentre la seconda prevede la perimetrazione e la valutazione dei livelli di pericolo.

Nella prima fase occorre inizialmente suddividere il territorio in tre diverse categorie urbanistiche, ad ognuna delle quali verrà successivamente assegnato un diverso grado di studio. La prima categoria comprende le aree maggiormente urbanizzate e da urbanizzare, come i centri abitati o gli impianti turistici. Nella seconda categoria invece sono compresi i piccoli insediamenti urbani, le piccole strutture turistiche, le strade, le piste da sci di fondo e le condotte di approvvigionamento. Nella terza categoria infine si trovano le zone non considerate di interesse urbanistico.

La prima categoria è quella caratterizzata dal grado di studio maggiore, infatti bisogna valutare nel dettaglio il livello di pericolo di tutti e tre i fenomeni naturali e le aree vanno rappresentate con una scala non inferiore a 1:5000. La seconda categoria invece, ha un grado di studio

leggermente più basso. In questo caso si prendono in considerazione solo i fenomeni di cui ci siano testimonianze passate e la scala su cui si lavora deve essere non inferiore a 1:10000. Per la terza categoria infine, normalmente non viene fatto nessuno studio a meno che il Comune non ritenga utile agire diversamente. Il prodotto finale di questa zonizzazione è la Carta definitiva del grado di studio.

Successivamente si procede all'individuazione delle aree potenzialmente soggette a dissesto idrogeologico, utilizzando tutti i mezzi messi a disposizione dalla Provincia. A questo scopo viene fatta una ricerca storica sugli eventi passati, si analizzano ortofoto, DTM e carte tematiche e si svolgono analisi di campo. Una volta identificate le zone suscettibili a fenomeni di dissesto, viene redatta la Carta dei fenomeni che contiene l'estensione dei singoli processi relativi alle fonti di dissesto (corsi d'acqua, frane e valanghe) presenti sul territorio comunale (Direttive per la redazione dei PZP e per la CRS, 2008).

Nella seconda fase si effettua lo studio della pericolosità basandosi sulle categorie urbanistiche precedentemente differenziate.

Per la valutazione dei livelli di pericolo si fa riferimento al metodo proposto da Buwal (1998). In questo modo le diverse classi di pericolo sono identificate mettendo in relazione l'intensità del fenomeno (spessore, velocità, pressione, tirante idraulico, ecc..) con la sua probabilità di accadimento (tempo di ritorno). Quest'ultima viene calcolata per tempo di ritorno: < 30 anni, 30-100 anni, 100-300 anni e > 300 anni. Le classi che ne derivano sono 4: molto bassa, bassa, media, elevata (Tabella 3). Per quanto riguarda invece l'intensità, ogni fenomeno è caratterizzato da diversi valori di classe legati alle sue specifiche caratteristiche (velocità, volume, spessore, etc...). Considerando i pericoli idraulici, tra cui ricadono anche i fenomeni da debris flow, le classi riguardanti l'intensità sono tre: bassa, media e alta (Tabella 4) Anche la presenza di opere di mitigazione influisce sul livello di pericolo, per questo motivo il PZP deve essere periodicamente aggiornato in modo da tenere conto delle eventuali nuove sistemazioni presenti sul territorio.

Dall'incrocio delle classi di intensità con quelle della probabilità di accadimento si ottiene la matrice in cui vengono distinti i diversi livelli di pericolo (Figura 9).

Le classi di pericolo in cui viene suddiviso il territorio sono 4 più una:

- H4: è la zona soggetta a divieti, caratterizzata da pericolo molto elevato sia per le persone, che possono subire lesioni gravi fino alla morte, sia per le infrastrutture, che possono andare incontro alla totale distruzione. Essa viene contrassegnata nella carta del pericolo col colore rosso.
- H3: è la zona soggetta a vincoli, caratterizzata da pericolo leggermente inferiore rispetto alla zona precedente, ma comunque elevato. I danni a persone possono essere gravi se

avvengono all'esterno degli edifici, mentre all'interno esse sono protette e gli edifici stessi possono subire lesioni importanti. È caratterizzata dal colore blu.

- H2: è la zona soggetta ad attenzione, caratterizzata da pericolo medio. Le persone non subiscono lesioni gravi né all'interno né all'esterno degli edifici, mentre le infrastrutture subiscono danni minori che non ne compromettono la stabilità. Viene identificata nella carta del pericolo con il colore giallo.
- AREE DI COLORE GRIGIO CHIARO: sono aree non caratterizzate da un livello di pericolo compreso tra H4 e H2 al momento dello studio. Esse vengono appunto identificate nella carta del pericolo con il colore grigio.
- H1: sono le aree caratterizzate da pericolo residuo. Siccome le analisi vengono fatte considerando un tempo di ritorno massimo di 300 anni, tutti i fenomeni estremamente rari (come può essere ad esempio la rottura di una diga), che hanno un tempo di ritorno ancora più elevato, vengono fatti ricadere in quest'ultima categoria. Essa non viene rappresentata nella carta del pericolo.

Il prodotto finale di questa fase del lavoro è la carta del pericolo che viene accompagnata da una relazione tecnica dettagliata, in cui vengono descritti tutti gli strumenti, le metodologie e i dati utilizzati, e una relazione sintetica. La carta delle zone di pericolo è una rappresentazione delle zone soggette a pericolo idrogeologico indipendentemente dalla presenza o meno di elementi esposti e dal loro grado di vulnerabilità.

Tabella 3: Probabilità di accadimento espressa in tempo di ritorno, modificata secondo Buwal (1998).

<i>Probabilità di accadimento</i>		<i>Tempo di ritorno (T_R)</i>	
	calcolata per 50 anni:	espresso in anni:	
<i>elevata</i>	100% fino a 82%	$T_R \leq 30$	<i>molto frequente</i>
<i>media</i>	82% fino a 40%	$30 < T_R \leq 100$	<i>frequente</i>
<i>bassa</i>	40% fino a 15%	$100 < T_R \leq 300$	<i>raro</i>
<i>molto bassa</i>	< 15%	$T_R > 300$	<i>molto raro</i>

Tabella 4: Valori di soglia e dell'intensità per i pericoli idraulici, modificati secondo Buwal (1998).

Processo	Valori soglia	Intensità bassa	Intensità media	Intensità alta
Alluvione, Alluvione torrentizia	- Concentrazione mat. solido <30% - Velocità <40 km/h - Pendenza alluvione <1,5% alluv. torrent. 1,5-15%	$h < 0,5$ m opp. $v \times h < 0,5$ m ² /s	$h = 0,5-2$ m opp. $v \times h = 0,5-2$ m ² /s	$h > 2$ m opp. $v \times h > 2$ m ² /s
Colata detritica	- Concentrazione mat. solido 30-70% - Velocità 40 - >60 km/h - Pendenza >15%	non noto	$M \leq 1$ m opp. $v \leq 1$ m/s	$M > 1$ m e $v > 1$ m/s
Erosione s.l.	sempre presente	$d < 0,5$ m	$d = 0,5-2$ m	$d > 2$ m

h =tirante idraulico; v =velocità; M =spessore del deposito; d =spessore medio dell'erosione o erosione di sponda, misurato perpendicolarmente a pendio/scarpatà/fondo rio/p.c.; $v \times h$ =pressione idrodinamica

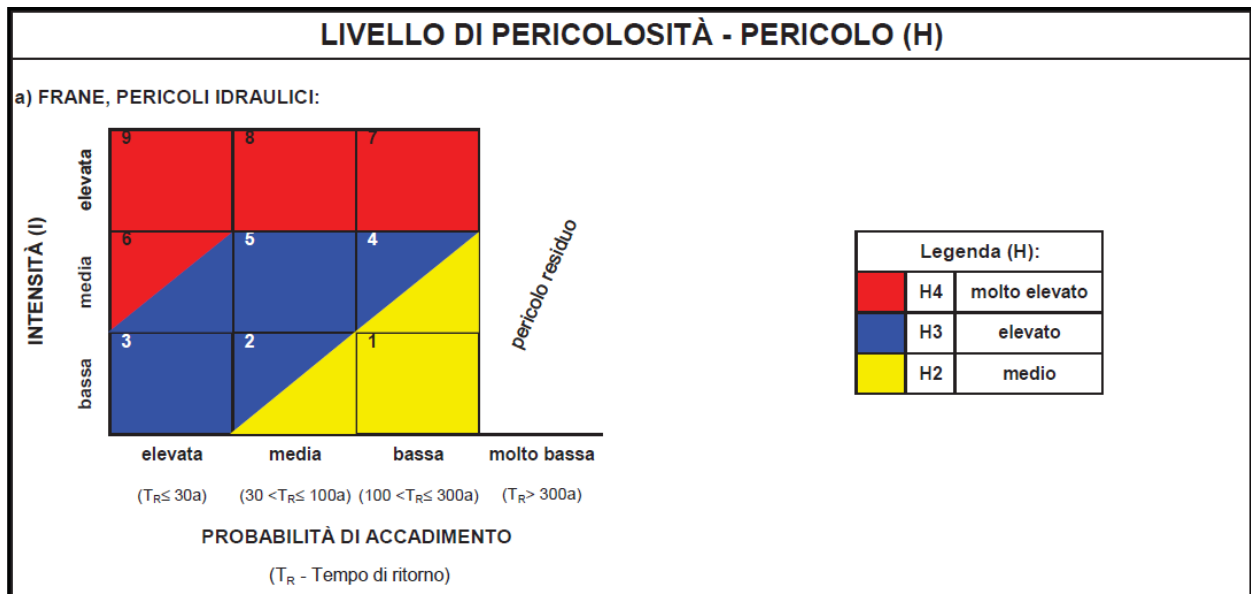


Figura 9: Matrice di definizione dei livelli di pericolo, modificata secondo Buwal (1998), per frane e pericoli idraulici.

La maggior parte del lavoro che viene fatto per identificare le aree di potenziale pericolo presenti nel territorio avviene attraverso studi bibliografici, analisi di campo, ricerche storiche o osservazione di ortofoto. In questo contesto un programma come Flow-R, che è in grado di analizzare delle aree relativamente ampie utilizzando solamente il modello digitale del terreno, potrebbe risultare molto utile. Infatti, inserendo l'analisi energetico-topografica tra questi studi preliminari, il lavoro di individuazione delle aree di conoide a rischio potrebbe essere notevolmente facilitato e diminuirebbe anche il tempo impiegato per questa fase di analisi. Inoltre, dato che il programma lavora basandosi esclusivamente sulla morfologia del territorio, potrebbe rivelarsi utile nell'identificare zone di pericolo in cui non siano stati registrati eventi passati, che quindi potrebbero essere state sottovalutate con le analisi precedenti.

CAPITOLO 2 – MATERIALI E METODI

3. AREA DI STUDIO

3.1. Val di Vizze

3.1.1. Inquadramento geografico

La Val di Vizze è una vallata situata nella parte più settentrionale dell'Alto Adige, a pochi km dal confine del Brennero (Figura 10). Essa è una valle laterale dell'Alta Val d'Isarco, che si sviluppa in direzione N-E S-O a partire dal Passo di Vizze (2248 m s.l.m.) fino al comune di Vipiteno (Figura 11). È circondata dai Monti di Fundres e dalle Alpi del Tux e si estende per una lunghezza di circa 23 km a partire dalle Alpi dello Zillertal, la cui vetta principale è il Gran Pilastro (3510 m s.l.m.).

Anche se oggi non è più possibile raccogliere i minerali, questa vallata è famosa fin dai tempi antichi per i suoi ricchi giacimenti di argento, rame e piombo.

Val di Vizze però non è solo il nome della vallata, ma anche quello del centro abitato. Questo



Figura 10: Veduta aerea della Val di Vizze (Archivio ED30)

comune vanta una popolazione di circa 2800 abitanti e, con la sua superficie di 142 km², è tra i più grandi dell'Alto Adige. Esso comprende tutte le numerose località e frazioni che si trovano lungo la valle tra cui le principali sono: Avenes, Borgone, Caminata, Centrale idroelettrica, Flaines, Fossa Trues, Fosse, Novale, Palù, Piazza, Quinzo, Riva, San Giacomo e Smudres.

La Val di Vizze è percorsa per tutta la sua lunghezza dal Rio Vizze, un affluente di sinistra del fiume Isarco, che sorge dal Monte Lavizza/Haupenhöhe (3040 m s.l.m.) e confluisce con l'Isarco proprio in corrispondenza di Vipiteno a 940 m s.l.m.. Esso è alimentato da estesi nevai, tra cui i maggiori sono il Griesferner e l'Hochferner sull'Hochferner (3470 m s.l.m.) e la Vedretta del Gran Pilastro sul Gran Pilastro. Per questo motivo il Rio ha una notevole portata per tutto il periodo dell'anno (Vanzetta, 1987). Il Rio Vizze ha numerosi affluenti che nascono dai monti che circondano la valle, tra questi i più pericolosi sono i Rii Mesule, Padone, Transacqua,

Grande, Bargone e Tolve in sinistra idrografica e i Rii Aiga, Riva, Fosso dei Camosci e Avenes in destra idrografica.



Figura 11: Carta dell'Alto Adige. Evidenziata in rosso l'area in cui è compresa la Val di Vizze.

3.1.2. Inquadramento geologico

L'Alta Val d'Isarco si estende dal passo del Brennero a Bressanone e la sua geologia è ovviamente legata ai processi di formazione dell'arco alpino (Figura 12). L'orogenesi delle Alpi, infatti, è da attribuire al movimento di diverse masse rocciose che scorrendo le une sopra le altre, si sono accavallate, dando vita a quattro diverse unità tettoniche: sudalpina, austroalpina, pennidica ed elvetica. Le prime tre sono presenti nell'area esaminata.

Per quanto riguarda la falda sudalpina, è costituita da diversi tipi di rocce, soprattutto di tipo metamorfico, tra cui la principale è la *fillade quarzifera di Bressanone*, che costituisce la quasi totalità del basamento cristallino sudalpino (Baggio et al., 1969).

Per la falda austroalpina, invece, è presente il *Complesso di Merano-Mules-Anterselva e delle Breonie* che forma lo zoccolo più profondo. Qui si trovano vari tipi di rocce, tra cui ancora le filladi quarzifere, ma anche gneiss e paragneiss; mentre, le coperture più superficiali sono costituite da sedimenti mesozoici e dai due complessi di *Stilves-Corno Bianco* e *Tribulaun-Cime Bianche di Telves*, formati entrambi da rocce calcaree come marmi e dolomia.

La falda pennidica infine, è quella che caratterizza in particolar modo la Val di Vizze e il Gran Pilastro. Essa comprende due gruppi di rocce: *Gruppo del Greiner-Tux-Gran Veneziano* e *Gruppo dei Calcescisti con ofioliti*. Il primo gruppo a sua volta comprende tre complessi di rocce: il *Complesso del Tux-Gran Veneziano*, formato da gneiss granitici e granodioritici; il

Complesso del Greiner, formato da micascisti granatiferi grigio-nerastri e vari tipi di gneiss; e il *Complesso di Vizze*, che forma la parte superiore del *Gruppo del Greiner-Tux-Gran Veneziano* e comprende rocce metamorfiche, tra cui quarziti bianche e quarziti nere e marmi dolomitici in facies metamorfica di colore bianco-giallognolo. Il secondo gruppo, invece, occupa una buona porzione della Val di Vizze ed è costituito da: marmi grigio-bluastri, calcescisti grigio-scuri, marmi bianchi o giallastri a flogopite e anfiboliti o serpentiniti. Nella zona verso il Gran Pilastro affiorano gli Gneiss degli Alti Tauri.

I depositi più superficiali presenti nella valle, invece, sono di formazione molto più recente e infatti sono denominati *formazioni quaternarie*. Esse sono legate alle azioni erosive svolte dal ghiaccio durante le ultime glaciazioni. La forma stessa della valle, che è la tipica forma a U caratteristica di molte vallate alpine, dimostra come il ghiaccio abbia avuto un ruolo fondamentale nel modellare i versanti con la sua azione erosiva, soprattutto durante l'ultima glaciazione del Würmiano avvenuta circa 12000 anni fa. Proprio l'azione svolta dal ghiaccio ha contribuito alla formazione di questi depositi morenici che caratterizzano gran parte del fondovalle. Le rocce che formano questi depositi sono principalmente di tipo metamorfico e si trovano sia nelle zone più basse dei versanti, in corrispondenza dei conoidi di deiezione, sia nelle aree dei circhi glaciali d'alta quota. Queste formazioni, ampiamente diffuse nella valle, vengono suddivise nel modo seguente:

- *Morene sottostanti alle alluvioni antiche terrazzate* formate soprattutto da granito e gneiss;
- *Alluvioni antiche terrazzate generalmente sottostanti a depositi morenici würmiani* che si sono formate attraverso una prima fase abbastanza lunga di deposito di sedimenti, seguita da una fase di intensa erosione svolta dal ghiaccio;
- *Alluvioni antiche cementate* derivanti da rocce dolomitiche;
- *Depositi fluvioglaciali a grossi blocchi*;
- *Morene würmiane degli stadi post-würmiani e attuali* che costituiscono un sottile strato detritico che ricopre le formazioni rocciose più profonde;
- *Detriti di falda e copertura eluviale (coni detritici)* che si trovano solitamente su versanti con pendenze piuttosto elevate, costituiti da rocce non molto compatte, alla base di pareti rocciose;
- *Alluvioni recenti e attuali, talora terrazzate (coni di deiezione)* formate da sedimenti a granulometria estremamente variabile (ghiaia, limo e argilla), che si localizzano sui fondovalle, in corrispondenza degli sbocchi del reticolo idrografico.

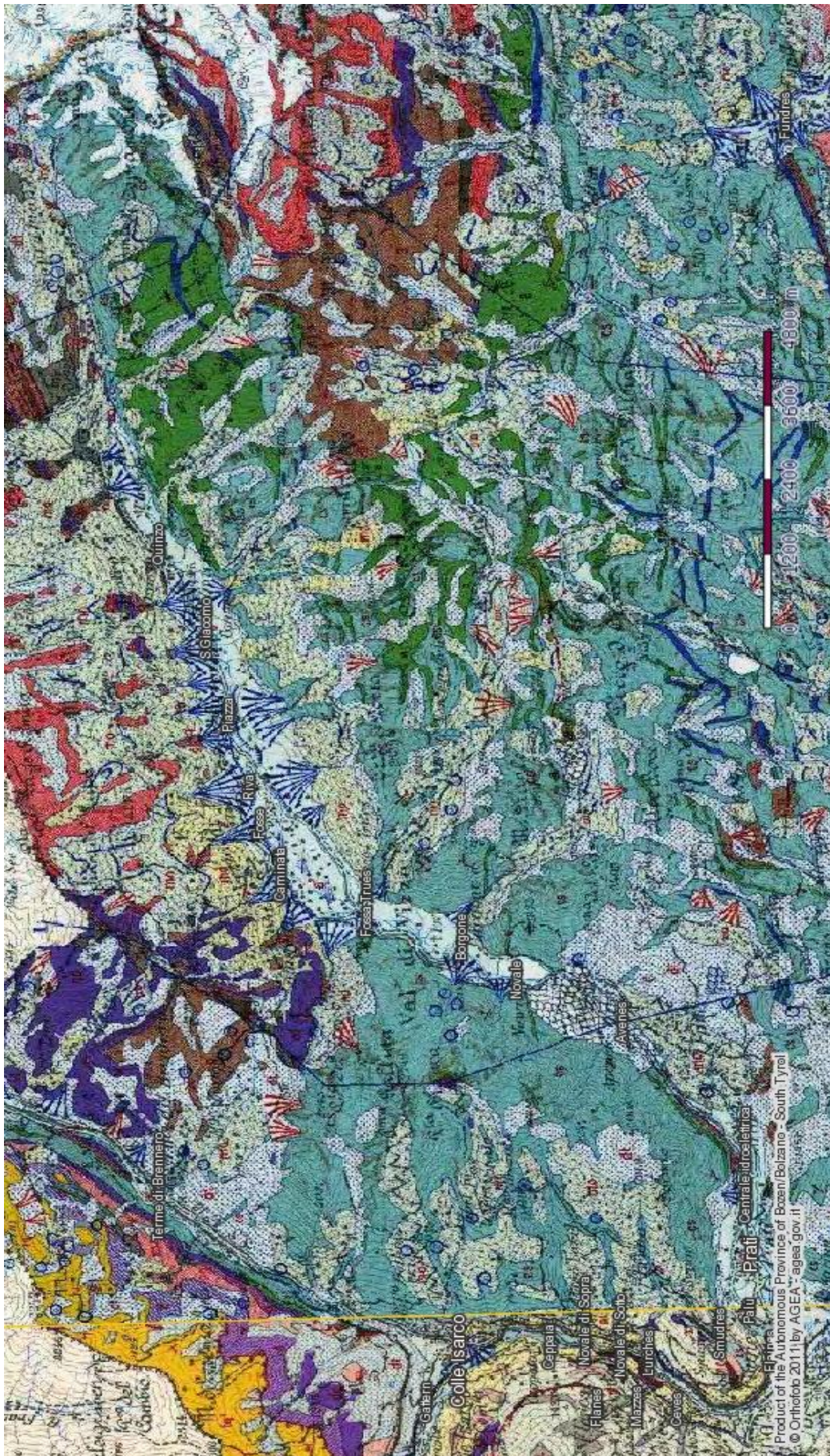


Figura 12: Carta geologica della Val di Vizza.

3.1.3. Uso del suolo

Il servizio Bacini Montani della Provincia di Bolzano ha fornito parecchi dati sulla medio-bassa Val di Vizze, compresa anche la mappa d'uso del suolo (Figura 14). Da questa si nota come la maggior parte della valle sia ricoperta da bosco. Esso è il classico bosco di conifere formato principalmente da *Picea abies*, con la presenza meno numerosa di *Larix decidua*, *Pinus sylvestris* e alcune specie di latifoglie tra cui *Sorbus aucuparia* e *Acer pseudoplatanus*. Il bosco ricopre i versanti laterali partendo

dal fondovalle fino ad un'altezza di poco superiore ai 2000 m s.l.m. (Figura 13). A quote maggiori, oltre il limite superiore del bosco, si trovano aree prative, pascoli e aree in roccia, prive di vegetazione. Nel fondovalle la maggior parte del suolo è coltivato e ricade nella categoria del "seminativo", mentre sono



Figura 13: Porzione della valle in cui si distinguono i diversi usi del suolo.

facilmente identificabili in Figura 14 col colore rosso i piccoli insediamenti urbani che si collocano lungo tutto il corso del torrente Vizze. La valle è attraversata per tutta la sua lunghezza dal Rio Vizze e dalla strada principale. A S-O, in corrispondenza dello sbocco nella Valle dell'Isarco, c'è un'area urbana molto estesa che corrisponde all'abitato di Vipiteno. Al centro della valle si può notare anche un bacino d'acqua che è posto in corrispondenza della diga di Vizze.

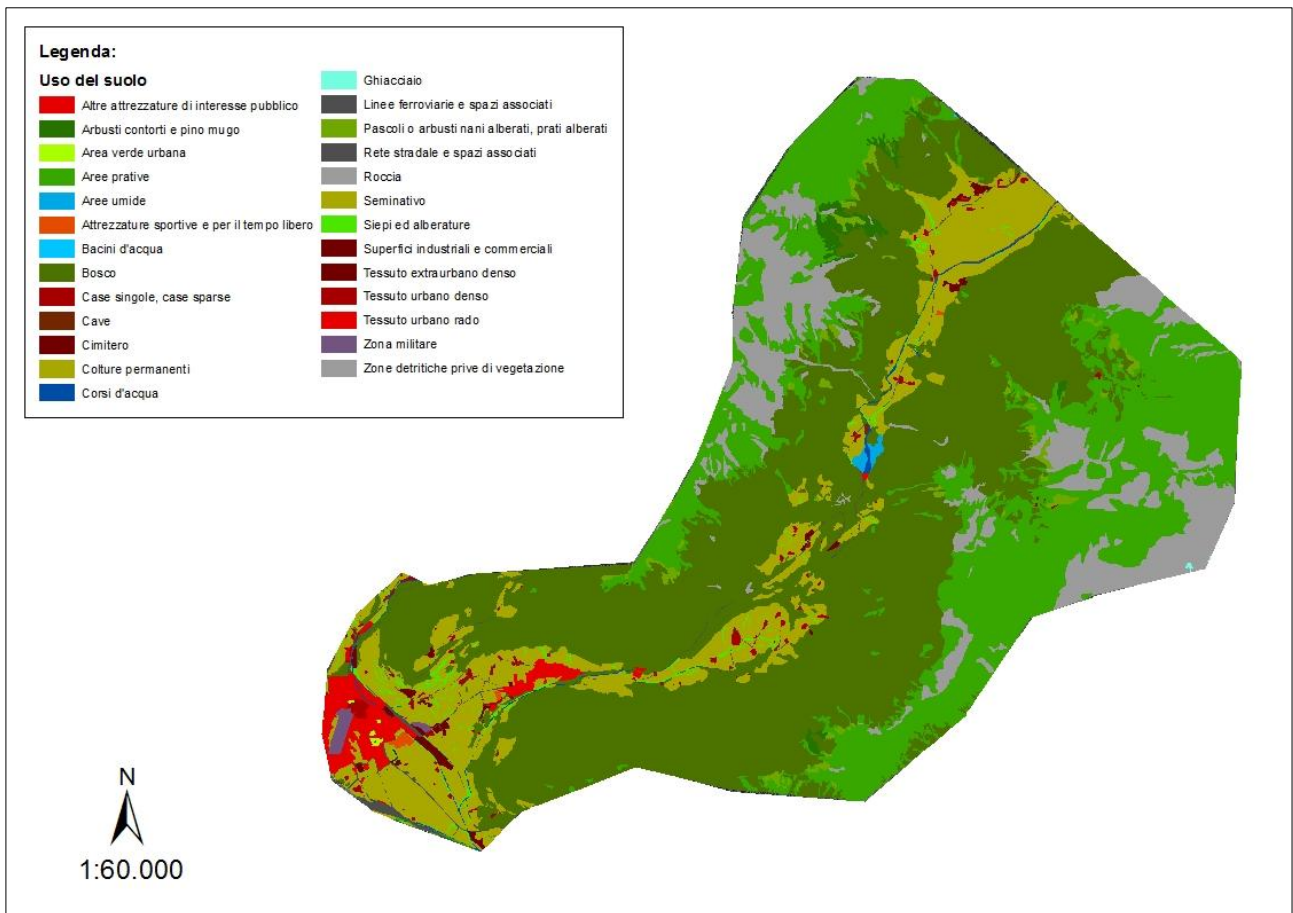


Figura 14: Uso del suolo della porzione medio-bassa della Val di Vize

3.2. Descrizione dei bacini di studio

Poiché nei dati forniti dalla Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano sono stati distinti due bacini diversi in corrispondenza del Rio Avenes, caratterizzati ognuno dal proprio codice di riconoscimento e dalla propria scheda evento con relativi dati, si è preferito tenere questa distinzione anche nel presente lavoro. Il primo bacino è stato identificato in corrispondenza del corso principale del torrente, mentre il secondo nei pressi del maggiore affluente posto in sinistra idrografica. I due bacini sono quindi limitrofi ed hanno il conoide di deiezione in comune.

Per i dati riguardanti il bacino del Rio Tolve, utilizzati nel presente lavoro invece, si rimanda al precedente studio di Andretto (2013) dal titolo “*Analisi dell’evento del 4 agosto 2012 nel bacino del torrente Tolve (Val di Vizze, Bolzano) e proposta di mitigazione del rischio sul conoide*”.

3.2.1. Bacino del Rio Avenes

Il Rio Avenes è situato nella parte centro-occidentale della valle, a circa 6 km da Vipiteno, e nasce da diversi rigagnoli a valle della Cima di Novale/Riedspitz (2490 m s.l.m.). Dopo un percorso di circa 2 km in direzione O-E si versa nel Rio Vizze a quota 1220 m s.l.m., a valle dell’abitato di Avenes (Vanzetta, 1987). La sezione di chiusura del bacino è stata posta poco sopra l’abitato di Avenes, ad una quota di circa 1330 m s.l.m. Da qui, lo spartiacque topografico che delimita l’area drenata procede verso N-O, attraversando la località denominata Plar e giunge al suo limite superiore, in corrispondenza della cresta del Monte Novale, a quota 2279 m s.l.m.. Prosegue poi verso N-E lungo la cresta, oltrepassando la Cima di Novale (2490 m s.l.m.) e puntando verso la cima del Monte

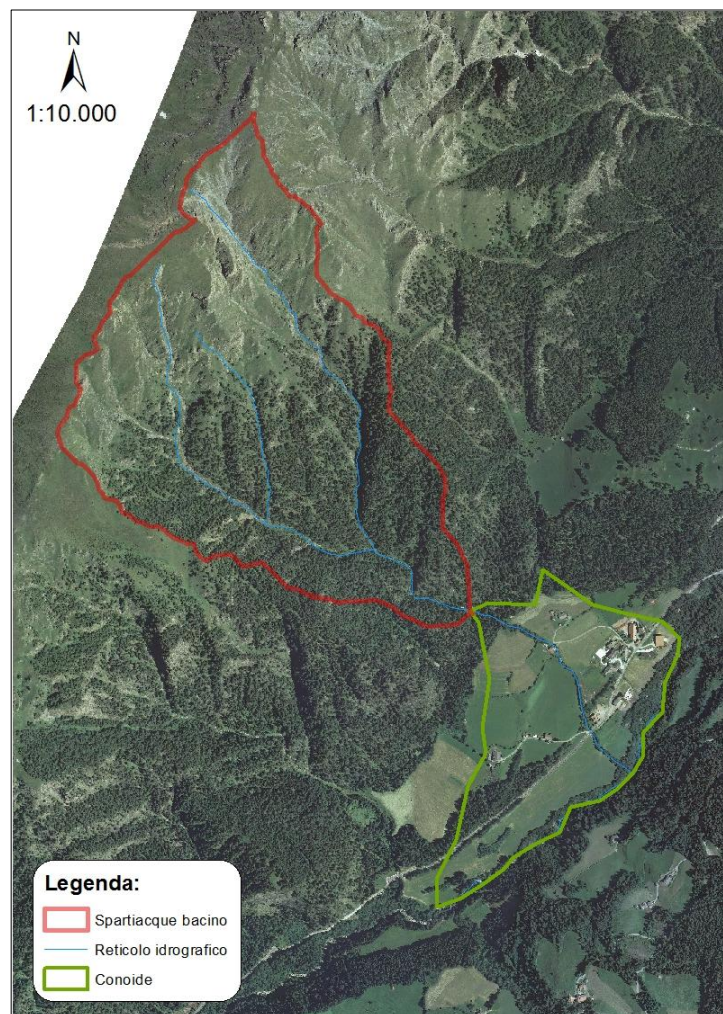


Figura 15: Bacino idrografico e conoide di deiezione del Rio Avenes.

Bairnock (2605 m s.l.m.), senza però raggiungerla. A quota 2560 m s.l.m. lo spartiacque svolta in direzione S-E, seguendo il confine con il bacino dell'affluente del Rio Avenes, fino a ricongiungersi con la sezione di chiusura (Figura 15).

Tabella 5: Principali parametri morfometrici calcolati per il bacino del Rio Avenes

Parametri morfometrici bacino Rio di Avenes	
Perimetro (m)	4519
Area (km²)	0,96
H min (m s.l.m.)	1337
H max (m s.l.m.)	2561
H media(m s.l.m.)	2019
Pend min (°)	0,98
Pend max (°)	82,79
Pend media (°)	45,85
Lunghezza reticolo idrografico (m)	4332
Lunghezza collettore principale (m)	2392
Pend media collettore (°)	43,45
Pend media conoide (°)	15,43
Densità di drenaggio (km⁻¹)	4,51
Indice di forma di Horton	0,17
Fattore di forma	2,17
Indice di compattezza del bacino (Gravelius)	1,29
Numero di Melton	1,25
Rapporto di biforcazione	2,50
Coefficiente di torrenzialità (km⁻²)	3,13
Frequenza di drenaggio	5,21

La superficie del bacino è di 0.96 km² e la sua esposizione prevalente è S S-E. Il punto di vetta è posto ad una quota di 2561 m s.l.m., mentre la sezione di chiusura è a 1337 m s.l.m..

Il bacino ha una pendenza media di 45.85°, con una punta massima di 82.79° (Figura 19). Il reticolo idrografico ha una lunghezza complessiva di 4332 m, di cui più della metà sono costituiti dal collettore principale, che da solo misura 2392 m. Da questi dati risultano un coefficiente di torrenzialità e una frequenza di drenaggio piuttosto bassi. Il reticolo infatti, non è molto ramificato, avendo solamente ordine 2, secondo la classificazione di Horton-Strahler.

Un altro parametro morfologico molto interessante è il numero di Melton che indica l'attitudine del bacino a generare debris-flow. Esso, mettendo in rapporto il dislivello tra il punto più alto e la sezione di chiusura del bacino con l'area dello stesso, esprime l'energia potenziale del bacino. Secondo alcune analisi svolte da D'Agostino nel 1996, quando questo parametro supera il valore di 0.5 il bacino può essere soggetto a debris flow (attitudine topografica); nel caso in esame, come si può notare dalla Tabella 5, il valore è pari a 1.25, quindi decisamente più alto.

Anche la pendenza media del collettore principale è un criterio discriminante l'attitudine a generare debris flow ed anche in questo caso il bacino in esame risulta suscettibile a fenomeni di colate detritiche. Infatti si ha potenziale sviluppo di debris flow con una pendenza media superiore a $12-13^\circ$ e nel bacino considerato, come si può osservare dal profilo longitudinale (Figura 16), essa è addirittura di 43.45° .

Dalla determinazione della curva ipsografica (Figura 17) risulta un'altitudine media di 1930.15 m mentre, osservando la curva ipsometrica adimensionale (Figura 18), il bacino sembra non aver ancora raggiunto la fase di maturità. Poiché la maggior parte della curva ricade sopra la bisettrice del grafico, il bacino risulta ancora in fase giovanile e quindi soggetto a fenomeni di erosione.

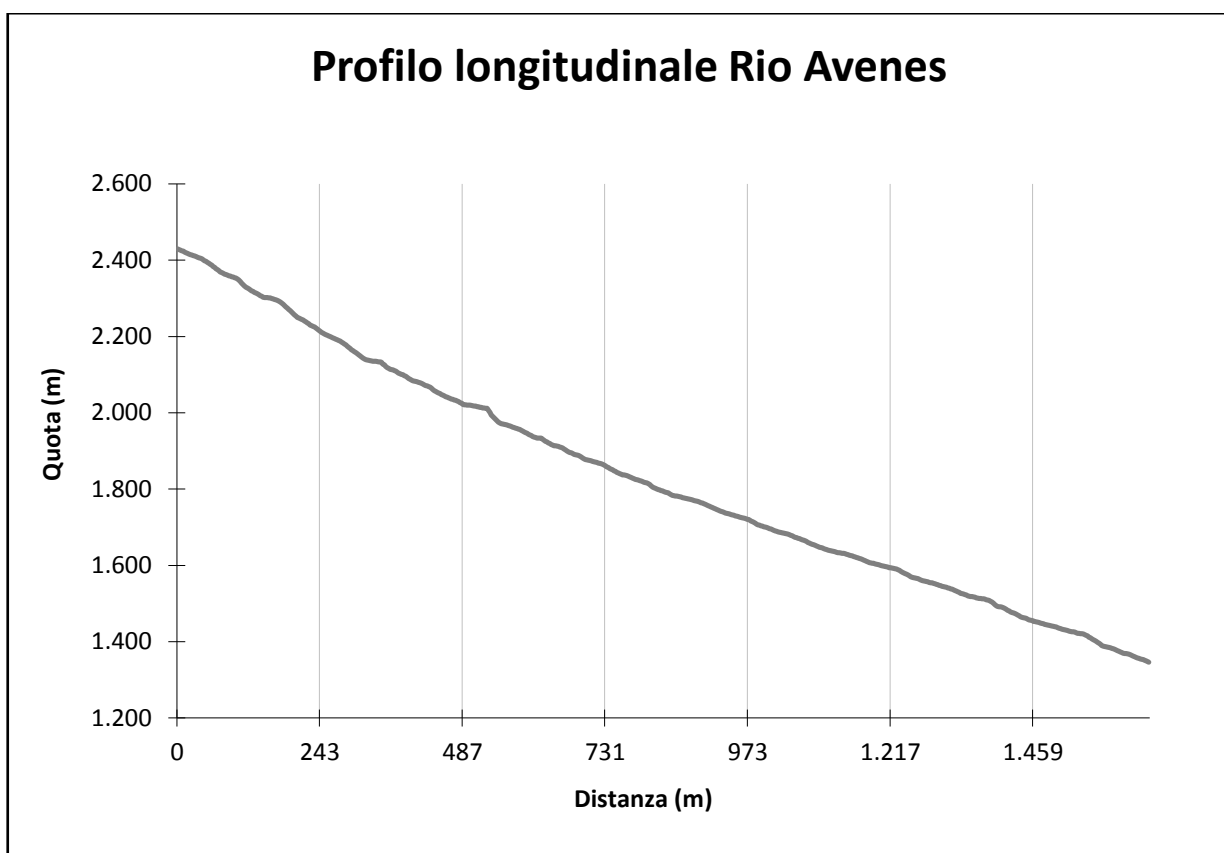


Figura 16: Profilo longitudinale del Rio Avenes

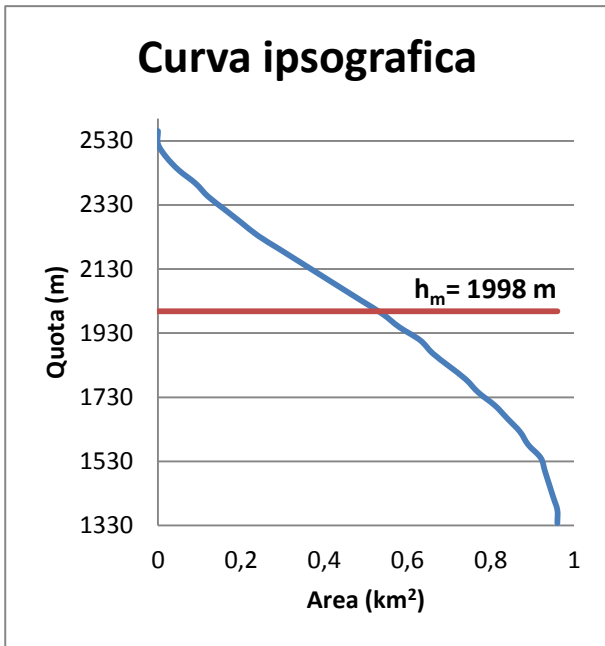


Figura 17: Curva ipsografica del Rio Avenes

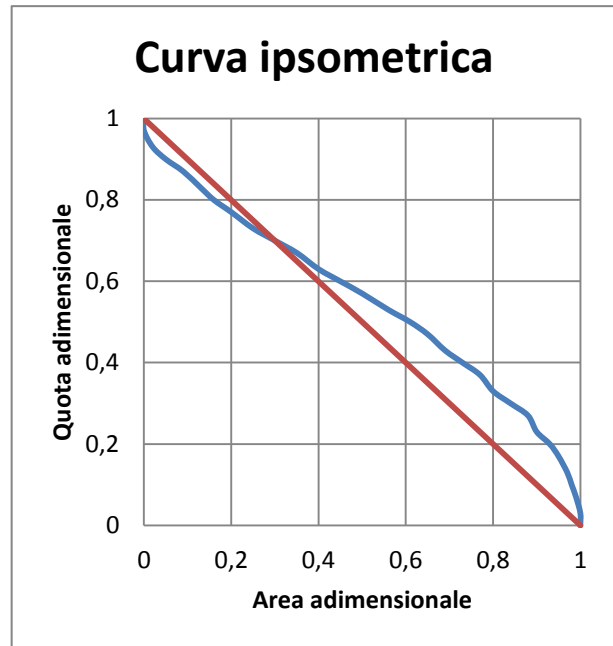


Figura 18: Curva ipsometrica del Rio Avenes.

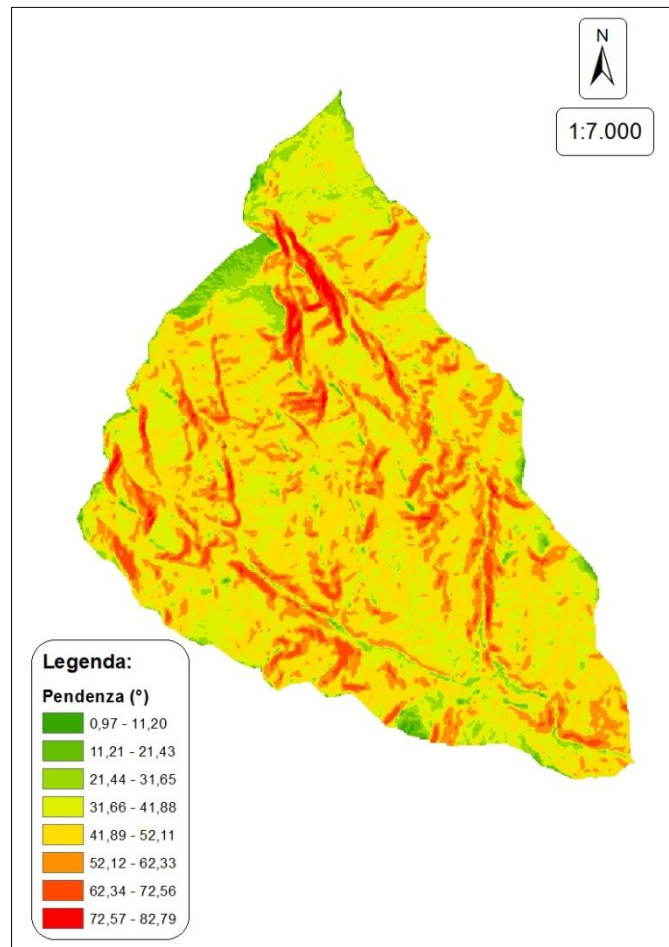


Figura 19: Carta delle pendenze del bacino del Rio Avenes.

3.2.2. Bacino dell'affluente del Rio Avenes

Il secondo bacino considerato è stato individuato per il principale affluente del Rio Avenes e si trova in sinistra idrografica rispetto al torrente principale. La sezione di chiusura è posta ad una quota di 1343 m s.l.m., appena sopra la località dell'abitato di Avenes denominata Joseler. Lo spartiacque idrografico procede in direzione N-E attraversando l'alpeggio di Pfannes e ad una quota di circa 1560 m s.l.m. punta in maniera più decisa verso nord, senza però raggiungere la cresta tra la Cima di Novale e il Monte Bairnock. Esso si mantiene infatti ad una quota inferiore, raggiungendo il suo punto di vetta in corrispondenza del perimetro del bacino del Rio Avenes, ad una quota di 2424 m s.l.m.. Da qui lo spartiacque procede in direzione sud, sempre seguendo il confine del primo bacino, fino a ricongiungersi con la sezione di chiusura (Figura 20).

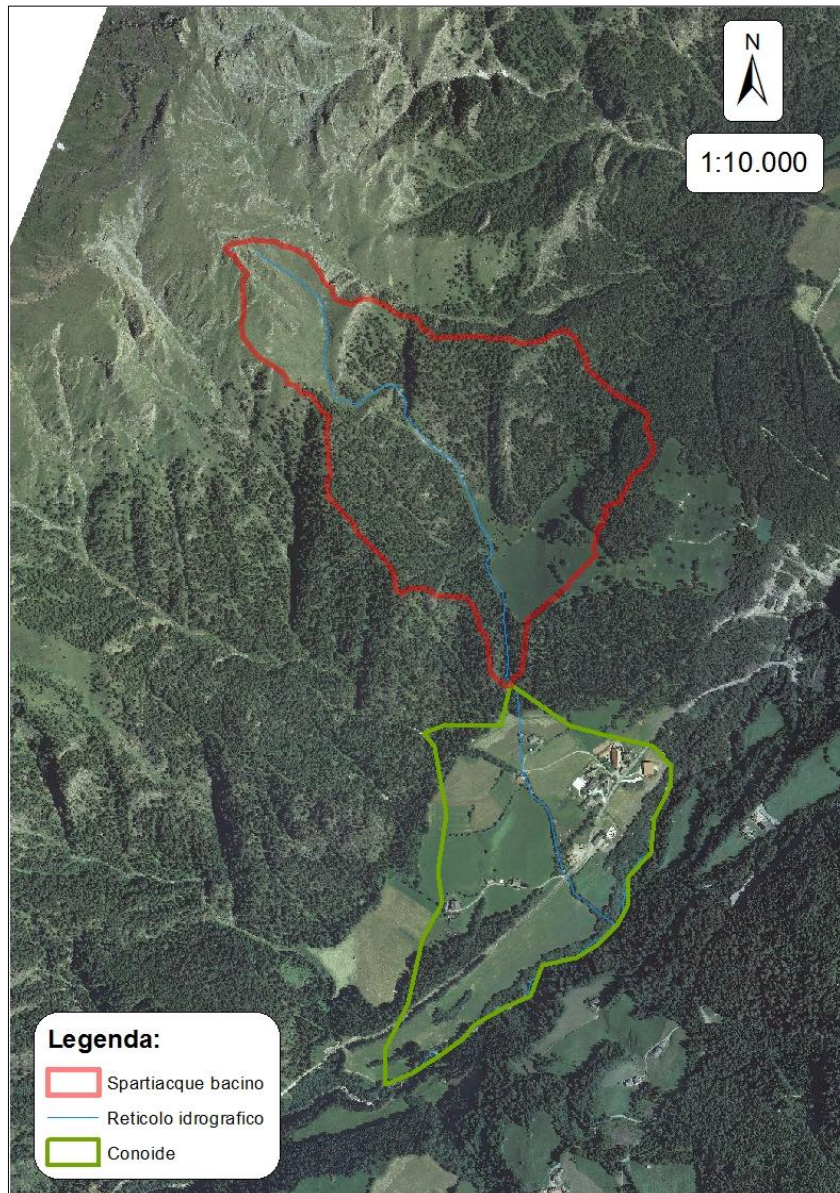


Figura 20: Bacino idrografico e conoide di deiezione del principale affluente del Rio Avenes.

Tabella 6: Principali parametri morfometrici calcolati per il bacino dell'affluente del Rio Avenes

Parametri morfometrici bacino affluente Rio di Avenes	
Perimetro (m)	3631
Area (km ²)	0,54
H min (m s.l.m.)	1343
H max (m s.l.m.)	2424
H media(m s.l.m.)	1788
Pendenza min (°)	0,00
Pendenza max (°)	77,62
Pendenza media (°)	40,53
Lunghezza reticolo idrografico (m)	1704
Lunghezza collettore principale (m)	1704
Pendenza media collettore (°)	37,89
Pendenza media conoide (°)	15,43
Densità di drenaggio (km ⁻¹)	3,16
Indice di forma di Horton	0,19
Fattore di forma	2,06
Indice di compattezza del bacino (Gravelius)	1,38
Numero di Melton	1,47
Rapporto di biforcazione medio	-
Coefficiente di torrenzialità (km ⁻²)	1,85
Frequenza di drenaggio	1,85

Il bacino, come descritto in Tabella 6, ha un'estensione abbastanza ridotta, la sua superficie infatti è di 0.54 km² e la sua esposizione prevalente è S S-E. Come già detto in precedenza, esso si estende a partire da una quota di 1343 m s.l.m. in corrispondenza della sezione di chiusura, fino ad un massimo di 2424 m s.l.m.. La pendenza media è di 40.53°, con una punta massima di 77.62° (Figura 24). Il reticolo idrografico è costituito solamente dal collettore principale, senza nessun affluente ne in destra ne in sinistra idrografica. La lunghezza complessiva del reticolo perciò è di 1704 m. Il numero di Melton, parametro che indica l'attitudine del bacino a generare colate detritiche, ha un valore di 1.47, quindi anche in questo caso superiore rispetto al limite di 0.5 indicato da D'Agostino come discriminante per i bacini da colate detritiche. Anche la pendenza media del collettore principale è indice di un bacino suscettibile a questo tipo di disturbo, infatti è di 37.89°, quando la pendenza minima indicata per lo sviluppo di debris flow è di 12-13° (Figura 21).

Dalla curva ipsografica risulta un'altitudine media di 1797.15 m (Figura 23) mentre, osservando la curva ipsometrica, essa si trova per la maggior parte al di sotto della bisettrice del grafico e solo nella parte terminale vi giace sopra (Figura 22). Questo teoricamente indica un bacino che sta entrando in fase di maturità e che quindi dovrebbe avere raggiunto una maggiore stabilità.

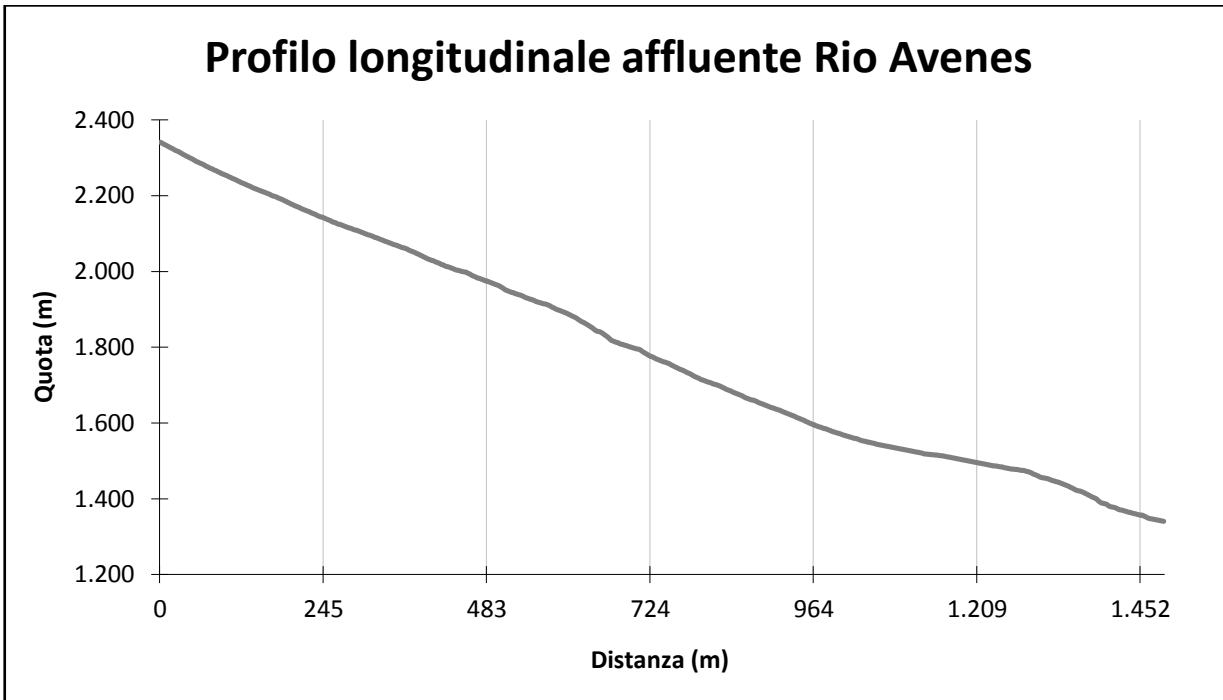


Figura 21: Profilo longitudinale del principale affluente del Rio Avenes.

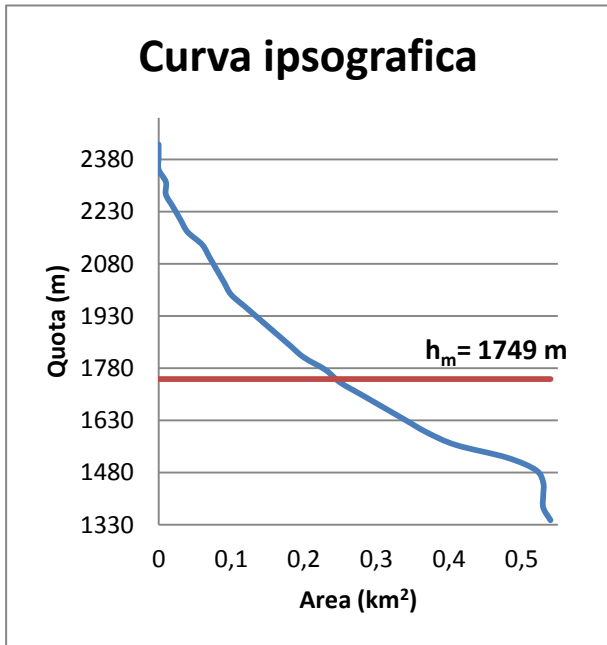


Figura 23: Curva ipsografica del principale affluente del Rio Avenes.

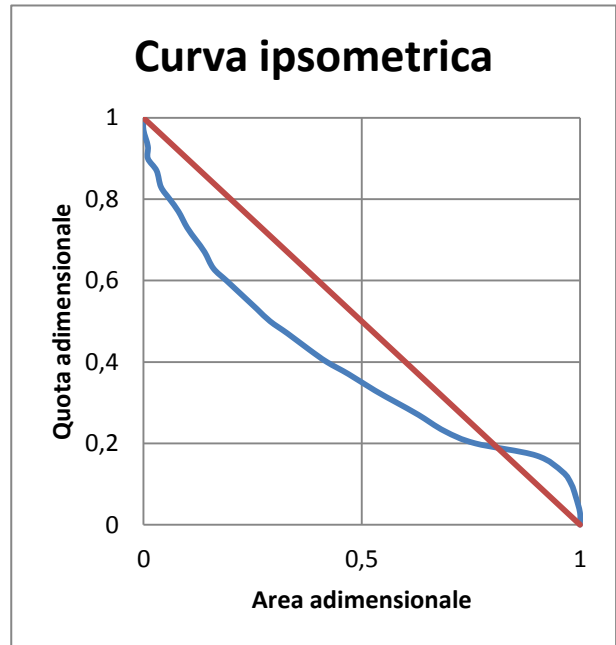


Figura 22: Curva ipsometrica del principale affluente del Rio Avenes.

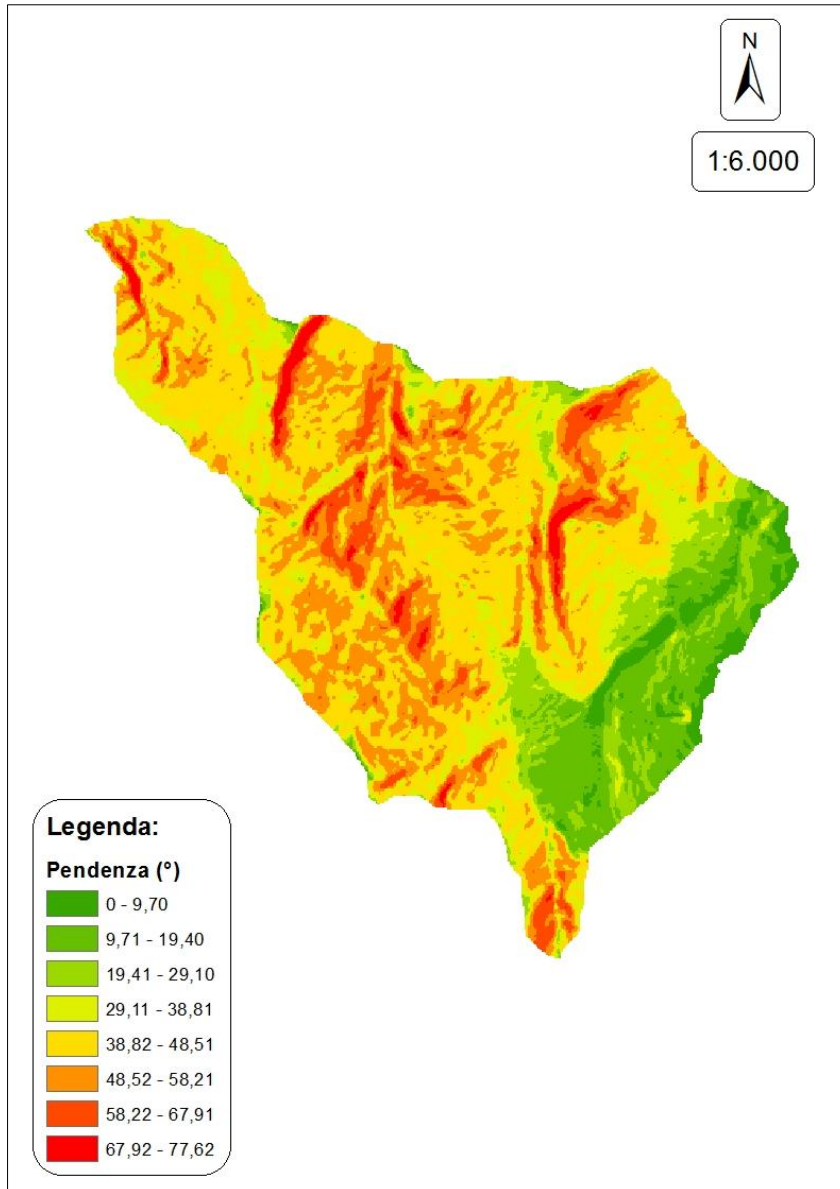


Figura 24: Carta delle pendenze del bacino del principale affluente del Rio Avenes.

3.3. Inquadramento meteorologico

3.3.1. Alto Adige

L'anno 2012 in Alto-Adige è stato particolarmente ricco di disturbi di natura idrogeologica. L'incremento rispetto agli anni precedenti è stato notevole (Figura 25).

La particolarità di questa annata però, è che gli eventi si sono concentrati in corrispondenza di poche date, caratterizzate da eventi temporaleschi di forte intensità (Figura 26). In particolare sono stati tre gli eventi meteorologici di rilievo che hanno scatenato a catena tutta una serie di disturbi idrogeologici tra cui frane, alluvioni e colate detritiche. (Figura 27). Il primo è stato il fenomeno del 4 agosto che ha interessato la zona dell'Alto Isarco con i comuni di Vipiteno, Brennero, Racines e in particolar modo la Val di Vizze. Il secondo è stato quello del 25 agosto che ha interessato la Valle di Trafoi e Solda. Il terzo è avvenuto in data 11 novembre e ha interessato più settori della provincia tra cui Bassa Atesina, Burgravato, Valle di Tires, Val Gardena e Val Pusteria (Macconi et al., 2012).

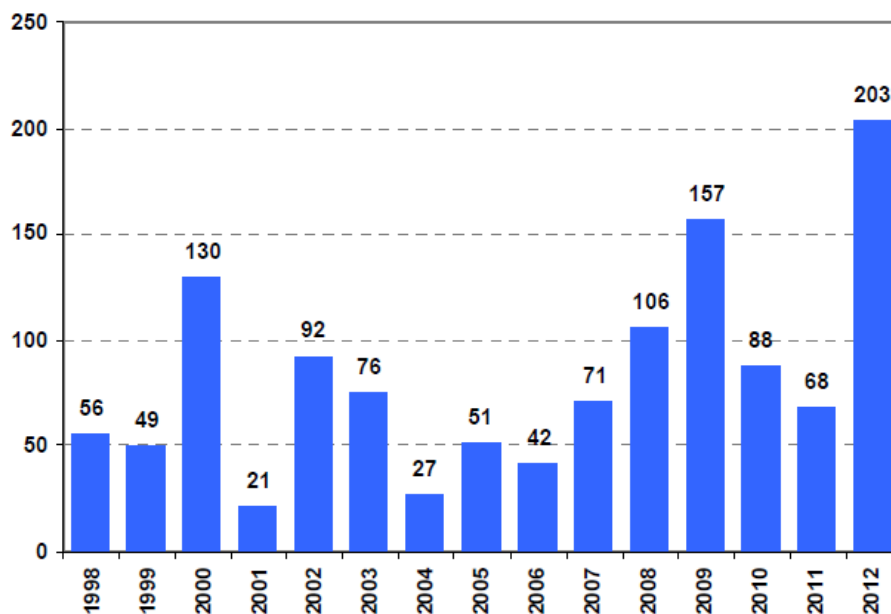


Figura 25: Riassunto degli eventi registrati per anno nel periodo 1998-2012 (da ED30 Report annuale).

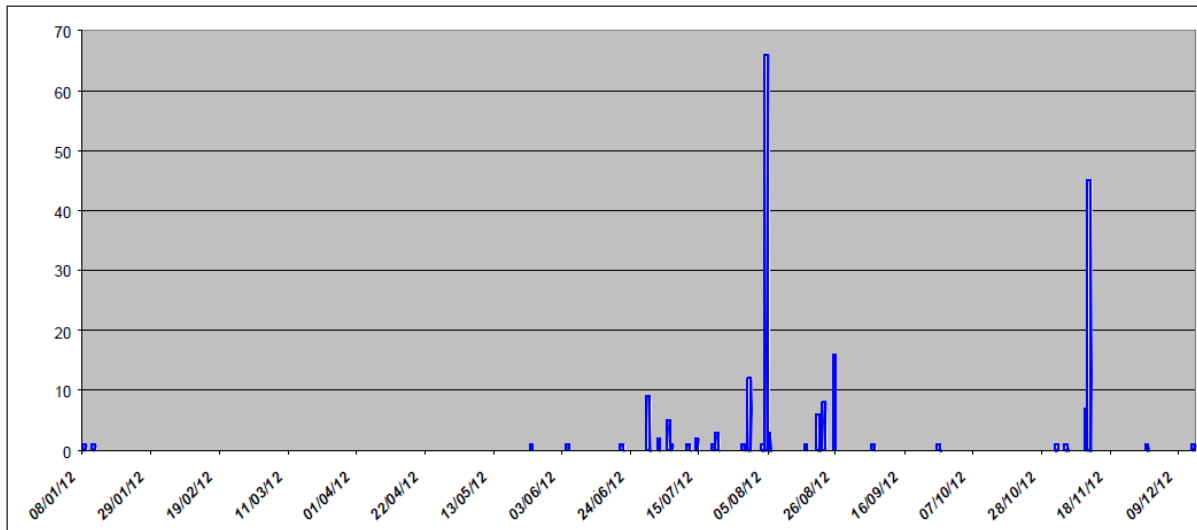


Figura 26: Distribuzione temporale degli eventi nell'anno 2012 (da ED30 Report annuale)

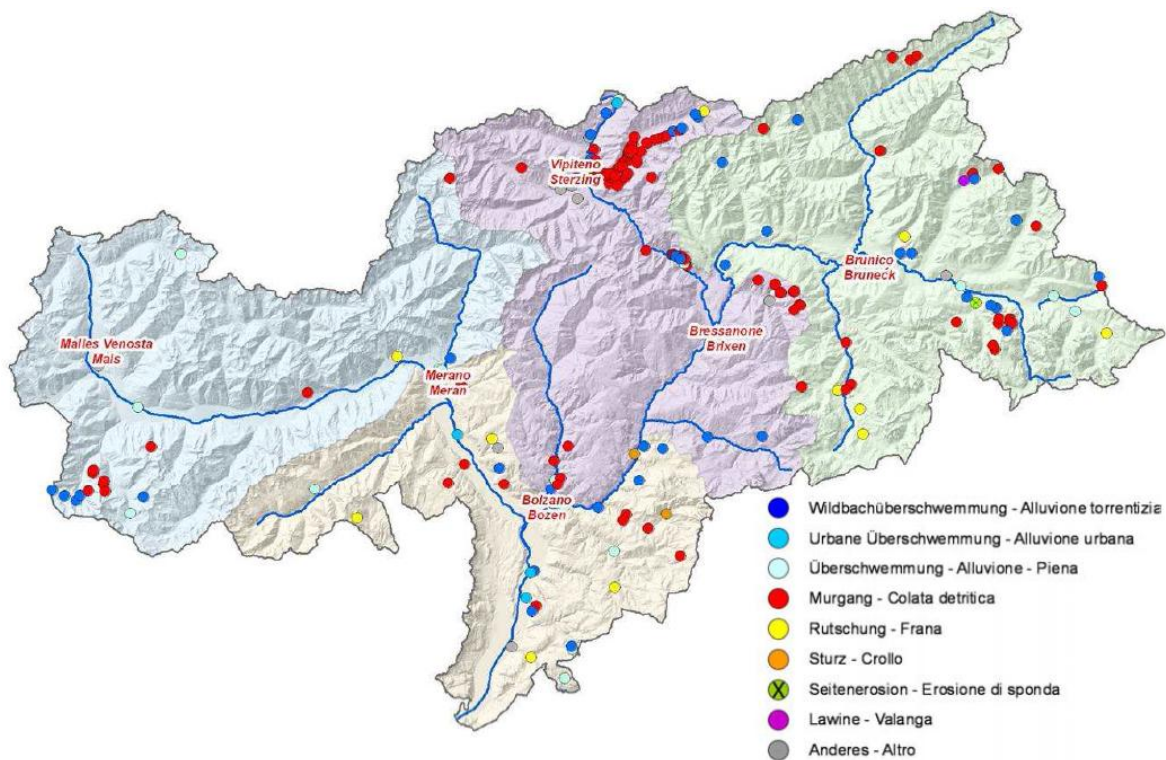


Figura 27: Tipologia e distribuzione degli eventi 2012 (da ED30 Report annuale)

3.3.2. Alta Val d'Isarco

Per quanto riguarda l'Alta Val d'Isarco, dal pluviografo di Vipiteno risulta una precipitazione media annua di 772.5 mm ma, nel 2012 il valore è stato di 1042.6 mm, il terzo dato più alto dal 1921, anno in cui è stato installato lo strumento di rilevazione. I mesi più piovosi hanno seguito il normale andamento climatico tipico di questa zona e infatti sono stati i tre estivi: nel mese di

giugno, il pluviografo di Vipiteno ha registrato 143.6 mm di pioggia mentre, nel mese di luglio sono stati 202.4 i mm caduti, con un evento abbastanza intenso registrato il 6 luglio, durante il quale sono caduti 62.4 mm. Per quanto riguarda il mese di agosto invece, sono caduti in totale 213.4 mm e l'evento più intenso è stato quello del 4/08, durante il quale sono caduti 81 mm di pioggia.

3.3.3. L'evento del 4 agosto 2012 in Val di Vizze

Dal pomeriggio e per tutta la serata del 4 agosto 2012 si sono formate di continuo nuove celle temporalesche a partire dalla Val Passiria. Queste si sono scaricate prevalentemente sulla Val di Vizze dando origine ad un fenomeno temporalesco di elevata intensità, caratterizzato dalla presenza di pioggia mista a grandine. È stato uno degli eventi più forti mai registrati dal pluviografo di Vipiteno infatti, considerando l'intervallo temporale di 24 ore, viene superato solamente dagli eventi del 18 luglio 1981 e del 3 agosto 1942. Mentre, considerando gli intervalli di 6 e 12 ore, rappresenta l'evento più forte registrato fino ad oggi (Tabella 7). Ha iniziato a piovere verso le ore 17 e nel giro di un'ora sono caduti circa 21 mm; successivamente c'è stata una breve pausa fino

alle 19, dopodiché si è scaricato il fronte più intenso del temporale (Figura 28). Tra le ore 19 e le ore 22 ha continuato a piovere incessantemente e sono caduti 51 mm di precipitazione. Infine il temporale è

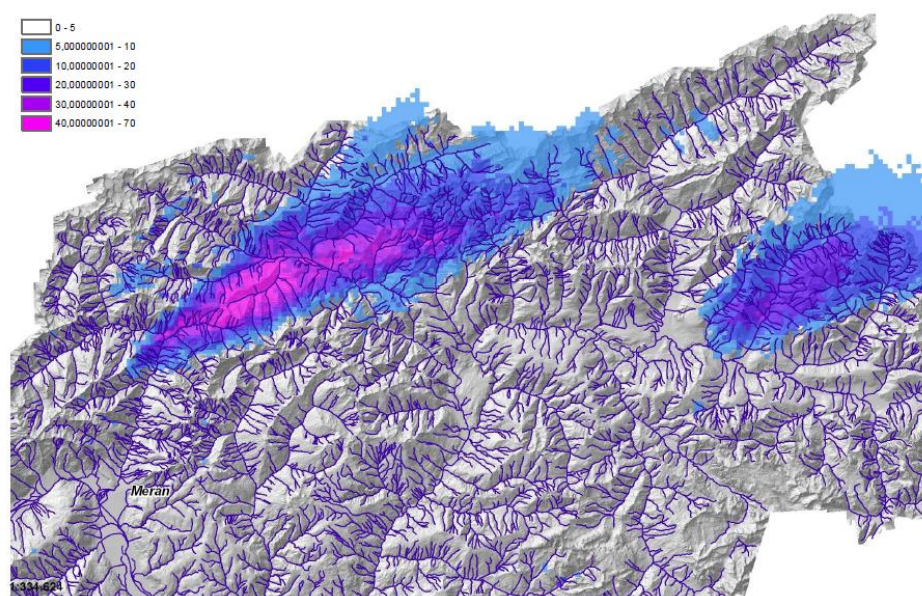


Figura 28: Precipitazione Cumulata - ore 20.00 04/08/2012

andato via via esaurendosi, facendo registrare solamente altri 7 mm tra le ore 22 e le ore 2 del mattino del 5 agosto (Figura 29). In totale quindi, nel giro di poche ore sono caduti circa 80 mm di precipitazione.

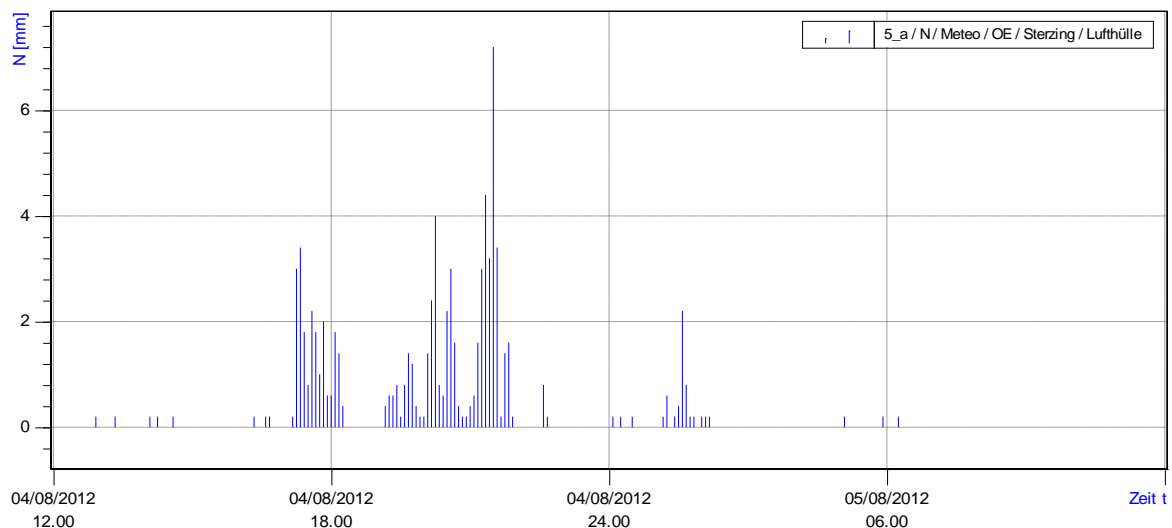


Figura 29: Diagramma pluviometrico 04/05-08-2012

Data l'eccezionalità dell'evento, il tempo di ritorno è stato stimato tra i 200 e i 300 anni. Esso inoltre, è stato particolarmente dannoso perché è avvenuto in un momento in cui il suolo era già saturo d'acqua a causa delle abbondanti piogge che hanno caratterizzato i due mesi precedenti. Questo intenso fenomeno meteorologico ha portato al conseguente innesco di numerosi eventi di dissesto. In occasione di precipitazioni eccezionali infatti, si riattivano anche impluvi effimeri rimasti secchi per decenni, dove la vegetazione e talvolta l'intervento umano hanno occupato la sezione di deflusso. Questi impluvi, la cui pericolosità non viene più percepita dalla popolazione, hanno una risposta idrologica estremamente rapida, cosa che rende inattuabile l'installazione di sistemi di allarme e di evacuazione (Macconi et al., 2012). In Val di Vizze sono state innescate circa 30 colate detritiche, tra cui le più dannose hanno interessato le frazioni di Avenes e Tolve. Queste hanno provocato ingenti danni alle infrastrutture e la morte di due persone che si erano rifugiate all'interno delle loro abitazioni. Il torrente Vizze, che attraversa tutta la valle, è esondato in più punti provocando tra l'altro l'inondazione di numerosi terreni agricoli e di parte della frazione di Prati di Vizze. Esso è stato interessato anche da importanti fenomeni di erosione delle sponde laterali che in certi casi hanno portato a un notevole cambiamento della morfologia del torrente e hanno provocato l'asportazione delle piante presenti lungo gli argini. Si è quindi creata una notevole massa legnosa che è stata trascinata dalla corrente e si è fermata in corrispondenza della diga di Vizze provocandone la temporanea ostruzione. Ingenti danni sono stati procurati anche alla rete viaria: in più punti la strada è stata invasa dal flusso di acqua e detriti, fungendo da corsia preferenziale per il moto della colata. Inoltre, la rete ferroviaria è stata bloccata per settimane a causa dei danni provocati dall'acqua alla massicciata (Figura 30).



Figura 30: Immagini relative all'evento del 4/08/2012 riguardanti diverse aree della Val di Vizze (Archivio ED30).

Tabella 7: Precipitazioni di massima intensità misurate dal pluviografo di Vipiteno a partire dal 1921, distinte negli intervalli di 1, 3, 6, 12 e 24 ore.

Precipitazioni di massima intensità registrate al pluviografo di :									
3260									
VIPITENO - STERZING									
INTERVALLO IN ORE ZEITABSTAND IN STUNDEN									
1		3		6		12		24	
mm	data/datum	mm	data/datum	mm	data/datum	mm	data/datum	mm	data/datum
40,0	11/08/1986	61,6	13/08/1944	72,8	04/08/2012	79,8	04/08/2012	107,4	18/07/1981
37,4	13/08/1944	50,8	04/08/2012	61,6	13/08/1944	69,0	06/08/1985	93,0	03/08/1942
30,8	15/07/1951	45,0	11/08/1986	50,8	27/07/2006	65,5	18/07/1981	81,0	04/08/2012
28,0	14/08/2003	39,2	15/07/1951	50,0	20/09/1943	65,4	03/08/1942	81,0	05/08/1985
27,2	04/08/2012	39,0	03/08/1942	49,2	06/08/1985	65,0	11/09/1983	80,6	18/09/2011
26,6	03/07/1952	38,2	20/09/1943	47,8	21/08/1953	64,4	20/09/1999	78,4	11/08/1986
26,4	02/08/1958	37,8	24/07/1988	47,6	03/08/1942	61,6	13/08/1944	78,4	02/10/1993
26,0	06/06/1959	35,0	25/07/1977	46,8	18/07/1981	59,6	24/08/1987	73,6	15/11/2002
24,0	17/08/1985	35,0	18/07/1981	46,0	11/08/1986	57,8	27/07/1941	73,0	24/08/1987
23,4	24/07/1988	34,6	24/08/1979	45,6	15/07/1951	56,8	02/10/1993	72,8	27/10/1959
23,2	27/07/2006	34,0	27/07/1941	45,0	11/09/1983	55,4	21/08/1953	71,0	20/09/1999
22,8	23/07/1994	33,2	23/07/1994	43,8	27/07/1941	53,0	20/09/1943	70,0	21/09/1979
22,8	21/07/1995	33,0	27/07/2006	42,2	06/06/1959	52,4	27/07/2006	69,8	11/09/1983
22,2	25/07/1977	32,8	17/08/1985	41,4	24/08/1979	51,4	18/09/2011	66,8	16/10/1980
22,0	17/07/1941	31,6	06/06/1959	41,2	25/07/1977	51,4	11/08/1986	66,4	26/07/1941
22,0	20/09/1943	30,0	02/08/1958	39,0	24/08/1987	49,6	15/07/1951	65,8	03/11/1966
21,8	16/09/2005	29,8	26/06/1998	38,6	24/07/1988	48,6	24/08/1979	64,1	09/11/1971
21,4	22/07/1970	29,6	18/07/1975	38,4	18/07/1975	46,8	08/06/1956	63,4	08/08/1945
20,8	12/08/2000	29,4	14/08/2003	37,6	20/09/1999	46,4	14/08/2008	62,4	22/11/1990
20,6	19/07/1979	29,0	24/07/1937	37,2	24/07/1937	44,0	18/07/1975	61,6	13/08/1944
20,0	21/07/1980	28,6	19/07/1955	36,8	02/10/1993	43,6	06/09/1952	61,0	27/07/2006
19,8	27/06/1942	28,6	16/09/2005	36,6	24/07/1970	43,6	04/04/1989	59,8	07/06/1956
18,8	15/08/2008	28,4	15/08/2008	36,6	15/08/2008	43,4	15/11/2002	58,8	21/08/1953
18,6	09/07/1947	28,0	26/06/1983	35,8	08/07/2004	43,2	08/07/2004	58,2	06/09/1952
18,6	24/07/1969	27,8	21/08/1953	35,6	09/07/1947	42,6	22/08/1954	57,0	21/10/1928
18,6	28/07/1971	27,2	08/07/2004	33,8	15/08/1966	42,6	28/10/1959	56,2	20/09/1943
18,4	14/09/1949	27,0	21/07/1995	33,6	19/07/1955	41,8	25/07/1977	56,2	19/08/1948
18,2	09/07/1990	26,6	03/07/1952	33,4	08/06/1956	41,4	04/11/1966	56,0	21/08/1954
18,0	25/06/1983	24,6	09/07/1947	33,4	23/07/1994	41,2	16/09/1960	55,8	26/06/1997
17,6	23/08/1974	24,6	24/08/1987	33,2	22/08/1954	41,0	08/08/1945	55,4	29/11/2009
17,2	08/07/2004	24,6	21/06/2007	32,4	17/10/2002	41,0	10/07/1972	54,8	14/08/2008
16,8	19/07/1955	24,4	24/07/1970	32,0	18/09/2011	40,4	25/10/1980	54,6	08/07/1947
16,6	31/08/1945	24,2	21/07/1980	31,8	20/05/1984	40,2	22/11/1990	52,7	27/04/1939
16,2	21/08/1953	23,8	10/07/1972	31,6	13/07/1961	40,0	14/07/1950	52,4	13/09/1976
15,8	17/06/1997	23,8	05/07/1997	31,6	12/08/2000	40,0	31/07/1955	51,8	13/11/1996
15,6	08/08/1946	23,4	28/07/1971	31,4	29/08/2003	39,6	20/09/2000	51,0	04/04/1989
15,6	15/08/1966	23,2	12/08/2000	31,2	05/07/1997	39,0	24/07/1970	50,6	01/07/2007
15,4	06/07/1973	22,6	20/09/1999	31,0	02/08/1958	39,0	24/07/1971	50,2	18/07/1975
14,8	04/08/2001	22,0	06/07/1973	30,4	22/05/1945	38,6	24/07/1988	49,6	05/02/1951
14,2	22/06/1938	21,8	30/06/1936	30,4	16/09/2005	38,2	19/08/1948	49,6	02/09/1965
14,2	23/06/1972	21,8	02/10/1993	30,2	26/06/1998	37,8	16/08/2007	48,6	16/09/1960
14,2	18/07/1981	21,6	15/08/1966	30,0	10/07/1972	37,4	28/04/1992	47,8	10/06/2001
14,0	14/07/1982	21,6	20/05/1984	29,8	14/07/1950	37,2	24/07/1937	47,4	28/04/1992
14,0	20/05/1984	21,0	14/09/1949	29,2	31/08/1992	37,0	17/08/1963	47,2	06/11/2000

14,0	26/06/1998	20,8	14/07/1950	28,8	29/06/1936	36,8	10/06/2001	46,8	05/09/1984
13,8	01/07/2007	20,4	01/09/1992	28,6	25/10/1980	36,4	13/09/1976	46,6	21/06/1946
13,6	16/07/1937	20,4	27/08/2011	28,2	22/11/1990	36,4	06/11/1997	46,5	06/07/1973
13,6	03/08/2011	20,2	22/08/1954	27,8	06/07/1973	36,4	29/08/2003	46,0	10/07/1972
13,4	20/08/1956	20,2	24/07/1969	27,2	13/09/1976	35,8	09/07/1947	45,2	08/07/2004
12,8	05/08/1962	20,2	17/10/2002	27,2	05/04/1989	34,8	18/08/1974	44,4	04/08/2010
12,8	07/07/1989	20,0	22/06/1938	27,2	01/07/2007	34,8	04/08/2010	43,8	17/08/1963
12,2	16/07/1965	20,0	10/06/2001	27,0	06/09/1952	34,6	13/07/1961	43,6	18/08/1974
12,0	05/08/1928	19,4	20/08/1956	27,0	21/07/1995	34,6	04/07/2005	43,4	07/10/1998
12,0	20/07/1960	18,8	13/09/1976	26,4	10/06/2001	34,4	22/10/1928	43,2	28/08/2003
11,8	01/07/1954	18,4	19/12/1989	25,6	19/06/1948	34,4	02/10/1984	42,8	23/11/1950
11,8	06/09/1964	18,4	09/07/1990	25,2	05/11/1960	33,4	22/06/1946	42,8	11/08/1961
11,6	08/06/1999	18,0	27/05/1945	25,0	18/08/1974	33,4	23/07/1994	42,0	07/09/1967
11,4	07/08/1961	18,0	12/08/1961	24,4	28/07/1971	33,2	13/11/1996	41,8	25/07/1977
11,4	24/07/2009	17,8	19/06/1948	24,2	12/06/1982	32,2	04/09/1939	40,5	03/01/1949
11,2	18/07/1975	17,8	23/08/1974	23,6	22/06/1946	32,0	02/06/1938	40,4	12/10/1988
11,2	26/03/2010	17,6	24/07/2009	23,0	17/09/1962	31,2	30/11/2009	40,0	31/07/1955
11,0	04/07/1963	17,0	05/08/1928	23,0	05/08/2010	31,0	02/08/1958	39,8	08/10/1964
10,8	24/08/1987	16,4	16/07/1965	22,4	18/08/1963	31,0	06/07/1973	39,8	02/07/1995
10,6	17/06/1936	16,2	12/07/1963	22,0	20/01/2009	30,2	26/06/1998	39,7	30/06/1970
10,6	18/06/1948	16,2	24/08/1996	21,4	14/09/1949	29,4	04/08/1962	39,0	06/10/1982
10,4	04/10/1967	16,0	12/06/1982	21,2	02/07/1938	29,4	06/10/1982	38,6	02/06/1938
10,4	20/06/1993	16,0	26/03/2010	21,2	02/08/1965	29,0	29/06/1936	38,0	02/08/1958
10,2	14/09/1976	15,6	08/08/1946	21,2	15/11/1969	28,2	14/11/1969	37,5	14/04/1962
10,2	01/09/1992	15,0	05/08/1962	21,0	16/07/1940	27,6	08/10/1964	37,4	24/07/1937
9,8	14/07/1950	15,0	06/09/1964	20,2	28/08/1996	27,2	21/07/1995	36,8	14/11/1969
9,8	06/06/1996	14,6	16/07/1940	20,0	04/09/1939	26,6	02/09/1965	36,0	14/09/1994
9,2	26/07/1940	14,4	07/09/1967	19,0	22/10/1928	26,0	07/09/1967	35,2	04/07/2005
8,8	25/05/2002	14,2	17/07/1939	16,8	04/10/1967	21,6	14/09/1949	29,0	29/06/1936
7,4	01/07/1939	14,0	20/07/1960	16,2	21/06/1968	21,2	16/07/1940	26,2	15/09/1968
6,8	14/08/1968	12,4	15/09/1968	15,8	06/09/1964	17,0	21/06/1968	25,2	29/05/1940

4. MATERIALI E METODI

La stima della suscettibilità nei confronti delle colate detritiche è un argomento molto importante ai giorni nostri, infatti la presenza di attività umane nelle vallate alpine, che spesso si concentra proprio sui conoidi, richiede una sempre maggiore attenzione verso questo tipo di pericoli. Sono stati sviluppati diversi programmi che permettono la modellazione di eventi “puntuali”, ma non si può dire altrettanto per quanto riguarda le analisi a scala regionale. Infatti, la stima della pericolosità su aree abbastanza ampie è difficile a causa della complessa natura del fenomeno, della variabilità dei fattori locali di controllo e dell’incertezza nella modellazione dei parametri (Horton et al., 2013).

Nel presente lavoro per gli studi a scala di dettaglio è stato utilizzato il modello FLO-2D. Attraverso la sua applicazione sono stati simulati i due eventi del 4 agosto 2012 che hanno riguardato i Rii Avenes e Tolve. I dati che si riferiscono a quest’ultimo bacino sono stati ricavati dal lavoro di Andretto (2013) e anche le simulazioni effettuate sul Rio Avenes sono state eseguite utilizzando gli stessi parametri di reologia settati da Andretto (2013) per il Rio Tolve.

Per stimare la suscettibilità nei confronti dei debris flow a scala regionale, dell’intera Val di Vizze, è stato utilizzato il modello numerico semi-empirico Flow-R. Questo è stato prima di tutto calibrato nei bacini dei Rii Avenes e Tolve. I risultati sono stati analizzati tramite l’utilizzo del software GIS ArcMap e i parametri migliori sono stati selezionati valutando l’accuratezza di previsione del deposito in conoide simulato dal programma, rispetto alle aree di deposito mappate in loco a seguito dell’evento del 4 agosto 2012. Successivamente il modello è stato applicato all’intera Val di Vizze e la bontà dei risultati è stata valutata localizzando i torrenti interessati da passati eventi da debris flow e verificando se il modello li avesse a sua volta riconosciuti come potenziali aree soggette a colate detritiche.

Infine, seguendo le Direttive della Provincia di Bolzano per la redazione dei PZP e della CRS sono stati assegnati diversi livelli di pericolo alle aree di conoide in corrispondenza dei due abitati di Avenes e Tolve. Quest’ultimo step è stato fatto utilizzando le aree di inondazione predette dal modello FLO-2D.

4.1. Il modello bidimensionale FLO-2D per la simulazione a scala di dettaglio

In questo lavoro, per la modellazione di colate detritiche a scala locale (singolo bacino) è stato applicato il modello FLO-2D (O’ Brien et al., 1993), uno dei programmi più ampiamente utilizzati per la stima del pericolo da colate detritiche.

FLO-2D è stato sviluppato allo scopo di fornire una stima delle velocità e profondità del flusso, di predire un'area di inondazione e simulare l'arresto del flusso (O' Brien et al., 1993). Esso è un modello idraulico bi-dimensionale a fondo fisso (nel caso di simulazione di colate detritiche) o mobile (nel caso di simulazione di trasporto solido) utilizzabile per la modellazione di flussi non-Newtoniani in aree di conoide che, partendo da un idrogramma di piena e utilizzando un modello completamente dinamico, consente di predire l'area di inondazione, la velocità e lo spessore del flusso per ogni cella in cui la topografia è stata discretizzata (Bettella, 2012). FLO-2D è basato su processi fisici in grado di combinare i modelli idrologici (quantità di pioggia, ruscellamento, infiltrazione) con modelli idraulici (effetti sulle strade, degli edifici e di ostruzioni sul deflusso, variazione della velocità del flusso tra due elementi di calcolo), al fine di delineare il pericolo da inondazione ed assistere nella scelta dei processi di mitigazione di quest'ultimo.

I dati di input base richiesti dal programma per poter sviluppare una simulazione di debris flow sono: il DTM, i dati idrologici (comprendenti l'idrogramma di piena, concentrazione del sedimento e scabrezza della superficie di scorrimento) e infine i dati reologici del flusso. Inoltre possono essere fornite informazioni specifiche riguardanti il canale (ad esempio la presenza di ponti). Importante è la definizione degli elementi di "inflow" i quali rappresentano le celle di ingresso del flusso nel sistema in base all'idrogramma ad essi associato, e quelli di "outflow" nei quali si impone l'uscita dell'acqua dal sistema (Gonella et al., 2007).

Tra i file di output del modello i più importanti sono il SUMMARY.OUT, il FINALDEP.OUT e il FINALVEL.OUT. Il primo riporta la sintesi della conservazione dei volumi, includendo l'intervallo di tempo della simulazione di uscita, lo step temporale minimo, l'idrogramma di afflusso, e i volumi affluiti e defluiti (Michelini, 2011). FINALDEP.OUT e il FINALVEL.OUT invece, permettono di individuare quali siano le massime altezze di deposito e velocità, di ogni cella presente sulla piana inondabile.

FLO-2D, segue un metodo d'integrazione numerica alle differenze finite, risolvendo le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto attraverso uno schema esplicito e centrato. L'equazione costitutiva adottata nel modello è quella del modello reologico quadratico da cui si ricava la seguente equazione per il calcolo della pendenza di dissipazione energetica (O'Brien et al., 1993):

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m + h_f} + \frac{K \mu_N u}{8 \gamma_m h_f^2} + \frac{n_{td}^2 u^2}{h_f^{4/3}}$$

dove: γ_m è il peso specifico della colata detritica;

K è il parametro di resistenza per flussi laminari;

n_{td} è il coefficiente di scabrezza turbolento dispersiva;

μ_N è la viscosità newtoniana apparente;

u è la velocità del flusso;

h_f è l'altezza del flusso. μ_N

μ_N e τ_y sono i parametri reologici che caratterizzano la colata, e vengono calcolati in funzione della concentrazione volumetrica (C_v) (O'Brien and Julien, 1988), tramite le due relazioni:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

$$\mu_N = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

dove α_1 , α_2 , β_1 e β_2 sono parametri di calibrazione desumibili da test di laboratorio.

FLO-2D quindi utilizza i parametri μ_N e τ_y , per simulare la reologia. Questi possono essere ricavati attraverso l'utilizzo del reometro su dei campioni di materiale prelevati in campo, che possono provenire o direttamente dal corpo della colata, oppure dalle aree d'innescio. A questi si aggiunge il parametro K relativo alla resistenza per i flussi laminari.

Per la determinazione dell'idrogramma di piena da inserire come input nel modello, si possono utilizzare dei metodi empirici che permettono di determinare la portata basandosi essenzialmente sulla capacità di trasporto della corrente, partendo dal volume mobilitato dal debris flow e dalla portata liquida.

In prima analisi vengono utilizzate delle formule empiriche (Tabella 8) che permettono di calcolare la portata al picco in funzione di un'unica variabile nota, cioè il volume totale dell'evento. Queste formule possono essere ricavate dalla letteratura (Scheidl e Rickenmann, 2010) e sono state sviluppate da diversi autori in seguito all'analisi di numerosi eventi di colate detritiche verificatesi in diversi tipi di ambienti. Poiché queste formule sono state sviluppate appunto in bacini con caratteristiche molto diverse tra loro, in alcuni casi danno dei risultati estremamente differenti. Per questo la scelta dell'equazione da applicare per il calcolo deve essere fatta con attenzione e i risultati devono essere confrontati con quelli ottenuti dagli altri metodi descritti.

Tabella 8: Esempi di formule per la determinazione della portata tratte dalla letteratura.

Tipologia	Formula	Autore
Muddy debris flows (Japan)	$Q_d=0.0188 \cdot V^{0.79}$	Mizuyama et al (1992)
Merapi volcano (Indonesia)	$Q_d=0.00558 \cdot V^{0.831}$	Jitousono et al (1996)
Sakurajima volcano (Japan)	$Q_d=0.00135 \cdot V^{0.87}$	Jitousono et al (1996)
Landslide dam failures	$Q_d=0.293 \cdot V^{0.56}$	Costa (1988)
Glacial dam failures	$Q_d=0.0163 \cdot V^{0.64}$	Costa (1988)
Muddy debris flows (Canada)	$Q_d=0.0028 \cdot V^{0.901}$	Bovis e Jacob (1999)

Successivamente dalla portata al picco del debris flow viene derivata la portata liquida. In questo modo è possibile costruire un idrogramma semplificato in cui si assume che l'onda di piena abbia una forma triangolare (Figura 31). La concentrazione volumetrica viene fatta variare, secondo intervalli temporali costanti, da un valore minimo di 0.2 (soglia in cui si passa da trasporto solido di fondo a trasporto iperconcentrato) ad un valore massimo rappresentativo della colata detritica. Si ottiene quindi un debrisgramma semplificato che però a differenza dell'idrogramma non ha una forma triangolare; è quindi necessario inserire un fattore di non linearità k , il quale si aggira attorno a 1.5, derivante dalla relazione tra C_v e $1/(1-C_v)$ che appunto non è lineare (D'Agostino, 2013).

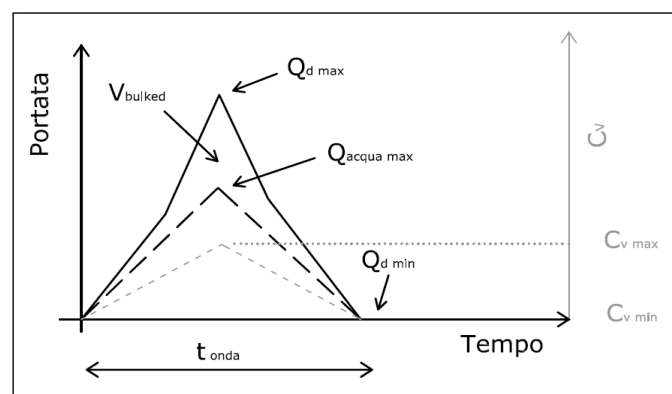


Figura 31: Schema di semplificazione dell'onda di colata detritica.

Integrando l'area sottesa dal debrisgramma non lineare si ottiene la seguente equazione:

$$V_{bulketed} = \frac{(Q_{d\ max} - Q_{d\ min})}{k} t_{onda} = \left[\frac{Q_{acqua\ max}}{(1 - C_{v\ max})} - \frac{Q_{acqua\ min}}{(1 - C_{v\ min})} \right] \frac{t_{onda}}{k}$$

essendo:

$$V_{bulketed} = (1.2 \div 1.3) V_{debris}$$

dove: $V_{bulketed}$ è il volume solido-liquido complessivo;

V_{debris} è il volume depositato in conoide;

$Q_{d\ max}$ è la portata massima del debris flow, espressa in m^3/s ;

$Q_{d\ min}$ è la portata minima del debris, espressa in m^3/s ;

$Q_{acqua\ max}$ è la portata massima di acqua per l'evento di piena, espressa in m^3/s ;

$Q_{acqua\ min}$ è la portata minima di acqua;

k è un coefficiente di forma dell'onda "Bulketed";

t_{onda} è il tempo che assume l'evento, espresso in secondi;

$C_{v\ max}$ è la concentrazione massima della colata;

$C_{v\ min}$ è la concentrazione minima della colata, assunta pari a 0.2.

Gli unici dati conosciuti di questa equazione sono il volume dell'evento, la portata liquida massima e la portata liquida minima (che si assume pari a $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$). Inoltre alla $C_{v \max}$ viene attribuito un valore compreso tra 0.5 e 0.65, caratteristico delle colate detritiche.

Quindi dall'equazione precedente si ricava il tempo di durata dell'onda e successivamente si può calcolare la portata al picco del debris flow con la seguente equazione:

$$Q_{d \max} = \frac{V_{bulked} k}{t_{onda}}$$

4.2. Il modello numerico semi-empirico Flow-R per la simulazione a scala di macroarea

Per la perimetrazione a scala regionale (intera vallata) delle aree suscettibili ai fenomeni di debris-flow, in questa tesi si è scelto di testare il programma Flow-R (*Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale*) (Figura 32). Esso è un modello numerico semi-empirico che utilizza algoritmi che si basano su ipotesi semplificate che, trascurando completamente il volume dell'evento, permette appunto una stima della pericolosità a livello regionale. È stato sviluppato da alcuni ricercatori dell'Università di Losanna (Svizzera) ed è stato applicato con buoni risultati a diversi casi studio, mostrandosi utile non solo per la modellazione dei debris flow, ma anche per altri pericoli naturali quali valanghe, caduta massi e alluvioni.

La caratteristica principale di Flow-R è la sua relativa semplicità di utilizzo infatti, l'unico dato strettamente necessario è rappresentato dal modello digitale del terreno (DTM), fornito in formato ASCII-GRID: la modellazione può essere portata a termine solamente inserendo questo dato. Per avere stime più accurate l'utente può ricorrere ad altri set di dati che possono facilmente essere ricavati in ambiente GIS. La scelta dei dati e degli algoritmi di dispersione (leggi di attrito o di perdita energetica) da utilizzare nei calcoli è libera, permettendo così una più accurata calibrazione del modello per ogni singolo caso studio.

Il processo sviluppato dal programma si divide in due fasi: la prima prevede l'individuazione delle aree sorgente partendo dai dati inseriti dall'utente; la seconda, invece, prevede il calcolo dell'area raggiunta dalla colata detritica e si divide a sua volta in due parti: una per il calcolo dell'espansione della colata ed una per il calcolo della sua massima runout. Gli output del modello sono costituiti da tre raster in formato ASCII: uno in cui sono evidenziate le aree sorgente, uno che mostra la massima energia cinetica del debris flow in ogni singola cella, e uno che mostra la probabilità di propagazione di ogni singola cella (Lari et al., 2011).

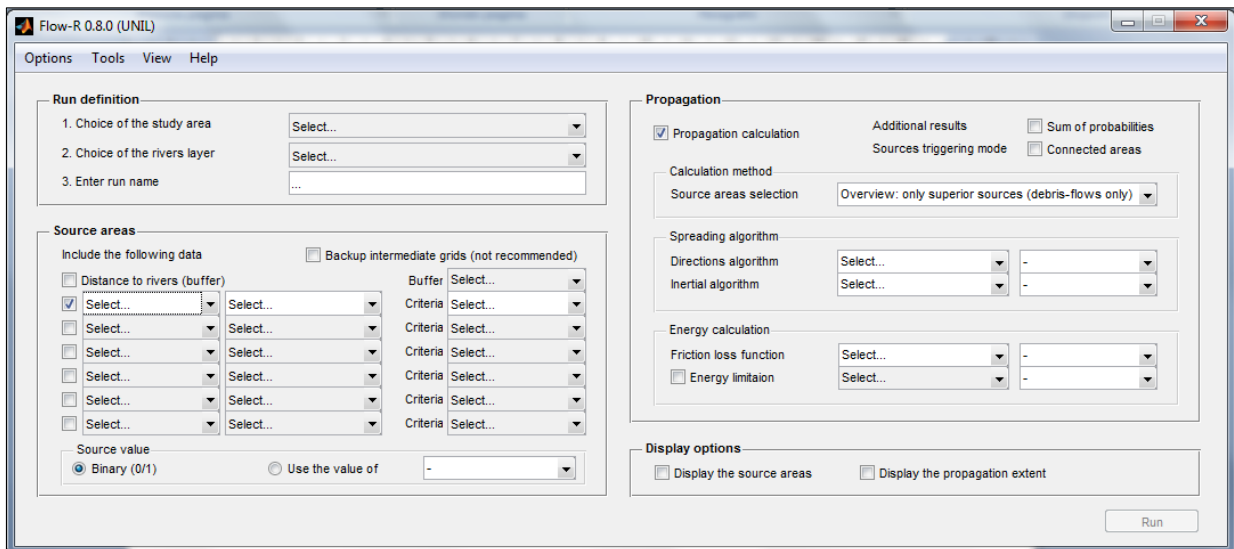


Figura 32: Schermata iniziale di Flow-R.

4.2.1. Identificazione delle celle sorgenti

Per l'identificazione delle aree sorgente il software utilizza diversi set di dati che l'utente può inserire facoltativamente. Le mappe che possono essere elaborate assieme per uno stesso calcolo sono sei ma, in totale, quelle che il software è in grado di leggere sono undici: DEM, pendenza, esposizione, curvatura (totale, planare e del profilo), area drenata, uso del suolo, geologia, litologia e aree sorgente predefinite (Figura 33).

Il DTM viene elaborato, per l'identificazione delle aree sorgente, secondo un criterio legato alla quota di ogni cella. In particolare, tutte le celle che si trovano

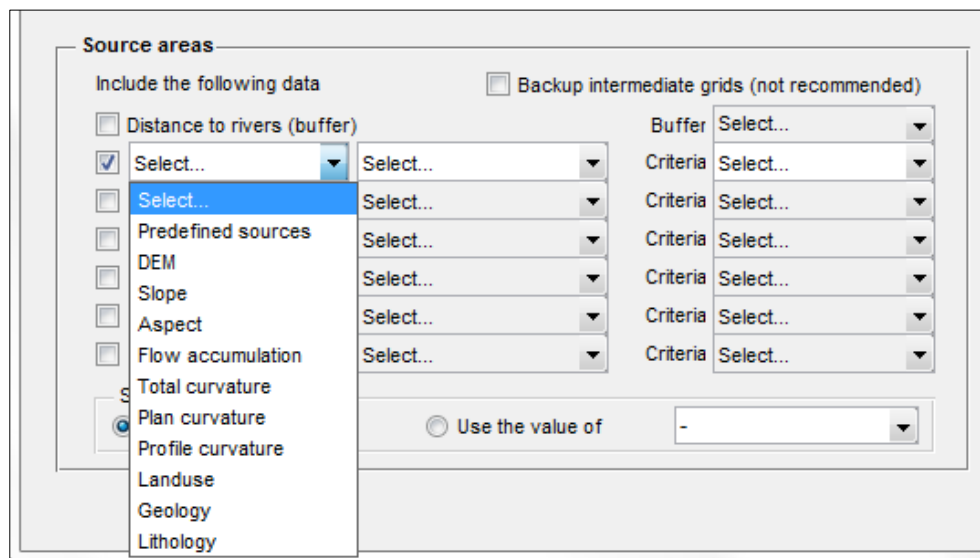


Figura 33: Parametri che possono essere inseriti per il calcolo delle aree sorgente.

ad un'altezza superiore a 1900 m s.l.m. vengono classificate come celle sorgente. Per una migliore identificazione è consigliabile inserire anche altri tipi di mappe. Infatti, come affermato da Rickenmann e Zimmermann (1993) e da Takahashi (1981), ci sono tre criteri fondamentali che combinati assieme favoriscono l'innesco delle colate detritiche: il gradiente di pendenza, il

contenuto idrico e la disponibilità di sedimento. Per tenere conto dei primi due fattori, vengono utilizzati due parametri importanti: l'area drenata e la pendenza del canale. La prima infatti è una rappresentazione della quantità d'acqua che può affluire ad ogni cella (Horton et al., 2011), mentre la seconda è un criterio decisivo per lo sviluppo delle colate detritiche: secondo gli studi svolti da Rickenmann e Zimmermann (1993) e da Takahashi (1981) i debris flow si sviluppano generalmente quando la pendenza del letto supera i 15°. Questo è il limite di default che è stato inserito nel modello (Horton et al., 2011). Quindi è stato implementato nel programma un parametro che mette in relazione la pendenza del letto con l'area drenata. Esso si basa su due curve descritte da Horton et al. (2008): la prima per gli eventi rari, la seconda per gli eventi estremi (Figura 34). Quella che individua il limite minimo d'innesco di colate detritiche per gli eventi rari, è descritta dalla seguente equazione proposta da Heinimann (1998):

$$\begin{cases} \tan \beta_{thres} = 0.32 S_{uca}^{-0.2} & \text{se } S_{uca} < 2.5 \text{ Km}^2 \\ \tan \beta_{thres} = 0.26 & \text{se } S_{uca} \geq 2.5 \text{ Km}^2 \end{cases}$$

Dove β_{thres} è il limite di pendenza e S_{uca} è la superficie dell'area contribuyente.

Mentre, la curva per gli eventi estremi individua il limite minimo d'innesco grazie ai risultati di uno studio svolto da Rickenmann e Zimmermann (1993) su un evento avvenuto in Svizzera nel 1987. L'equazione che descrive il valore limite è la seguente:

$$\begin{cases} \tan \beta_{thres} = 0.31 S_{uca}^{-0.15} & \text{se } S_{uca} < 2.5 \text{ Km}^2 \\ \tan \beta_{thres} = 0.26 & \text{se } S_{uca} \geq 2.5 \text{ Km}^2 \end{cases}$$

Tutte e due le curve hanno un valore limite costante di 15° per un'area contribuyente maggiore di 2.5 ha, mentre hanno valori soglia differenti per aree contribuyente più piccole.

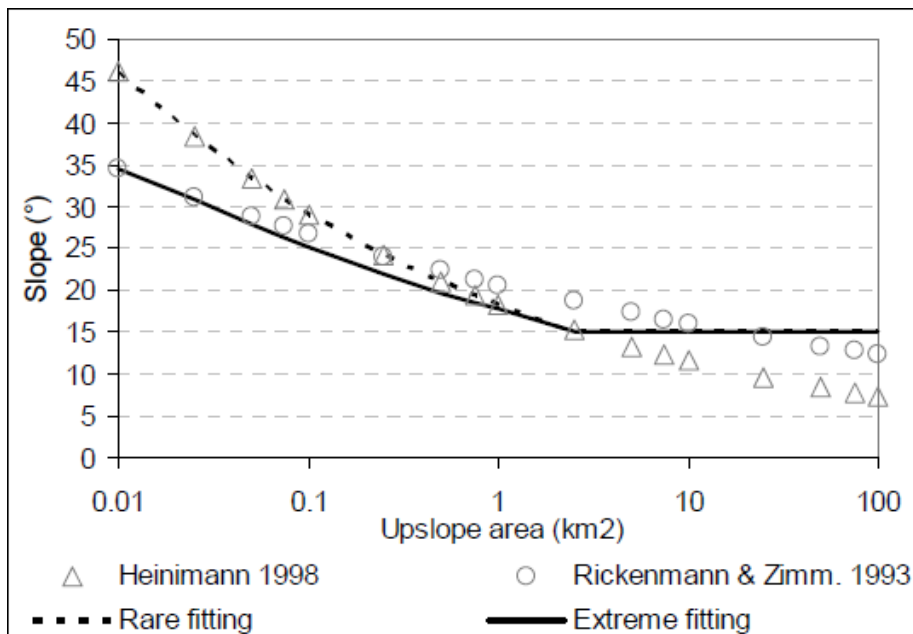


Figura 34: Limite di pendenza fissato rispetto all'area contribuyente per gli eventi rari ed estremi. Dopo Horton et al. (2008), Heinimann (1998) e Rickenmann e Zimmermann (1993) (Horton et al., 2013).

Il raster della curvatura invece può essere inserito per tenere conto della disponibilità di sedimento. La curvatura infatti viene solitamente utilizzata per identificare gli impluvi, che sono uno dei principali punti d'innescio dei debris flow. Non c'è nessun criterio stabilito a riguardo, per l'innescio di colate detritiche, ma Horton et al. (2013) consigliano di fissare un limite di $-2/100 \text{ m}^{-1}$ mentre, Fisher et al. (2012) utilizzano dei valori compresi tra $-1.5/100 \text{ m}^{-1}$ e $-0.5/100 \text{ m}^{-1}$.

Per affinare ulteriormente l'identificazione delle celle sorgenti, possono essere utilizzate anche le mappe di geologia, litologia e uso del suolo. Quest'ultima, in particolare, permette di eliminare eventuali celle in cui ci siano zone compatte o altri impedimenti all'innescio che potrebbero essere erroneamente identificate come potenziali sorgenti nelle altre mappe.

Tutti questi layer vengono analizzati secondo i criteri precedentemente descritti ed ogni cella viene identificata come: area potenziale sorgente, area esclusa o area ignorata dal fenomeno naturale. Sovrapponendo tutti i set di dati elaborati si ottiene il prodotto finale in cui verrà contraddistinta come area sorgente ogni cella che sia stata almeno una volta considerata come potenziale sorgente e non sia mai stata esclusa (Figura 35).

In alternativa, l'utente può inserire nel programma un layer in cui siano già identificate le aree sorgente e in questo caso, il programma individua semplicemente queste come celle sorgenti predefinite, senza fare ulteriori calcoli.

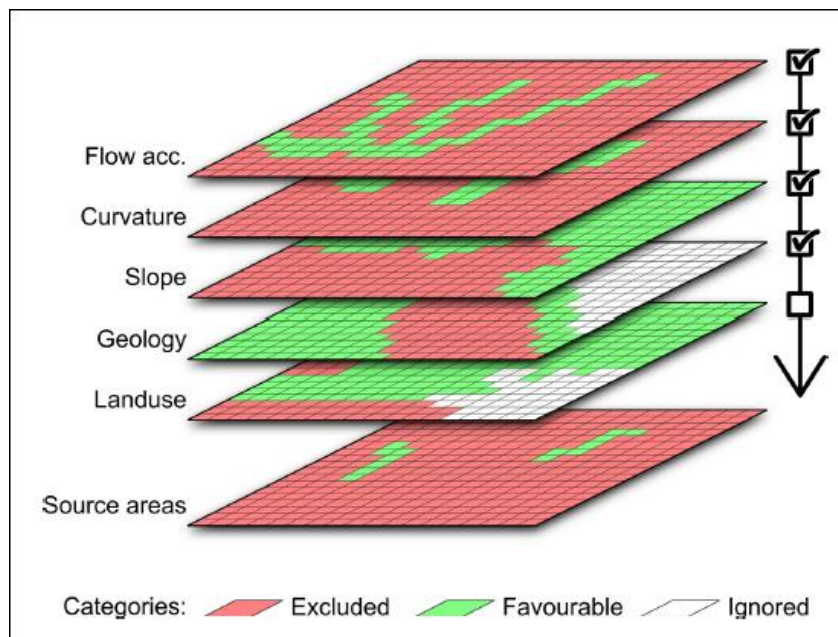


Figura 35: Illustrazione della combinazione di diversi set di dati per la stima delle aree sorgente (Horton et al., 2013).

4.2.2. Algoritmi di propagazione

Per il calcolo della propagazione della colata detritica il software sviluppa due processi distinti:

- a) stima della probabile espansione della colata attraverso algoritmi che controllano la direzione di deflusso;
- b) stima della massima distanza di arresto attraverso un semplice bilancio energetico (Horton et al., 2011).

Per la prima stima il processo calcola l'espansione della colata partendo dalle celle sorgenti precedentemente identificate e individua il tracciato che il debris flow segue da una cella verso una o più delle otto celle adiacenti. Le celle che hanno una maggiore probabilità di essere raggiunte dalla colata vengono individuate attraverso l'utilizzo di noti algoritmi di direzione di flusso. L'utente può scegliere tra i seguenti tipi: Holmgren, versione modificata di Holmgren (Horton et al., 2013), D8, D ∞ , Rho8, Freeman, direzioni di flusso multiple (Quinn et al. 1991), Wichmann e Becht, Gamma (Figura 36). Horton et al. (2013) individuano nella versione modificata di Holmgren, l'algoritmo più indicato per la stima del processo di propagazione, nel caso di colate detritiche. Questa formula, infatti, fornisce un ampio range di risultati che comprendono anche quelli che potrebbero essere forniti dagli altri algoritmi. La formula dell'algoritmo di Holmgren è la seguente:

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^x} \quad [1]$$

Dove i, j sono le direzioni di flusso, p_i^{fd} è la proporzione di suscettibilità nella direzione i , $\tan \beta_i$ è il gradiente di pendenza tra la cella centrale e la cella nella direzione i e x è l'esponente variabile. Per valori di x tendenti a zero l'equazione si comporta come l'algoritmo delle direzioni di flusso multiple; per valori di x tendenti a infinito invece, il flusso tende a convergere verso gli algoritmi di singola direzione di flusso, come D8 e Rho8. Nella versione modificata introdotta nel software, oltre al valore dell'esponente x , è possibile scegliere anche il valore di un fattore chiamato dh che permette di rialzare la cella centrale di 1 m o 2 m rispetto al valore originale. Questo fornisce delle propagazioni molto più realistiche permettendo al flusso di essere guidato dalla topografia generale e non dai singoli dettagli del DTM (Horton et al., 2013) e inoltre permette indirettamente di tenere conto dell'altezza del flusso, un parametro molto importante che non viene considerato nel processo.

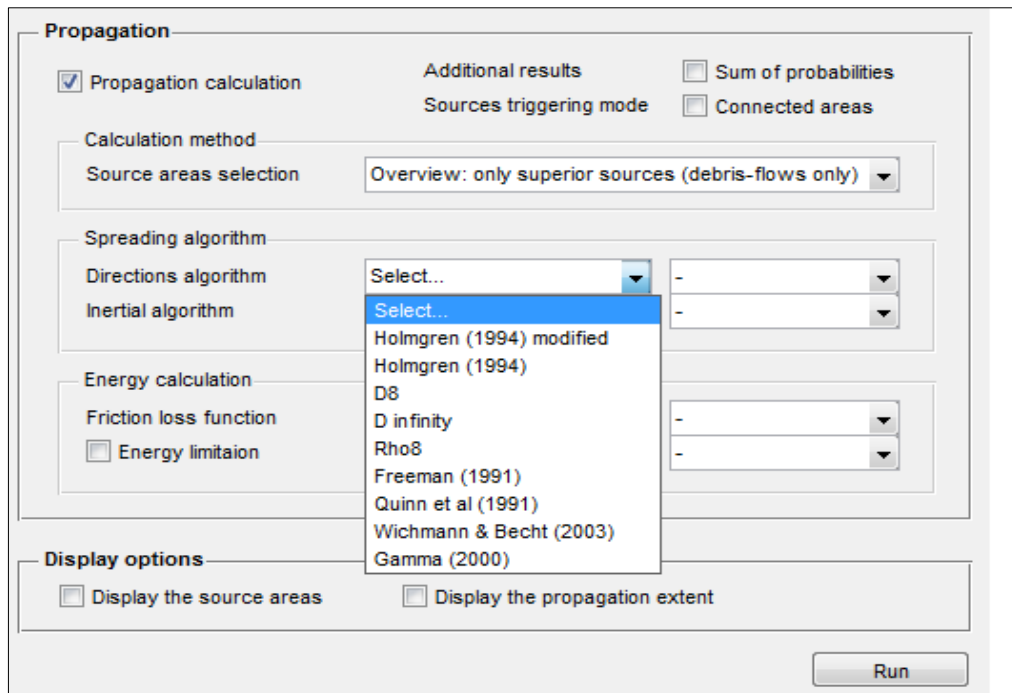


Figura 36: Algoritmi implementati nel software per il calcolo dell'espansione della colata.

A questo algoritmo viene aggiunto anche un calcolo dell'inerzia del flusso, chiamata persistenza e definita come una funzione del cambiamento nell'angolo rispetto all'ultima direzione di flusso (Kappes et al., 2011). Per la risoluzione vengono proposte tre possibili funzioni: Gamma 2000, coseno e proporzionale. Esse pesano in maniera diversa la direzione che il flusso segue da una cella a quelle adiacenti (Figura 37).

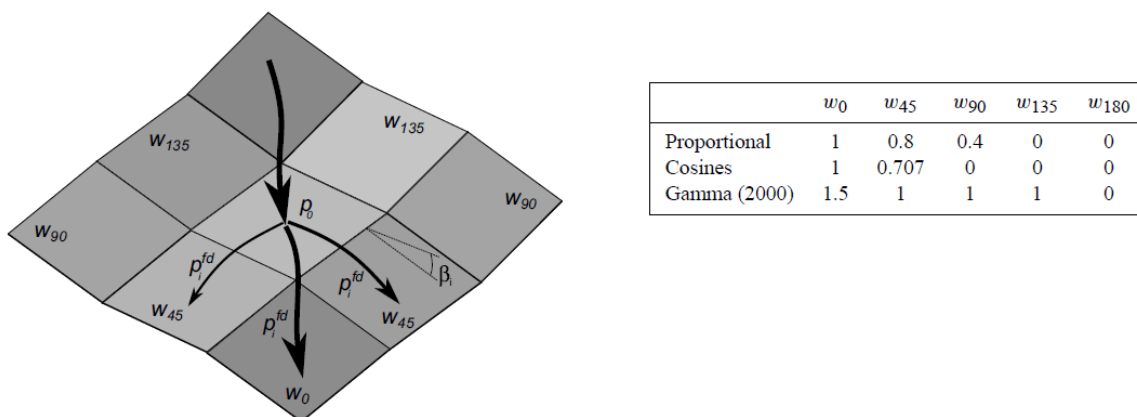


Figura 37: Pesì delle funzioni di persistenza implementate nella stima della propagazione (Horton et al., 2013).

La stima della massima distanza di arresto viene fatta attraverso calcoli energetici basati su semplici leggi di attrito, senza tenere conto del volume della colata. Questi algoritmi controllano la distanza raggiunta dal debris flow e in più, ne riducono la divergenza (Blahut et al., 2010). A questo proposito è possibile scegliere tra due diversi approcci: il modello frizionale bi-

parametrico di Perla (1980) e il modello semplificato SFLM (Simplified Friction-Limited Model).

Il primo è stato originariamente sviluppato per le valanghe ma è stato usato anche per i debris flow (Zimmermann et al., 1997). In questo caso la distanza di arresto viene calcolata in funzione del coefficiente di frizione μ e del rapporto M/D (mass-to-drag ratio).

Il secondo invece, calcola la distanza di arresto prendendo come parametro fisso il *travel angle*, detto anche *fahrböschung angle* (Heim, 1932), cioè l'angolo tra l'orizzontale e la linea che congiunge il punto più alto da cui si innesca la colata con il punto più distante in cui essa si ferma. In più viene fissato un limite di velocità della colata, per evitare che vengano raggiunti valori energetici troppo alti, che fornirebbero dei risultati poco realistici.

In entrambi i casi viene fatta una stima dell'energia cinetica che si sviluppa da una cella alla successiva, lungo il percorso del debris flow, secondo la seguente equazione:

$$E_{kin}^i = E_{kin}^0 + \Delta E_{pot}^i - E_f^i$$

Dove E_{kin}^i è l'energia cinetica della cella nella direzione i , E_{kin}^0 è l'energia cinetica della cella centrale, ΔE_{pot}^i è il cambiamento in energia potenziale verso la cella nella direzione i e E_f^i è la perdita frizionale di energia verso la cella nella direzione i .

4.2.3. Output del modello

Ogni simulazione fornisce come risultato una mappa che comprende tutte le potenziali propagazioni di una colata detritica, che possono essere distinte in base al diverso valore di probabilità di transito. Questi valori comunque, non esprimono una vera probabilità matematica ma, devono essere considerati in maniera qualitativa (Horton et al., 2008). In ogni caso, i risultati vanno interpretati con attenzione infatti, le aree di propagazione risultanti dal modello sono in generale più ampie di quelle osservate in campo. Ciò è intenzionale nella creazione di mappe di suscettibilità perché, in un'ottica cautelativa, queste dovrebbero contenere ogni possibile evento, anche il caso più catastrofico (Horton et al., 2013).

I risultati forniti dal programma dipendono fortemente dalla risoluzione del DTM utilizzato. Per una stima ottimale vari autori, tra cui Horton (2013) e Fischer (2012), consigliano un DTM di 10 m. Infatti, siccome il programma è stato sviluppato per stime a livello regionale, un DTM più dettagliato sarebbe fuorviante per il software che verrebbe influenzato troppo dalla micro-topografia, andando a creare dei tracciati del debris flow poco realistici. Inoltre, con delle mappe così dettagliate, il tempo impiegato dal programma per le elaborazioni cresce in maniera esponenziale. Un DTM di 10 m invece, è un buon compromesso tra un'elevata risoluzione e il

volume di dati richiesto per simulare i processi geomorfologici e idrologici (Horton et al., 2013). Nel caso di simulazioni su piccole aree, ad esempio un singolo bacino idrografico, il programma si è rivelato molto efficiente anche con DTM a risoluzione minore (fino a 2.5 m), fornendo delle buone stime dell'espansione del debris flow e mantenendo comunque il tempo impiegato per i calcoli entro un limite ragionevole.

4.3. Valutazione dell'accuratezza di previsione dei modelli nei bacini del Rio Avenes e del Rio Tulve

Per valutare l'accuratezza delle simulazioni effettuate a scala locale ed evidenziare di conseguenza i parametri di simulazione migliori per le aree oggetto di studio, si è seguito il metodo proposto da Scheidl e Rickenmann (2010). Essi valutano l'accuratezza di previsione sovrapponendo le zone di inondazione predette con quelle osservate in campo. Da questa sovrapposizione si ottengono le tre sottoaree X, Y e Z (Figura 38): la prima è l'area predetta dal modello in modo esatto (positiva); la seconda è l'area non predetta dal modello ma interessata dall'evento (mancante); la terza è l'area predetta dal modello ma non interessata dall'evento (negativa).

Dal rapporto tra le tre sottoaree e la zona di deposizione osservata si ricavano tre diversi tipi di accuratezza:

- Accuratezza positiva, indicata con il simbolo α , che si calcola come segue:

$$\alpha = \frac{B_x}{B_{observed}}$$

Dove B_x è la sottoarea X e $B_{observed}$ è l'area di deposizione osservata.

- Accuratezza negativa, chiamata β , che si ricava tramite la seguente formula:

$$\beta = \frac{B_y}{B_{observed}}$$

Dove B_y è la sottoarea Y.

- Accuratezza mancante, indicata con γ , e calcolata come di seguito:

$$\gamma = \frac{B_z}{B_{observed}}$$

Dove B_z corrisponde alla sottoarea Z.

Poiché il migliore grado di accuratezza tra le aree di deposito predette e quelle osservate è descritto da alti valori di α e bassi valori di β e γ , l'accuratezza complessiva (δ) è stata calcolata attraverso il rapporto tra l'accuratezza positiva e la somma tra accuratezza negativa e accuratezza mancante:

$$\delta = \frac{\alpha}{\beta + \gamma} 100$$

Visto che l'accuratezza complessiva viene espressa in percentuale, più il suo valore si avvicina a 100, maggiore è la corrispondenza tra le aree di deposito predette e quelle osservate.

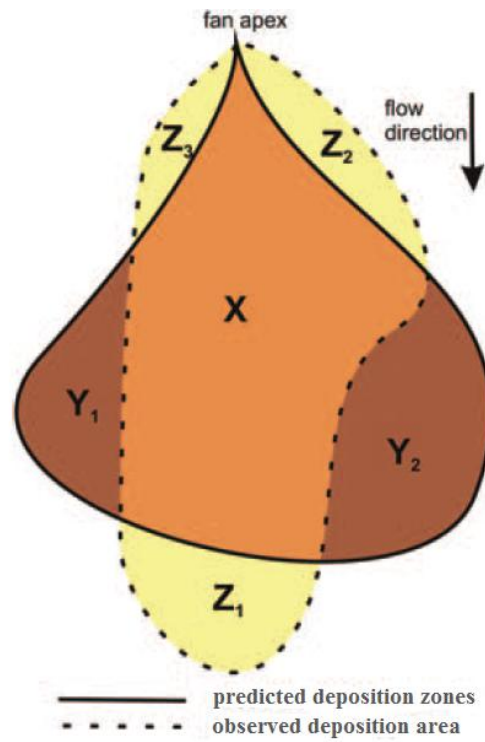


Figura 38: Identificazione delle tre sottoaree X, Y e Z tramite la sovrapposizione dell'area predetta e quella osservata (da Scheidl e Rickenmann, 2010).

CAPITOLO 3 – RISULTATI E DISCUSSIONE

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE TRAMITE IL MODELLO FLO-2D

La portata da inserire come input nel modello FLO-2D è stata calcolata tramite un'analisi indiretta, utilizzando le formule empiriche riportate in Tabella 8, che ha permesso di ricostruire empiricamente l'idrogramma e il debrisgramma dell'evento. A questo scopo è stata scelta la formula di Mizuyama et al. (1992) sviluppata in Giappone per le colate detritiche a matrice fangosa, in quanto è quella che da come risultato finale il volume solido del debris flow più simile a quello reale. I dati volumetrici riguardanti l'evento del 4 agosto 2012, forniti dalla Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano, sono distinti per i due bacini del Rio Avenes e del suo affluente. Per questo motivo sono stati creati due idrogrammi separati da inserire successivamente come input per la simulazione dell'evento.

5.1. Idrogramma e debrisgramma semplificati del Rio Avenes

Il volume reale del debris flow misurato in seguito all'evento del 4 agosto 2012, che ha interessato il Rio Avenes, è di 19000 m³. Quindi la formula empirica che ha fornito la corrispondenza migliore è stata quella di Mizuyama et al. (1992). Con questa sono state calcolate le portate e i relativi volumi del debris flow. Per la costruzione dell'idrogramma e del relativo debrisgramma semplificati è stato ipotizzato che l'onda di piena della colata si sia esaurita nel giro di circa 25 minuti. Sono stati quindi utilizzati degli intervalli temporali costanti pari a 0.105 ore. La Cv è stata fatta variare da un valore minimo di 0.2 ad un massimo di 0.585. Poiché normalmente il ramo discendente dell'debrisgramma è più lungo rispetto a quello ascendente, il picco è stato raggiunto subito in corrispondenza del primo intervallo temporale (Tabella 9), dopodiché la portata inizia a decrescere fino al suo completo esaurimento. In Figura 39 sono riportati l'idrogramma e il relativo debrisgramma ottenuti dai dati riportati in Tabella 9.

Tabella 9: Portate e volumi del Rio Avenes calcolate con il metodo semplificato.

Tempo (h)	Q _L (m ³ /s)	Cv	Q _T (m ³ /s)	Q _S (m ³ /s)	V _L (m ³)	V _S (m ³)	V _T (m ³)
0,000	0,000	0,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,105	13,234	0,585	31,9	18,7	5002,5	7051,6	12054,1
0,210	8,823	0,457	16,2	7,4	3335,0	2803,0	6138,0
0,315	4,411	0,328	6,6	2,2	1667,5	815,1	2482,6
0,420	0,000	0,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTALE					10004,9	10669,8	20674,7

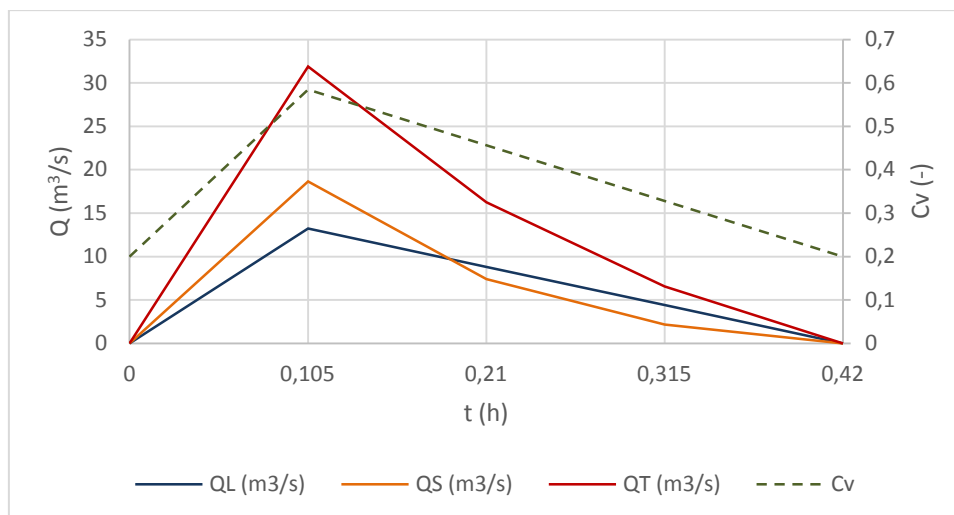


Figura 39: Idrogramma e debrisgramma semplificati relativi all'evento del 4/08/12 che ha interessato il Rio Avenes.

5.2. Idrogramma e debrisgramma semplificati dell'affluente del Rio Avenes

Per quanto riguarda l'affluente del Rio Avenes, il volume reale mobilitato dal debris flow è pari a 7000 m^3 . Siccome il bacino considerato è più piccolo rispetto al precedente, il tempo di corrivazione è inferiore. Si è deciso quindi di far sviluppare l'onda di piena in circa 20 minuti, considerando degli intervalli temporali costanti di 0.083 ore. La Cv è stata fatta variare come nel caso precedente in modo da costruire un idrogramma ed un relativo debrisgramma con forma triangolare semplificata, ma con il ramo ascendente più corto rispetto a quello discendente (Figura 40). In Tabella 10 sono riportati i valori di portate e volumi calcolati per l'affluente del Rio Avenes.

Tabella 10: Portate e volumi dell'affluente de Rio Avenes calcolate con il metodo semplificato.

Tempo (h)	Q_L (m^3/s)	Cv	Q_T (m^3/s)	Q_S (m^3/s)	V_L (m^3)	V_S (m^3)	V_T (m^3)
0,000	0,000	0,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,083	6,012	0,585	14,5	8,5	1796,4	2532,3	4328,6
0,167	4,008	0,457	7,4	3,4	1197,6	1006,6	2204,2
0,250	2,004	0,328	3,0	1,0	598,8	292,7	891,5
0,333	0,000	0,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTALE					3592,8	3831,5	7424,3

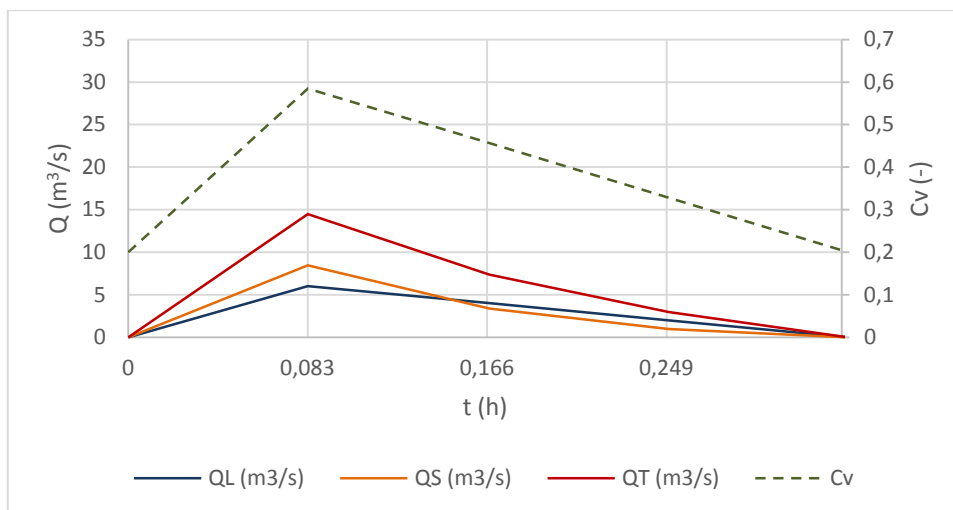


Figura 40: Idrogramma e debrisgramma semplificati relativi all'evento che ha interessato l'affluente del Rio Avenes.

5.3. Simulazione dell'evento del 4 agosto 2012 sui Rii Avenes e Tulve

Per la simulazione dell'evento che ha interessato il Rio Avenes ed il relativo affluente si è scelto di dare origine alla colata poco sopra le sezioni di chiusura dei due bacini. In Figura 41 e Figura 42 sono riportate sia la simulazione effettuata in corrispondenza del Rio Avenes, sia quella eseguita da Andretto (2013) in corrispondenza del Rio Tulve.

Come si può vedere in Figura 41 i depositi simulati in corrispondenza dell'abitato di Avenes raggiungono un'altezza massima di poco superiore ai 2 m. In particolare la colata che si sviluppa in corrispondenza dell'affluente del Rio Avenes (parte destra dell'immagine) va a colpire immediatamente il piccolo gruppo di case che si trova nel tracciato della colata, poco sotto l'apice del conoide. Questo è uno dei punti in cui vengono raggiunte le altezze di deposito e le velocità maggiori (Figura 41 e Figura 42) ed infatti, in seguito all'evento del 4 agosto, proprio qui le case sono state fortemente danneggiate dal flusso di fango e detriti (Figura 43) e si è registrata anche la morte di una residente, all'interno della propria abitazione. L'espansione della colata simulata segue abbastanza bene la forma dei depositi reali anche se evidenzia una distanza di arresto leggermente maggiore e il modello non riesce a simulare correttamente la grande area di deposito mappata nella parte più bassa in corrispondenza del prato sottostante la strada.

È interessante notare come sia le velocità sia le altezze di deposito simulate siano maggiori in corrispondenza dell'abitato di Avenes rispetto a quelle evidenziate sul Rio Tulve.

Per quanto riguarda quest'ultimo torrente, come si può vedere nella parte bassa di Figura 41 e Figura 42, la simulazione non rispecchia pienamente il reale comportamento della colata, andando a formare un ramo laterale, posizionato in sinistra idrografica rispetto alla reale espansione assunta durante l'evento. Il modello di simulazione infatti ha continuato a far defluire parte della

colata detritica lungo il canale esistente, dimostrando la sua insufficiente sezione, tanto che viene comunque occluso poco più a valle (Andretto, 2013).

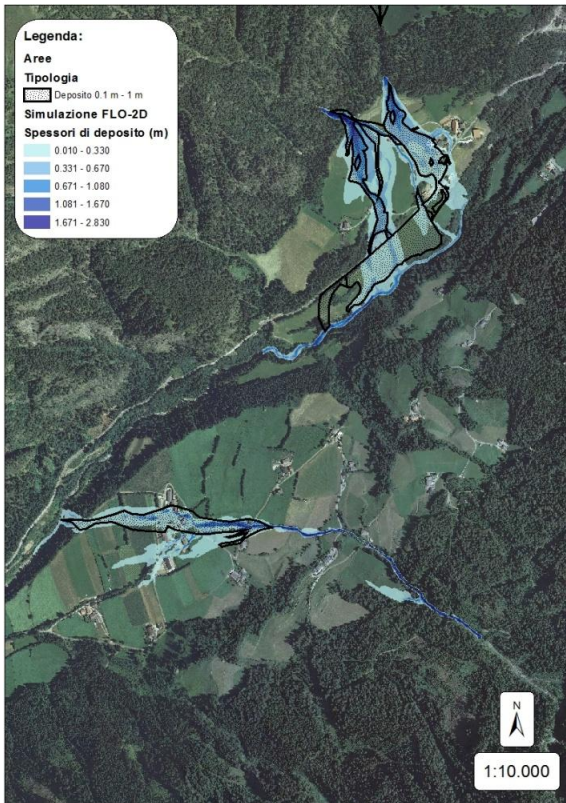


Figura 41: Altezze di deposito delle simulazioni sui Rii Avenes e Tulve.

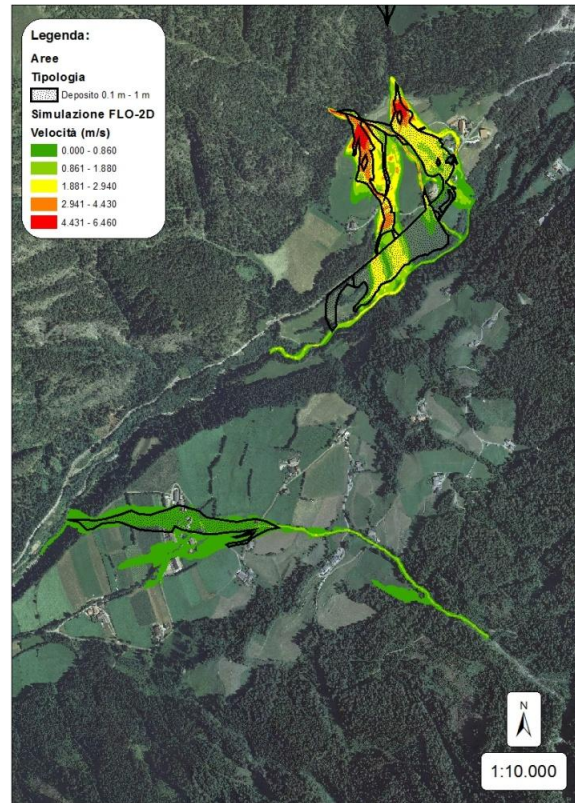


Figura 42: Velocità delle colate simulate sui Rii Avenes e Tulve.



Figura 43: Particolare di un'abitazione posta poco sotto l'apice del conoide in corrispondenza dell'abitato di Avenes (Archivio ED30).

6. CALIBRAZIONE DEL MODELLO FLOW-R A SCALA DI DETTAGLIO

Per la calibrazione dei parametri di input utilizzati dal programma Flow-R si è deciso di fare inizialmente una serie di simulazioni di prova su tre piccoli bacini utilizzando dei raster di input con una risoluzione di 2.5 m. A questo scopo sono stati scelti il bacino del Rio Avenes, il bacino del Rio Tolve e quello di un suo affluente. Tutti e tre infatti il 4/08/12 sono stati interessati da colata detritica e il Servizio Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano ha fornito le mappe riguardanti le aree sorgente e di deposito mappate in corrispondenza dei rispettivi bacini e conoidi. Le prime simulazioni sono state effettuate sul Rio Avenes. Successivamente, una volta identificati i parametri che hanno fornito i risultati migliori, sono state effettuate le simulazioni anche per i bacini del Rio Tolve e del suo affluente.

I parametri più idonei selezionati dalle simulazioni a scala locale sono quelli che verranno successivamente utilizzati per le simulazioni a scala regionale sull'intera Val di Vizze.

6.1. Calibrazione dei parametri di simulazione per il Rio Avenes

Per capire come influiscono i diversi algoritmi nella stima della propagazione è stato scelto, come area di calibrazione, il bacino del Rio Avenes. Questo infatti è il luogo ideale per fare delle simulazioni di prova perché, essendo un'area di dimensioni contenute, il programma impiega solo pochi minuti per eseguire i calcoli. Inoltre sono disponibili molte informazioni riguardo a questa zona, comprese le aree d'innescò e di deposito relative all'evento di debris flow del 4 agosto 2012, mappate dai tecnici del Servizio Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano (Figura 44). Questo viene considerato un evento eccezionale perché nel giro di poche ore sono caduti quasi 100 mm di precipitazione, i quali hanno provocato lo sviluppo di diverse colate detritiche su tutta la Val di Vizze. Il tempo di ritorno stimato per questo evento è di 200-300 anni.

Il deposito mappato in corrispondenza dell'abitato di Avenes ha una forma particolare: il paese è stato raggiunto da due diversi debris flow originatisi rispettivamente lungo il Rio Avenes e lungo un suo affluente in sinistra idrografica. Per questo motivo si vedono chiaramente due tracciati distinti, che si sviluppano dai due torrenti, i quali si toccano poco sotto l'apice del conoide, ma poi proseguono separati fino alla porzione più bassa del conoide dove si uniscono definitivamente.

Lo scopo della calibrazione è stato quindi di capire quali fossero i parametri migliori che sviluppassero una propagazione che coincidesse il più possibile con le aree di deposito mappate.

Per fare questo inizialmente sono state fatte delle simulazioni inserendo solamente il DTM dell'area attorno al Rio Avenes e un raster in cui sono state identificate le aree sorgente predefinite, prendendo come riferimento quelle perimetrare dai tecnici della Provincia di Bolzano.

Il primo parametro testato è stato l'algoritmo di propagazione: si è scelto di utilizzare la versione modificata di Holmgren (1994), sviluppata da Horton et al. (2013), la quale alzando il valore della quota della cella centrale della finestra 3x3 su cui sono eseguiti i calcoli, produce un cambiamento delle pendenze portando a fenomeni di dispersione più realistici, in particolare nel caso si operi con dati ad alta risoluzione. Sono state fatte numerose prove cambiando sia il valore dell'esponente (x), sia il valore di rialzo della cella centrale (di 1 m o 2 m) e tenendo gli altri parametri fissi, finché non è stata settata la formula ottimale per l'area oggetto di studio (Tabella 12).

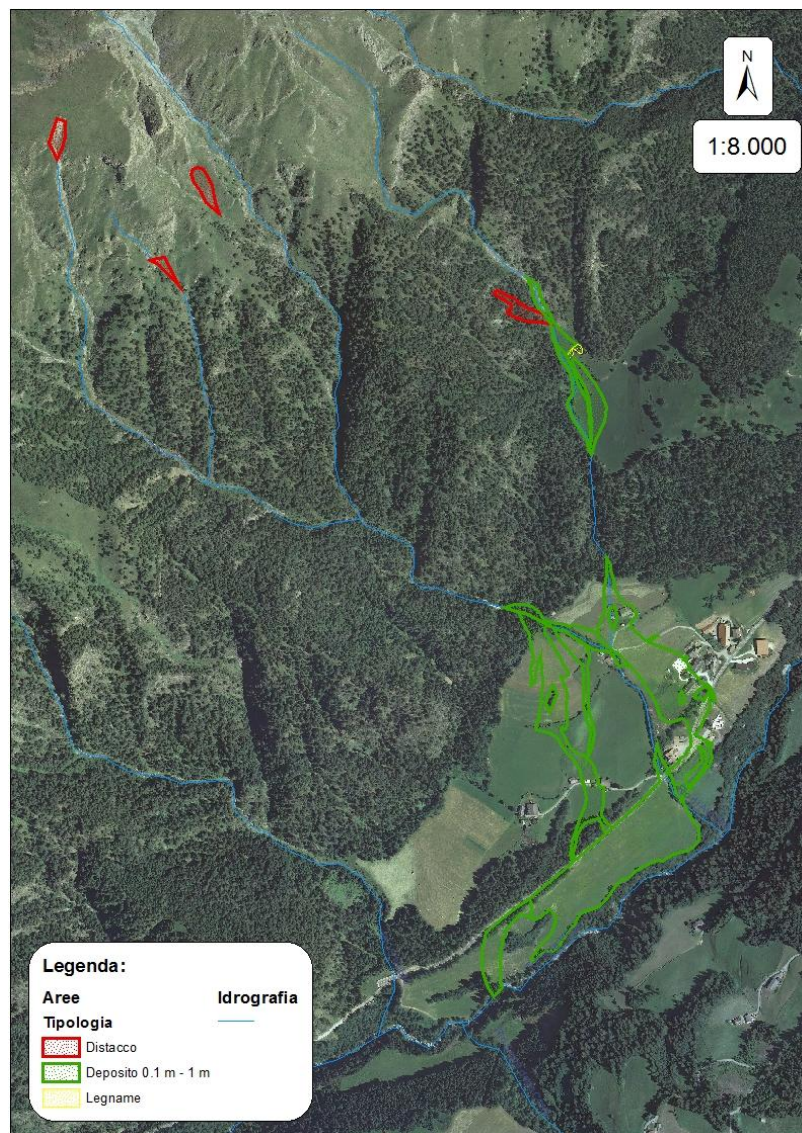


Figura 44: Aree sorgente e di deposito mappate lungo il corso del Rio Avenes e del suo principale affluente.

Un altro test effettuato è quello riguardante la scelta delle formule per il calcolo energetico, che stimano la distanza di arresto della colata. Utilizzando il modello SFLM è richiesta l'assegnazione del valore corretto al *travel angle*; mentre se si utilizza il modello di Perla et al. (1980), ci sono due possibili set di valori suggeriti per i debris flow: *default* e *Pakistan* (Tabella 11). Per le simulazioni con il primo modello sono state fatte alcune prove con angoli diversi e la scelta finale è stata effettuata anche consultando l'articolo di Horton et al. (2013), in cui sono riportati i valori consigliati per la propagazione dei debris flow nelle Alpi. Per il modello di Perla et al. (1980) invece, si è scelto di utilizzare i parametri di *default* che sono parsi più idonei rispetto a quelli salvati sotto la voce *Pakistan*. Questi ultimi infatti sono stati calibrati in maniera specifica per un'area situata nell'omonimo stato, in un precedente studio (Horton et al., 2011).

È importante sottolineare che in questa tesi è stata utilizzata la versione di Flow-R 0.8 che permette di scegliere solamente tra le due voci sopra citate (*default* e *Pakistan*) per il modello di Perla et al. (1980). Nella nuova versione del programma, cioè la 0.9 (uscita quando il presente studio era già stato elaborato), la scelta dei parametri riguardanti il modello di Perla et al. (1980) è molto più varia. Sono infatti disponibili svariati set di valori riguardanti il rapporto M/D e il coefficiente μ .

Tabella 11: Leggi frizionali e rispettivi parametri utilizzabili in Flow-R per il calcolo della runout del debris flow.

LEGGI FRIZIONALI				
TRAVEL ANGLE (°)	PERLA ET AL. (1980)			
0,1	DEFAULT		PAKISTAN	
0,5	<i>M/D</i>	μ	<i>M/D</i>	μ
1	30	0,10	30	0,08
2				
3				
4				
5				
10				
11				
15				
20				
25				
30				

L'ultimo parametro scelto è stato il limite di velocità. Questo è strettamente collegato alla legge di attrito utilizzata per il calcolo energetico, infatti serve ad evitare che le potenziali colate raggiungano dei valori energetici, e di conseguenza delle velocità di movimento, eccessivamente elevati rispetto alla realtà. Horton et al. (2013) consigliano di utilizzare un valore limite di 15

m/s, ma nel presente studio, poiché le colate sono a matrice abbastanza fangosa, si è preferito settare questo limite a 20 m/s. In questo modo infatti, la distanza di arresto raggiunta dalle potenziali colate rispecchia in maniera abbastanza buona quella reale misurata in campo. Questo valore di 20 m/s può sembrare eccessivamente alto rispetto alla realtà del fenomeno considerato, ma esso dipende dalla fisica modificata del modello Flow-R. Esso infatti, basandosi esclusivamente su un calcolo energetico, trascura completamente i parametri fisici reali del processo. Di conseguenza un valore come la velocità della colata, che nella realtà è strettamente dipendente dalla fisica e dalla reologia del fluido, sarà differente rispetto ai valori misurabili in campo se basato solamente su un calcolo energetico.

Ogni raster risultante dalle simulazioni mostra l'area potenzialmente raggiunta dal debris flow, in termini probabilistici, attribuendo ad ogni cella la probabilità che questa sia raggiunta dalla colata. Siccome per questo primo step di calibrazione, lo scopo principale è stato di far coincidere le aree mappate con quelle simulate, sono stati momentaneamente trascurati questi valori di probabilità. Quindi i raster risultanti sono stati trasformati in file di tipo shape, in modo da facilitarne il confronto.

Successivamente si è verificato se, utilizzando questi stessi parametri ma diversi dati di input, il programma fornisse delle propagazioni altrettanto realistiche. Quindi, invece di impiegare il raster delle aree sorgenti, sono stati utilizzati alcuni set di dati che permettessero al programma di identificare in modo automatico le potenziali sorgenti. Si è deciso di utilizzare come input i seguenti raster: modello digitale del terreno, area drenata e curvatura planare. Questi tre infatti, sono una rappresentazione sintetica dei tre fattori che stanno alla base dell'insorgere dei debris flow descritti da Rickenmann e Zimmermann (1993) e da Takahashi (1981): pendenza locale, portata liquida e disponibilità di sedimento. Il raster della pendenza non è stato inserito, in quanto il programma identifica come potenziali sorgenti tutte le celle con una pendenza compresa entro un certo intervallo e, facendo numerose prove, si è visto che il suo inserimento non aveva alcuna influenza sul risultato finale. Inoltre il programma tiene già conto della pendenza del letto nel calcolo delle celle sorgenti riguardante il raster dell'area drenata.

Il risultato delle simulazioni senza aree sorgente predefinite è stato confrontato con i risultati delle simulazioni effettuate con gli stessi parametri ma, aventi come input le aree sorgente predefinite.

6.2. Calibrazione dei parametri di simulazione per Rio Tolve e “evento bosco”

La calibrazione effettuata sul Rio Avenes è stata testata su altri due casi di studio a scala di bacino: il Rio Tolve ed un suo affluente in sinistra idrografica. Anche per questi due torrenti si dispone infatti della mappatura delle aree di distacco e deposito, perimetrata dai tecnici della Provincia di Bolzano in seguito all’evento dell’agosto 2012 (Figura 45). L’area di deposito mappata lungo il Rio Tolve (localizzato nella parte destra di Figura 45) ha una forma stretta e molto allungata, quindi si sono dovuti calibrare i parametri in modo che la colata avesse una buona distanza di arresto ma non si espandesse troppo lateralmente.

Per quanto riguarda invece l’evento avvenuto lungo l’affluente in sinistra del Rio Tolve, che ha sviluppato una colata all’interno di un bosco, sono stati mappati due piccoli depositi dalla classica forma a ventaglio. Inoltre è stata mappata un’area più grande a valle, dove però i depositi sono inferiori a 0.1 m di altezza. Si è deciso di calibrare i parametri del programma senza tenere conto di quest’ultima area. Infatti, siccome Flow-R non tiene conto del volume dell’evento, è impossibile fare una distinzione sui depositi e, calibrando la simulazione in modo da farla coincidere con l’intera area mappata, si rischia di sviluppare una colata detritica troppo grande rispetto alla realtà.

In queste due aree si è proceduto separatamente ma, utilizzando lo stesso metodo. Inizialmente, come per il Rio Avenes, sono state fatte delle simulazioni inserendo il raster delle aree sorgente predefinite come unico dato di input (oltre al DTM dell’area esaminata). In questo caso, avendo già a disposizione i parametri settati per il Rio Avenes, sono stati utilizzati questi fin da subito. Si è così verificato se essi si adattassero in maniera corretta anche a queste altre due aree. Siccome lo scopo è sempre quello di far coincidere il più possibile le aree di deposito stimate con quelle reali, sono state condotte delle prove anche con parametri leggermente diversi rispetto a quelli derivanti dalla calibrazione sul Rio Avenes, per cercare di migliorare ulteriormente il risultato. Poi, come nel caso precedente, le simulazioni sono state fatte inserendo come dati di input il DTM, l’area drenata e la curvatura planare. A questo punto si è verificata la corrispondenza tra le aree reali e quelle stimate e sono stati scelti i parametri più appropriati per tutte e tre le aree di indagine.

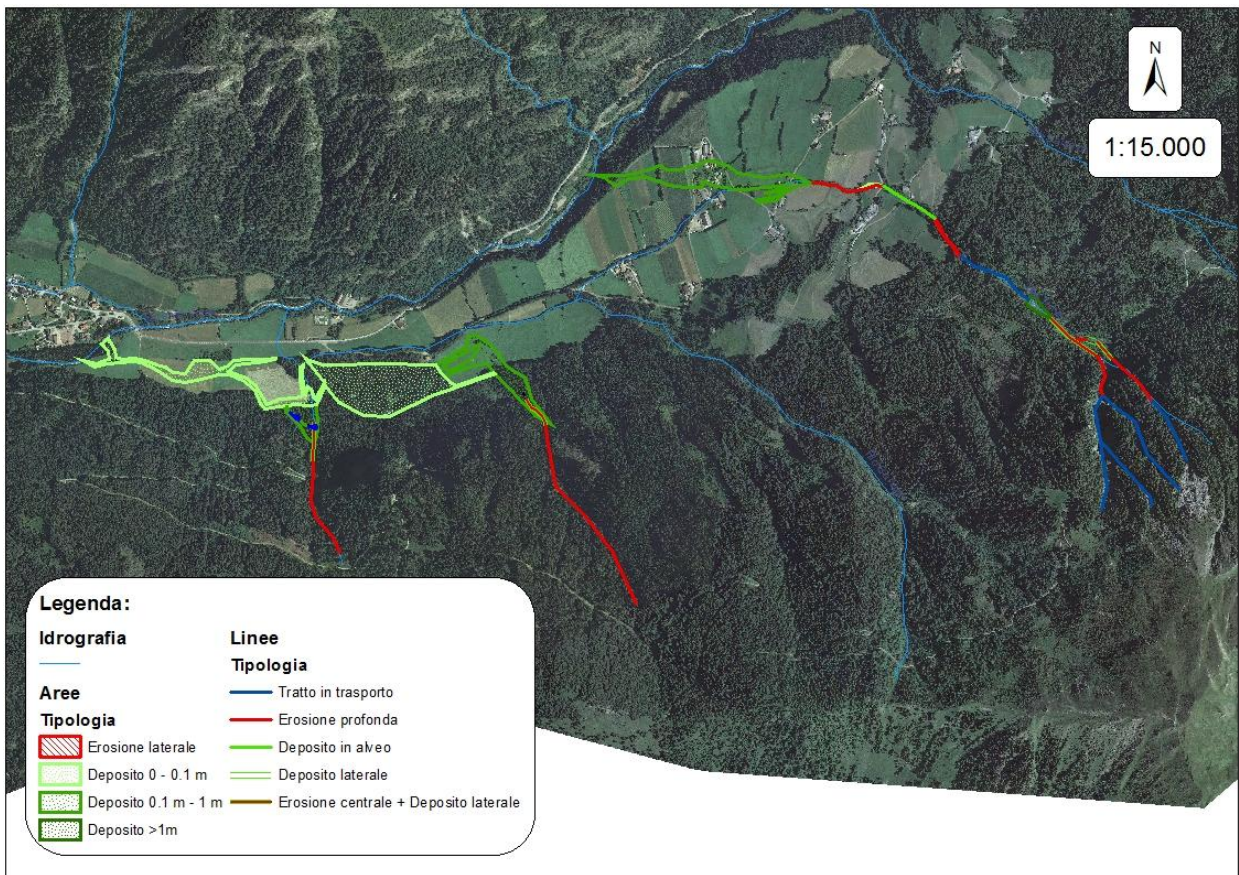


Figura 45: Aree sorgente e di deposito lungo il Rio Tolve e il suo affluente in sinistra idrografica.

6.3. Risultati della calibrazione a scala locale

6.3.1. Rio Avenes

In Tabella 12 sono riportate le principali simulazioni effettuate sul bacino del Rio Avenes attraverso il modello Flow-R.

Tabella 12: Riassunto delle simulazioni effettuate sul Rio Avenes. Sono evidenziate in grassetto le due simulazioni effettuate con il set di parametri ritenuto migliore.

TEST	DATI INPUT	1. SPREADING ALGORITHM			2. ENERGY CALCULATION		
		Directions Algorithm	Parameters	Inertial algorithm	Friction loss function	Energy Limitation	
1	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=01 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
2	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=10 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
3	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=04 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
4	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=06 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
5	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
6	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=2m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
7	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
8	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	20°	velocity < 20 m/s
9	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	6°	velocity < 20 m/s
10	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 15 m/s
11	DTM	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						
12	DTM	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						

Le prime dieci simulazioni sono state fatte inserendo le aree sorgente predefinite (Tabella 12). Inizialmente, sono stati testati diversi esponenti dell'algoritmo modificato di Holmgren (1994) per il calcolo dell'espansione della colata. È risultato chiaro che, con esponenti bassi (tra 1 e 3), la colata ha un espansione molto elevata. Come si può vedere in Figura 46, i margini laterali della colata simulata utilizzando l'esponente 1 sono molto più ampi rispetto a quelli reali e tutta la porzione interna a questi margini, diversamente dal deposito reale, risulta completamente ricoperta dai detriti. Al contrario, con un esponente troppo alto (9 o 10), il flusso ha un'espansione laterale ridotta rispetto ai depositi reali. Come si nota in Figura 46, infatti, con l'esponente 10, anche se in alcune porzioni i margini seguono abbastanza fedelmente i depositi reali, in certi tratti risultano invece troppo ristretti. Se si osserva, ad esempio, la porzione sinistra appena sotto l'apice del conoide, si vede come il deposito simulato sia troppo ristretto rispetto all'area reale rappresentata in verde e, siccome si preferisce essere più cautelativi, si è deciso di utilizzare un esponente leggermente più basso.

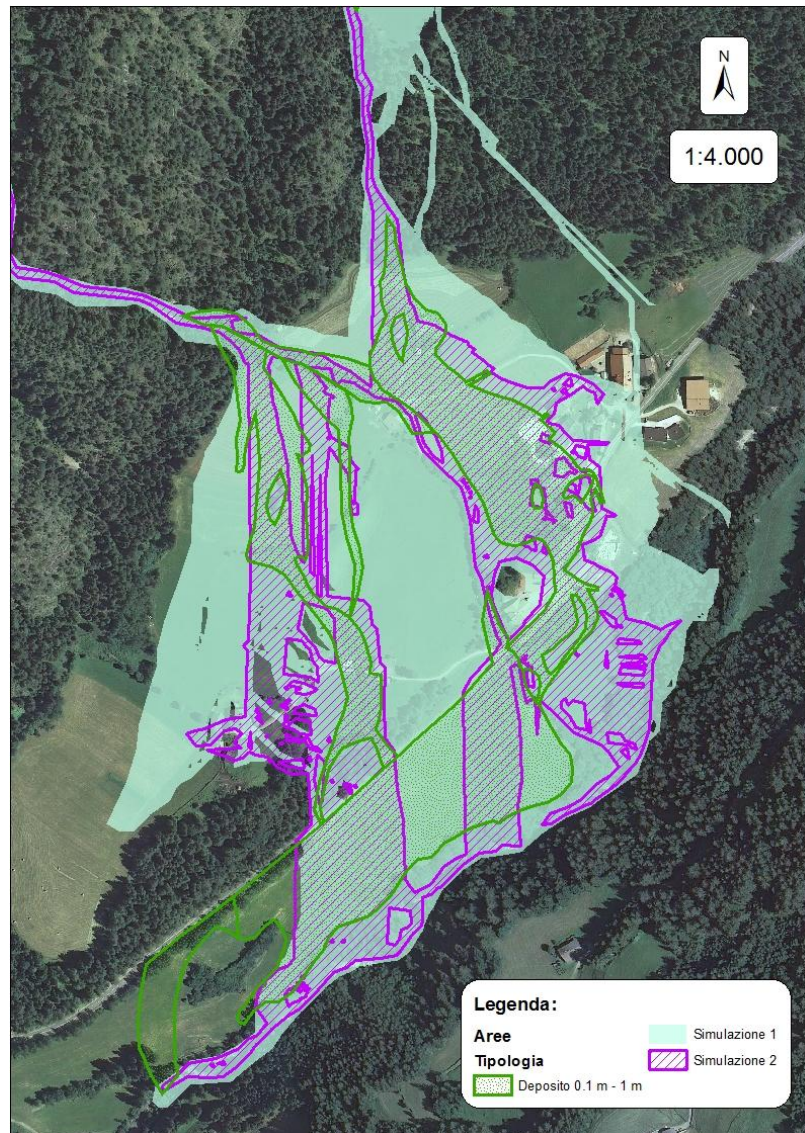


Figura 46: Confronto tra: simulazione 1, effettuata con $\text{exp}=01$ e $\text{dh}=1\text{m}$ e simulazione 2 con $\text{exp}=10$ e $\text{dh}=1\text{m}$.

l'apice del conoide, si vede come il deposito simulato sia troppo ristretto rispetto all'area reale rappresentata in verde e, siccome si preferisce essere più cautelativi, si è deciso di utilizzare un esponente leggermente più basso.

Poiché molti autori, tra cui Horton et al. (2013), consigliano di utilizzare un esponente compreso tra 4 e 6 per i debris flow, le successive simulazioni sono state fatte inserendo questi valori di esponente. Anche con questi parametri però, la colata risulta troppo espansa rispetto alla realtà, fuoriuscendo parecchio rispetto ai margini mappati e non rispecchiando fedelmente la particolare forma dei depositi reali (Figura 47).

Utilizzando un esponente pari ad 8 invece, il deposito è molto simile a quello risultante con l'esponente 6 ma, essendo leggermente più contenuto, segue meglio i margini reali in verde. Se si osservano anche le porzioni interne, si nota come con questo valore di esponente si evidenzino più discontinuità che invece vengono completamente ricoperte dalla colata inserendo l'esponente più basso. Utilizzando il valore 8 l'espansione del debris flow risulta quindi più simile a quella dei depositi mappati, rimanendo comunque più ampia. Nella porzione sinistra del deposito, ad esempio, la colata simulata scorre molto di più seguendo un piccolo impluvio ed anche nella

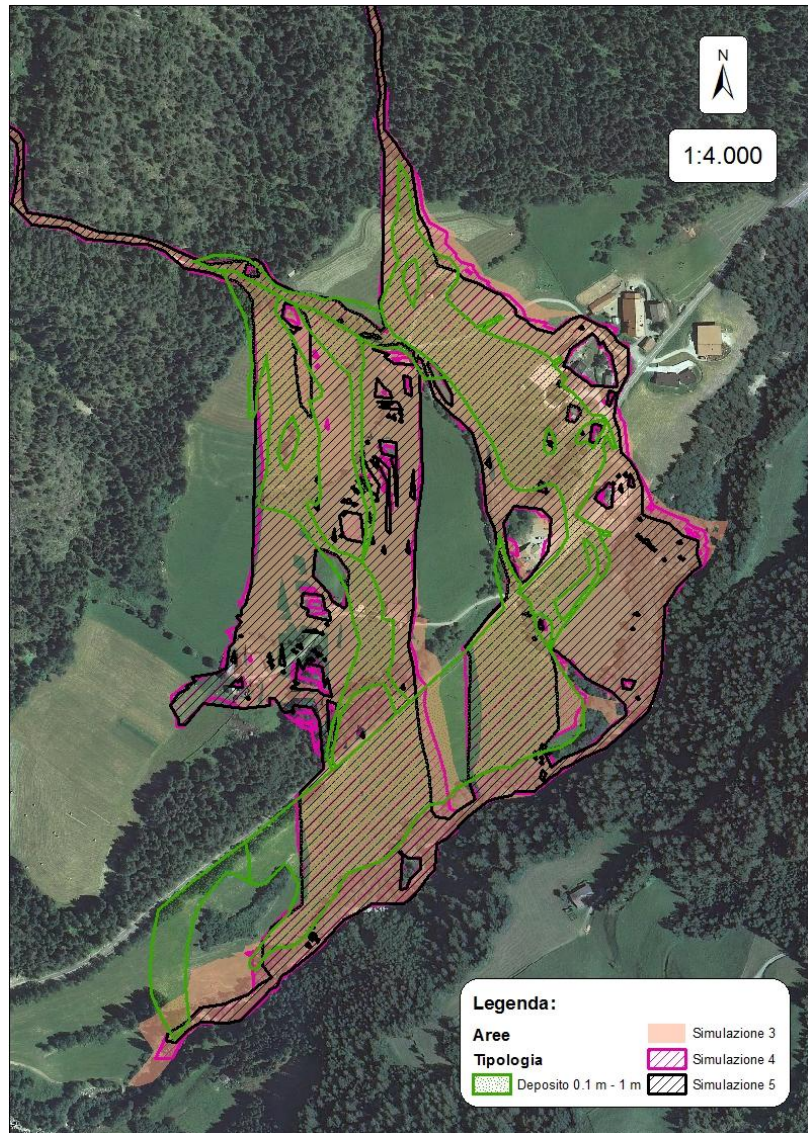


Figura 47: Confronto tra: simulazione 3, effettuata con $\text{exp}=04$ e $\text{dh}=1\text{m}$, simulazione 4, con $\text{exp}=06$ e $\text{dh}=1\text{m}$ e simulazione 5, con $\text{exp}=08$ e $\text{dh}=1\text{m}$.

parte centrale il bordo è comunque più ampio rispetto a quello mappato. Il programma, durante il calcolo della propagazione della colata, permette di scegliere anche un secondo parametro assieme al valore dell'esponente. Questo consente di rialzare la cella centrale di 1 m o di 2 m, in modo da evitare che la propagazione si arresti troppo presto a causa di lievi variazioni di quota tra una o più celle contigue. In tutti i precedenti test è stato utilizzato il rialzo di 1 m. Se si scelgono i 2 m infatti, il programma sviluppa nuovamente un'espansione troppo elevata, evidenziando inoltre una distanza di arresto maggiore rispetto alle aree di deposito reali (Figura 48).

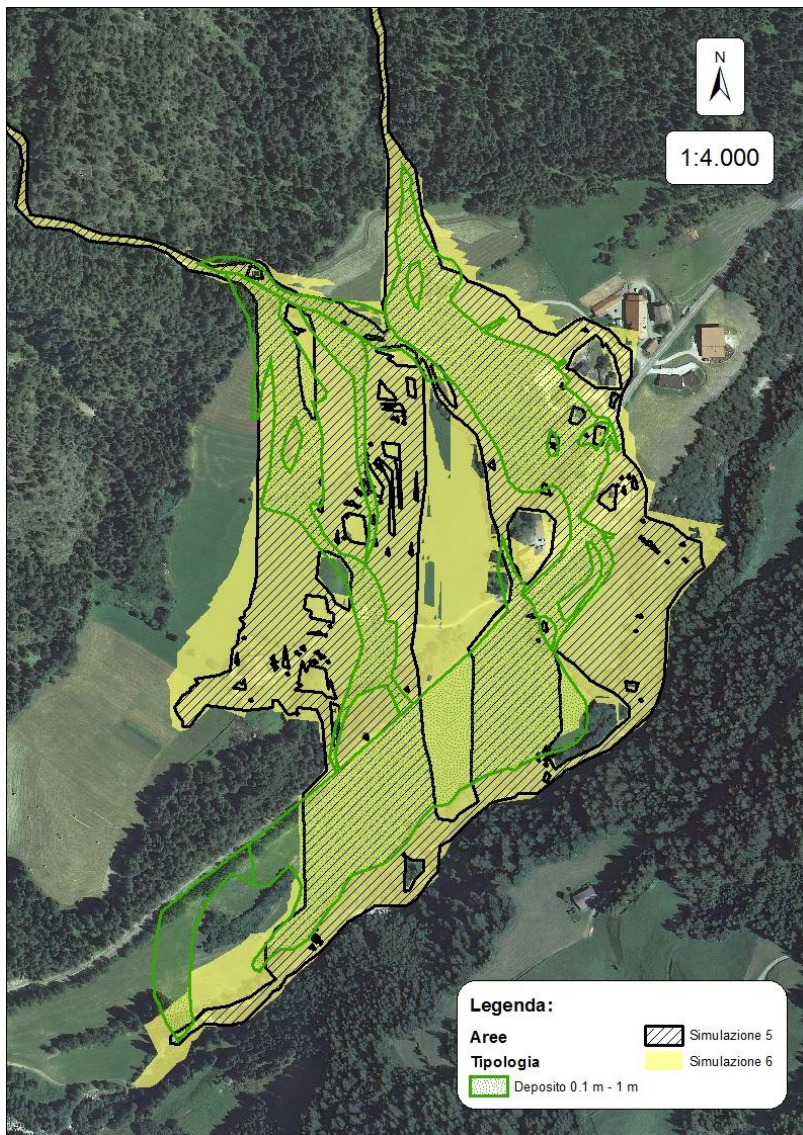


Figura 48: Confronto tra: simulazione 5, effettuata utilizzando $\exp=08$ e $dh=1m$ e simulazione 6 con $\exp=08$ e $dh=2m$.

Per quanto riguarda la funzione di persistenza, cioè il parametro che si accompagna all’algoritmo di espansione, si è scelto di utilizzare il metodo proporzionale che è quello di default inserito nel programma. L’altra funzione chiave che necessita di essere calibrata è la formula per il calcolo energetico che permette di definire la distanza di arresto della colata. Ci sono due possibilità: il modello frizionale bi-parametrico di Perla et al. (1980) oppure il modello SFLM che utilizza il “travel angle”.

In quest’ultimo caso la scelta dell’angolo è molto varia. Sono state fatte alcune prove da cui si è verificato che, con angoli bassi ovviamente, la colata si

arresta immediatamente mentre, con angoli maggiori la distanza di arresto si allunga notevolmente. Il valore ottimale per il caso esaminato si è dimostrato di 11° (Figura 49). Questo è anche il valore che viene suggerito da vari autori, tra cui Rickenmann e Zimmermann, 1993; Bathurst et al., 1997; Huggel et al., 2002 (Horton et al., 2013), per la simulazione di debris flow nelle Alpi.

Le simulazioni effettuate utilizzando il modello frizionale di Perla et al. (1980) sono state eseguite scegliendo i valori stabiliti di default per i debris flow. L'ampiezza di deposito che si ottiene è abbastanza buona. Confrontandolo infatti con la stessa simulazione effettuata scegliendo un "travel angle" di 11°, si nota come i margini del deposito siano leggermente più ristretti. Sulla parte sinistra della Figura 50, il modello di Perla et al. (1980) segue meglio la forma dei depositi mappati mentre, sulla porzione più a destra, esso si restringe troppo rispetto alla realtà. Allo stesso modo nella parte inferiore, alla base del conoide, dove è evidenziata una grande area di deposito mappata

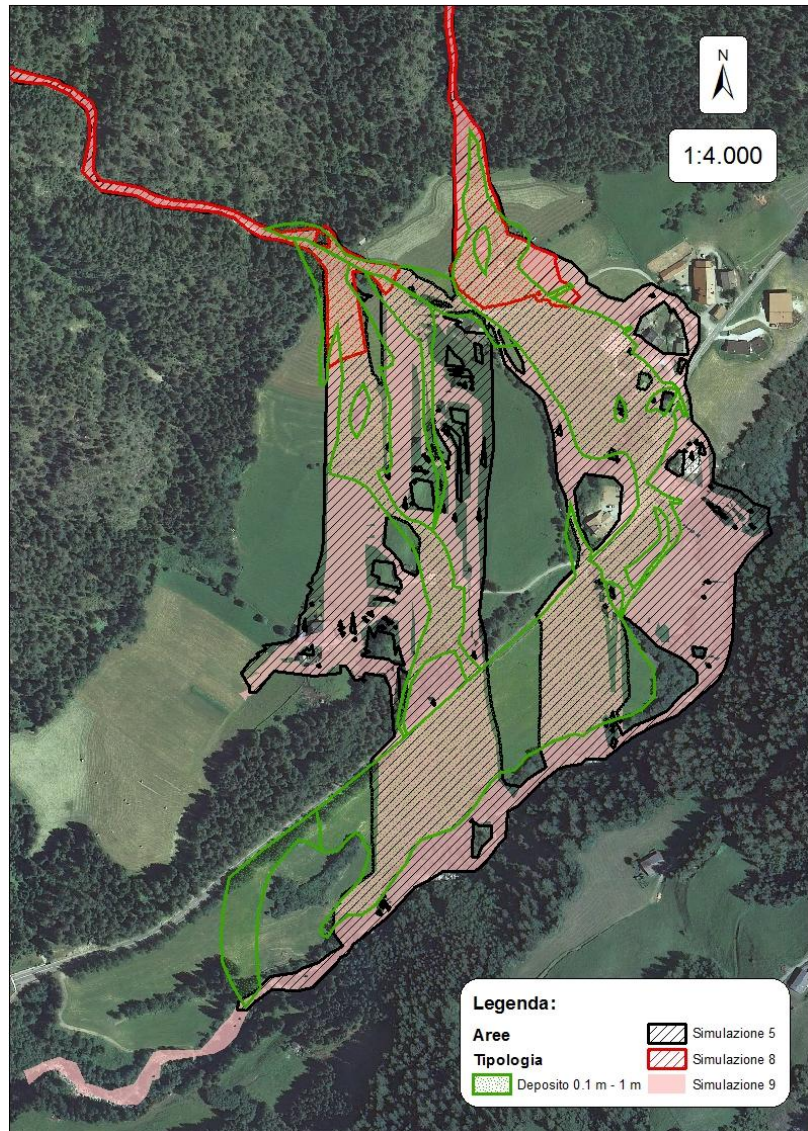


Figura 49: Confronto tra: simulazione 5 effettuata con "travel angle" pari a 11°, simulazione 8 con "travel angle" pari a 20° e simulazione 9 con "travel angle" pari a 1°.

nel prato sottostante la strada, nessuno dei due modelli riesce a simulare perfettamente il fenomeno, ma attraverso l'utilizzo del "travel angle" il deposito risulta un po' più espanso. Per questo motivo, ponendosi in ottica cautelativa, si è preferito quest'ultimo al modello di Perla et al. (1980).

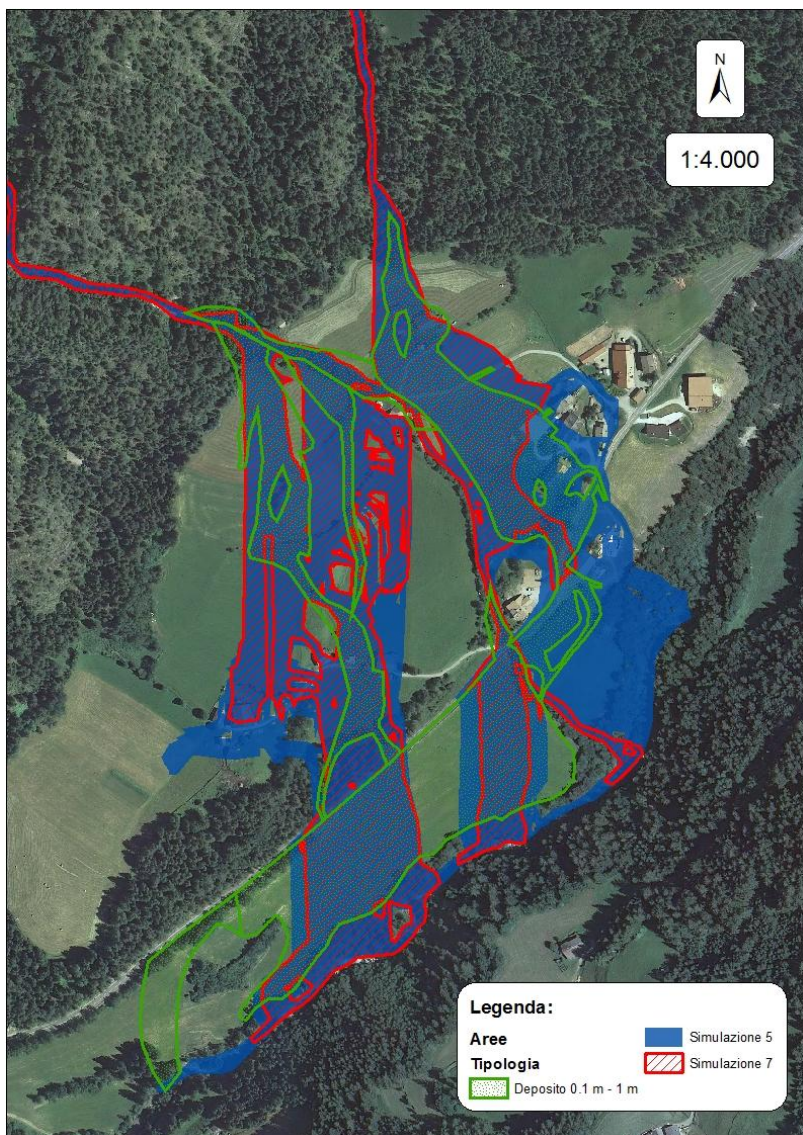


Figura 50: Confronto tra: simulazione 5 effettuata con "travel angle" pari a 11° e simulazione 7 con il modello di Perla et al. (1980).

L'ultimo parametro settato è stato il limite di velocità che, assieme al tipo di funzione scelta per il calcolo energetico, determina la distanza di arresto. Molti autori (Horton et al., 2011; Horton et al., 2013; Fischer et al., 2012) consigliano un valore di 15 m/s ma, nel caso in esame, poiché si tratta di colate piuttosto fangose che hanno una velocità superiore rispetto a quelle granulari, si è scelto un limite di 20 m/s. Con questo valore, come si può notare in Figura 51, la colata sviluppa una distanza di arresto simile a quella reale. Con un limite di 15 m/s invece la propagazione si blocca prima, mostrando in particolar modo nella porzione destra del deposito, una distanza di arresto eccessivamente ridotta.

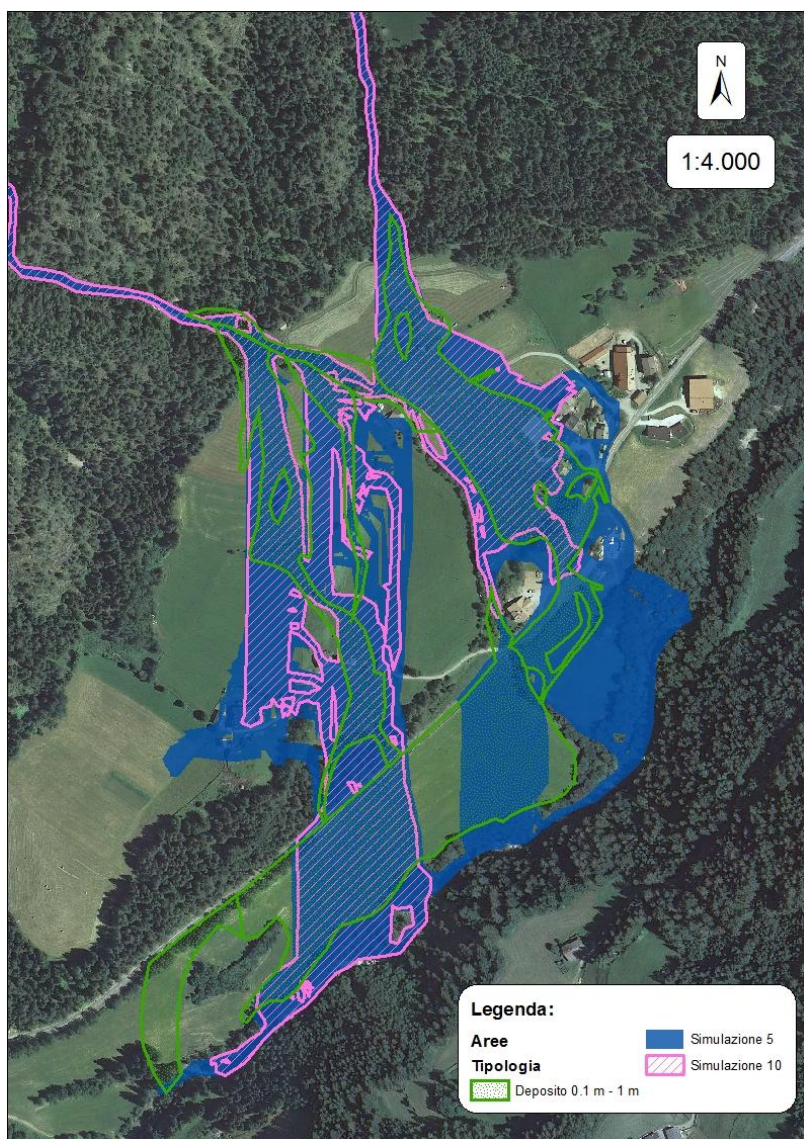


Figura 51: Confronto tra: simulazione 5 effettuata con un limite di velocità pari a 20 m/s e simulazione 10 con limite di velocità pari a 15 m/s.

In conclusione riassumendo, la simulazione che ha fornito il risultato ritenuto migliore è stata quella prodotta utilizzando come algoritmo di dispersione quello di Holmgren (1994) modificato con esponente pari a 8 ed un rialzo della cella centrale di 1 m e i pesi della funzione di persistenza di default mentre, per il calcolo della runout il modello SFLM con “travel angle” pari a 11° e con un limite di velocità di 20 m/s.

Il passo successivo è stato quello di effettuare delle simulazioni senza le aree sorgente predefinite ma, mettendo come dati di input dei raster che permettessero al programma di riconoscere

autonomamente le celle sorgente. A questo scopo sono stati utilizzati il DTM, l’area drenata e la curvatura planare. Sono state effettuate due simulazioni utilizzando i parametri ottimali scelti in precedenza e mettendo nuovamente a confronto il modello frizionale di Perla et al. (1980) con il modello SFLM (Figura 52). Per le stesse ragioni del caso precedente, si è preferito il risultato che si ottiene utilizzando il secondo, per il calcolo della distanza di arresto.

Come si può vedere in Figura 53, il deposito prodotto facendo riconoscere automaticamente al programma le celle sorgenti, rispecchia perfettamente quello che si ha utilizzando le aree sorgente predefinite. Questo dimostra la sua efficacia sia nell’individuazione delle zone potenziali d’innesco sia nella propagazione del debris flow a partire da queste aree.

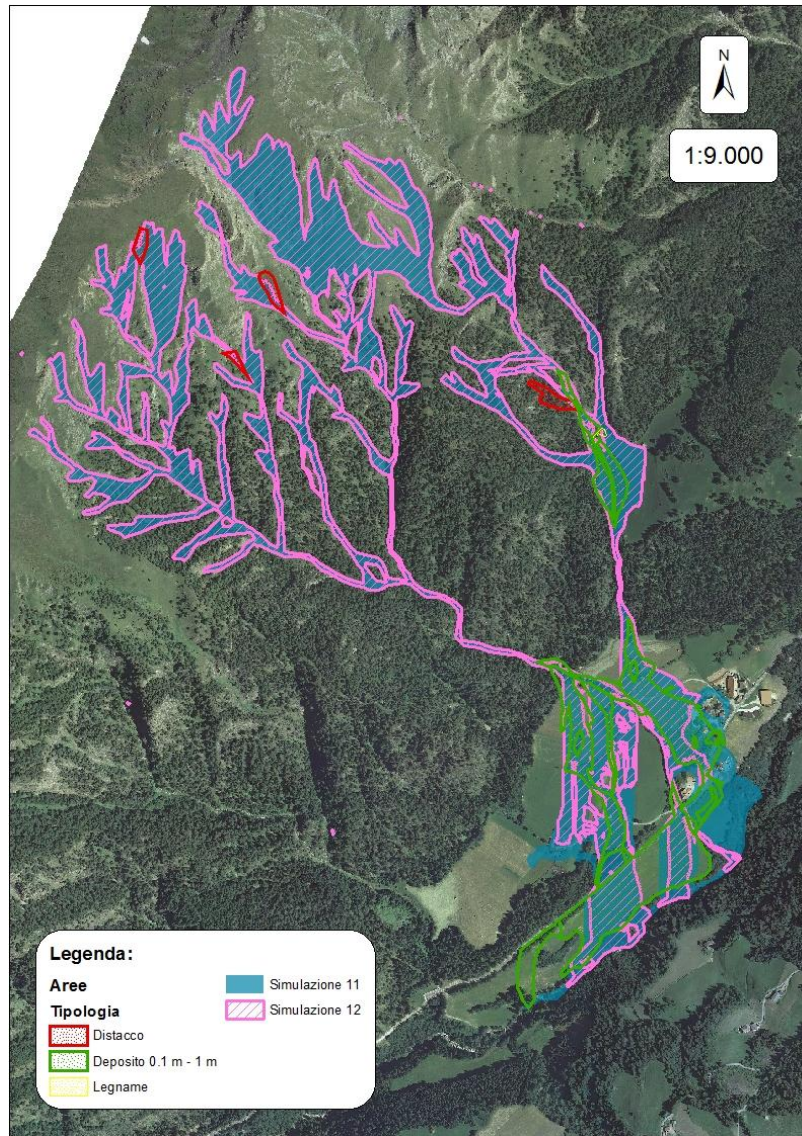


Figura 52: Confronto tra: simulazione 11 effettuata utilizzando un “travel angle” pari a 11° e simulazione 12 con il modello di Perla et al. (1980). Entrambe sono state calcolate senza l’inserimento delle aree sorgente predefinite.

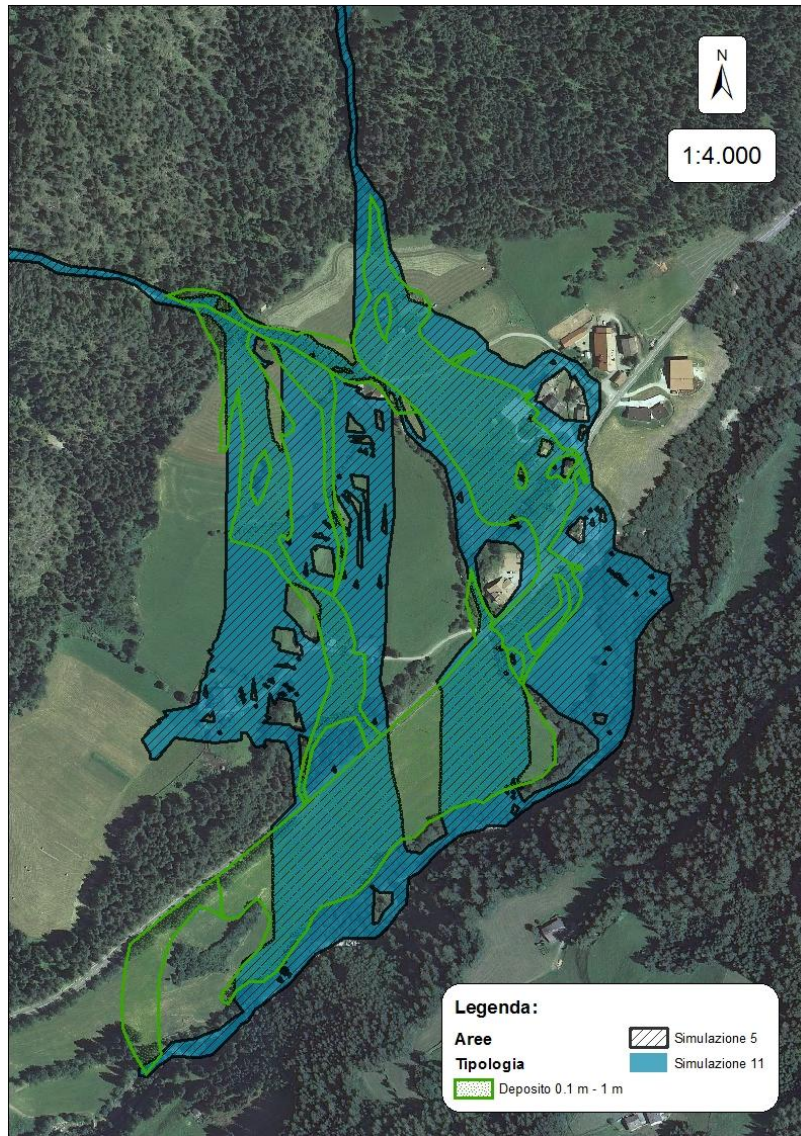


Figura 53: Confronto tra: simulazione 5, effettuata con le aree sorgente predefinite e simulazione 11, effettuata senza le aree sorgente predefinite. I parametri utilizzati per il calcolo della propagazione sono stati settati nello stesso modo.

6.3.2. Rio Tolve e “evento bosco”

In Tabella 13 sono riportate le principali simulazioni effettuate sul bacino del Rio Tolve attraverso il modello Flow-R.

Tabella 13: Riassunto delle simulazioni effettuate sul Rio Tolve. Sono evidenziate in grassetto le due simulazioni effettuate con il set di parametri ritenuto migliore.

TEST N°	DATI INPUT	1. SPREADING ALGORITHM			2. ENERGY CALCULATION		
		<i>Directions Algorithm</i>	<i>Parameters</i>	<i>Inertial algorithm</i>	<i>Friction loss function</i>		<i>Energy Limitation</i>
1	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20m/s
2	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20m/s
3	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=06 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20m/s
4	DTM	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						
5	DTM	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						

Per le simulazioni riguardanti il Rio Tolve e l’evento bosco, il procedimento seguito è analogo. Le prime simulazioni, effettuate con l’utilizzo delle aree sorgente predefinite, sono state fatte utilizzando fin da subito i parametri migliori calibrati sul Rio Avenes.

Per quanto riguarda il Rio Tolve, l’ampiezza del deposito simulato con questi parametri (simulazione 1) è maggiore rispetto a quella del deposito reale. Infatti la colata segue probabilmente una piccola depressione laterale del terreno, andando ad allargarsi maggiormente in sinistra idrografica. La distanza di arresto invece rispecchia in maniera abbastanza buona quella misurata in campo (Figura 54). Le due successive simulazioni sono state fatte utilizzando degli altri parametri per tentare di affinare ulteriormente il risultato. Nella simulazione 2 si è scelto di utilizzare il modello di Perla et al. (1980) ma, la propagazione della colata risulta eccessivamente ridotta, arrestandosi molto prima rispetto al deposito reale. Si è provato quindi, nella simulazione 3, ad utilizzare sempre il modello di Perla et al. (1980) ma, settando l’esponente dell’algoritmo di Holmgren (1994) pari a 6, per vedere se l’espansione della colata risultasse migliorata. In questo caso però, la propagazione dà troppo peso alla depressione

presente sulla sinistra, sviluppandosi quasi completamente da quella parte, evitando invece l'area interessata dal deposito reale più a destra (Figura 54).

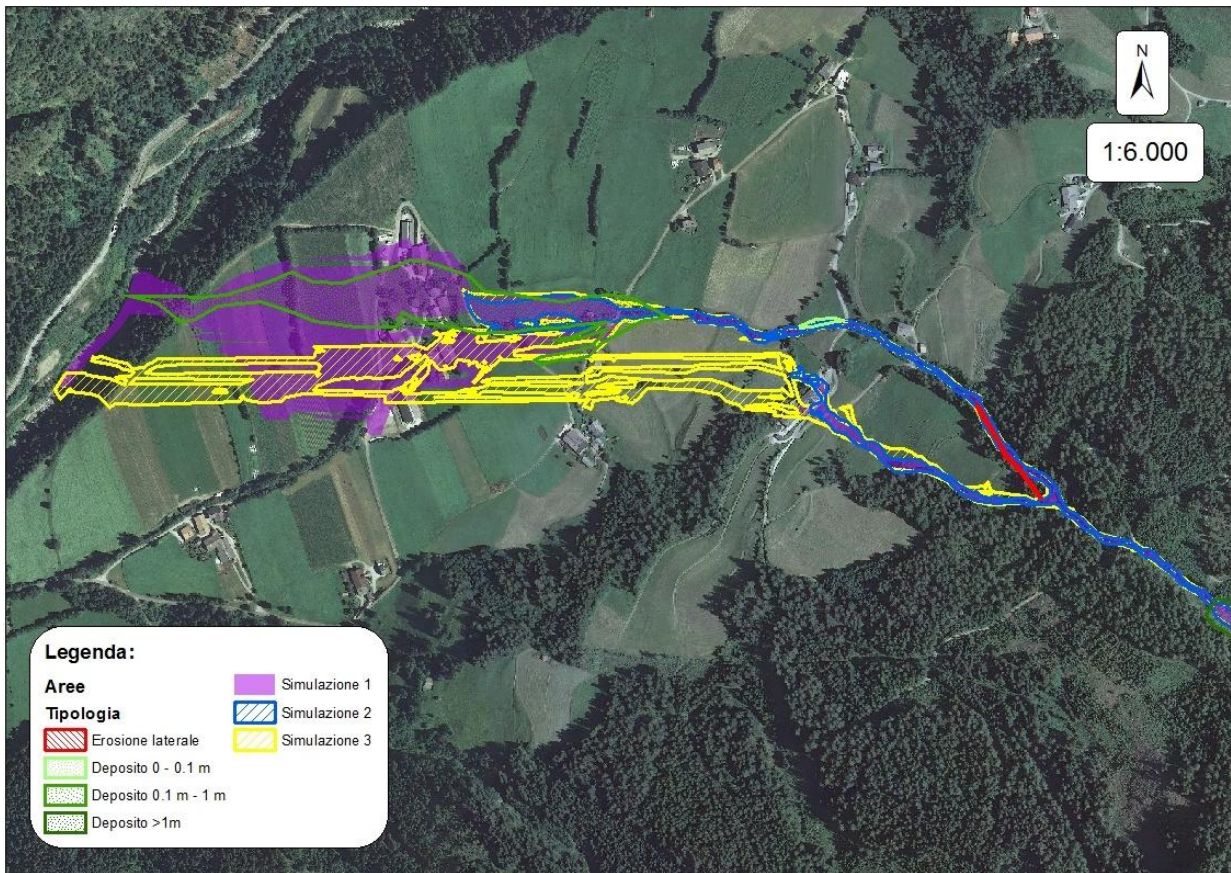


Figura 54: Confronto tra: simulazione 1 effettuata con $\exp=08$, $dh=1m$ e "travel angle" pari a 11° ; simulazione 2 con $\exp=08$, $dh=1m$ e modello frizionale di Perla et al. (1980); e simulazione 3 con $\exp=06$, $dh=1m$ e modello frizionale di Perla et al. (1980).

Le simulazioni effettuate senza l'inserimento delle aree sorgente predefinite, sono risultate invece un po' più confuse. Infatti, partendo sempre dai tre raster di DTM, area drenata e curvatura planare, il programma seleziona molte più aree sorgente rispetto a quelle mappate. Si sviluppano, di conseguenza, molte più colate nella zona attorno al Rio Tolve, oltre a quella mappata durante l'evento del 2012.

Per quanto riguarda la porzione interessata dalla colata realmente avvenuta, la simulazione effettuata con questi dati fornisce una propagazione caratterizzata da una minore distanza di arresto rispetto sia a quella reale sia a quella fatta con le aree sorgente predefinite (Figura 55). Il risultato migliore, si ottiene comunque utilizzando nuovamente il modello SFLM con "travel angle" di 11° . Con il modello di Perla et al. (1980) infatti, non solo la propagazione nella zona mappata risulta molto ridotta, ma vengono evidenziate molte meno colate potenziali. Osservando infatti in Figura 55 la parte a destra del deposito reale, si nota come il test effettuato con il modello SFLM evidenzi un potenziale debris flow abbastanza ampio mentre, quello effettuato

utilizzando il modello di Perla et al. (1980), non porta alla propagazione di nessuna colata in quella zona.

Siccome l'interesse di questo studio è proprio quello di individuare tutte le aree potenzialmente soggette a debris flow, l'utilizzo del modello SFLM sembra nuovamente fornire un risultato più cautelativo rispetto all'altra formula per il calcolo energetico.

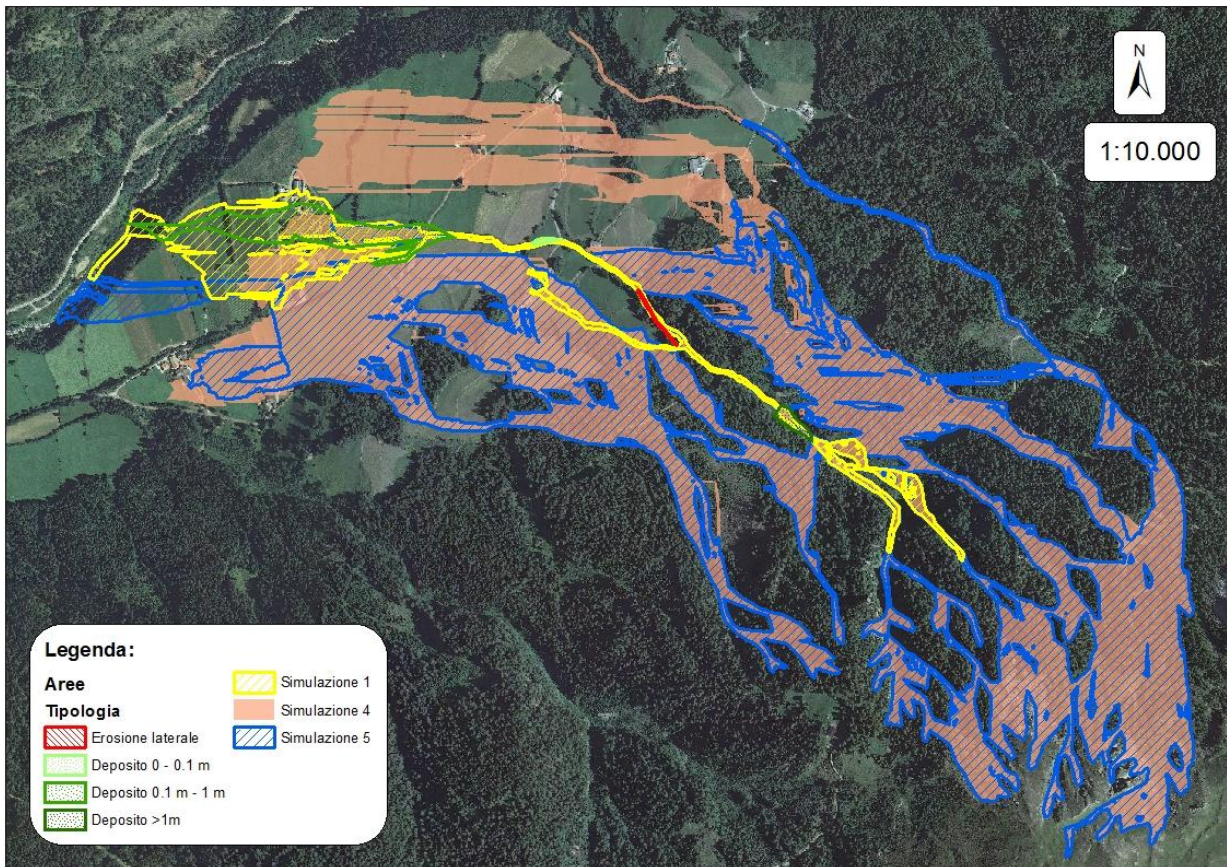


Figura 55: Confronto tra: simulazione 1 effettuata con l'utilizzo delle aree sorgente predefinite e "travel angle" pari a 11°; simulazione 4 effettuata senza le aree sorgente predefinite e "travel angle" pari a 11°; e simulazione 5, senza le aree sorgente predefinite e con modello frizionale di Perla et al. (1980).

In Tabella 14 sono riportate le principali simulazioni effettuate sul bacino dell'affluente del Rio Tolve attraverso il modello Flow-R.

Tabella 14: Riassunto delle simulazioni effettuate sulla colata sviluppatasi in un bosco, lungo l'affluente del Rio Tolve. Sono evidenziate in grassetto le due simulazioni effettuate con il set di parametri ritenuto migliore.

TEST N°	DATI INPUT	1. SPREADING ALGORITHM			2. ENERGY CALCULATION		
		<i>Directions Algorithm</i>	<i>Parameters</i>	<i>Inertial algorithm</i>	<i>Friction loss function</i>		<i>Energy Limitation</i>
1	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
2	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=06 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
3	Predefined sources	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
4	DTM	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						
5	DTM	Holmgren (1994) (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
	Flow accumulation						
	Plan Curvature						

Per quanto riguarda l'evento che ha interessato il bosco poco a valle del Rio Tolve, sono stati settati nuovamente i parametri delle due precedenti calibrazioni. Ancora una volta le prime simulazioni sono state fatte utilizzando le aree sorgente predefinite. Come si può vedere in Figura 56, sono stati messi nuovamente a confronto il modello di Perla et al. (1980) e il modello SFLM. Si preferisce ancora una volta quest'ultimo perché fornisce una maggiore espansione della colata, andando a ricoprire meglio il deposito mappato sulla destra mentre, con il modello di Perla et al. (1980), la propagazione si arresta prima, evidenziando una distanza di arresto inferiore. Anche qui si è provato a utilizzare un esponente di Holmgren (1994) pari a 6 ma, il risultato è praticamente identico a quello in cui è stato usato il solito esponente pari a 8. Solo la distanza di arresto è leggermente maggiore.

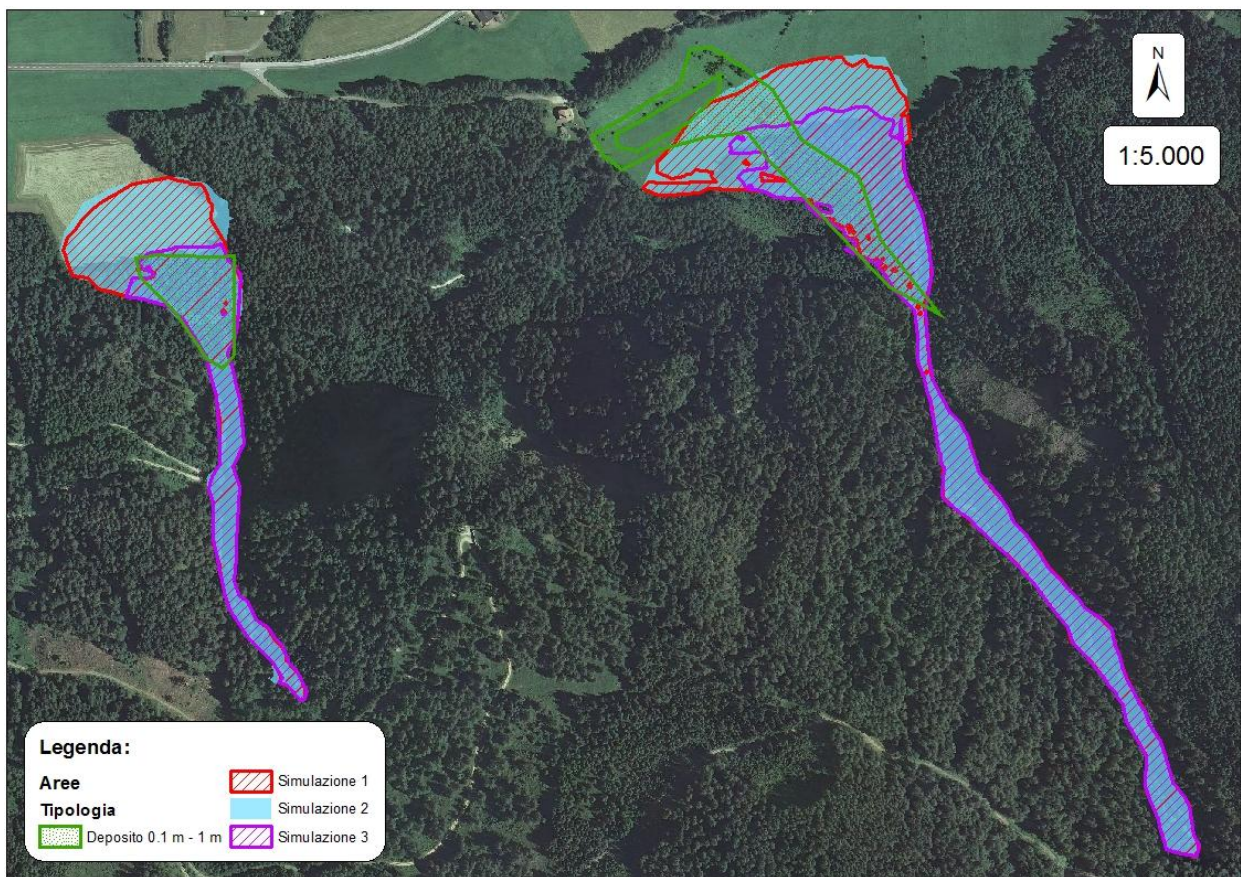


Figura 56: Confronto tra: simulazione 1 effettuata con $\text{exp}=08$ e "travel angle" pari a 11° ; simulazione 2 con $\text{exp}=06$ e "travel angle" pari a 11° ; e simulazione 3 con $\text{exp}=08$ e modello frizionale di Perla et al. (1980).

Le prove effettuate senza le aree sorgente predefinite hanno evidenziato in maniera buona la colata di destra mentre, quella localizzata più a sinistra non viene riconosciuta. Questo problema potrebbe essere attribuibile al DTM utilizzato. Esso infatti risulta tagliato nella parte alta del bacino e per questo probabilmente, i parametri di Flow-R non riescono a riconoscere le aree sorgente presenti. Viene invece evidenziata una seconda colata potenziale, nella parte destra dell'immagine (Figura 57).

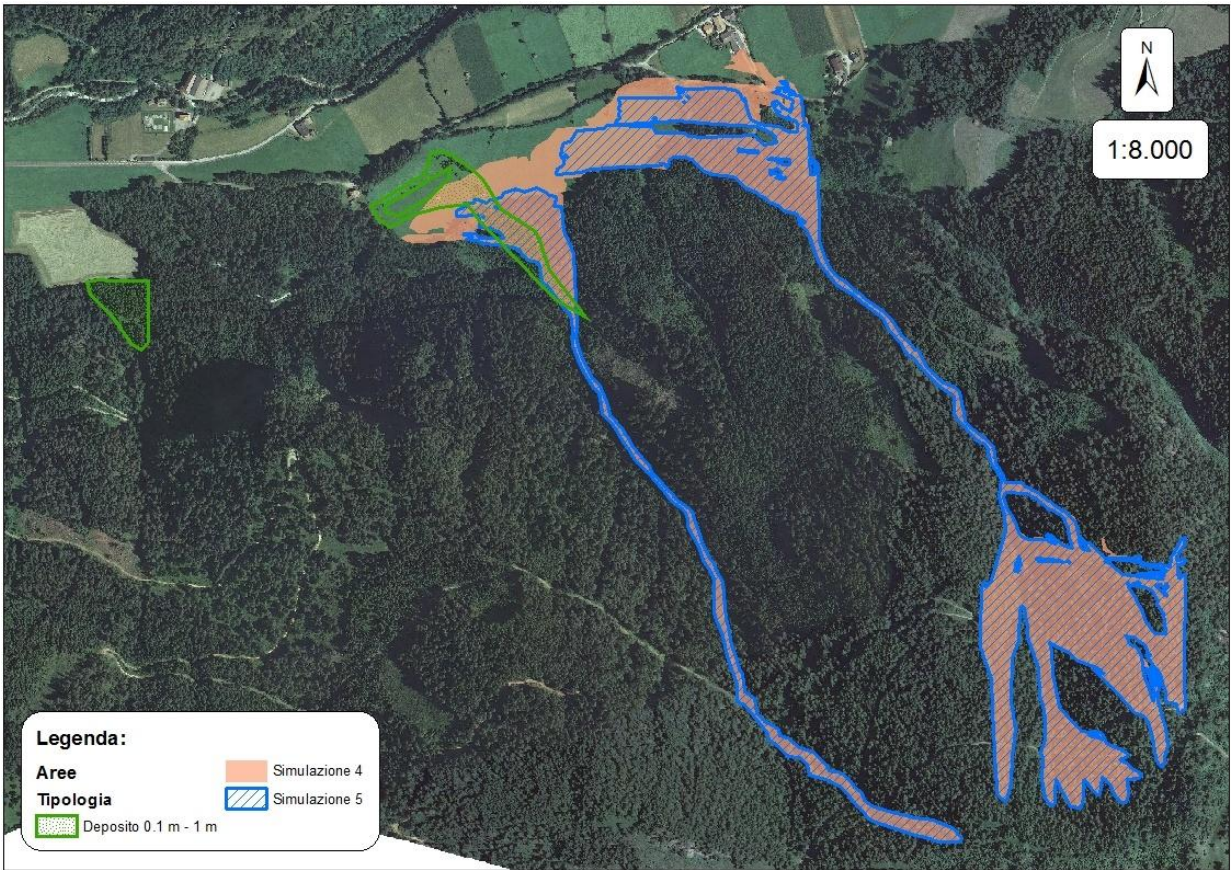


Figura 57: Confronto tra: simulazione 4 effettuata con "travel angle" pari a 11° e simulazione 5 con modello frizionale di Perla et al. (1980).

6.4. Accuratezza delle simulazioni a scala locale

L'accuratezza delle simulazioni effettuate a scala locale è stata calcolata solamente per i due bacini del Rio Avenes e del Rio Tolve. L'“evento bosco” non è stato considerato in quanto non sono state effettuate simulazioni utilizzando il modello FLO-2D. I valori di accuratezza riportati in Tabella 15 riguardano quindi le simulazioni effettuate nei due bacini con il modello FLO-2D e le due simulazioni migliori ottenute con il modello Flow-R, utilizzando per il calcolo dell'espansione i parametri migliori settati nelle precedenti fasi di calibrazione (versione modificata dell'algoritmo di Holmgren con esponente (x) pari a 8, rialzo della cella centrale (dh) di 1 m e funzione di persistenza proporzionale); mentre per il calcolo della distanza di arresto sono stati messi a confronto i risultati ottenuti con i due modelli utilizzabili (SFLM e Perla).

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate con il modello Flow-R, come si può vedere in Tabella 15, in tutti e due i casi il modello SFLM fornisce un risultato migliore rispetto al modello Perla (1980). Sul Rio Tolve l'accuratezza complessiva (δ) relativa al modello SFLM è superiore di addirittura 21 punti percentuali rispetto a quella risultante dal modello Perla (1980).

L'accuratezza di simulazione delle aree di deposito è stata calcolata anche per il modello FLO-2D. In questo caso è interessante notare che nel bacino del Rio Avenes, le aree di deposito risultanti da Flow-R hanno un grado di corrispondenza con quelle reali maggiore rispetto alla simulazione effettuata con FLO-2D. Nel bacino del Rio Tolve invece, quest'ultimo modello fornisce un valore di accuratezza decisamente maggiore rispetto al modello Flow-R.

Questi risultati di accuratezza differenti nei due bacini, tra i due modelli utilizzati, dipendono probabilmente dal fatto che, mentre FLO-2D è un modello fisico, Flow-R è invece a base topografica. Esso quindi riesce a riprodurre meglio il corso del Rio Avenes che ha uno sviluppo più “naturale” rispetto al Rio Tolve. Quest'ultimo infatti presenta molte sistemazioni lungo il suo corso e nella parte che va dall'abitato di Tolve fino alla confluenza con il Rio Vitze ha una larghezza del letto molto ridotta (circa 1 m) e quindi utilizzando un DTM a risoluzione di 2.5 m il risultato che si ottiene non può essere per forza di cose sufficientemente accurato.

Tabella 15: Valori di accuratezza delle simulazioni effettuate sul Rio Avenes e sul Rio Tolve.

ACCURATEZZA	RIO AVENES			RIO TOLVE		
	FlowR SFLM	FlowR PERLA	FLO-2D	FlowR SFLM	FlowR PERLA	FLO-2D
α	0,787	0,611	0,719	0,840	0,221	0,857
β	0,926	0,512	0,827	1,596	0,021	1,259
γ	0,213	0,389	0,285	0,135	0,754	0,118
$\beta+\gamma$	1,139	0,902	1,112	1,731	0,776	1,377
δ	69%	68%	65%	49%	28%	62%

6.5. Classificazione della probabilità di transito risultante da Flow-R

Una volta calibrato il modello e simulato il processo, il passo successivo è rappresentato dalla classificazione delle probabilità di transito fornite in output dal programma per una migliore comprensibilità dei risultati. Flow-R infatti fornisce come risultato di output un raster in cui viene individuata l'area che con assegnata probabilità verrà raggiunta dal debris flow.

In questo raster ogni cella ha un determinato valore di probabilità di transito che può variare tra un minimo settabile manualmente (definito nelle preferenze di Flow-R come limite minimo di suscettibilità) e un massimo di 1. A valori più bassi corrisponde una minore probabilità che la cella venga raggiunta dal debris flow, al contrario con valori più alti, la probabilità di transito è maggiore. Il valore di probabilità delle celle identificate come sorgenti viene assegnato di default dal programma ed è pari a 1.

Seguendo l'esempio di Blahut et al. (2010) si è deciso di rappresentare il raster in ArcMap con una simbologia di tipo classificato (Figura 58). In questo modo la lettura della mappa diventa più immediata e si possono identificare le diverse classi attraverso specifici intervalli di valori. Blahut et al. (2010), per classificare la mappa del pericolo finale, hanno definito 5 classi distinte secondo i valori rappresentati nella Tabella 16.

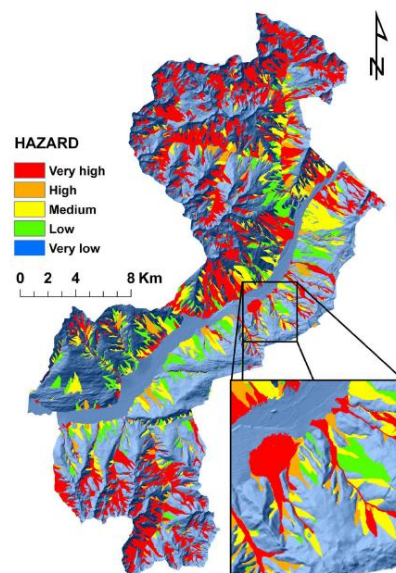


Figura 58: Esempio di mappa del pericolo nei confronti dei debris flow classificata in cinque classi da Blahut et al. (2010).

Tabella 16: Valori di probabilità utilizzati da Blahut et al. (2010) per classificare la mappa del pericolo.

CLASSE DI PERICOLO	PROBABILITÀ DI ESPANSIONE
Molto alta	0.224783
Alta	0.033754
Media	0.006456
Bassa	0.002323
Molto bassa	0.000042

Inizialmente si è provato ad utilizzare gli stessi valori anche per il presente caso studio. Ma per far combaciare meglio le diverse classi di probabilità con le aree di deposito reali, si è scelta infine una classificazione di tipo geometrico, disponibile tra le opzioni di ArcMap. La classificazione risultante è quindi distinta nelle seguenti 5 classi di probabilità: molto bassa, bassa, media, alta e molto alta.

Si è scelta una classificazione di tipo geometrico perché è parsa quella in grado di descrivere meglio il fenomeno, dando maggior risalto alle classi di suscettibilità più elevate. Se fossero state scelte ad esempio delle classi con uguale intervallo, non sarebbe più stato possibile distinguere i diversi valori di probabilità nella zona di deposito, in quanto questi ricadrebbero tutti nella classe di probabilità più bassa. Rappresentare il raster in questo modo inoltre, può essere vista come una rappresentazione approssimata del volume del debris flow, un parametro che non viene considerato in Flow-R. Infatti, secondo Blahut et al. (2010), le celle con una probabilità più elevata corrispondono a quelle che nella realtà saranno raggiunte da un maggiore volume di detriti.

Gli intervalli di valori delle 5 classi utilizzati per tutti e tre gli eventi simulati (Rio Avenes, Rio Tolve e “evento bosco”) sono riportati in Tabella 17.

Tabella 17: Classi di probabilità di transito utilizzate per la rappresentazione delle simulazioni effettuate con Flow-R a scala locale.

CLASSE DI PROBABILITÀ	RANGE
Molto bassa	0.0001 – 0.0025
Bassa	0.0025 – 0.0127
Media	0.0127 – 0.0556
Alta	0.0556 – 0.2366
Molto alta	0.2366 – 1.0000

In Figura 59 è riportata la classificazione della simulazione relativa al Rio Avenes. Le classi più rappresentate sono la bassa (verde) e la media (gialla) mentre, le zone classificate con probabilità molto alta si localizzano quasi esclusivamente lungo il letto del torrente. In grigio viene evidenziata la classe con probabilità inferiore, che infatti si localizza nella parte più esterna del deposito. Questa è la porzione che potrebbe essere raggiunta con minore probabilità da un’eventuale colata detritica. Infine è rappresentata in arancione la classe ad alta probabilità di transito. Essa è localizzata principalmente nella parte più interna dei depositi.

L’andamento seguito dalla classe a media probabilità di transito rispecchia abbastanza bene i depositi mappati dai tecnici della Provincia di Bolzano. Mentre, la maggiore espansione mostrata dalle classi a probabilità più bassa evidenzia quale potrebbe essere potenzialmente l’evento peggiore che potrebbe colpire l’area esaminata.

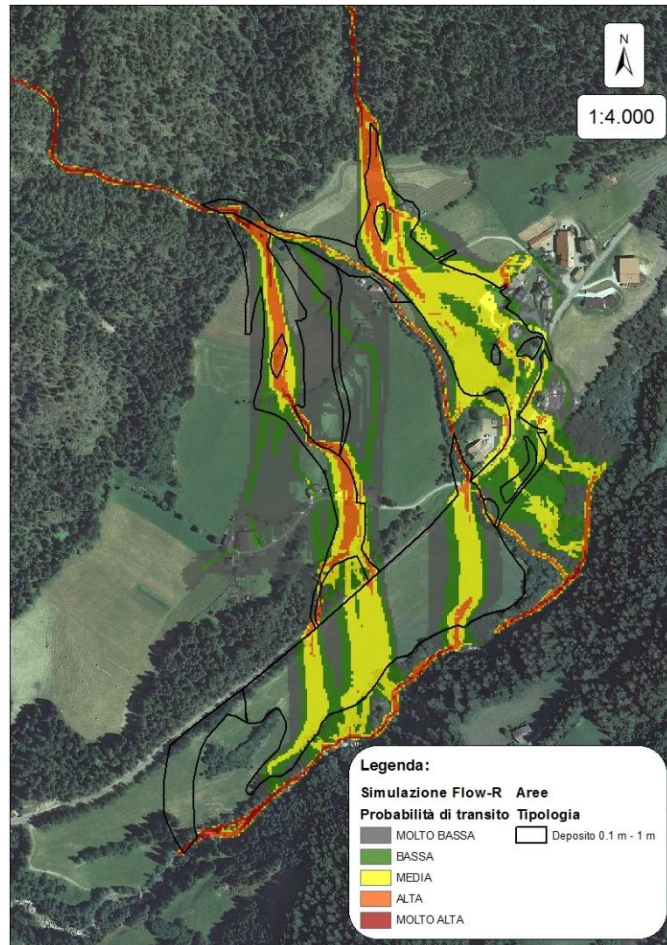


Figura 59: Rappresentazione classificata della simulazione effettuata sul Rio Avenes con il modello Flow-R.

In Figura 60 è riportata invece la simulazione classificata effettuata sul Rio Tolve. Anche in questo caso la classe a probabilità di transito molto alta si localizza solamente in brevi tratti del letto del torrente. È interessante invece notare come ci sia una lingua di deposito con probabilità di transito alta che si concentra proprio nel mezzo dell'area di deposito reale. Questa si sviluppa da un punto di discontinuità topografica posto in corrispondenza di un attraversamento stradale. Anche il modello Flow-R quindi, che si basa su semplici calcoli energetico-topografici, evidenzia come la colata abbia maggiore probabilità di fuoriuscire in destra idrografica rispetto al letto del torrente (che prosegue invece verso la parte sinistra dell'immagine), andando a colpire il gruppo di case sottostante.

Una seconda area di deposito con probabilità di transito da molto bassa a media viene evidenziata al di sotto dell'area di deposito reale. Una parte del flusso quindi segue per un tratto leggermente più lungo il letto del torrente andando a fuoriuscire più a valle.

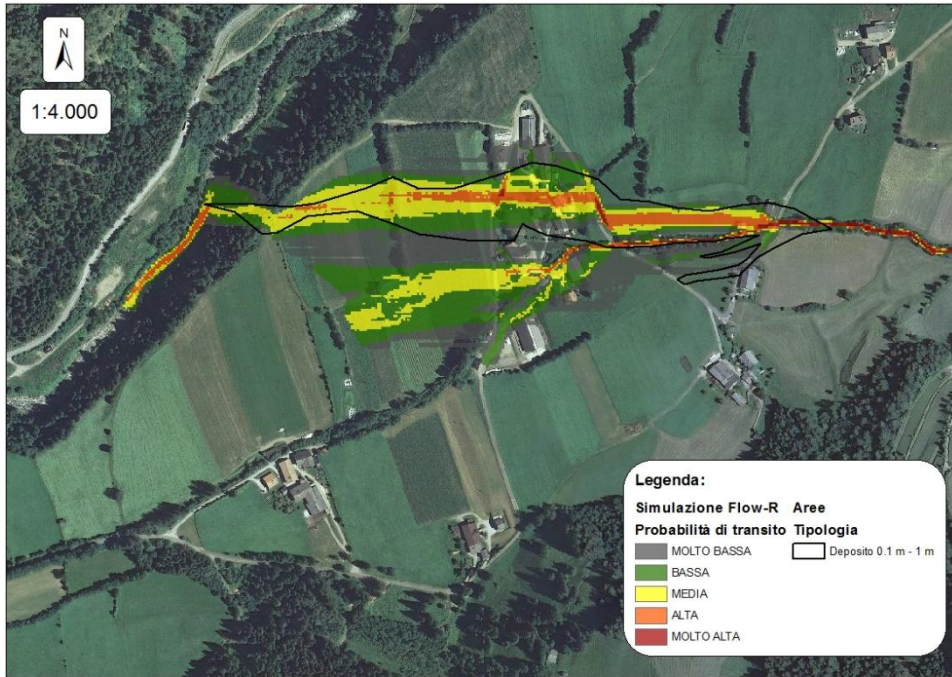


Figura 60: Rappresentazione classificata della simulazione effettuata sul Rio Tolve con il modello Flow-R.

Le due piccole colate sviluppatesi invece vicino alla confluenza del Rio Tolve col Rio Vizze, non hanno interessato nuclei abitativi, ma si sono sviluppate in zone prative e in parte all'interno del bosco. Come si può vedere in Figura 61 le aree con probabilità di transito alta e molto alta corrispondono in maniera discreta con quelle reali. I due depositi assumono la tipica forma a ventaglio evidenziando in un caso una distanza di arresto maggiore rispetto a quella reale (parte sinistra dell'immagine), mentre nell'altro il deposito simulato si arresta prima rispetto a quello reale (parte destra dell'immagine).

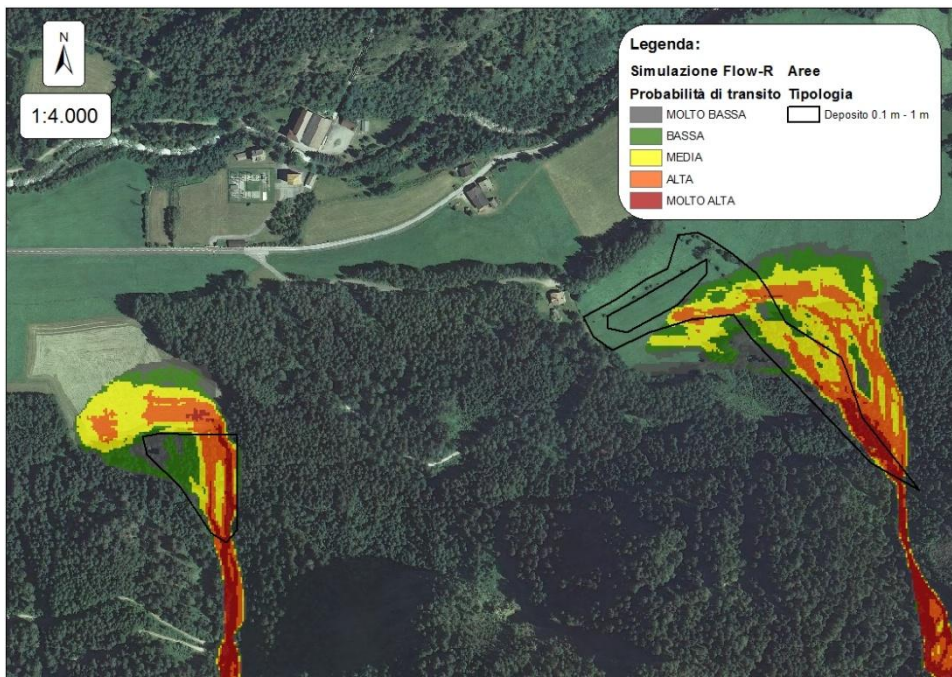


Figura 61: Rappresentazione classificata della simulazione effettuata sull'affluente del Rio Tolve con il modello Flow-R.

7. SIMULAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ A DEBRIS FLOW A SCALA REGIONALE

La combinazione di parametri impiegata per le simulazioni a scala regionale su tutta la valle è stata quella caratterizzata dal maggior grado di accuratezza a scala locale. In questo caso ovviamente il confronto con i depositi reali è passato in secondo piano. Infatti si hanno a disposizione solo quelli delle tre piccole aree usate precedentemente per la calibrazione. Inoltre, non avendo a disposizione le aree sorgente mappate per l'intera valle, tutte le simulazioni sono state fatte senza le aree sorgente predefinite.

I dati input inseriti per il calcolo delle aree sorgente sono stati anche in questo caso: DTM, area drenata e curvatura planare. Siccome l'area esaminata è molto più grande rispetto alle tre precedenti, seguendo il consiglio di Horton et al. (2013), si è deciso di utilizzare principalmente delle mappe con una risoluzione inferiore. Inserire un raster troppo dettagliato significa far aumentare esponenzialmente il tempo impiegato dal processo. Inoltre, con una risoluzione di 2.5 m, i valori di probabilità risultanti vengono fortemente influenzati dal limite minimo di suscettibilità scelto. In ogni caso, per avere un'idea di come cambino i risultati aumentando la risoluzione, si è fatta ugualmente una simulazione con risoluzione di 2.5 m.

Le prime simulazioni sono state eseguite solamente sulla parte medio-bassa della valle, utilizzando le mappe fornite dalla Ripartizione Opere Idrauliche della Provincia di Bolzano. In questo modo infatti è stato possibile in poco tempo eseguire delle simulazioni “di prova” per verificare ancora una volta le differenze risultanti dall'utilizzo dei diversi parametri per il calcolo della runout. Successivamente la simulazione finale è stata fatta utilizzando le mappe corrispondenti all'intera estensione della valle.

Inizialmente sono stati utilizzati dei raster a risoluzione di 30 m, in questo modo il programma riesce in pochi secondi a fornire la mappa di probabilità risultante e si può avere quindi, in pochissimo tempo, un inquadramento generale del fenomeno. Poi si è passati ad una risoluzione di 10 m, che è quella consigliata in numerosi studi (Horton et al., 2011; Horton et al., 2013; Kappes et al., 2010). Sono state fatte diverse simulazioni utilizzando i parametri per il calcolo dell'espansione stabiliti dalla precedente calibrazione a scala locale (versione modificata dell'algoritmo di Holmgren (1994) con esponente pari a 8 e d_h di 1 m) ma, variando la formula utilizzata per il calcolo della distanza di arresto: in alcuni casi è stato utilizzato il modello SFLM (con “travel angle” di 11°), mentre in altri è stato utilizzato il modello di Perla et al. (1980). È stata inoltre verificata la differenza di risultato che si ottiene utilizzando le due diverse curve a disposizione (eventi estremi e eventi rari) per il riconoscimento delle celle sorgenti nel raster di area drenata.

Infine, sebbene il tempo impiegato dal programma per svolgere i calcoli passi da qualche minuto a parecchie ore, è stato effettuato un test con i raster di input a risoluzione di 2.5 m. Infatti Horton et al. (2013) consigliano una risoluzione di 10 m in quanto offre un buon compromesso tra tempi di calcolo e descrizione topografica mentre, celle più piccole non fornirebbero informazioni significative. Però aggiungono anche che, per chi fosse particolarmente interessato al tracciato dei valori di probabilità di transito, si può rendere necessaria una risoluzione maggiore.

La simulazione finale effettuata su tutta la valle è stata messa a confronto con i dati storici relativi agli eventi di debris flow registrati in Val di Vize. Utilizzando il software ArcMap si è verificato se i punti in cui sono stati registrati in passato fenomeni di colate detritiche, siano stati riconosciuti dal programma come suscettibili al fenomeno in questione. Verificando se i tracciati simulati corrispondevano alle zone già interessate realmente da debris flow si è quindi fatta una stima speditiva sulla bontà della simulazione.

Tabella 18: Riassunto delle simulazioni effettuate sull'intera Val di Vize. È evidenziata in grassetto la simulazione effettuata con la risoluzione e con il set di parametri ritenuti migliori.

TEST N°	RISOLUZ.	DATI INPUT	1. SPREADING ALGORITHM			2. ENERGY CALCULATION		
			Directions Algorithm	Parameters	Inertial algorithm	Friction loss function		Energy Limitation
1	30 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (rare events)						
		Plan Curvature						
2	30 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (rare events)						
		Plan Curvature						
3	10 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (extreme events)						

		Plan Curvature						
4	10 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (extreme events)						
		Plan Curvature						
5	10 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (rare events)						
		Plan Curvature						
6	10 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Perla et al. (1980)	default	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (rare events)						
		Plan Curvature						
7	2.5 m	Dtm	Holmgren (1994) modified	x=08 dh=1m	weights default	Travel angle	11°	velocity < 20 m/s
		Flow accumulation (rare events)						
		Plan Curvature						

Le prime due simulazioni (Tabella 18) sono state effettuate inserendo in input i raster di area drenata, DTM e curvatura planare con una risoluzione di 30 m. Come si può notare in Figura 62, i risultati che si ottengono utilizzando i due diversi modelli frizionali (Perla et al. (1980) e SFLM) presentano delle differenze. Si nota subito come la simulazione 2, effettuata con il modello di Perla et al. (1980), evidenzi un'area di deposito molto estesa nella parte inferiore della valle, in corrispondenza del Rio Tulve. Mentre con il modello SFLM il deposito che viene calcolato in quell'area è molto più ridotto. Invece, come si può osservare in Figura 63 (evidenziato un particolare della parte più alta di Figura 62), tutte le altre colate che vengono riconosciute dal programma con il "travel angle" (modello SFLM) danno luogo a depositi caratterizzati da una maggiore distanza di arresto.

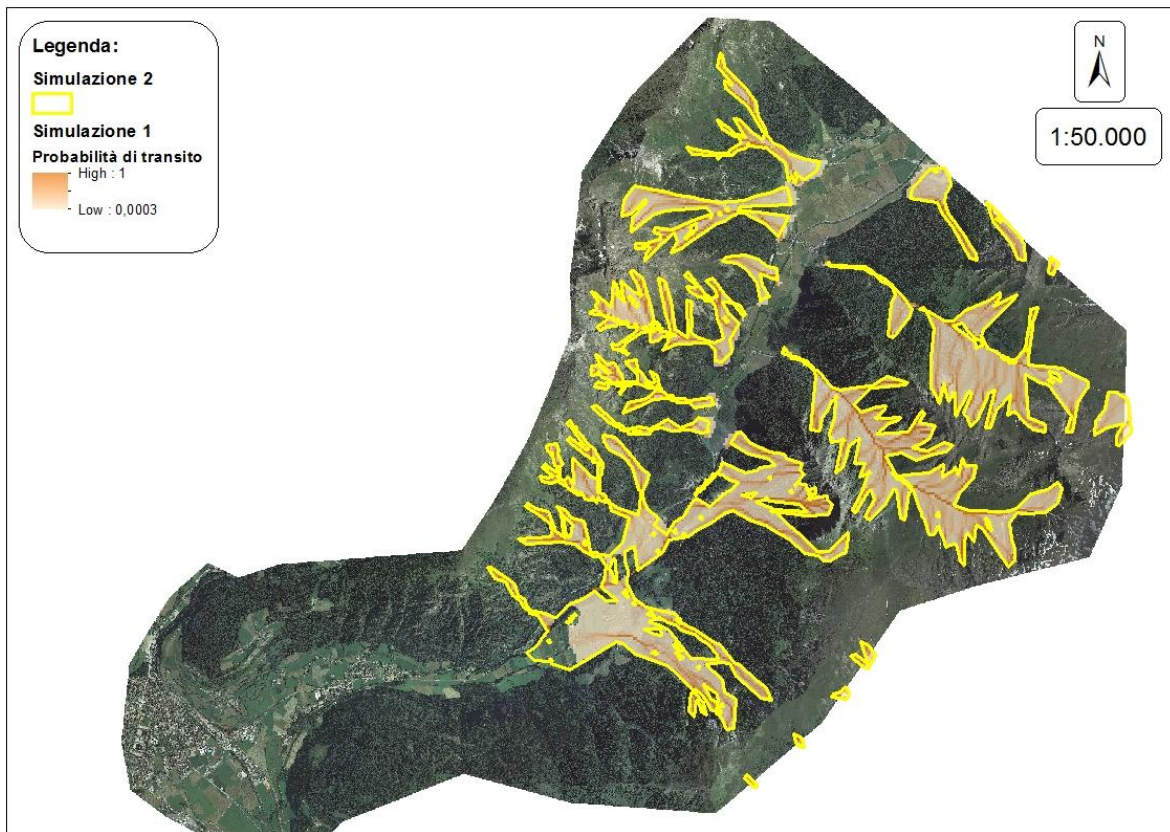


Figura 62: Confronto tra: simulazione 1 rappresentata mediante i diversi valori di probabilità di transito e simulazione 2 di cui vengono evidenziati solamente i margini dei depositi (risoluzione 30 m).

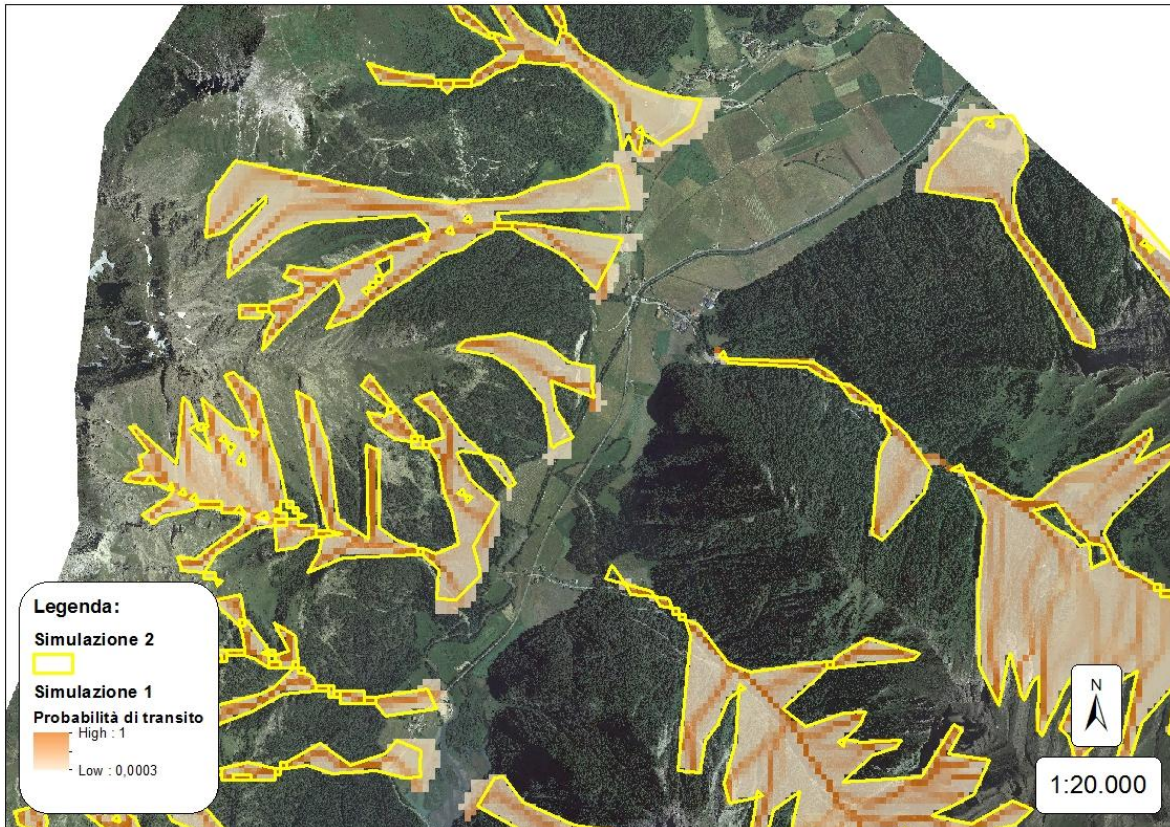


Figura 63: Particolare della parte più alta di Figura 62.

Successivamente si è passati alla risoluzione di 10 m perché è quella che viene consigliata per una simulazione a scala regionale da diversi autori, tra i quali Horton et al., (2013), Blahut et al. (2010) e Kappes et al. (2010). Queste simulazioni sono state eseguite utilizzando sempre i medesimi parametri, cercando inizialmente di capire se fosse più corretto utilizzare la curva degli eventi rari oppure quella degli eventi estremi per il riconoscimento delle celle sorgenti nel raster di area drenata. Si è deciso di utilizzare la prima perché, a parità di aree di deposito risultanti nelle aree di conoide, evidenzia un più basso numero di aree sorgente e sembra adattarsi meglio all'area esaminata. Il risultato che si ottiene con la curva degli eventi estremi infatti, come si nota in Figura 64, evidenzia molte più celle sorgente, in particolare nei versanti esposti a N-O, creando maggiore confusione nella mappa risultante.

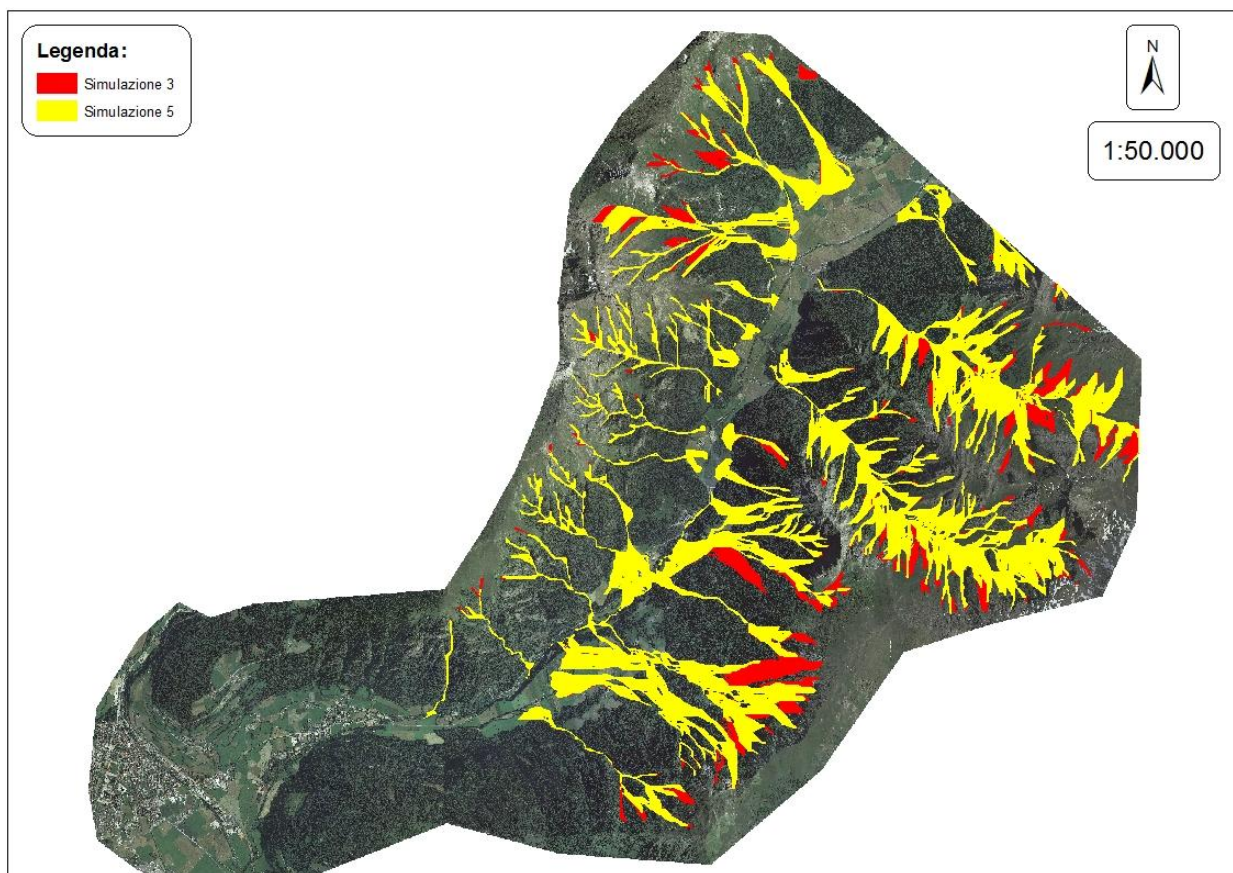


Figura 64: Confronto tra: simulazione 3 effettuata utilizzando il parametro degli eventi estremi e simulazione 5 in cui si è invece utilizzata la curva degli eventi rari.

Poi si è fatto nuovamente un confronto tra le aree di deposito calcolate con il modello Perla et al. (1980) e quelle calcolate invece attraverso il modello SFLM (Figura 65). Come già ipotizzato dalle simulazioni effettuate sui due bacini dei Rii Avenes e Tolve, si è dimostrato più appropriato quest'ultimo perché fornisce delle espansioni e delle distanze di arresto maggiori (Figura 66) e più simili ai casi reali, nei punti in cui si sovrappongono ai depositi mappati dai tecnici della Provincia di Bolzano. È interessante notare come il modello SFLM evidenzi una colata

localizzata a valle del Rio alla Difesa (di fronte al Rio Avenes), che viene completamente ignorata dal modello di Perla et al. (1980). Il deposito di questo potenziale debris flow va ad unirsi a quello del Rio Avenes, andando a ricoprire quasi interamente l'abitato in questione (Figura 65).

L'utilizzo del modello SFLM si dimostra quindi ancora una volta più cautelativo rispetto al modello di Perla et al. (1980), come evidenziato dal fatto che riconosce delle potenziali colate dove quest'ultimo invece le ignora. E più in generale, tutte le colate simulate utilizzando il "travel angle" hanno un'espansione laterale e una distanza di arresto leggermente maggiore e più simile alla realtà, come dimostra il confronto con le tre aree di deposito mappate sui tre bacini analizzati a scala di dettaglio.

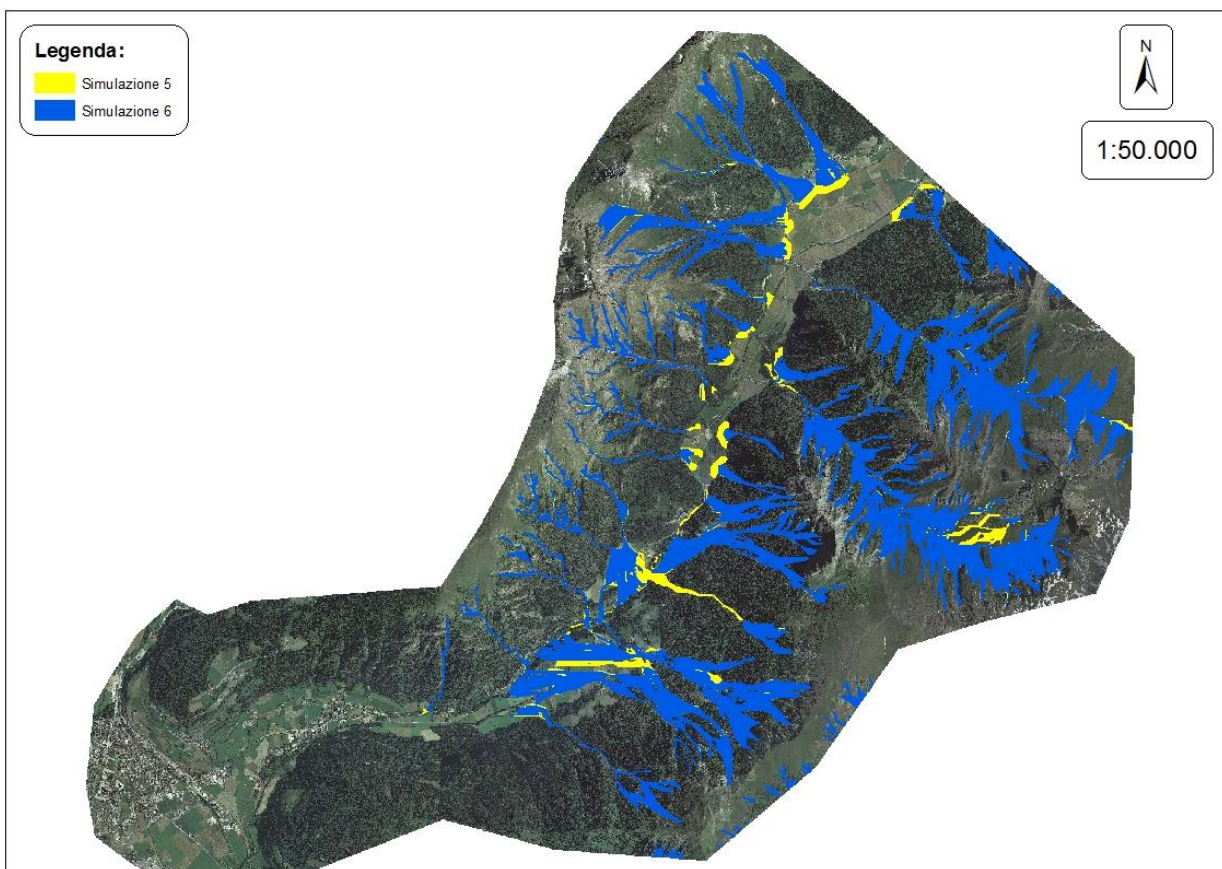


Figura 65: Confronto tra: simulazione 5 effettuata utilizzando il "travel angle" e simulazione 6 effettuata utilizzando il modello di Perla et al. (1980).

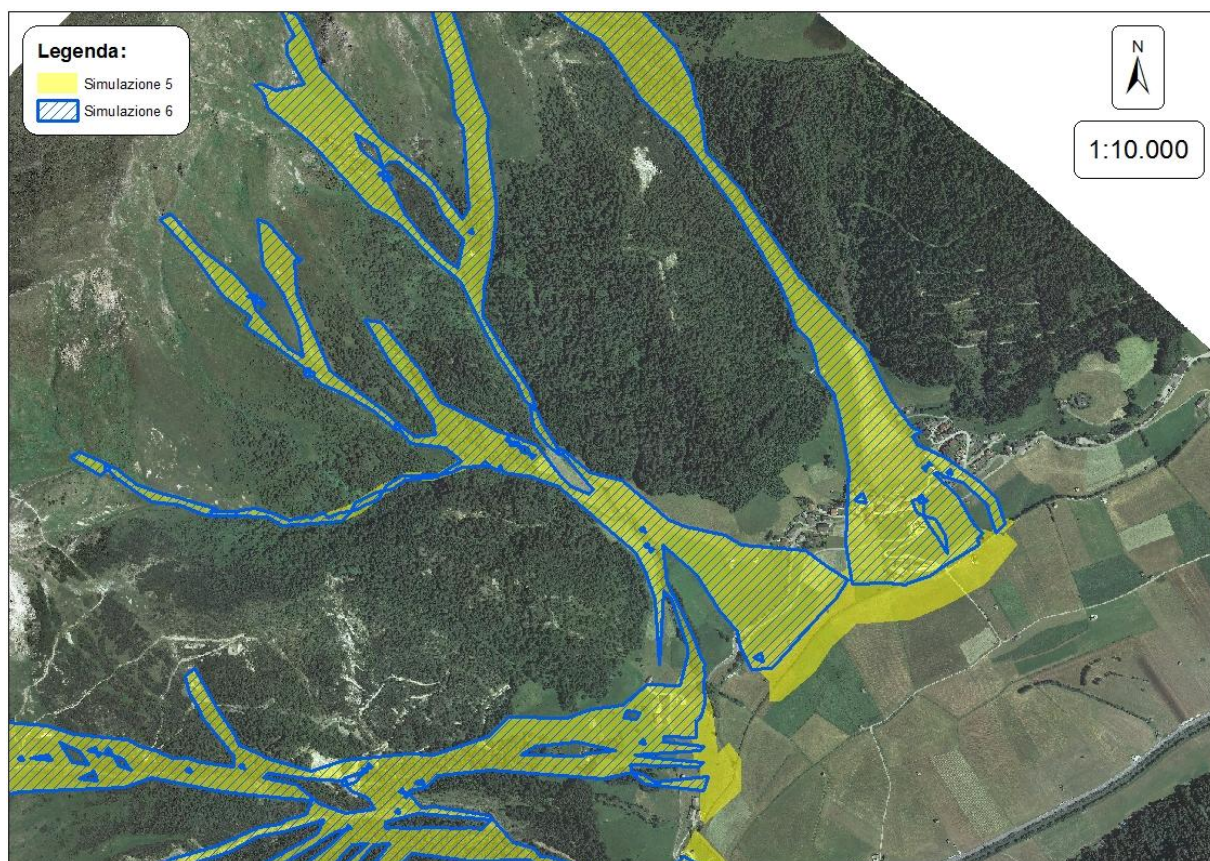


Figura 66: Particolare, tratto da Figura 65, delle potenziali colate lungo il Rio di Caminata e il Rio di Salento.

La simulazione 7 è stata effettuata con dei raster di input a risoluzione di 2.5 m (Tabella 18). I parametri utilizzati per il calcolo della propagazione sono ancora una volta quelli giudicati più idonei dalle simulazioni precedenti (versione modificata di Holmgren (1994) con esponente 8 e rialzo della cella centrale di 1 m e modello SFLM con travel angle di 11° per il calcolo della runout). Come si può vedere in Figura 67, la mappa di probabilità risultante contiene molte più celle sorgente lungo i pendii. Essi risultano quasi completamente ricoperti da potenziali colate detritiche, rendendo di conseguenza meno chiara la distinzione delle aree che con maggiore probabilità potranno sviluppare dei debris flow.

Poiché le aree di deposito che si evidenziano in corrispondenza dei conoidi sono invece molto simili a quelle ottenute dalla precedente simulazione con risoluzione di 10 m, si è preferito effettuare la simulazione finale sull'intera Val di Vizze utilizzando quest'ultima la risoluzione. Infatti il tempo impiegato dal programma per il calcolo aumenta esponenzialmente all'aumentare della risoluzione delle mappe: con celle a grandezza di 2.5×2.5 , sono necessarie circa 10 ore per ottenere il risultato finale sulla porzione bassa della valle. E, siccome per la redazione della mappa finale di suscettibilità viene presa in considerazione anche la porzione di valle mancante, cioè quella situata a N-E, questo tempo sarebbe più che raddoppiato vista l'estensione della parte mancante non considerata finora. Con la risoluzione a 10 m invece, si ottiene un buon risultato

finale di probabilità di transito e nello stesso tempo il tempo impiegato dal programma per la simulazione è quantificabile in minuti non in ore.

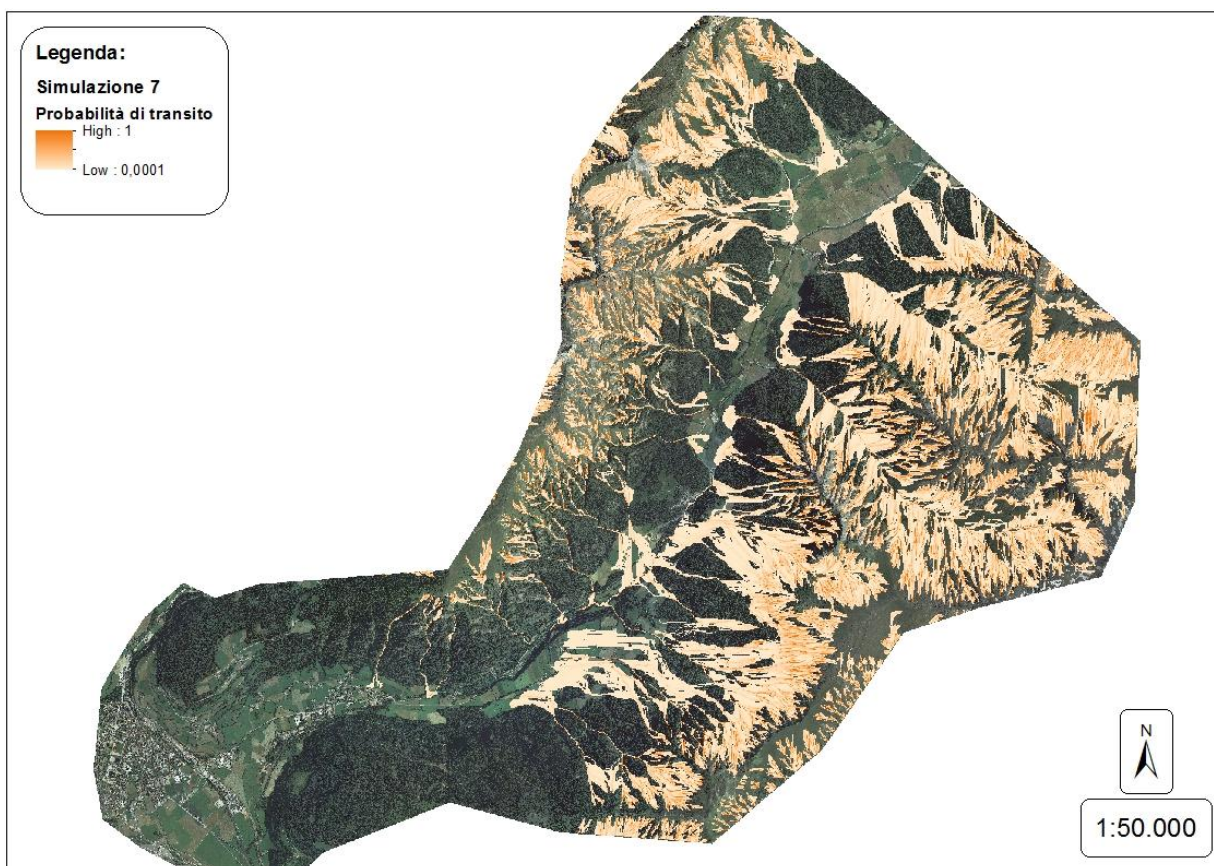


Figura 67: Mappa di probabilità di transito, sviluppata per la Val di Vizze, con risoluzione di 2.5 m.

In Figura 68 è riportata la mappa di suscettibilità a debris flow per l'intera Val di Vizze, con risoluzione di 10 m. Questa simulazione finale è stata ottenuta settando gli stessi parametri utilizzati per la Simulazione 5, cioè quella che ha fornito il migliore risultato sulla porzione medio-bassa della valle. Come era stato fatto precedentemente con le mappe di suscettibilità finali dei tre bacini di studio a scala locale, anche in questo caso si è preferito rappresentare la mappa attraverso una classificazione di tipo geometrico. In questo modo è possibile distinguere la probabilità di transito dei potenziali debris flow secondo le 5 classi che hanno rispettivamente probabilità: molto bassa, bassa, media, alta e molto alta. Per verificare la bontà di questa simulazione è stato fatto un confronto con gli eventi storici da colata detritica registrati in Val di Vizze dalla Provincia di Bolzano. I dati a disposizione non sono molti, infatti comprendono solamente nove eventi (due dei quali hanno interessato per due volte lo stesso torrente) che si sono verificati tra il 1999 e il 2005. Comunque dal confronto si nota come il modello Flow-R abbia simulato delle potenziali colate detritiche in corrispondenza di tutti i punti in cui è stato registrato un evento reale passato.

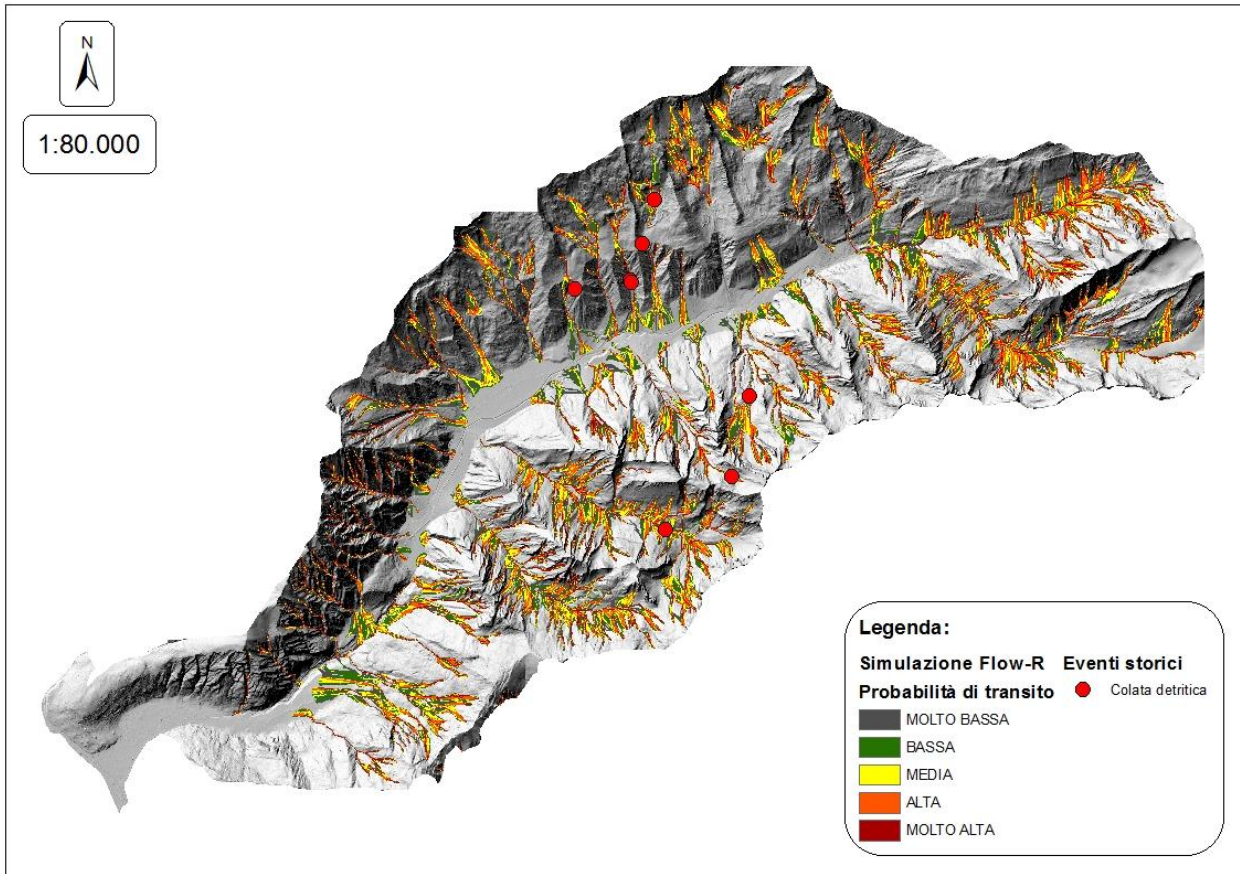


Figura 68: Simulazione effettuata su tutta la Val di Vizze, rappresentata secondo 5 diverse classi di probabilità di transito.

Analizzando nel dettaglio le aree di conoide interessate da potenziali colate detritiche, si nota come quasi tutti gli abitati presenti lungo la valle siano almeno parzialmente suscettibili a debris flow. Partendo dalla porzione nord della valle, come si può vedere in Figura 69, in corrispondenza dell'abitato di Quinzo il modello ha prodotto due distinti debris flow che si sviluppano in una porzione di versante in cui non c'è idrografia digitalizzata. La località in questione è interessata interamente dal potenziale deposito, che la ricopre con probabilità di transito medio-alta.

Spostandosi lungo la valle verso S-O, seguendo il corso del Rio Vizze, si incontra l'abitato di San Giacomo (Figura 71). Questo

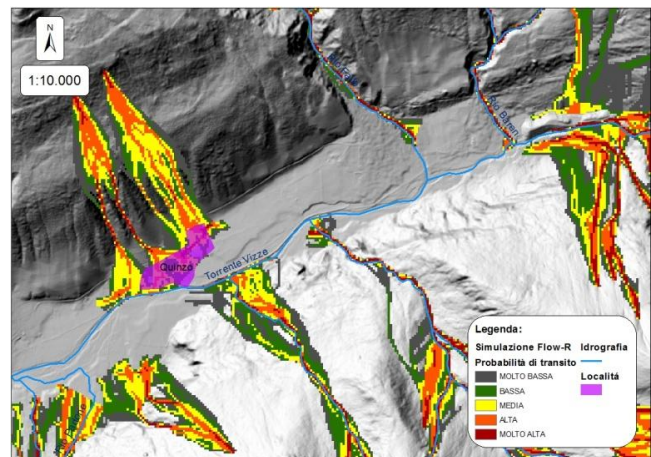


Figura 69: Particolare della Valle in corrispondenza dell'abitato di Quinzo.

viene interessato solo parzialmente da due potenziali debris flow: uno si sviluppa sul versante sud della valle, lungo il Rio dei Canopi, mentre l'altro ha origine sul versante nord, e interessa nuovamente un impluvio non evidenziato nell'idrografia digitalizzata. Anche il piccolo abitato di

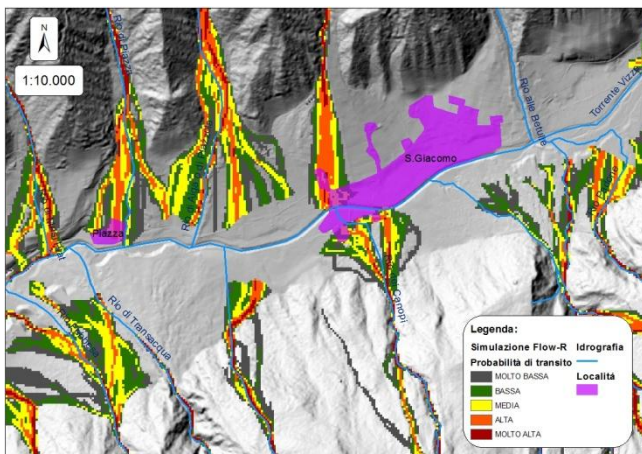


Figura 71: Particolare della Valle in corrispondenza degli abitati di San Giacomo e di Piazza.

Piazza risulta suscettibile ad una potenziale colata detritica. Questa si origina dall'omonimo Rio di Piazza e va ad interessare la località con una probabilità di transito medio-alta.

Spostandosi ancora verso S-O, lungo la valle si incontrano altre due località: Riva e Fosse (Figura 70). In questa porzione della valle, la simulazione effettuata con il modello Flow-R mette in evidenza diverse

potenziali colate detritiche. Nel versante sud si originano dei debris flow lungo il Rio di Febbesa ed altri due impluvi non digitalizzati. Ma sono le potenziali colate che si sviluppano sul versante nord, quelle che vanno ad interessare i due abitati presenti. La località Riva viene colpita da un lobo laterale di una colata che si sviluppa lungo il Rio di Riva. La probabilità di transito in corrispondenza dell'abitato è comunque da molto bassa a bassa. L'abitato di Fosse invece, è interessato da un potenziale debris flow che ha origine lungo il Rio di Fosse e il cui deposito ricopre interamente l'abitato in questione.

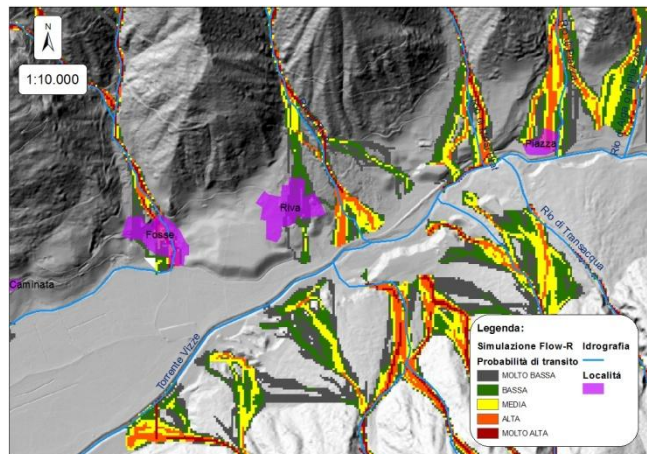


Figura 70: Particolare della Valle in corrispondenza degli abitati di Riva e Fosse.

La porzione centrale del paese viene raggiunta dalla potenziale colata con una probabilità di transito molto alta.

Si possono notare altre due potenziali colate interessanti nella parte medio-alta della valle. Infatti all'altezza dell'abitato di Caminata si evidenziano due potenziali debris flow che, se avvenissero realmente, potrebbero essere pericolosi per l'abitato in questione (Figura 72). Una si sviluppa proprio lungo il Rio di Caminata, mentre

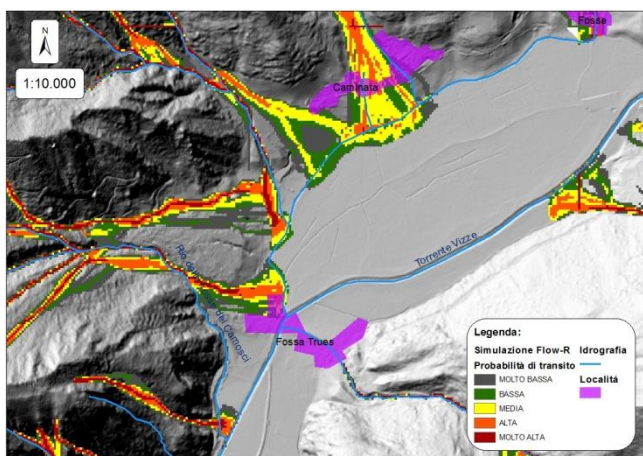


Figura 72: Particolare della Valle in corrispondenza degli abitati di Caminata e Fossa Trues.

l'altra si localizza leggermente più a valle, lungo il Rio di Salento. Insieme queste due ricoprono

quasi completamente il paesino sottostante. L'abitato di Fossa Trues invece, posto poco più a valle, viene interessato solo marginalmente da una colata che si sviluppa lungo il Rio delle Fosse dei Camosci, situato nel versante nord. La simulazione effettuata con Flow-R invece, non evidenzia nessun potenziale deposito allo sbocco del Rio Montegrande, in corrispondenza della parte più a sud dell'abitato di Fossa Trues. Il torrente in questione, assieme al vicino Rio di Borgo (posto a S-O rispetto al primo) risulta molto evidente nella porzione centrale di Figura 68.

Il primo sbocca nel Rio Vizze proprio in corrispondenza di Fossa Trues mentre, il secondo raggiunge la piana sottostante in corrispondenza dell'abitato di Borgone (Figura 73). Entrambi scorrono in due piccole vallecole laterali prima di ricongiungersi al torrente principale e lungo il loro corso si sviluppano numerose potenziali colate con probabilità di transito medio-alta. Queste si originano dagli impluvi situati nei versanti

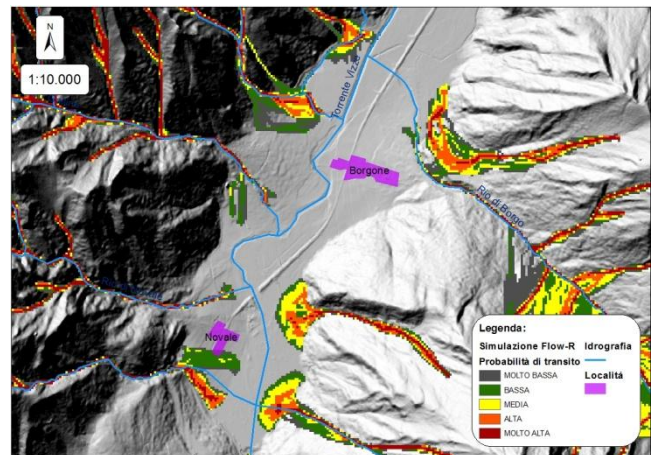


Figura 73: Particolare della Valle in corrispondenza degli abitati di Borgone e Novale.

lateralmente di Cima Grava e del Picco di Croce e interessano solo la porzione medio-alta del torrente, senza raggiungere i due abitati più a valle. Durante l'evento temporalesco dell'agosto 2012 però, dal Rio di Montegrande si è originata un'importante colata detritica che ha provocato numerosi danni, riuscendo a superare una briglia a fessura posta lungo il torrente. Si è ipotizzato che il modello Flow-R non riesca a simulare la propagazione della colata fino all'abitato di Fossa Trues a causa della forma anomala del bacino in questione. Esso infatti ha un'estensione molto maggiore rispetto a quella degli altri torrenti presenti in Val di Vizze e proprio questa notevole estensione potrebbe rendere difficile per il modello sviluppare una corretta simulazione della colata.

Anche l'abitato di Novale si trova nel mirino di un potenziale debris flow, ma viene raggiunto solamente da un lobo laterale con bassa probabilità di transito (Figura 73). Nel versante opposto a questo paese si sviluppano due colate che interessano la zona in cui è situata la diga di Vizze. Esse formano due depositi dalla caratteristica forma a ventaglio, che però colpiscono un'area non interessata dalla presenza umana.

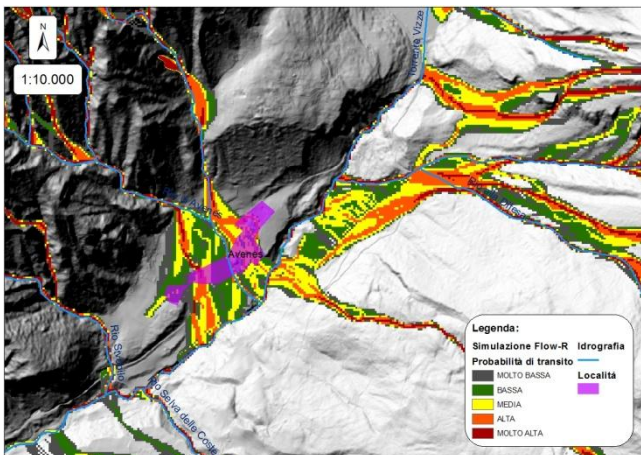


Figura 74: Particolare della Valle in corrispondenza dell'abitato di Avenes.

Seguendo ancora il Rio Vizze lungo il suo percorso verso l'Isarco, si incontra a questo punto l'abitato di Avenes. Questa è una delle zone a maggiore suscettibilità. I potenziali debris flow che la interessano infatti, non si sviluppano solo dal Rio Avenes (come avvenuto nell'agosto 2012), ma anche dal Rio alla Difesa e da un impluvio non digitalizzato, entrambi localizzati sul versante opposto al Rio Avenes. L'abitato

viene raggiunto quasi interamente dalle potenziali colate con una probabilità di transito da bassa a molto alta.

L'altra zona ad alto rischio è quella situata nei pressi dell'abitato di Tolve (Figura 75). Qui infatti confluiscono due potenziali colate che si sviluppano sul versante sud della valle. Una interessa proprio il Rio Tolve (dove è stato mappato l'evento del 2012), mentre l'altra si sviluppa nuovamente su un impluvio non digitalizzato che si trova tra il Rio Tolve e il Rio Selva delle Coste. La

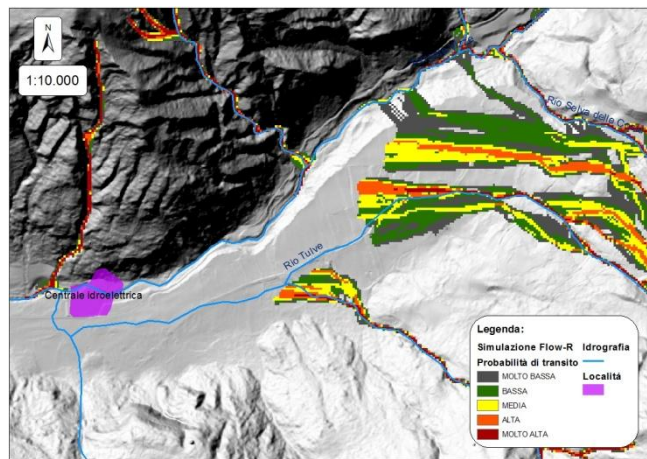


Figura 75: Particolare della Valle in corrispondenza delle località Tolve e "Centrale idroelettrica".

probabilità di transito più elevata si localizza proprio in corrispondenza dell'abitato di Tolve, lungo l'area di deposito mappata dai tecnici della Provincia di Bolzano.

Subito a valle del Rio Tolve, si trova il Rio Senago da cui si sviluppa un piccolo debris flow che va a lambire con una probabilità medio-bassa un gruppetto di case poste vicino alla confluenza col Rio Vizze. Infine, l'ultima colata potenzialmente pericolosa riconosciuta dal programma, interessa un altro piccolo impluvio non segnalato tra i corsi d'acqua digitalizzati. Esso si trova sul versante nord, nei pressi della centrale idroelettrica. Il deposito che si forma non è molto esteso, tanto che non arriva a toccare gli edifici della centrale, però ha una probabilità di transito molto elevata per cui potrebbe ugualmente creare qualche danno.

La colata sviluppata in bosco, lungo l'affluente del Rio Tolve nell'agosto 2012, localizzata proprio dalla parte opposta alla centrale idroelettrica, non viene riconosciuta da Flow-R.

8. APPLICAZIONE DEL MODELLO REGIONALE E TRASPOSIZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ IN PERICOLOSITÀ

8.1. Redazione della Carta del pericolo con il modello FLO-2D

Attraverso uno studio di dettaglio come quello effettuato utilizzando il modello FLO-2D per i bacini del Rio Avenes e del Rio Tolve, si può procedere, partendo dalla mappa di suscettibilità, alla redazione della carta del pericolo.

I risultati delle simulazioni effettuate con il modello FLO-2D, a scala di dettaglio sui due bacini del Rio Avenes e del Rio Tolve, sono quindi stati utilizzati per la redazione di due carte del pericolo, seguendo le normative in vigore per la Provincia Autonoma di Bolzano.

A questo scopo i dati riguardanti la velocità e la profondità del flusso di ogni cella, risultanti dal modello FLO-2D, sono stati analizzati attraverso il software ArcMap. In base ai valori osservati sull'area di deposito in conoide sono state distinte le 4 classi di pericolo stabilite dalla Normativa della Provincia di Bolzano. Poiché la zona di deposito simulata con il modello FLO-2D è stata calcolata attraverso i dati riguardanti l'evento del 4 agosto 2012, che si è stimato avere un tempo di ritorno tra i 200 e i 300 anni, è stato considerato solamente lo scenario riguardante il tempo di ritorno compreso tra 100 e 300 anni, cioè la colonna posizionata nella parte destra della matrice in Figura 9. Le aree caratterizzate da pericolo molto elevato (colore rosso) sono state fatte corrispondere alle zone vicine al canale collettore e a quelle in cui sono risultati i depositi maggiori; la classe con livello di pericolo elevato (colore blu) invece, si localizza ai margini del deposito simulato con FLO-2D e caratterizza le zone in cui l'intensità dell'evento è inferiore rispetto alla classe precedente. Infine è stata evidenziata in grigio l'area di conoide non raggiunta dalla propagazione simulata con FLO-2D, ma che potrebbe essere interessata da eventi con tempo di ritorno molto elevato.

Come si può notare in Figura 76, ci sono numerosi nuclei abitativi che ricadono all'interno delle zone caratterizzate da pericolo elevato e molto elevato. In particolare, in corrispondenza dell'affluente del Rio Avenes, posto nella parte destra di Figura 76, le tre abitazioni poste appena sotto l'apice del conoide si trovano in piena zona rossa. Proprio qui sono stati registrati i danni maggiori in seguito all'evento del 4 agosto 2012.

Anche in corrispondenza dell'abitato di Tolve (Figura 77) una gran parte dei nuclei abitativi presenti ricade all'interno delle due classi caratterizzate dal livello di pericolosità più elevato.

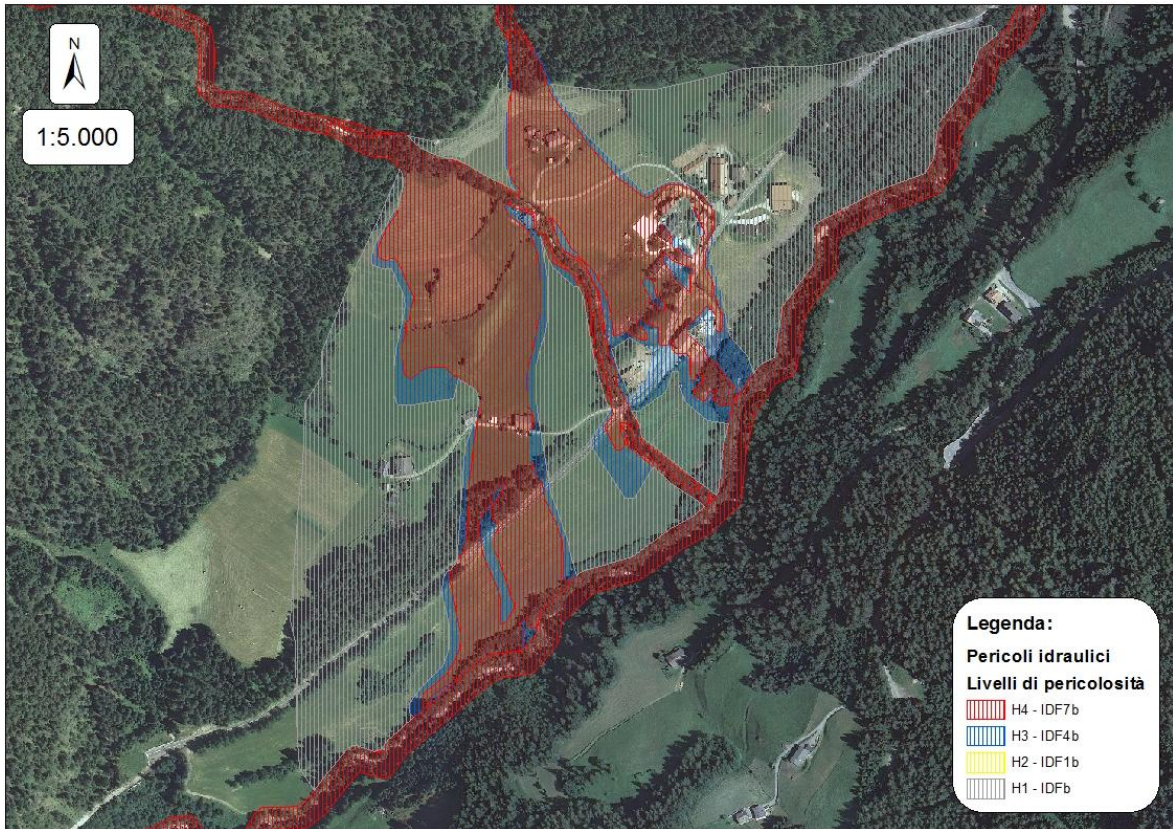


Figura 76: Carta del pericolo del Rio Avenes, secondo lo scenario caratterizzato da tempo di ritorno compreso tra 100 e 300 anni (simulazione FLO-2D).

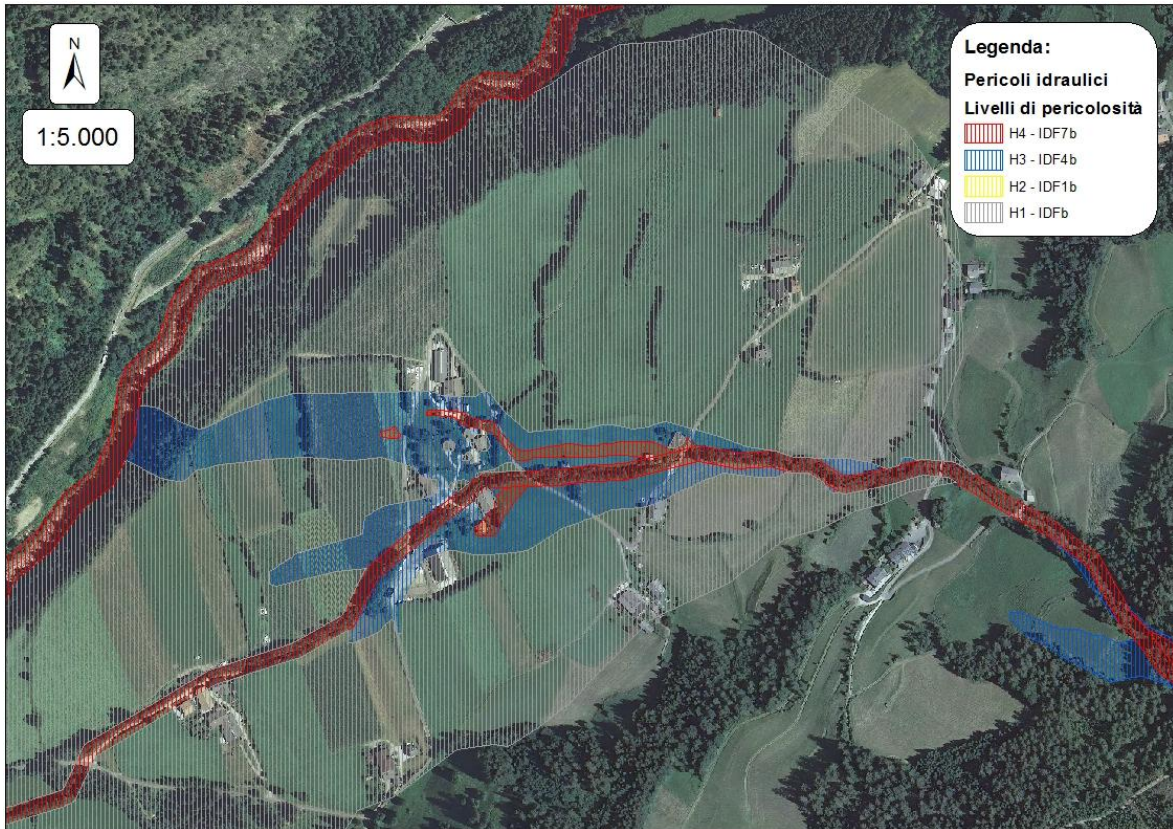


Figura 77: Carta del pericolo del Rio Tolve, secondo lo scenario caratterizzato da tempo di ritorno compreso tra 100 e 300 anni (simulazione FLO-2D).

8.2. Trasposizione dei valori di suscettibilità in classi del pericolo

Infine è stato fatto un tentativo di trasposizione dei valori di probabilità di transito risultanti da Flow-R, sull'intera Val di Vizze, in classi di pericolosità. A questo scopo sono stati confrontati i valori di probabilità di transito con quelli delle diverse classi di pericolo risultanti sui due abitati di Avenes e Tolve (le uniche due zone in cui è stato possibile realizzare una carta del pericolo seguendo la Normativa della Provincia Autonoma di Bolzano). Quindi, in base ai valori rilevati da questo confronto, sono state distinte due classi di potenziale pericolo per l'intera vallata (Tabella 19). Queste corrispondono alle due classi di pericolo più elevate presenti nella Normativa della Provincia Autonoma di Bolzano: pericolo molto elevato (colore rosso) e pericolo elevato (colore blu). In Figura 78, Figura 79 e Figura 80 sono riportate le mappe di suscettibilità della Val di Vizze risultanti dalla trasposizione.

Tabella 19: Range delle due classi di suscettibilità ottenute dalla trasposizione dei valori di probabilità di transito in pericolosità.

CLASSE DI SUSCETTIBILITÀ	RANGE
Molto elevata	0.00 – 0.02
Elevata	0.02 – 1.00

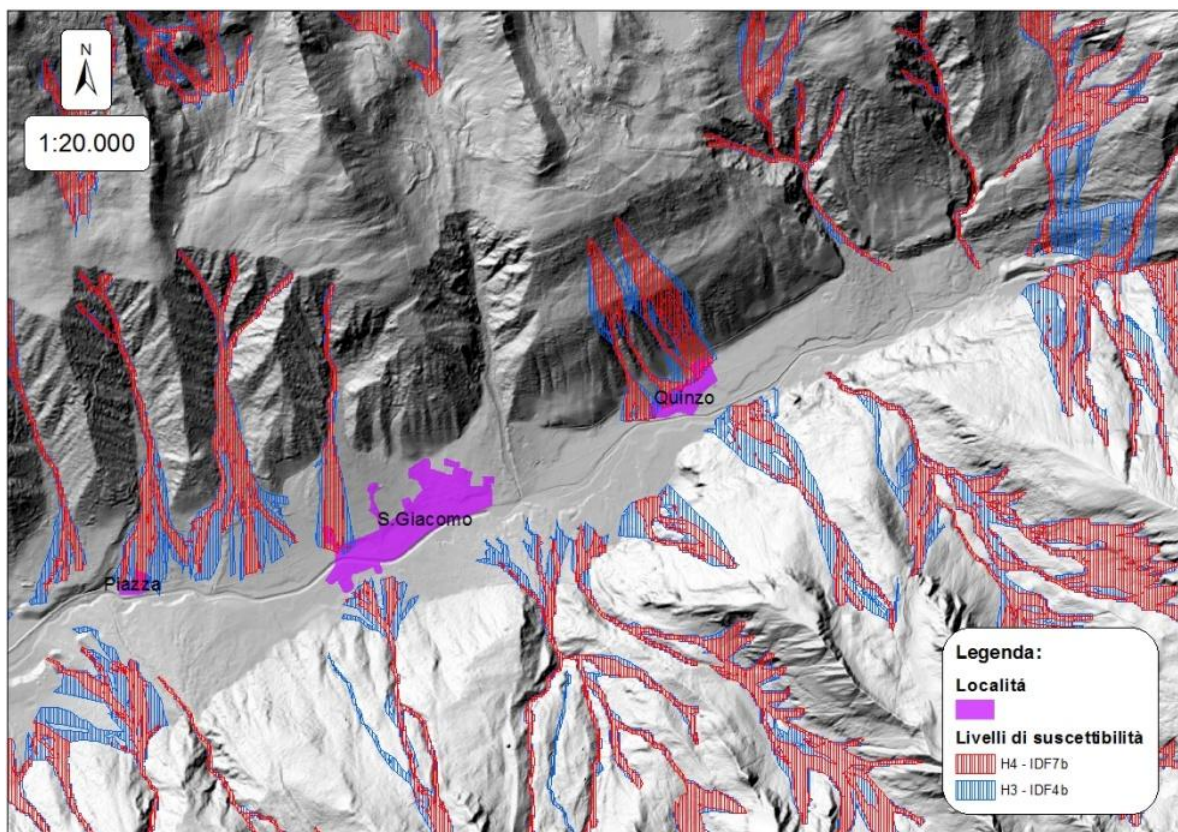


Figura 78: Carta di suscettibilità dell'alta Val di Vizze, rappresentata secondo le classi del pericolo stabilite dalla Normativa provinciale di Bolzano.

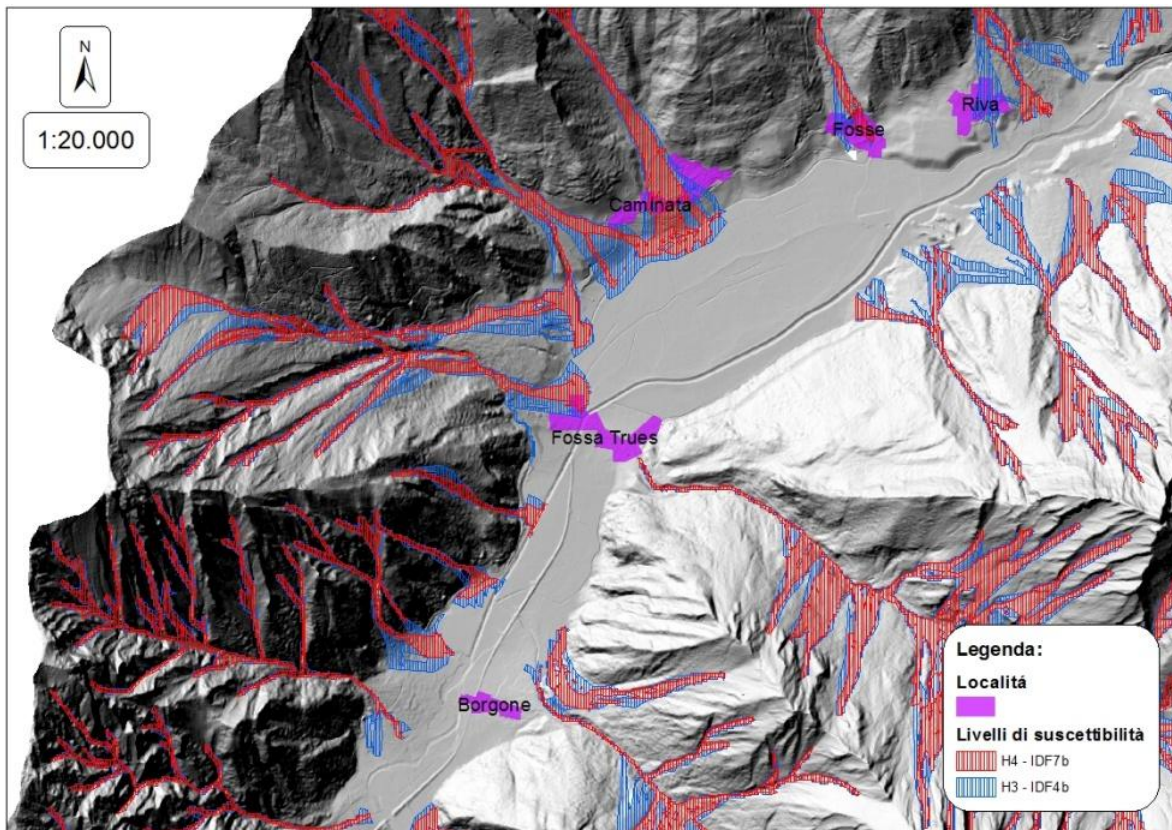


Figura 79: Carta di suscettibilità della media Val di Vizze, rappresentata secondo le classi del pericolo stabilite dalla Normativa provinciale di Bolzano.

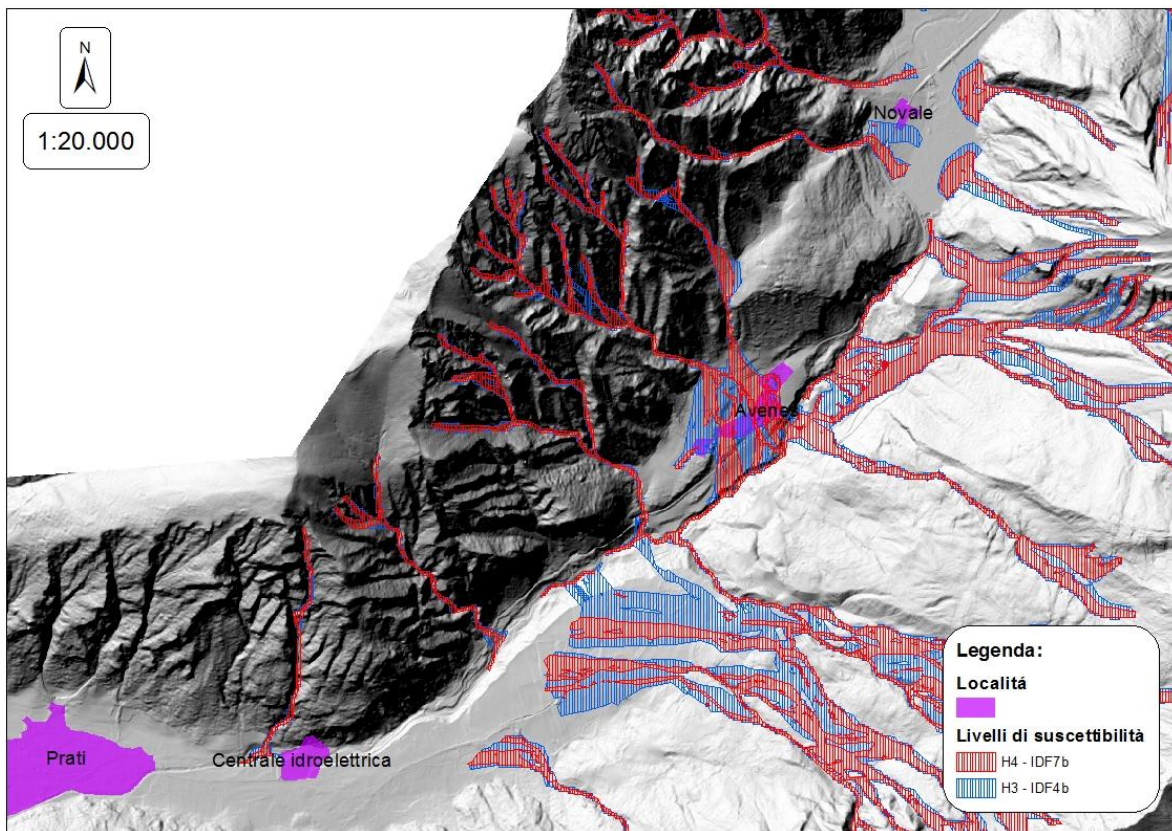


Figura 80: Carta di suscettibilità della bassa Val di Vizze, rappresentata secondo le classi del pericolo stabilite dalla Normativa provinciale di Bolzano.

Le mappe di suscettibilità risultanti dall'applicazione del modello Flow-R all'intera Val di Vizze devono essere prese come un primo strumento di analisi in funzione della successiva redazione della Carta del Pericolo finale. I valori di suscettibilità risultanti da questa simulazione infatti, forniscono una buona visione d'insieme di quali siano le aree soggette a maggiore pericolo potenziale. In queste aree si rende necessario in seguito eseguire uno studio di dettaglio, utilizzando dei modelli a scala locale che permettano di considerare un range più ampio di parametri, in modo da identificare in maniera più chiara l'intensità del fenomeno simulato prendendo in considerazione anche parametri quali la velocità del flusso e gli spessori di deposito in conoide.

Per la redazione di una carta del pericolo quindi, sarebbe consigliabile nelle fasi preliminari di analisi affiancare ai consueti studi di campo e sugli eventi passati, anche l'analisi energetico-topografica. Questa infatti permette di identificare tutte quelle aree caratterizzate da un certo livello di suscettibilità, in cui non siano stati registrati in passato eventi di debris flow.

CONCLUSIONI

Il programma Flow-R si è dimostrato un utile strumento per lo studio della pericolosità nei confronti delle colate detritiche a scala regionale. Esso infatti permette di individuare in tempi rapidi e con pochi dati input facilmente acquisibili quali siano le aree più suscettibili al fenomeno naturale considerato.

Per individuare i parametri di modellazione da settare nel programma, più adatti per l'area della Val di Vizze, sono state fatte delle simulazioni su tre piccoli bacini (Rio Avenes, Rio Tolve e "evento bosco") interessati dall'evento del 4 agosto 2012, che ha innescato numerose colate detritiche in tutta la vallata. Calibrando il modello a scala locale si è potuta affinare la scelta dei parametri in base alle caratteristiche specifiche dell'area studiata, in modo da avvicinarsi il più possibile al comportamento reale seguito dal fenomeno. In questa prima fase di calibrazione a scala di dettaglio l'algoritmo di dispersione più adatto a simulare gli eventi di colata detritica è risultato la versione modificata di Holmgren (1994) con valore dell'esponente (x) pari a 8 e rialzo della cella centrale (dh) di 1 m. Si è preferito quindi un esponente x con un valore più elevato rispetto a quello consigliato dagli studi di Horton et al. (2008) e Horton et al. (2013), che suggerivano invece un valore dell'esponente x compreso tra 4 e 6 per la modellazione delle colate detritiche. La legge di attrito per il calcolo energetico che ha fornito i risultati più accurati è risultata il modello SFLM con un travel angle di 11° . Questo infatti, rispetto al modello di Perla et al. (1980), evidenzia un numero maggiore di tracciati di debris flow e inoltre produce distanze di arresto più lunghe e più consone alla tipologia di fenomeno osservato.

L'utilizzo delle aree sorgente predefinite, come input per la simulazione, ha fornito mediamente dei risultati migliori rispetto a quelli ottenuti attraverso l'individuazione automatica da parte di Flow-R, partendo dai raster di area drenata, curvatura planare e modello digitale del terreno. Sia nel bacino del Rio Tolve sia nel bacino del suo affluente ("evento bosco") infatti, le colate simulate senza le aree sorgente predefinite non rispecchiano perfettamente l'andamento dei depositi reali mappati in campo. Solamente nel bacino del Rio Avenes la corrispondenza tra le due simulazioni è stata perfetta.

Complessivamente i risultati ottenuti nei tre bacini campione rispecchiano in maniera buona i depositi reali mappati in campo in seguito all'evento dell'agosto 2012. In particolare l'accuratezza di previsione delle aree potenzialmente inondabili, ottenuta con l'utilizzo del modello SFLM sul bacino del Rio Avenes, è risultata perfino più elevata rispetto a quella ricavata mediante l'applicazione del modello FLO-2D. Inoltre a scala di dettaglio, il programma

Flow-R ha evidenziato tempi rapidi di simulazione anche con mappe a risoluzione molto dettagliata (2.5 m).

Il sistema di rappresentazione del raster di probabilità di transito risultante da Flow-R, attraverso una simbologia di tipo classificato (classificazione geometrica) ha fornito una migliore lettura della mappa di suscettibilità risultante, mettendo maggiormente in evidenza le differenze tra i valori di probabilità.

Per quanto riguarda FLO-2D, ovvero il secondo modello utilizzato per le simulazioni a scala locale, la formula più adatta per la creazione dell'idrogramma di piena da inserire come input per la simulazione è risultata quella di Mizuyama (1992), sviluppata in Giappone per le colate detritiche a matrice fangosa. I risultati ottenuti dall'applicazione di questo modello sono caratterizzati da un'accuratezza di previsione delle aree di deposito molto simile a quella ottenuta con il modello Flow-R nel bacino del Rio Avenes. Mentre nel bacino del Rio Tolve la simulazione di FLO-2D ha prodotto un risultato più buono. In quest'ultimo caso però, osservando nel dettaglio i tracciati delle simulazioni effettuate con i due diversi modelli si può notare come anche Flow-R, che si basa su semplici calcoli energetico-topografici, segua la specifica direzione del deposito reale mappato in conoide, che fuoriesce in destra idrografica rispetto al corso del torrente, andando a propagarsi proprio sopra l'abitato di Tolve.

Per quanto riguarda invece lo studio di suscettibilità a scala regionale che ha interessato l'intera Val di Vizze, si è evidenziata la buona capacità del programma Flow-R di simulare le propagazioni ad ampia scala utilizzando pochi dati di input, in seguito alla rapida fase di calibrazione. La risoluzione ottimale si è dimostrata pari a 10 m. Questa infatti è un buon compromesso tra il tempo di simulazione e l'influenza della morfologia, come dimostrato anche da altri studi (Horton et al., 2013; Blahut et al., 2010; Kappes et al., 2011).

Le piogge del 4 agosto 2012 hanno prodotto due eventi che il modello non è riuscito a simulare: l'"evento bosco" a valle del Rio Tolve e il conoide del Rio Montegrando. Nel primo caso si è ipotizzato che il problema non sia dovuto al programma ma al DTM utilizzato. Questo infatti è tagliato proprio in corrispondenza della parte alta dei versanti, posti sopra al conoide considerato, e per questo probabilmente il programma non riesce a riconoscere automaticamente le aree sorgente presenti. Nel secondo caso invece sembra più un problema di scala. Il Rio Montegrando infatti scorre all'interno di un bacino con una notevole estensione, rispetto agli altri presenti nella valle, e Flow-R non sembra in grado di simulare correttamente il fenomeno: esso evidenzia numerose propagazioni nella porzione interna del bacino, ma non produce alcun deposito sul

conoide allo sbocco nella piana del Rio Vizze (fenomeno reale più simile ad un debris flood che a un debris flow).

In generale il modello Flow-R si è dimostrato un ottimo strumento che può essere utilizzato nelle fasi preliminari di uno studio della pericolosità. Esso infatti attraverso un'analisi energetico-topografica riconosce tutte le aree maggiormente suscettibili ai debris flow. Per questo sulla carta di suscettibilità della Val di Vizze non ha evidenziato solamente le potenziali colate in corrispondenza dei punti in cui sono stati registrati passati eventi da debris flow, ma ha riconosciuto molte potenziali colate anche al di fuori dell'idrografia digitalizzata.

Per la redazione finale delle carte del pericolo delle due aree in corrispondenza degli abitati di Avenes e Tulve, è stato svolto uno studio dettagliato utilizzando i risultati delle simulazioni effettuate con il modello FLO-2D. Infatti è stata seguita la Normativa della Provincia Autonoma di Bolzano per la redazione dei PZP e delle CRS ed erano quindi necessari dei dati molto dettagliati che comprendessero anche i valori legati all'intensità del fenomeno, tra cui gli spessori di deposito e la velocità del flusso. Siccome la zona di deposito simulata con il modello FLO-2D è stata calcolata attraverso i dati riguardanti l'evento del 4 agosto 2012, il cui tempo di ritorno è stato stimato tra i 200 e i 300 anni, si è preso in considerazione solamente lo scenario della Carta del Pericolo riguardante il tempo di ritorno compreso tra 100 e 300 anni.

BIBLIOGRAFIA

- ANCEY, C. (2001). Debris flows and related phenomena. In: Balmfort, N. and Provenzale, A. (Eds.). Geomorphological fluid mechanics. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- ANDRETTO, A. (2013). *Tesi di laurea magistrale*: Analisi dell'evento del 4 Agosto 2012 nel bacino del Torrente Tulve (Val di Vizze, Bolzano) e proposta di mitigazione del rischio sul conoide. Relatore: Prof. Vincenzo D'Agostino. Università di Padova, Dipartimento TeSAF.
- AULITZKY, H. (1973). Hazard Mapping and Zoning in Austria: Methods and Legal Implications. In: Mountain Research and Development Vol. 14, No. 4, Mountain Hazard Geomorphology (Nov., 1994), pp. 307-313 Published by: International Mountain Society.
- BAGGIO, P., BOSELLINI, A., BRAGA, GP., CASTIGLIONI, G.B., CORSI, M., DAL CIN, R., VECCHI, GP. DF., FRIZ, C., GATTO, G.O., GATTO, P., GREGNANIN, A., MEZZACASA, G., SASSI, F.P., ZIRPOLI, G., ZULIAN, T. (1969). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. Foglio 1, Passo del Brennero, Foglio 4a, Bressanone. Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato. Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (Napoli).
- BAGNOLD, R.A. (1968). Deposition in the process of hydraulic transport. *Sedimentology* 10, pp. 45-56.
- BATHURST, J.C., BURTON, A., WARD, T.J. (1997). Debris flow runout and landslide sediment delivery model tests. *Journal of hydraulic engineering* 123, pp. 410-419.
- BAUMANN, V., WICK, E., HORTON, P., JABOYEDOFF, M. (2011). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale along the National Road N7, Argentina. In Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2-6 October, 2011, Toronto, Ontario, Canada.
- BETTELLA, F. (2012). *Tesi di dottorato*: Reologia e dinamica di propagazione delle colate detritiche: analisi e modellazione a diversa scala. Relatore: Prof. Vincenzo D'Agostino. Università di Padova, Dipartimento TeSAF.
- BLAHUT, J., HORTON, P., STERLACCHINI, S., JABOYEDOFF, M. (2010). Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10.
- BRP, BWV & BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) (1997). Empfehlung 1997 – Berücksichtigung der assenbewegungsgefahren bei raumwirks Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Wasserwirtschaft und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL), EidG. Forstdirektion (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Arbeitspapier, Bern.

- CAVALLI, M., GRISOTTO, S. (2006). Individuazione con metodi GIS delle aste torrentizie soggette a colate detritiche: applicazione al bacino dell'alto Avisio (Trento). In: Le sistemazioni idraulico-forestali per la difesa del territorio, Quaderni di Idronomia Montana, 26, pp. 83-94.
- D'AGOSTINO, V., CERATO, M., COALI, R. (1996). Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del trentino Orientale. Atti del Convegno Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Band 1, pp. 377-386.
- D'AGOSTINO, V., CESCA, M. (2009). Reologia e distanza di arresto dei debris flow: sperimentazioni su modello fisico a piccola scala. IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria. Ischia Porto, 12-16 settembre 2009.
- D'AGOSTINO, V. (2013). Appunti delle lezioni di Protezione dal Rischio Idrogeologico, laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali. Dipartimento TeSAF, Università di Padova.
- ED30, (2012). Catasto opere. Provincia Autonoma di Bolzano, Ripartizione Opere Idrauliche, Azienda speciale per la regolazione dei corsi d'acqua e la difesa del suolo.
- FERRO, V. (2006). La sistemazione dei bacini idrografici, seconda edizione. McGraw-Hill editore, Milano. (ISBN 88-386-6327-0).
- FISCHER, L., RUBENSDOTTER, L., SLETTEN, K., STALSBERG, K., MELCHIORRE, C., HORTON, P., JABOYEDOFF, M. (2012). Debris flow modeling for susceptibility mapping at a regional to national scale in Norway. Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides, 3-8 June 2012, Banff, Alberta, Canada.
- GONELLA, M., POLO, P., FOLTRAN, F. (2007). *Relazione tecnico-idraulica*: Studio di approfondimento volto alla delimitazione delle fasce fluviali ed individuazione degli scenari di intervento per la sistemazione idraulica del Torrente Rupinaro in Comune di Chiavari.
- GREGORETTI, C. (2000). The initiation of debris flow at high slopes: experimental results. *Journal of Hydraulic Research* 38, pp. 83-88.
- HEIM, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich.
- HEINIMANN, H.R. (1998). Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 85, 247.
- HOLMGREN, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models: An empirical evaluation, *Hydrol. Process.*, 8, pp. 327-334.
- HORTON, P., JABOYEDOFF, M., BARDOU, E. (2008). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. In: Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards, edited by: Locat, J., Perret, D., Turmel, D., Demers, D., Leroueil, S. Quebec, Canada, 24 May 2008, pp. 339-406.

- HORTON, P., JABOYEDOFF, M., ZIMMERMANN, M., MAZOTTI, B., LONGCHAMP, C. (2011). Flow-R, a model for debris flow susceptibility mapping at a regional scale – some case studies. 5th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation, Padua, Italy. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, pp. 875-884.
- HORTON, P., JABOYEDOFF, M., RUDAZ, B., ZIMMERMANN, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, pp. 869-885.
- HUGGEL, C., KAAB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, P., PAUL, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. Can. Geotech. J., 39, pp. 316-330.
- IVERSON, R.M., DENLINGER, R.P. (2001). Mechanics of debris flows and debris-laden flash floods. 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada.
- JAKOB, M. (2005). A size classification for debris flows. In: Engineering geology, vol. 79, Elsevier, pp. 151-161.
- JAKOB, M., HUNGR, O. (2005). Debris flow hazards and related phenomena. Springer Praxis books, Berlin Heidelberg, New York.
- KAPPES, M.S., MALET, J.P., REMAÎTRE, A., HORTON, P., JABOYEDOFF, M., BELL, R. (2011). Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp. 627-641.
- LARI, S., CROSTA, G., FRATTINI, P., HORTON, P., JOBOYEDOFF, M. (2011). Regional-scale debris flow risk assessment for an alpine valley. 5th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation, Padua, Italy. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, pp. 933-940.
- MACCONI, P., FORMAGGIONI, O., SPERLING, M. (2012). Report annuale, ED30-2012. Provincia Autonoma di Bolzano, Alto-Adige.
- MAMMOLITI, M. (2011). *Tesi di dottorato*: Studio dei metodi di Valutazione della Pericolosità associata ai Debris Flow in Ambiente Alpino. Relatore: Prof. Alessandro Simoni. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna.
- MICHELINI, T. (2011). *Tesi di laurea magistrale*: Dinamica di deposizione di colate detritiche granulari: il caso dei torrenti Dosson, Cercen e Gabbio (Strembo, Trento). Relatore: Prof. Vincenzo D'Agostino. Dipartimento TeSAF, Università di Padova.
- MIZUYAMA, T., KOBASHI, S., OU, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge, Proc. Int. Symp. Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, pp. 99-108.
- O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 114(8), pp. 877-887.

- O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y., FULLERTON, W.T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 119(2), pp. 244-259.
- PERLA, R., CHENG, T.T., McCLUNG, D.M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.*, 26, pp. 197-207.
- PETRASCHECK, A., KIENHOLZ, H., (2003). Hazard assessment and mapping of mountain risk in Switzerland. In Rickenmann, D., Chen, C.L., (eds), *Debris flow hazard mitigation: mechanics, prediction, and assessment*, 10-12 September 2003, Davos, Switzerland: 25-38. Millpress, Rotterdam, Netherlands.
- PIERSON, T.C. (1986). Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: A.D. Abrahams (ed.), *Hillslope Processes* (pp. 269-296). Allen & Unwin, Boston.
- PROGETTO CARG VENETO (2007). *La pericolosità geologica per instabilità dei versanti nell'Alta Val Cordevole*. Grafiche Nardin, Ca' Savio (Venezia).
- QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, pp. 59-79.
- RICKENMANN, D., ZIMMERMANN, M. (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology* 8(2-3), pp. 175-189.
- RICKENMANN, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19, pp. 47-77.
- RICKENMANN, D. (2001). Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37(12), pp. 3295-3305.
- SCHEIDL C., RICKENMANN D. (2010). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, pp. 157-173.
- TAKAHASHI, T. (1981). Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for disaster. *Journal of Natural Disaster Science*, 3, pp. 57-89.
- TAKAHASHI, T. (2007). *Debris flow. Mechanics, prediction and countermeasures*. Taylor & Francis, London. (ISBN 978-0-415-43552-9).
- VAN DINE, D.F. (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Ministry of Forests Research Program, Working paper 22/1996. Government of the Province of British Columbia, Vancouver.
- VANZETTA, A. (1987). *Relazione tecnica riguardante i lavori di sistemazione idraulico-forestale da eseguirsi nei Rivi Riva e Avenes, affluenti del torrente Vize in comune di Prati di Vize*. Provincia Autonoma di Bolzano, Alto Adige.
- VARNES, D.J. (1984). *Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice*. UNESCO Press, Paris, 63 pp.

- WIECZORECK, G.F., GLADE T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flow. In: Jakob, M. and Hungr, O. (2005). Debris flow hazard and related phenomena. Springer Praxis books, Berlin Heidelberg, New York.
- ZIMMERMANN, M., MANI, P., GAMMA, P. (1997). Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. NFP 31 Schlussbericht, Hochschulverlag an der ETH, Zurich.