

**SOCIETÀ INCREMENTO TURISTICO
CANAZEI S.P.A.**



**"STUDIO DI COMPATIBILITÀ PER PERICOLO IDRAULICO
RELATIVAMENTE AL PROGETTO DELLA NUOVA
STAZIONE DI PARTENZA DELLA FUNIVIA COL RODELLA "**



RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA

					<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROV. DI TRENTO <hr style="width: 20%; margin: 5px auto;"/> dott. ing. MATTEO GIULIANI ing. civile e ambientale, industriale e dell'informazione iscriz. Albo N°2459 - Sez. A degli ingegneri </div>	
0	Emissione	GRD	LTT- GLN	10/2019	LINGUA	PAGINE
REV	DESCRIZIONE	EMESSO	APPROV.	DATA	I	35
SIGLA 336_C_R1-0_Studio di compatibilità idraulica_fun. Col Rodella.doc Questo documento non potrà essere copiato, riprodotto o altrimenti pubblicato in tutto o in parte senza il consenso scritto di questo studio (legge 22 aprile 1941, n 633-art 2575 e segg. c.c.)						



Indice

1	Oggetto	4
2	Inquadramento della zona di indagine.....	5
3	Caratteristiche principali del bacino imbrifero	8
4	Idrogrammi di piena.....	12
4.1	Geolitologia, uso del suolo e CN	12
4.2	Analisi idrologica	14
4.2.1	Modello geomorfologico AdB-ToolBox	14
4.2.2	Dati in input.....	15
4.3	Idrogramma liquido.....	20
4.4	Idrogramma colata.....	22
5	Modellazione idraulica bidimensionale con Flumen2D.....	26
5.1	Fondamenti matematico-numerici del codice Flumen2D.....	26
5.2	Dati di input della modellazione 2D.....	28
5.2.1	Dominio di calcolo	28
5.2.2	Condizioni al contorno	28
5.2.3	Idrogramma di piena	28
5.2.4	Parametri numerici.....	28
5.2.5	Parametri idraulici e reologici.....	28
5.3	Risultati della modellazione 2D	29
5.3.1	Simulazione A.....	31
5.3.1	Simulazione B	32
6	Conclusioni.....	34
7	Bibliografia.....	35



1 Oggetto

La presente relazione rappresenta lo studio Idrologico-Idraulico per la verifica della compatibilità al pericolo idraulico per la realizzazione, presso il sito denominato Ischia, della nuova stazione di partenza della Funivia Col Rodella nel comune di Campitello di Fassa, che comporterà la dismissione di quella attuale.

Tale studio è stato specificatamente richiesto dalla Provincia autonoma di Trento-PAT sulla base delle risultanze emerse dalla Conferenza di Pianificazione dd. 23 luglio 2019 indetta per la verifica di coerenza della prima adozione del Piano Regolatore Generale-PRG variante 2019 del comune di Campitello di Fassa.

Nello specifico, lo studio determinerà l'idrogramma di una colata di detrito con tempo di ritorno bicentenario ($T_r=200$ anni) e valuterà la propagazione della stessa colata lungo il conoide interessato sulla sinistra idrografica del fiume Avisio.

Pertanto, l'analisi permetterà di verificare la compatibilità idraulica degli interventi previsti in progetto per la realizzazione della nuova stazione di partenza della Funivia Col Rodella, in particolare si valuterà l'opportunità della realizzazione di un'opera di difesa passiva a tergo del nuovo manufatto.

La propagazione della colata di detrito sopra menzionata sarà studiata mediante un modello matematico-numerico bidimensionale ai volumi finiti a celle quadrate.



2 Inquadramento della zona di indagine

L'intervento in progetto prevede lo spostamento dell'esistente stazione funiviaria di partenza dell'impianto Col Rodella in una nuova posizione sita più a monte; nello specifico la nuova posizione individuata dal progetto si colloca ai piedi del versante nord-ovest del Col Pedous (presso la zona denominata Ischia).

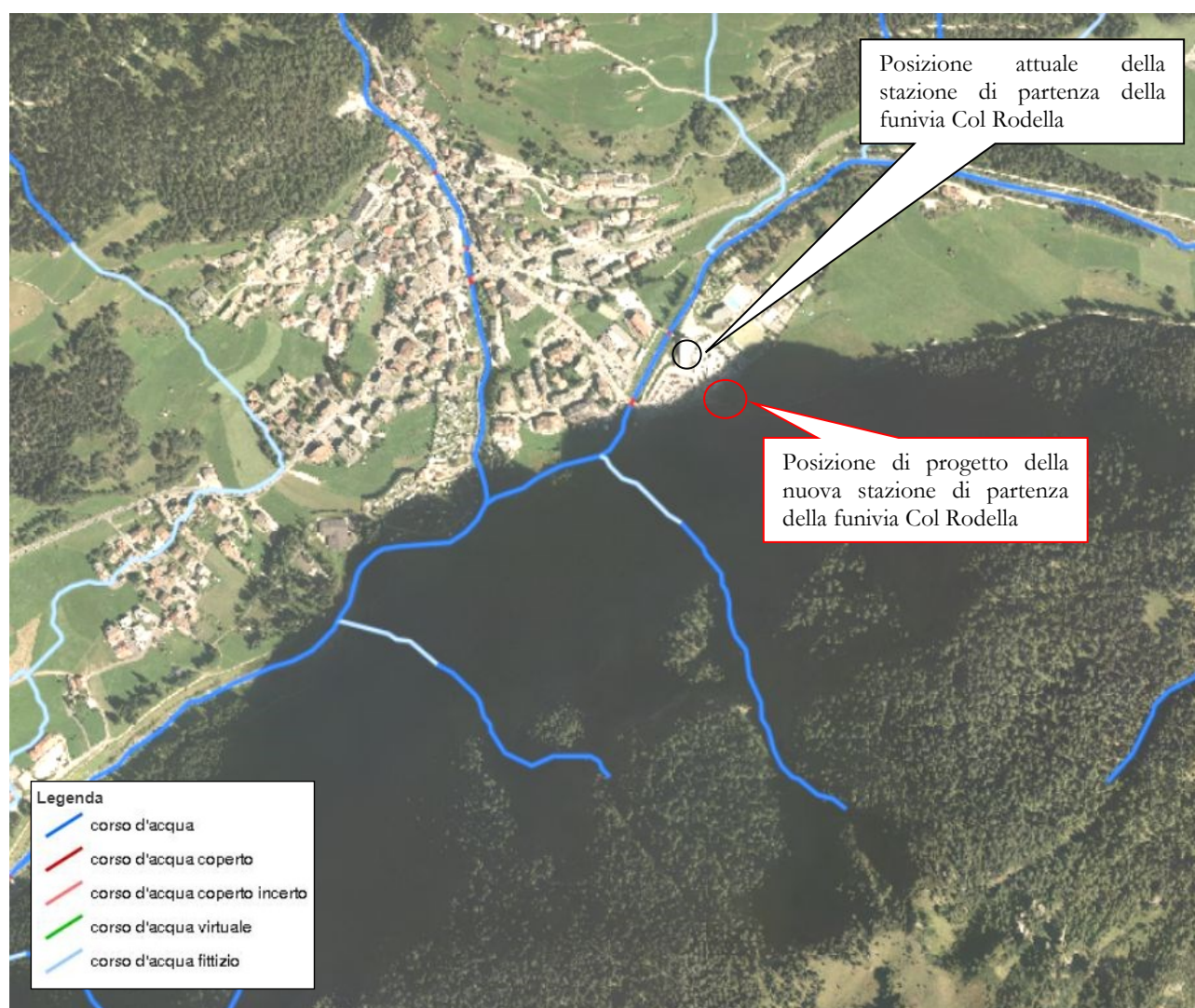


Figura 2.1: Rappresentazione su ortofoto 2015-PAT della zona oggetto di indagine con l'indicazione della posizione attuale e di progetto della stazione di partenza della funivia Col Rodella.

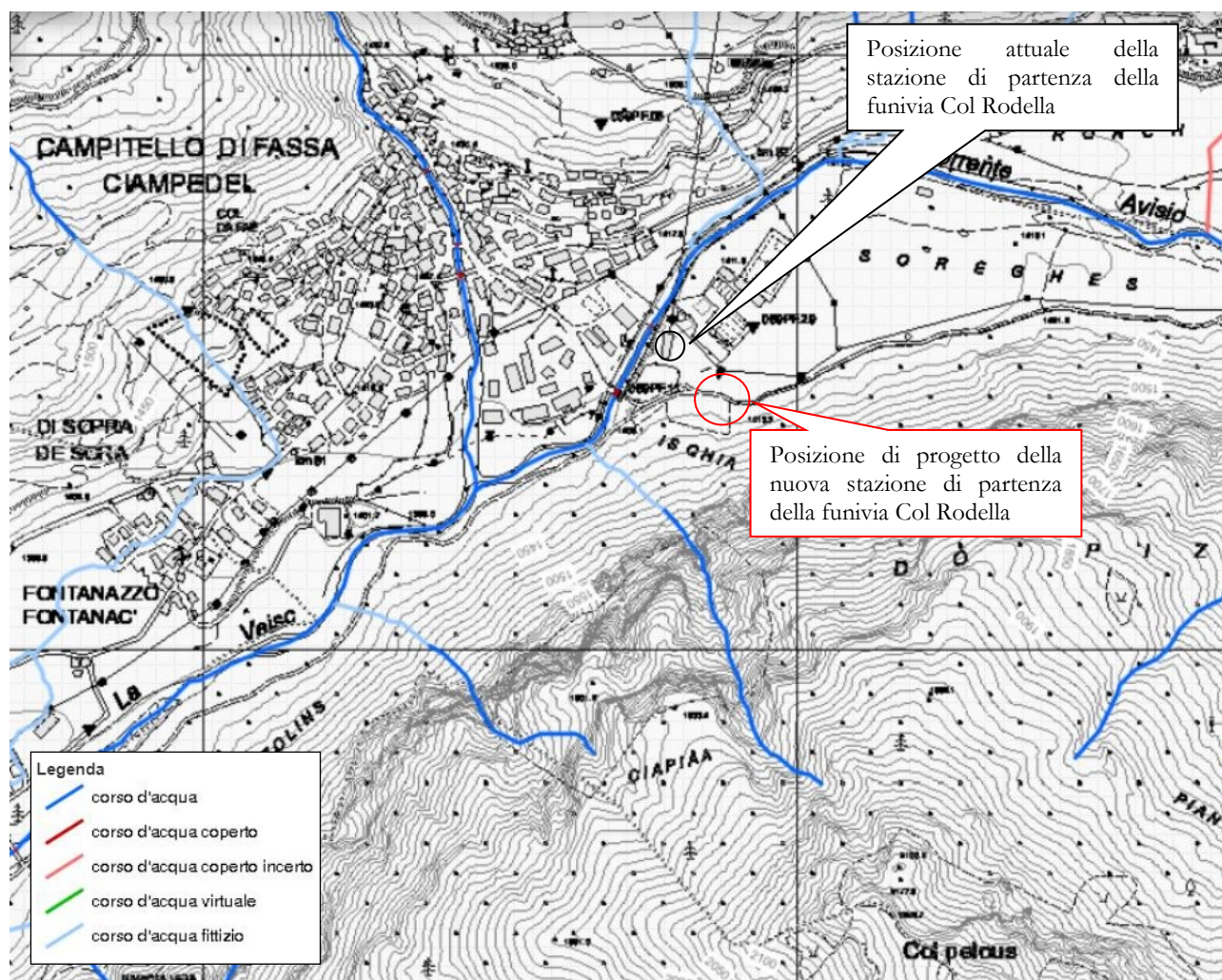


Figura 2.2: Rappresentazione su Carta Tecnica Provinciale 2017-CTP della zona oggetto di indagine con l'indicazione della posizione attuale e di progetto della stazione di partenza della funivia Col Rodella.

Si evidenzia come la nuova posizione, a quota più elevata rispetto al sito della stazione attuale dove quest'ultima ricade in un'area potenzialmente allagabile, è prossima ad uno dei compluvi della dorsale nord-nord-ovest del Col Petous.

Ebbene, le Carte della Pericolosità-CaP, adottate preliminarmente su tutto il territorio provinciale con D.G.P. n. 1067/2019, identificano una zona di penalità alluvionale torrentizia da approfondire riferita al compluvio sopra menzionato.

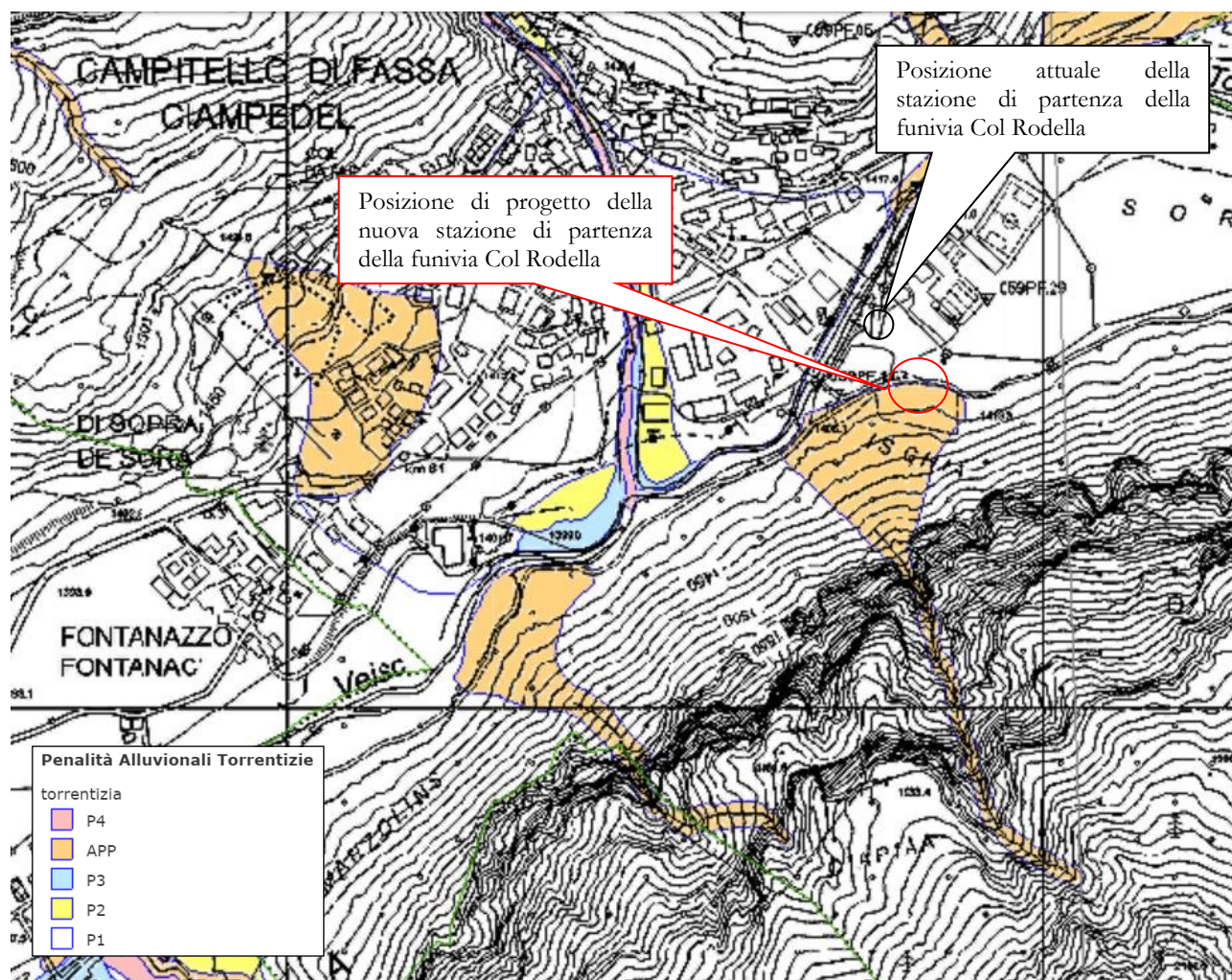


Figura 2.3: Rappresentazione su CaP-adozione preliminare della zona oggetto di indagine con l'indicazione della posizione attuale e di progetto della stazione di partenza della funivia Col Rodella.



3 Caratteristiche principali del bacino imbrifero

Il bacino imbrifero sotteso dal compluvio della dorsale nord-nord-ovest del Col Pedous che potrebbe interferire con il nuovo sito nel quale è previsto la realizzazione della nuova stazione di partenza della Funivia Col Rodella, interessa prevalentemente un'area di rupi boscate.

La delimitazione dello spartiacque del bacino imbrifero afferente alla nuova zona interessata dal progetto in questione è stata eseguita sulla base del rilievo Lidar 2006 della P.A.T. La quota massima del bacino imbrifero si trova a circa 2226 m s.l.m.; la quota minima dello stesso bacino è a ca 1510 m s.l.m. laddove termina sul conoide il compluvio in esame.

Sono riportate di seguito alcune immagini raffiguranti il compluvio in esame e la zona di chiusura del relativo bacino idrografico.

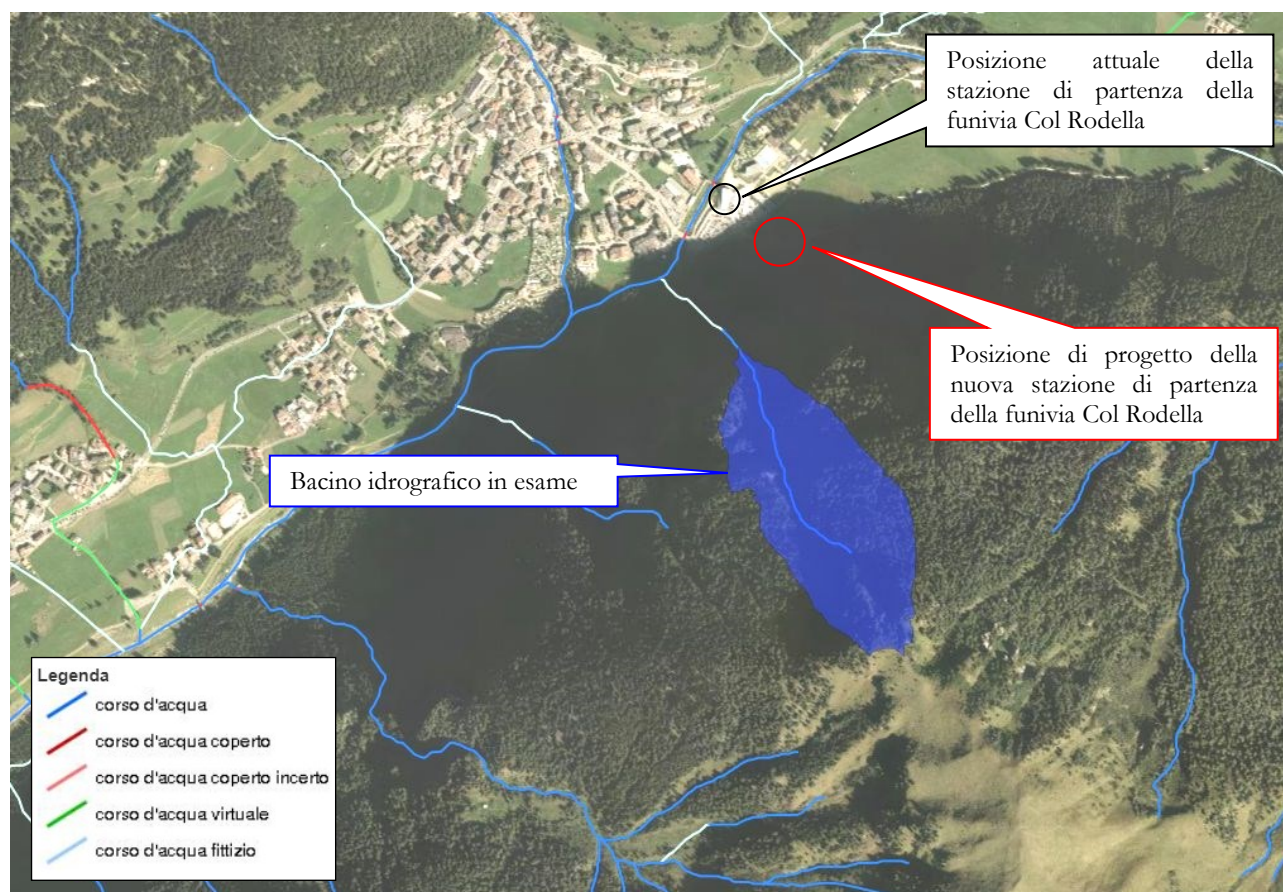


Figura 3.1: Rappresentazione su Ortofoto 2015-PAT dell'area in esame con l'indicazione del bacino idrografico in esame, la posizione attuale e di progetto della stazione di partenza della funivia Col Rodella.



Le caratteristiche del bacino idrografico del compluvio presente sulla dorsale nord-nord-ovest del Col Pelous, che potrebbe interferire con la posizione in progetto della nuova stazione di partenza della funivia Col Rodella, chiuso a quota 1510,25 m s.l.m., sono riassunte nella Tabella 3.1.

Bacino imbrifero del compluvio in esame	
Area Bacino [km ²]	0,147
Altitudine media [m s.l.m.]	1936,49
Altitudine minima [m s.l.m.]	1510,25
Altitudine massima [m s.l.m.]	2226,03
Pendenza media del bacino [%]	75,3

Tabella 3.1: Caratteristiche geografiche del bacino imbrifero chiuso a quota 1510,25 m s.l.m. che potrebbe interferire con la posizione in progetto della nuova stazione di partenza dell'impianto Col Rodella.

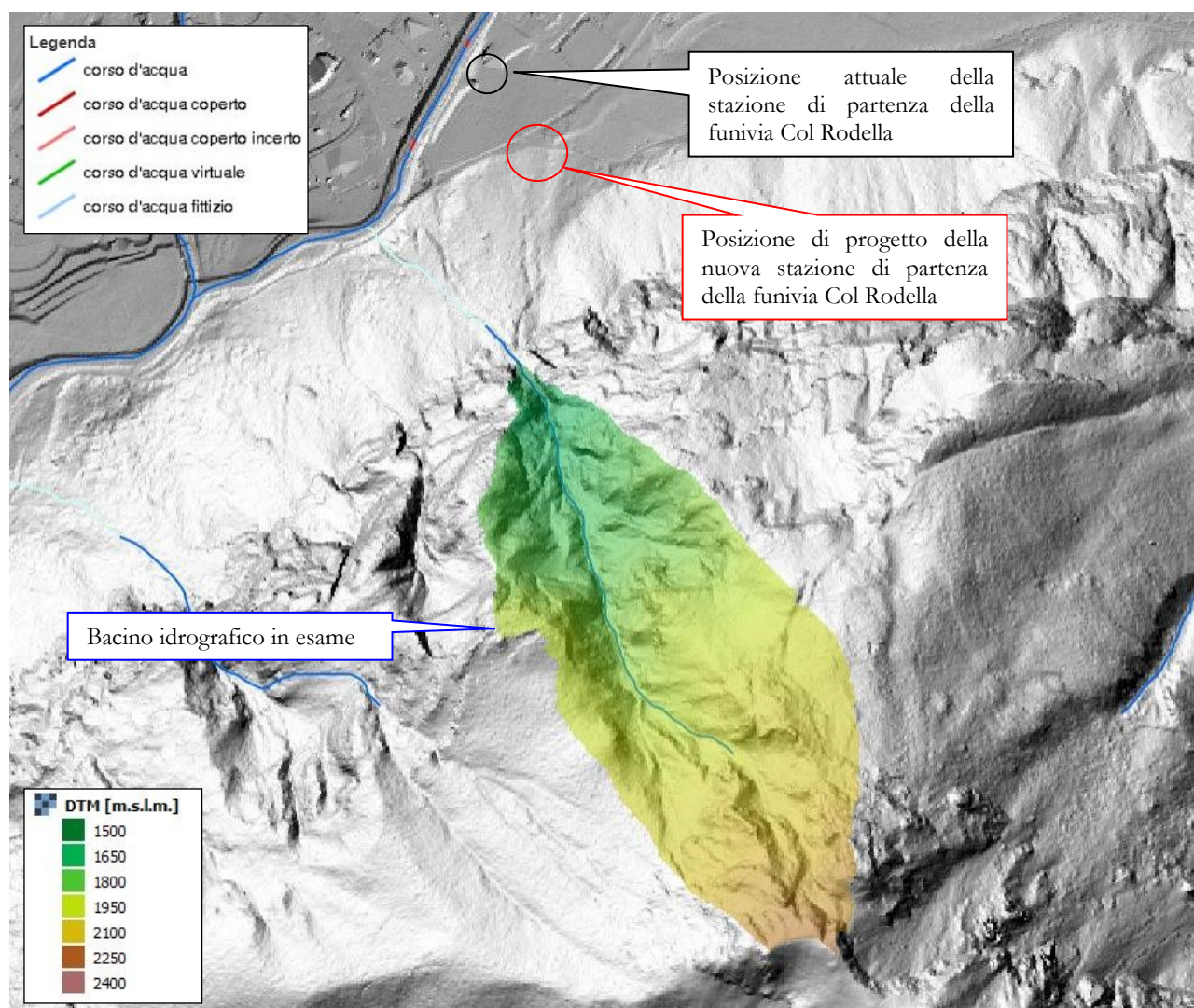


Figura 3.2: Altimetria del bacino imbrifero in esame.

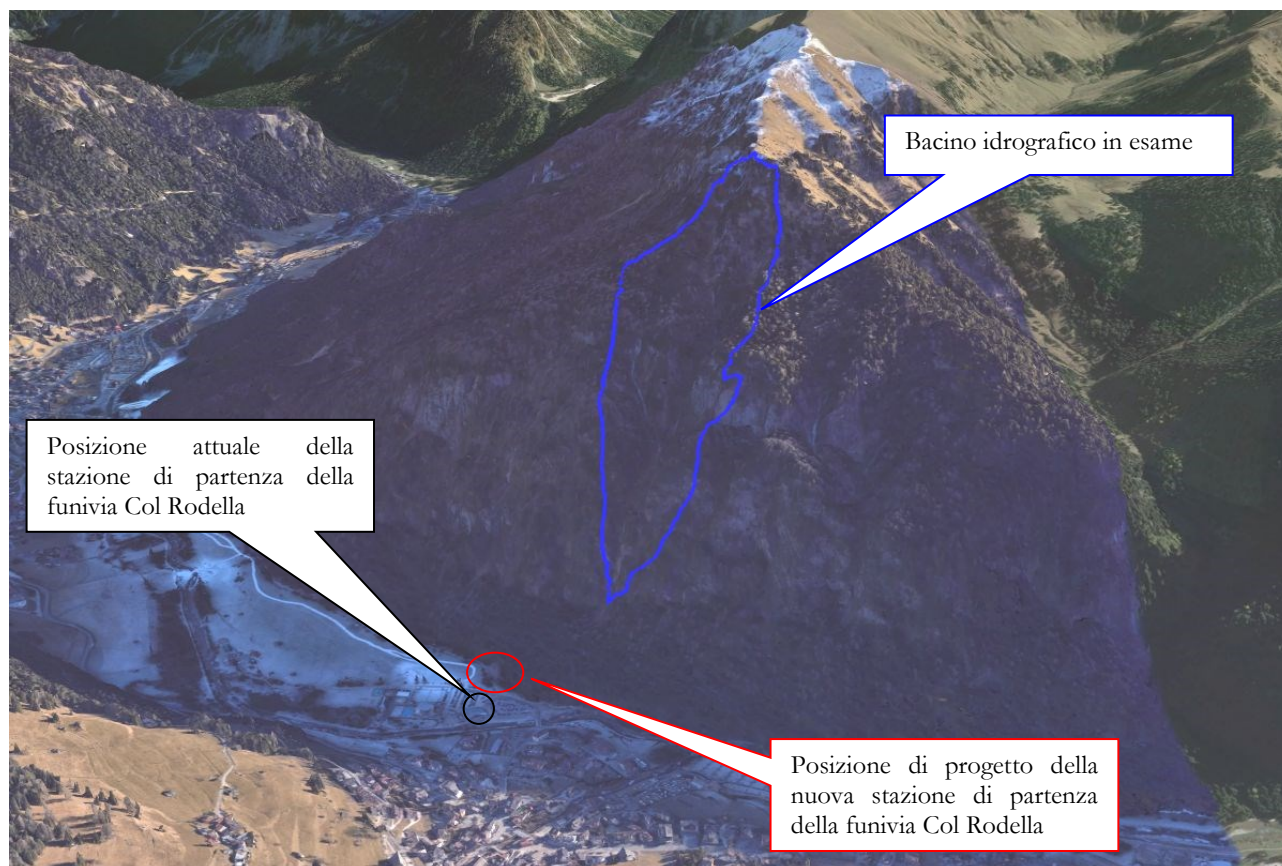


Figura 3.3: Rappresentazione su immagine aerea dall'applicativo Google Earth dell'area in esame con l'indicazione del bacino idrografico in esame, la posizione attuale e di progetto della stazione di partenza della funivia Col Rodella.

Si riportano di seguito due foto del conoide che si apre a valle del bacino imbrifero in esame. Il conoide alla base del quale si prevede la realizzazione della nuova stazione di partenza della funivia Col Rodella è solcato da alcuni compluvi sede di passate colate di detriti e di flussi di portata avvenuti in seguito ad eventi piovosi intensi. Tali incisioni si notano anche dalla carta delle ombre derivata da Lidar 2006 – PAT e risultano delle vie preferenziali per la propagazione sia di onde di piena liquide, che con concentrazione più o meno elevata. Come si vedrà dalle simulazioni 2D proprio le incisioni esistenti determineranno le direzioni preferenziali della colata di detrito. Nelle simulazioni che saranno eseguite in fase di progettazione esecutiva si dovrà, quindi, tener conto di queste incisioni nel terreno considerando anche che la loro posizione cambia nel tempo e che successioni di eventi con o senza trasporto solido potranno modificarne posizione e profondità.



Figura 3.4: Foto da valle del conoide presso la località Ischia a valle del bacino in esame.



Figura 3.5: Foto da monte del conoide presso la località Ischia a valle del bacino in esame.



4 Idrogrammi di piena

In generale la modellazione idrologica ha per obiettivo la determinazione delle onde di piena di progetto al variare del tempo di ritorno (30, 100 e 200 anni), come previsto dal Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche-PGUAP.

Le onde di piena rappresentano una delle condizioni al contorno dei modelli idrodinamici a moto vario che solitamente vengono utilizzati per la delimitazione delle aree di esondazione; nel caso specifico sono demandate a determinare un'eventuale colata, fenomeno che potrebbe manifestarsi in occasione di eventi pluviometrici estremi.

Pertanto, sarà stimata l'onda di piena per il tempo di ritorno più gravoso di 200 anni per il bacino idrografico del compluvio afferente alla posizione di progetto prevista per la nuova stazione di partenza della funivia Col Rodella e chiuso a quota 1525,10 m s.l.m..

4.1 Geolitologia, uso del suolo e CN

Le carte della litologia e dell'uso del suolo del bacino idrografico permettono di definire la capacità drenante del sistema suolo-soprassuolo e di procedere contestualmente alla determinazione dello ietogramma efficace ai fini del deflusso superficiale. La suddivisione delle piogge viene effettuata attraverso il metodo SCS valutando il valore del parametro Curve Number (CN), indicatore dell'attitudine del complesso suolo-soprassuolo a produrre deflusso superficiale.

La carta dell'uso del suolo permette di caratterizzare la capacità di deflusso del soprassuolo, mentre la carta della permeabilità è rappresentativa del substrato geolitologico, che è dotato di una permeabilità primaria, collegata alle caratteristiche intrinseche della roccia, e di una permeabilità secondaria, rappresentativa dello stato di fratturazione. Le caratteristiche di permeabilità vengono sintetizzate in un unico indice che deriva dalla riclassificazione della carta geolitologica in quattro gruppi idrologici:

- *A. Permeabilità alta*, bassa capacità di deflusso, suoli con elevata infiltrabilità anche se completamente saturi, conducibilità idraulica alta (rocce calcaree fossilifere organogene molto fratturate, depositi alluvionali, falde e coni di detrito, tufi incoerenti, ceneri);
- *B. Permeabilità medio-alta*, suoli con moderata infiltrabilità se saturi, tessitura medio grossolana, conducibilità idraulica media (morene, coltri eluviali e colluviali, sabbie conglomerati e sabbioni cementati, rocce in genere molto fratturate);
- *C. Permeabilità medio-bassa*, suoli con bassa infiltrabilità se saturi, tessitura medio fine, conducibilità idraulica bassa (rocce sedimentarie compatte, rocce dolomitiche compatte, rocce calcaree compatte, rocce fratturate);



- D. *Permeabilità bassa*, alta capacità di deflusso, suoli con ridottissima infiltrabilità se saturi, suoli ricchi di argilla rigonfiante, conducibilità idraulica estremamente bassa (rocce eruttive intrusive e magmatiche, rocce argillose, rocce metamorfiche).

		CN			
CLASSE DI PERMEABILITÀ		A	B	C	D
USO DEL SUOLO	Fustaia densa di conifere	18	27	40	50
	Fustaia rada di conifere	23	32	50	55
	Ceduo scadente	35	45	58	68
	Lariceti, cembrete e larici-cembrete	40	48	63	75
	Pascoli nudi o arborati	37	50	68	75
	Prati e colture agrarie	41	47	65	76
	Improduttivo nudo	45	55	70	80
	Aree urbanizzate	80	85	90	95
	Rupi boscate	40	50	65	75
	Arbusteti e mughete	38	45	60	70
	Bosco di latifoglie	25	36	50	55
	Pinete di Pino silvestre e/o Pino nero	38	49	64	73
	Piste da sci	50	65	75	80
	Zone incendiate	70	75	80	88
	Laghi e corsi d'acqua	99	99	99	99
	Paludi e zone umide	90	90	90	90
	Ghiacciai	95	95	95	95

Tabella 4.1: Parametro CN in funzione dell'uso del suolo e della permeabilità.

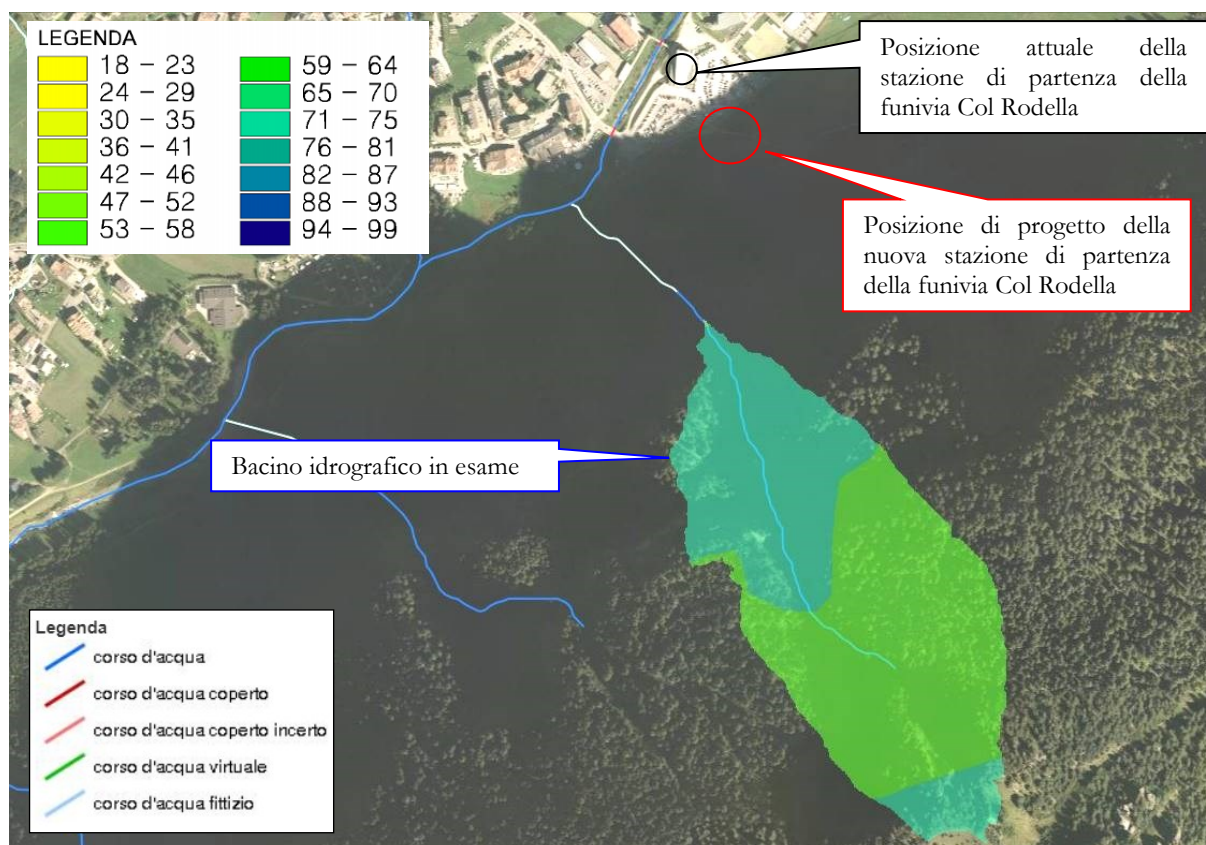


Figura 4.1: Carta del Curve Number per l'area del bacino imbrifero in esame.

Il CN medio del bacino imbrifero in argomento è riportato in Tabella 4.2.

Bacino imbrifero	Parametro CN medio
Compluvio afferente alla posizione in progetto della nuova stazione di partenza della funivia del Col Rodella	65

Tabella 4.2: Valore medio di CN del bacino imbrifero in esame.

4.2 Analisi idrologica

L'analisi idrologica ha per obiettivo la definizione dell'onda di piena di progetto per Tr 200 anni.

4.2.1 Modello geomorfologico AdB-ToolBox¹

Il calcolo della portata al colmo è stato effettuato per mezzo di un modello afflussi-deflussi denominato AdB-ToolBox realizzato a cura del Ministero dell'Ambiente. L'estensione Analisi Idrologiche, compresa nel software, consente il calcolo delle portate di progetto su specifiche sezioni della rete idrografica. Si riportano di seguito alcune indicazioni presenti nel manuale d'uso [3].

¹ AdB-ToolBox (versione 1.8) con Estensione ANALISI IDROLOGICHE (AI) - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare Direzione Generale per la Difesa del Suolo.



Il modello adottato propone un'applicazione distribuita dell'approccio geomorfologico combinando le equazioni del Soil Conservation Service per il calcolo della pioggia efficace, il metodo cinematico per la propagazione del deflusso superficiale alla sezione di chiusura ed un serbatoio lineare per la simulazione del deflusso di base. Si tratta di un approccio consolidato nella letteratura tecnica e nella pratica operativa le cui potenzialità nei settori della pianificazione territoriale e della progettazione di interventi di difesa idraulica sono note. È tuttavia opportuno evidenziarne alcuni limiti applicativi allo scopo di non incorrere in errate interpretazioni dei risultati forniti dallo strumento stesso. Lo schema modellistico adottato è di tipo semplificato ed è indirizzato a cogliere in modo concettuale i processi ritenuti più importanti nel determinare la risposta idrologica di piena di un bacino idrografico montano. Si ritiene che una superficie di 200-250 km² costituisca il limite superiore per l'applicazione del modello. Nei limiti di estensione territoriale indicati, risultati soddisfacenti possono essere ottenuti avendo a disposizione solo i seguenti livelli informativi:

- il modello digitale del terreno per definire la direzione di deflusso, l'area contribuyente, il reticolo idrografico;
- la carta del CN;
- i parametri cinematici della propagazione dell'onda di piena ossia la velocità media sul versante e nel canale, di norma rispettivamente prossimi a 0.02 m/s e 2 m/s;
- i parametri a e n della curva di possibilità pluviometrica.

È evidente peraltro che la qualità di tali livelli informativi costituisce un presupposto in grado di influenzare direttamente i risultati della simulazione idrologica. Un elevato standard qualitativo dei dati di input è conseguibile con idonee procedure di validazione, ma esso tuttavia non garantisce da solo la validità dei risultati della simulazione stessa. A tale obiettivo si può pervenire solo attraverso una fase di taratura e validazione dei parametri del modello da condurre sulla base di riscontri di natura oggettiva principalmente costituiti da registrazioni idrometriche di eventi di piena realmente accaduti. Tale fase non può che essere messa in atto dagli utenti con specifico riferimento all'area di indagine e utilizzando preferibilmente i quantili derivati da procedure di regionalizzazione statistica dell'informazione idrometrica. Di qualche aiuto può risultare anche la simulazione di alcuni singoli eventi di piena registrati utilizzando una delle opzioni previste dal modello.

4.2.2 Dati in input

Per le simulazioni effettuate nel corso del presente studio, i dati in input utilizzati sono i seguenti.

Il **modello digitale del terreno** (DTM) è un raster ottenuto dal rilievo LIDAR effettuato dalla Provincia Autonoma di Trento nel 2006 ad una risoluzione di 1 m. L'operazione preliminare è stata quella di "depittare" il DTM con un algoritmo presente in AdB-ToolBox eliminando così le aree concave; fatto ciò è stato possibile creare gli altri raster per il modello afflussi-deflussi denominati



UPSLOPE e FLOWDIR che sono rispettivamente la carta delle aree cumulate e la carta delle direzioni di drenaggio.

La **carta del Curve Number** è ottenuta rasterizzando, con la medesima risoluzione di 1 m, la cartografia provinciale in formato shapefile della geologia e dell'uso del suolo; il file da utilizzare in AdB-ToolBox è denominato CN.

La scelta dei **parametri cinematici** (nel software indicati come “parametri avanzati”) è stata guidata dalla calibrazione dei parametri cinematici del modello afflussi-deflussi effettuata dalla Provincia Autonoma di Trento nel 2003 [1]. Il modello richiede anche altri due parametri che rivestono un peso importante nella definizione dell'idrogramma di progetto per bacini di notevole estensione: “*ARF*” e “parametro geomorfologico *C*”.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione a scala di bacino è messa in conto tramite il coefficiente di riduzione dell'area (Area Reduction Factor, *ARF*). In mancanza di informazioni specifiche derivate da approfondimenti a scala locale, si fa riferimento alla funzione di riduzione dei nubifragi ricavata da Moisello e Papiri (1986). In tale relazione empirica il fattore di riduzione (inteso come rapporto tra l'altezza di pioggia media, relativa ad una data area *A*, e l'altezza di pioggia puntuale rappresentativa del bacino) risulta dipendente sia dall'area *A* che dalla durata della precipitazione *d*, secondo la relazione:

$$ARF = 1 - \exp\left(-2.472 \cdot A^{-0.242} \cdot d^{0.6 - \exp(-0.643 \cdot A^{0.235})}\right)$$

Dove l'area è espressa in km², la durata in ore, e con $5 \leq A \leq 800$ km² e $15' \leq d \leq 12$ h.

Il Fattore geomorfologico *C* è un fattore di riduzione delle precipitazioni per grandi bacini, tale riduzione può inglobare fenomeni come l'effetto di laminazione dell'onda di piena e aspetti morfologici come la presenza di aree al di sopra di una certa quota (zero termico) che a causa della temperatura non contribuiscono come le altre al deflusso superficiale. Le precipitazioni sono quindi moltiplicate per un fattore (*x_{att}*), dipendente dalla sola area del bacino *A* e applicato solo se l'area supera la soglia *A_{th}*:

$$x_{att} = 1 - C \cdot (A - A_{th})$$

Dove *C* è un parametro che assume valori normalmente compresi tra 0.0008 e 0.0013.

Per gli altri parametri per i quali non esistono in letteratura indicazioni specifiche, si sono mantenuti i valori di default suggeriti dal software.

I parametri scelti per il bacino imbrifero in esame, riportati nella Tabella 4.3, sono in linea con quanto suggerito in [1], salvo un leggero aumento della velocità di reticolo e della velocità nel canale per tenere conto della morfologia locale. La classe AMC scelta è la 3, mentre lo ietogramma in input è stato scelto di forma triangolare in quanto tende a massimizzare il valore al picco della piena.



Velocità caratteristica di versante	0,05 ms ⁻¹
Velocità caratteristica di reticolo	5,0 ms ⁻¹
Valore di soglia per l'area drenata (min – max)	0,00 - 0,01 km ²
Forma dello ietogramma	Triangolare
Classe AMC	3.0
Step output dell'idrogramma	5 min

Tabella 4.3: Parametri cinematici utilizzati per l'analisi idrologica del bacino imbrifero in esame.

I **valori delle curve di possibilità pluviometrica** sono stati forniti dalla Provincia Autonoma di Trento - Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture - Servizio Prevenzione Rischi - Ufficio Previsioni e Pianificazione sotto forma di file raster. Si tratta di tre file raster (a_1 , n , CV) che coprono la superficie dei bacini imbriferi esaminati ciascuno dei quali descrive la distribuzione spaziale di un singolo parametro. Il modello scala-invariante utilizzato è quello di Gumbel e la linea segnalatrice di probabilità pluviometrica è descritta dalla seguente equazione:

$$h_T(d) = a_1 \cdot \left(1 - \frac{CV \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot (\varepsilon + y_T) \right) \cdot d^n \quad \text{con} \quad y_T = \ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right)$$

con $h_T(d)$ valore di precipitazione caratterizzato da un tempo di ritorno T per una durata di pioggia d , n , CV e a_1 parametri stimati come di seguito riportato, ε numero di Eulero pari a 0.5772157.

I valori dei parametri n , CV e a_1 sono stati stimati sulla base dei dati delle altezze di pioggia massime annuali di durata compresa nell'intervallo 1-24 ore. I valori dei parametri n ed a_1 sono determinati tramite regressione lineare dei logaritmi delle medie campionarie delle altezze di pioggia massime annuali relative alle diverse durate rispetto ai logaritmi delle corrispondenti durate. Il valore del coefficiente di variazione globale CV è calcolato come media dei quadrati dei coefficienti di variazione calcolati per i massimi annuali relativi alle durate comprese fra 1 e 24 ore. Per quanto riguarda gli scrosci, l'esponente di scala n si può ritenere costante sull'intero territorio trentino, con valore pari a 0.366.

Le procedure di analisi sono state applicate sulla base dei valori massimi annuali di precipitazione di breve durata registrati tra il 1923 ed il 2009 in 62 stazioni pluviografiche ubicate nel territorio provinciale. Dette 62 stazioni sono quelle caratterizzate da numerosità campionaria almeno pari a 15 anni per tutte le durate comprese nell'intervallo 1h-24h. Per quanto riguarda il problema di estrapolazione spaziale delle linee segnalatrici, al fine di rendere più affidabile tale valutazione nelle zone 'di bordo' prossime ai confini amministrativi provinciali sono stati utilizzati dati di precipitazione massima annuale relativi a diverse stazioni ubicate in province limitrofe (Brescia, Bolzano, Belluno e Vicenza).



Vengono di seguito riportate la mappa dell'area cumulata e delle direzioni di drenaggio, elaborate dal modello afflussi-deflussi (AdB-ToolBox) per il calcolo dell'idrogramma di piena.

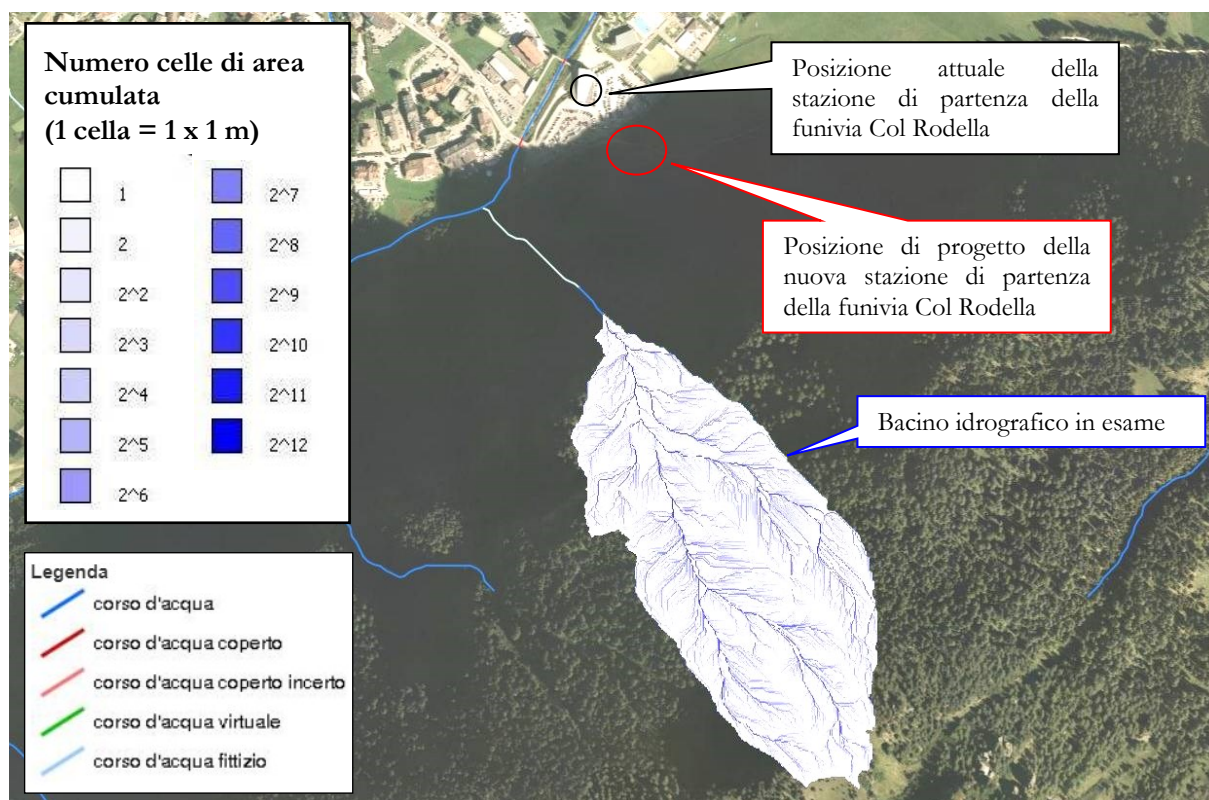


Figura 4.2: Carta dell'area cumulata del bacino imbrifero in esame.

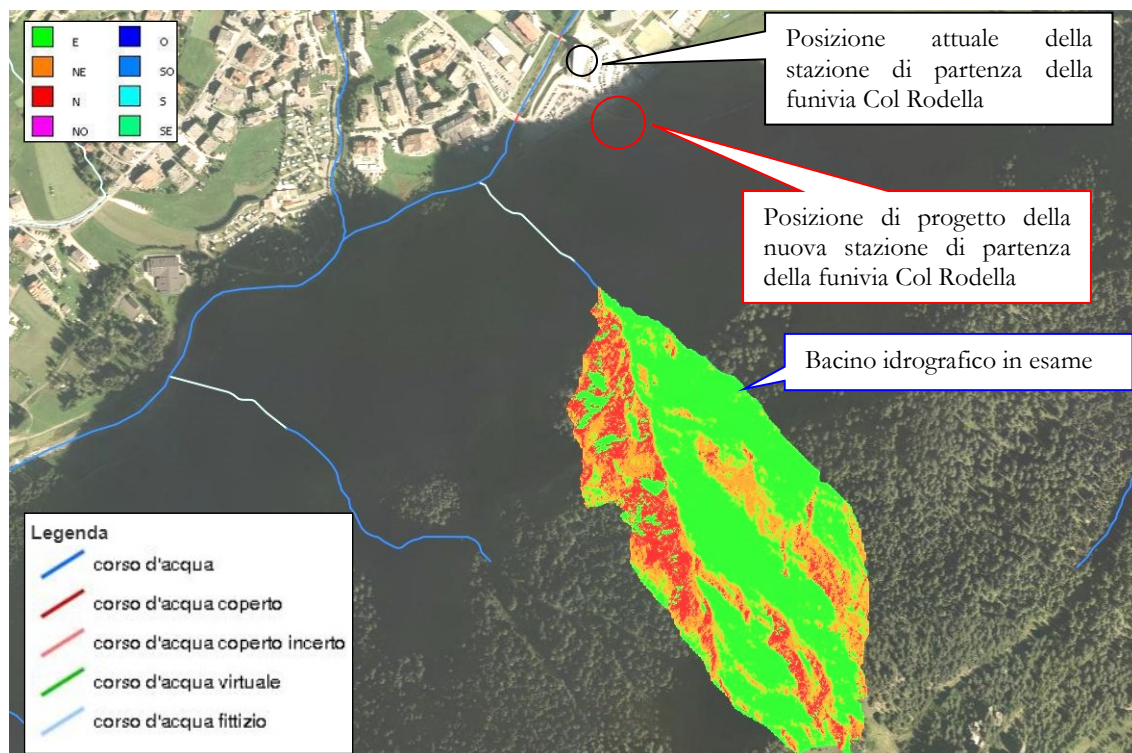


Figura 4.3: : Carta delle direzioni di drenaggio per il bacino idrografico in esame.



I valori di pioggia di progetto utilizzati per il calcolo delle curve di possibilità pluviometrica sono indicati in Tabella 4.4.

Tempo [h]	Tr [anni]							
	2	5	10	20	30	50	100	200
0,25	14,3	18,5	21,3	24,0	25,6	27,5	30,2	32,8
0,50	18,4	23,9	27,5	31,0	33,0	35,5	38,9	42,2
0,75	21,3	27,7	31,9	35,9	38,3	41,2	45,1	49,0
1,00	23,7	30,8	35,4	39,9	42,5	45,7	50,1	54,4
2,00	30,0	38,9	44,8	50,5	53,8	57,9	63,4	68,9
3,00	34,4	44,7	51,5	58,0	61,8	66,4	72,8	79,1
4,00	37,9	49,3	56,8	64,0	68,1	73,3	80,2	87,2
5,00	40,9	53,2	61,2	69,0	73,5	79,0	86,6	94,1
6,00	43,6	56,6	65,2	73,4	78,2	84,1	92,1	100,1
7,00	45,9	59,6	68,7	77,4	82,4	88,6	97,1	105,5
8,00	48,0	62,4	71,9	81,0	86,2	92,7	101,6	110,4
9,00	50,0	64,9	74,8	84,3	89,7	96,5	105,7	114,9
10,00	51,8	67,3	77,5	87,3	93,0	100,1	109,6	119,1
11,00	53,5	69,5	80,1	90,2	96,1	103,4	113,2	123,0
12,00	55,1	71,6	82,5	92,9	98,9	106,5	116,6	126,7
13,00	56,6	73,6	84,8	95,5	101,7	109,4	119,8	130,2
14,00	58,1	75,4	86,9	97,9	104,3	112,2	122,9	133,5
15,00	59,5	77,2	89,0	100,3	106,7	114,8	125,8	136,7
16,00	60,8	78,9	91,0	102,5	109,1	117,4	128,6	139,7
17,00	62,1	80,6	92,8	104,6	111,4	119,8	131,2	142,6
18,00	63,3	82,2	94,7	106,7	113,6	122,2	133,8	145,4
19,00	64,5	83,7	96,4	108,6	115,7	124,5	136,3	148,1
20,00	65,6	85,2	98,1	110,6	117,7	126,6	138,7	150,7
21,00	66,7	86,6	99,8	112,4	119,7	128,8	141,0	153,2
22,00	67,7	88,0	101,4	114,2	121,6	130,8	143,3	155,7
23,00	68,8	89,3	102,9	115,9	123,4	132,8	145,5	158,1
24,00	69,8	90,6	104,4	117,6	125,2	134,7	147,6	160,4

Tabella 4.4: Altezza di pioggia di progetto [mm] per vari tempi di ritorno, per il bacino in esame.

Con questi valori di altezza di pioggia si ricavano le curve di possibilità pluviometrica illustrate in Figura 4.4, che corrispondono ai valori di a ed n indicati in Tabella 4.5.

Tempo di ritorno [anni]	a	$n (<1h)$	$n (>1h)$
200	54,428	0,37	0,34

Tabella 4.5: Valori di a e n della curva di possibilità pluviometrica per il bacino in esame per un tempo di ritorno di 200 anni.

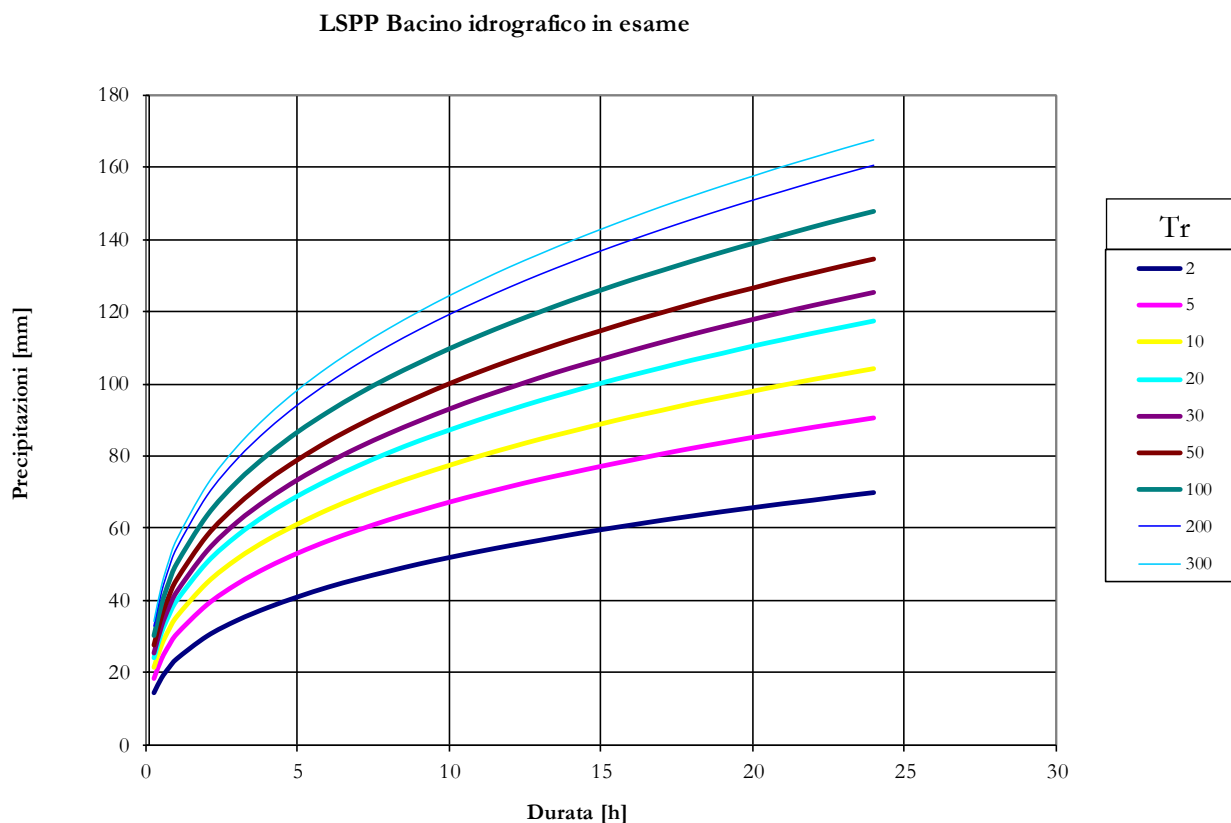


Figura 4.4: Linee di possibilità pluviometrica per il bacino idrografico in esame chiuso a quota 1510,25 m s.l.m.

4.3 Idrogramma liquido

Il codice AdB-ToolBox ha permesso di valutare l'idrogramma liquido di piena con T_r 200 anni per il bacino esaminato; la portata al picco stimata è riportata nella sottostante **Tabella 4.6**.

Bacino in esame	T_r 200 anni
Tempo di pioggia [h]	0,42
Portate al picco [m^3/s]	1,414

Tabella 4.6: Portata teorica al colmo della piena e tempo di pioggia, rispetto un tempo di ritorno di 200 anni, per il bacino in esame chiuso a quota 1510.25 m s.l.m.

L'idrogramma di piena e lo ietogramma di progetto per il bacino imbrifero analizzato sono riportati nelle figure che seguono. Preme precisare che l'idrogramma sotto riportato è l'idrogramma liquido, cioè non comprendente un'eventuale presenza di trasporto solido che sarà invece computata nel **paragrafo 4.4**.

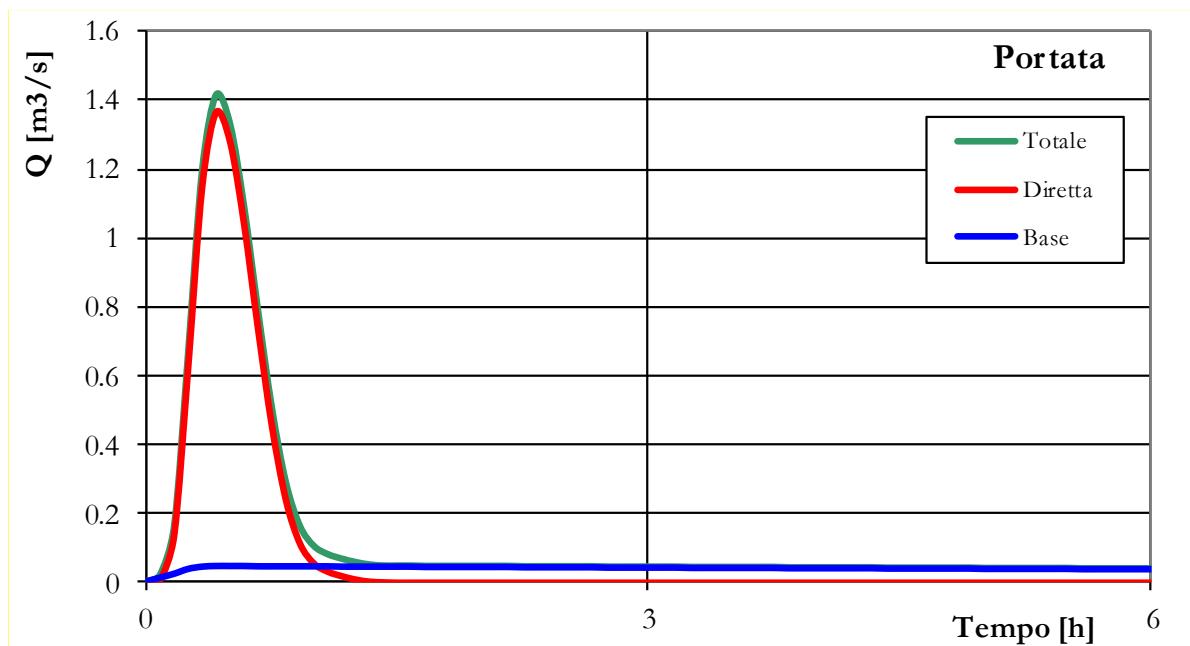


Figura 4.5: Tr 200 - Idrogramma di piena per il bacino in esame a quota 1925,10 m s.l.m.; Q_{bas} indica il deflusso profondo, Q_{dir} quello superficiale, Q_{tot} quel totale somma dei precedenti.

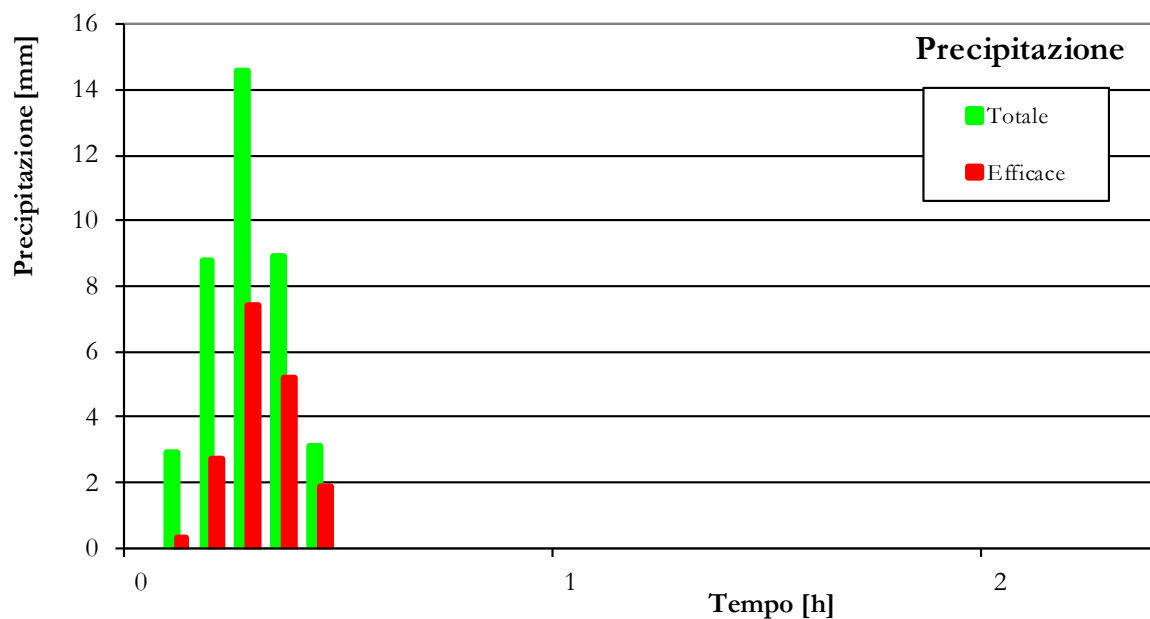


Figura 4.6: Tr 200 - Ietogramma di progetto utilizzato per la determinazione dell'idrogramma di piena per il bacino imbrifero in esame; P_{tot} indica la pioggia totale (costante), P_{exc} la pioggia efficace.

Infine, preme evidenziare che si è verificato quale potesse essere lo sviluppo di un bacino idrografico con punto di chiusura più a valle (più vicino all'asta torrentizia dell'Avisio) rispetto a quello che è stato necessario considerare per simulare il punto di sbocco della colata detritica (vedasi capitolo 0). Ebbene,

è emerso un bacino scolante che non risulta dissimile da quello valutato con chiusura presso l'apice del conoide e quindi ciò conferma la modellazione idrologica eseguita.

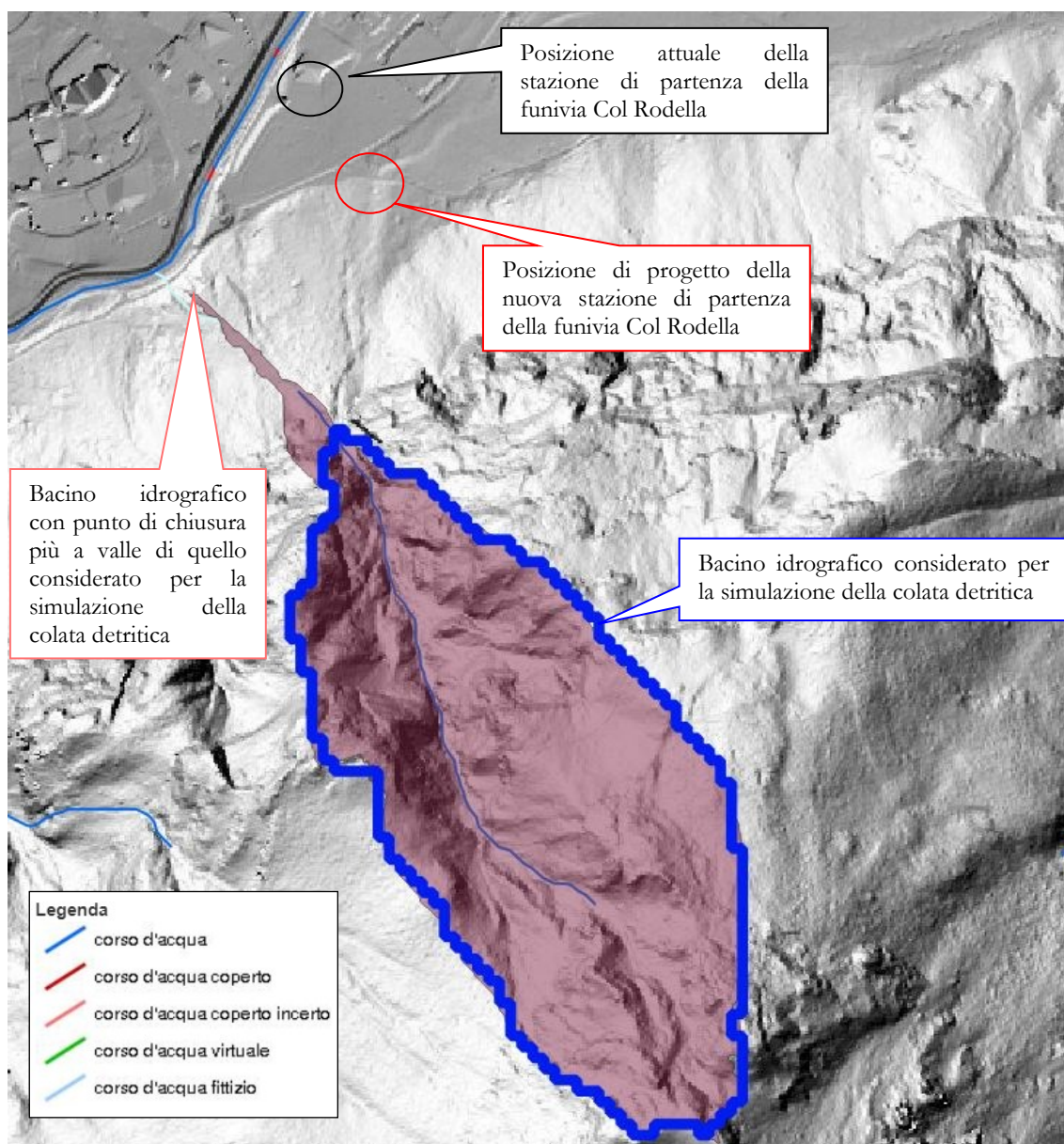


Figura 4.7: Rappresentazione del bacino idrografico con punto di chiusura più a valle di quello assunto per la simulazione della colata detritica.

4.4 Idrogramma colata

La conoscenza dell'idrogramma liquido di progetto, rappresentato nel paragrafo precedente, permette di definire, attraverso il metodo volumetrico, l'idrogramma della colata; ne segue la necessità di definire il sedimentogramma della colata, ossia l'andamento della concentrazione volumetrica del sedimento nel corso dell'evento.



Le colate come quella in esame sono fenomeni di piena caratterizzati da una concentrazione volumetrica del sedimento superiore al 20%. Nella letteratura scientifica esistono diverse modalità di classificazioni del fenomeno, che si possono ricondurre alle proprietà della matrice fluida – concentrazione volumetrica del sedimento e concentrazione di materiale fine coesivo. Basse concentrazioni danno luogo a *mud flood* caratterizzato da elevate velocità di propagazione del fronte, mentre concentrazioni elevate ($C > 0,45$) danno luogo a colate di fango o granulari in presenza rispettivamente di matrice fluida coesiva o non coesiva.

Il sedimentogramma di progetto presenta un picco praticamente coincidente con il picco dell'idrogramma liquido, la concentrazione massima dell'idrogramma è del 50%, mentre la concentrazione minima è pari al 15%. La concentrazione media del picco sedimentogramma è pari all'incirca al 43%.

Secondo il metodo volumetrico, si fa uso della seguente espressione:

$$\frac{Q_{tot}}{Q_l} = \frac{C^*}{C^* - C_m}$$

dove:

- C^* rappresenta la massima concentrazione di massimo impaccamento del materiale costituente l'ammasso (0.65);
- C_m rappresenta la concentrazione volumetrica di equilibrio del fronte stazionario della colata in movimento.

La simulazione della colata è stata effettuata ipotizzando un evento estremo nell'ipotesi di alimentazione solida continua da monte.

Tali ipotesi riguardanti le concentrazioni della colata e le fonti di sedimento saranno affinate successivamente con l'acquisizione di informazioni più dettagliate di natura geologica. Tali dati, acquisiti in fase di redazione del progetto esecutivo per la realizzazione della nuova stazione di partenza dell'impianto in esame, permetteranno una più precisa simulazione del fenomeno anche in vista del dimensionamento delle opere di difesa.

Nella realtà la presenza del bosco che si è sviluppato al di sopra dei depositi presenti sul bacino e sul conide tende ad inibire l'erosione del versante, limitandone l'alimentazione solida; ciò non toglie che potrebbero verificarsi eventi che in futuro potrebbero cambiare la copertura, a seguito ad esempio di un incendio o di una tempesta analoga alla tempesta Vaia.

Nella figura che segue si mostrano i vari idrogrammi ottenuti con il metodo volumetrico. Dall'integrale delle curve ottenute si stima che il volume complessivo della colata (liquido + solido, curva blu) sia pari a 8500 m³, mentre il volume che ci si attende venga depositato presso la zona di analisi sia pari a circa 6000 m³ (solido, curva blu meno curva azzurra). Ne risulta quindi che la colata di detrito ipotizzata ha un bacino imbrifero di 0,147 km², e un volume di materiale movimentabile stimato in 6000 m³.

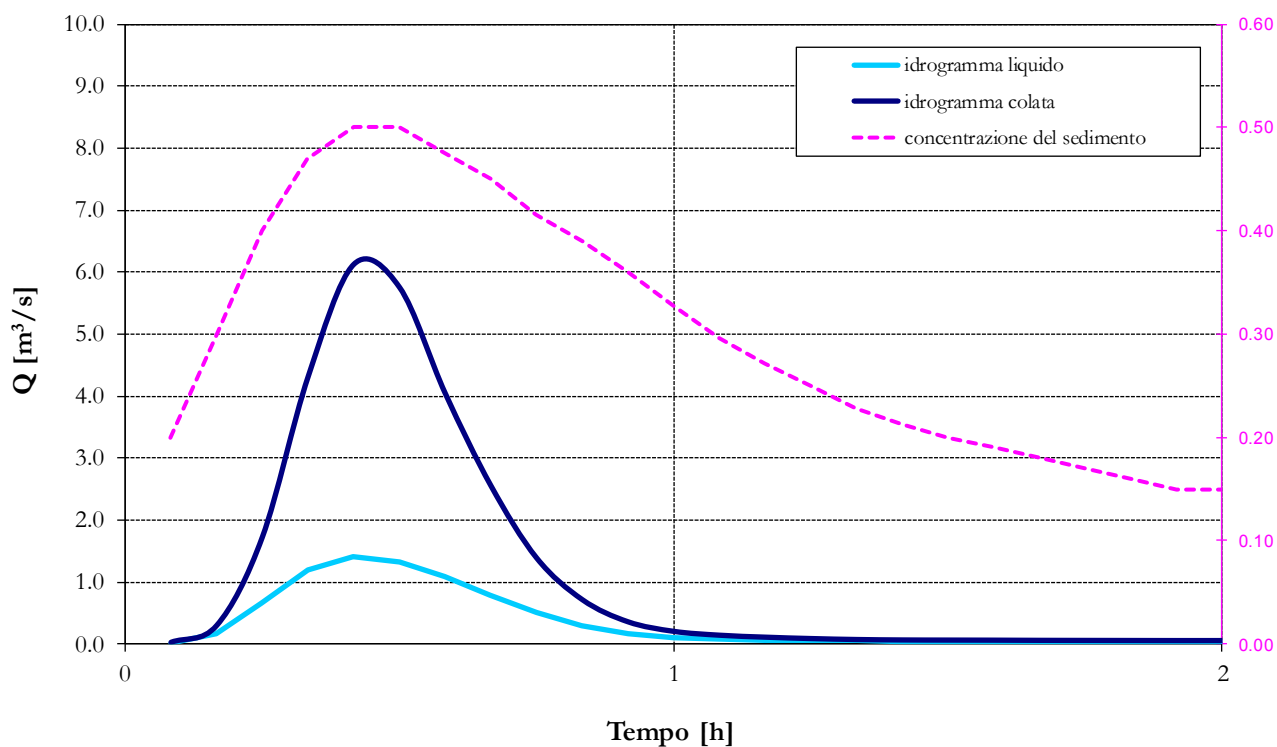


Figura 4.8: idrogramma liquido, idrogramma della colata e sedimentogramma di progetto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni.

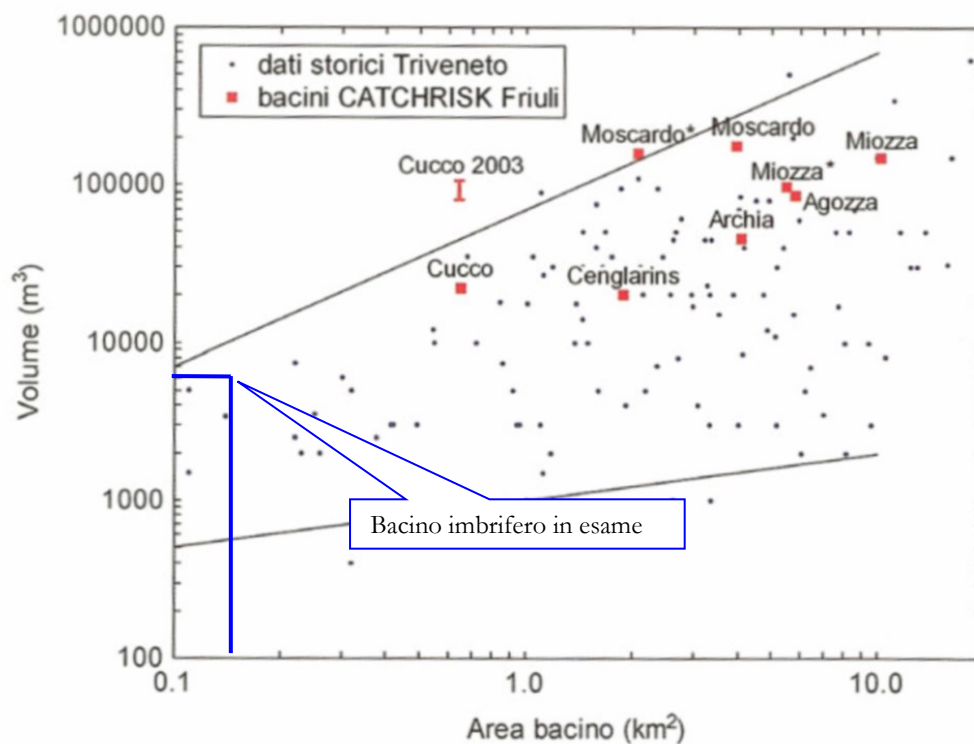


Figura 4.9: confronto fra valutazioni di terreno dei volumi mobilizzabili ed eventi storici documentati nei bacini dell'Italia nordorientale. Viene indicata la posizione del bacino in esame in base all'area dello stesso bacino e del volume mobilizzato.

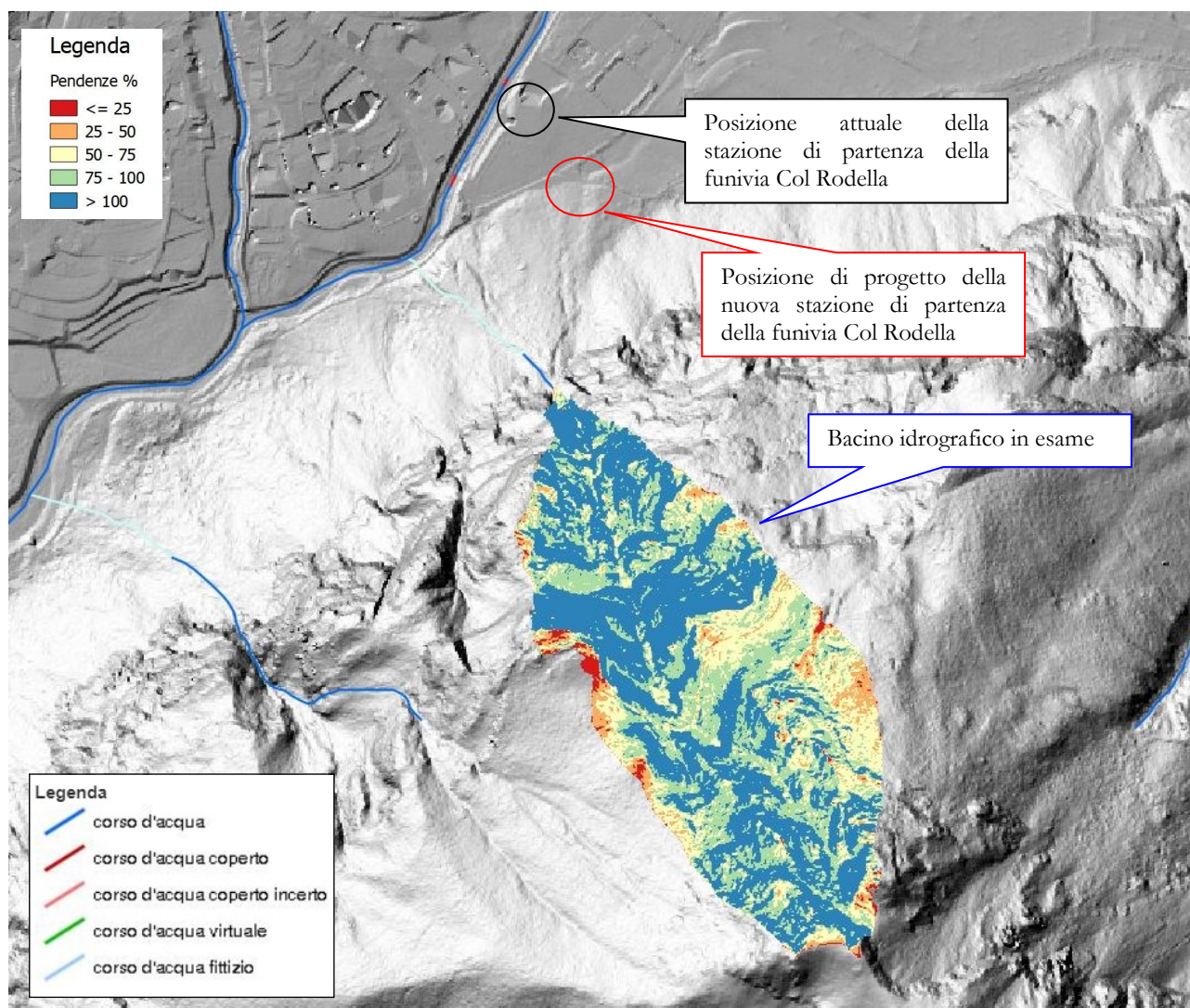


Figura 4.10 : carta delle pendenze per il bacino in esame.

Per quanto riguarda i volumi mobilitati dalla simulazione della colata detritica, questi appaiono in linea con quanto risulta da dati storici relativi a bacini presenti nell'area del Triveneto, vedasi **Figura 4.9**.

Come già accennato l'ampiezza della zona di ricarica di sedimento è in grado di garantire il volume della colata detritica di progetto stimata, la quale sarà alla base delle simulazioni 2D. Si è rilevata, infatti, la presenza di pareti a forte pendenza notevolmente fratturate su quasi tutta la superficie del bacino imbrifero, vedasi **Figura 4.10**. Tali evidenze saranno meglio dettagliate e quantificate in fase di progettazione esecutiva.

La tipologia ed il meccanismo di colata che si potrebbe verificare è quello classico di franamento dai versanti scoscesi della zona di distacco con conseguente temporaneo sbarramento dell'alveo del rio. Tale sbarramento induce un accumulo di acqua e detriti a monte e nel momento in cui la spinta dell'acqua vince questo ostacolo si ha l'innescò della colata di acqua mista a sedimento. Si può quindi concludere che la tipologia di colata, i volumi coinvolti ed il meccanismo di formazione/alimentazione della stessa siano da ritenersi plausibili per l'area di studio.



5 Modellazione idraulica bidimensionale con Flumen2D

Le simulazioni sono state eseguite tramite il codice di calcolo Flumen2D. Il codice di calcolo Flumen2D permette di valutare fenomeni di propagazione di onde impulsive in alvei a fondo fisso e mobile a concentrazione variabile, ossia con concentrazione funzione delle variabili idrodinamiche. Per il caso in esame si è scelta una modellazione su fondo fisso.

5.1 Fondamenti matematico-numeric del codice Flumen2D

Il codice di calcolo Flumen2D permette di valutare fenomeni di propagazione di onde impulsive in alvei a fondo fisso e mobile a concentrazione variabile, ossia con concentrazione funzione delle variabili idrodinamiche.

Le equazioni del modello matematico, scritte in forma conservativa, sono [7], [8]:

$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}_x + \mathbf{G}_y = \mathbf{H} + \mathbf{S}$$

dove la variabile conservata \mathbf{U} e i flussi conservativi \mathbf{F} e \mathbf{G} nelle direzioni x e y, per quanto riguarda i bilanci delle due fasi liquida e solida, sono:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h + z_b \\ (c\Delta + 1)uh \\ (c\Delta + 1)vh \\ ch + c_b z_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ (c\Delta + 1)\left(u^2 h + g \frac{h^2}{2}\right) \\ (c\Delta + 1)uvh \\ cuh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ (c\Delta + 1)uvh \\ (c\Delta + 1)\left(v^2 h + g \frac{h^2}{2}\right) \\ cvh \end{bmatrix}$$

mentre il flusso non conservativo \mathbf{H} e il termine sorgente \mathbf{S} sono:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial z_b}{\partial x}(c\Delta + 1)gh \\ -\frac{\partial z_b}{\partial y}(c\Delta + 1)gh \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau_x}{\rho_w} \\ -\frac{\tau_y}{\rho_w} \\ 0 \end{bmatrix}$$

dove h è la profondità, u e v sono le componenti della velocità lungo le direzioni ortogonali x e y rispettivamente, z_b è la quota locale del fondo, c la concentrazione media sulla verticale, c_b la concentrazione solida dei sedimenti del fondo, ρ_w and ρ_s le densità dei sedimenti e dell'acqua, rispettivamente, $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ la densità relativa immersa dei sedimenti, $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ il vettore dello sforzo tangenziale al fondo.

Le condizioni di chiusura relative alla concentrazione e allo sforzo al fondo vengono di seguito descritte. Per quanto riguarda la concentrazione, la formula di chiusura viene derivata dalla formula di



trasporto di Meyer-Peter e Müller [9], definendo $q_s = (cu_h, cv_h)$. Come riportato in precedenti lavori, l'equazione che definisce la concentrazione in funzione delle variabili idrodinamiche è la seguente:

$$c = c_b \beta \frac{w^2}{h}$$

dove $w^2 = u^2 + v^2$ è il modulo della velocità della corrente e β è un coefficiente, funzione della densità del materiale e dalla scabrezza del fondo:

$$\beta = \frac{8\sqrt{g}}{g\Delta c_b \sqrt{h}} \left(1 - \frac{g_{cr} \Delta d_{50} h^{1/3}}{w^2 n_{td}} \right)$$

È possibile anche considerare la propagazione su fondo fisso, in questo caso la concentrazione risulta assimilata ad una variabile trasportata in modo avvettivo e la quota del fondo una variabile nota.

Per definire invece il valore dello sforzo sul contorno si è utilizzata la formulazione adottata da O'Brien e Julien [10] nel codice Flo2D:

$$\tau_x = \tau_s \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} + \frac{K}{8h} \frac{\eta}{h^{1/3}} u + \frac{n_{td}^2}{h^{1/3}} \frac{\gamma_m}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau_y = \tau_s \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} + \frac{K}{8h} \frac{\eta}{h^{1/3}} v + \frac{n_{td}^2}{h^{1/3}} \frac{\gamma_m}{h^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

dove τ_s è lo sforzo di soglia, η è la viscosità dinamica, n_{td} è il coefficiente di resistenza dispersivo-turbolento γ_m è il peso specifico della miscela, K è un parametro di resistenza per deflussi laminari (variabile nell'intervallo 24÷50000 al variare della scabrezza del fondo).

Il parametro di Manning dispersivo-turbolento dipende dalla concentrazione volumetrica c e dal valore di Manning della superficie attraverso la relazione empirica:

$$n_{td} = n \cdot (1 + b \cdot e^{mc})$$

dove il valore dei coefficienti b e m è rispettivamente di 0.0538 e 6.0896.

Lo schema numerico di calcolo è conservativo, esplicito e ai volumi finiti, tipo Godunov. Il solutore delle equazioni del modello è shock-capturing (HLL) ed è quindi adatto all'analisi della propagazione di fenomeni impulsivi con correnti sia subcritiche che supercritiche.

L'aggiornamento temporale delle variabili conservate viene eseguito tramite il seguente bilancio ai volumi finiti, nel quale risulta già inclusa la lateralizzazione:

$$\mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = \mathbf{U}_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\mathbf{F}_{i-\frac{1}{2},j} - \mathbf{F}_{i+\frac{1}{2},j} \right] + \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\mathbf{G}_{i,j-\frac{1}{2}} - \mathbf{G}_{i,j+\frac{1}{2}} \right] + \Delta t (\mathbf{H}_{i,j} + \mathbf{S}_{i,j})$$

La stabilità del metodo di calcolo viene garantita dal rispetto della condizione di Courant:



$$\Delta t = \frac{C_{eff} \min[\Delta x, \Delta y]}{\max[S_{3x}, |S_{1x}|, S_{3y}, |S_{1y}|]} \quad C_{eff} = 0.49$$

ove S è la celerità delle piccole perturbazioni.

5.2 Dati di input della modellazione 2D

5.2.1 Dominio di calcolo

Il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni include la parte terminale del bacino idrografico considerato ed il conoide fino al torrente Avisio.

Il dominio di calcolo viene rappresentato con una griglia a maglia quadrata di lato 1 m, sufficiente per schematizzare con adeguata accuratezza la parte terminale del bacino in esame. L'altimetria del dominio è ricavata dal rilievo Lidar della Provincia Autonoma di Trento 2006 la cui risoluzione è di 1m.

5.2.2 Condizioni al contorno

Nel caso in esame viene posta la condizione di moto localmente uniforme sul bordo del dominio di calcolo; tale condizione entra in gioco se la colata si propaga fino al confine del dominio di calcolo. La medesima condizione al contorno viene assegnata anche alla cella di calcolo dove viene immesso l'idrogramma di progetto.

5.2.3 Idrogramma di piena

L'idrogramma della colata viene assegnato a due celle di calcolo del dominio computazionale nel punto all'apice del conoide considerato. I valori di portata dell'idrogramma sono riportati in **Figura 4.8**.

5.2.4 Parametri numerici

Il programma valuta i flussi di massa e quantità di moto nelle direzioni x e y, quando almeno una delle due celle di calcolo presenta un tirante idrico superiore a $h_{\min \text{ flooding}}$; tale parametro è stato posto pari a 1 cm.

5.2.5 Parametri idraulici e reologici

Come è stato ricordato in precedenza, la chiusura fenomenologia dello sforzo tangenziale al fondo è stata definita tramite la relazione reologica di O'Brien e Julien [10]. Il parametro di resistenza, K , rappresentativo del termine di sforzo viscoso, è stato posto pari a 1000 (valore tipico per superfici erodibili con presenza di vegetazione). La viscosità dinamica, η , della mistura è stata scelta in un intervallo 1 – 10 Pa s per i valori di concentrazione di progetto, come proposto in letteratura, [10] e [11]. La fase di arresto della colata e, quindi, il limite del deposito ed il suo spessore dipendono principalmente dal valore del parametro di soglia τ_s . Per questo motivo si è scelto un range di valori



anche per tale parametro: 10 e 100 Pa (vedasi [10] e [11]); il primo valore è corrispondente ad una colata piuttosto fluida (simulazione A), il secondo è invece relativo ad una colata più coesiva, in grado di creare depositi di materiale di maggior spessore (simulazione B).

Gli sforzi dispersivo-turbolenti dipendono dal parametro n_{td} , che sulla base dei dati di letteratura è stato posto pari $0,07 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Il valore di γ_m , peso specifico della mistura, è stato posto pari a 17 kN m^{-3} valutato considerando la concentrazione media del picco della colata C_m pari a 0.43.

Si è scelto di effettuare due diverse simulazioni con i valori limite dei range proposti per i parametri di viscosità dinamica e di parametro di soglia. Lo scostamento tra i valori relativi alle due simulazioni è rilevante e può ascriversi sia alla mancanza di misure granulometriche e reologiche specifiche sia alla capacità del bacino in esame di generare colate con caratteristiche reologiche diverse a seconda dell'evento meteorico che le innesca.

Sono state quindi eseguite con il codice Flumen2D due distinte simulazioni denominate “simulazione A” e “simulazione B”, le quali prevedono i seguenti parametri modellistici:

SCENARIO	τ_s [Pa]	η [Pa·s]	n_{td} [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]	γ_m [kN m^{-3}]
Simulazione A	10	1	0,07	17
Simulazione B	100	10	0,07	17

Tabella 5.1: parametri modellistici utilizzati nelle simulazioni con Flumen2D.

5.3 Risultati della modellazione 2D

Per ciascuno scenario di riferimento viene riportata la mappa del tirante (h [m]), della velocità massima (v [m/s]) e della pressione (P [KPa]) in ciascuna cella di calcolo, adottando come sfondo le ombre del Lidar 2006 - PAT (vedasi figure successive).

I diversi risultati in termini di spessore e di velocità del materiale solido sono da ascrivere, come previsto, ai diversi valori dei parametri reologici.

In particolare, la simulazione A prevede una colata meno coesiva che induce depositi con spessore minore e velocità della colata maggiori. La simulazione B, al contrario presenta, velocità del flusso meno consistenti, ma spessori di deflusso maggiori. Le maggiori velocità e la minor coesione della simulazione A portano ad una colata che si sparge a ventaglio su tutto il conoide, mentre per la soluzione B si ha una colata che segue gli impluvi presenti senza fuoriuscire su tutto il conoide. In fase di progettazione esecutiva si valuterà il punto, o i punti, presso cui assegnare l'idrogramma di colata in modo tale da non considerare solamente canali incisi esistenti e di verificare percorsi alternativi della colata qualora vi fossero nuove incisioni o nuovi canali preferenziali creati dagli eventi atmosferici negli anni o creati dalla colata stessa, in uscita dalla forra scorrendo sul materiale del conoide.



Le simulazioni eseguite non hanno tenuto conto del possibile trasporto di legname da parte del flusso di piena del rio; tale evenienza risulta infatti difficilmente modellizzabile e quantificabile. Un'eventuale presenza di elementi arborei di dimensioni superiori a 10 m all'interno del flusso iperconcentrato potrebbe creare un intasamento locale e determinare delle nuove direttrici del flusso. Anche per tale motivo in fase di progetto esecutivo andranno analizzati vari scenari con diversi punti di partenza della colata.

Si riportano nei paragrafi che seguono i risultati della modellazione, mentre di seguito si mostra l'estensione del dominio di calcolo.

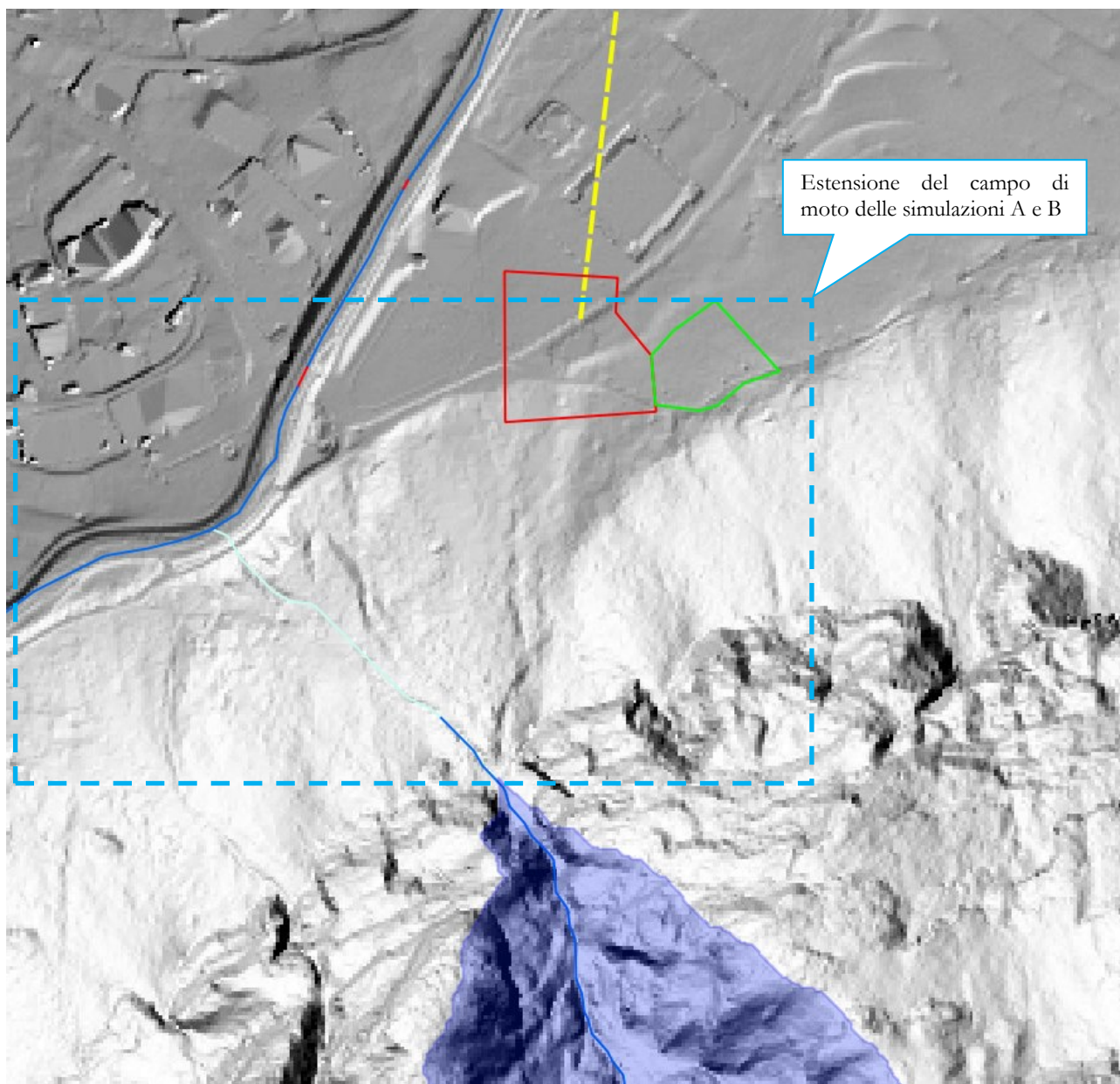


Figura 5.1: Rappresentazione del campo di moto delle simulazioni A e B su ombre Lidar 2006 – PAT, con indicazione in giallo della linea della nuova funivia, in rosso dell'ingombro della nuova stazione ed in verde del possibile sito di deposizione del materiale di colata nell'ipotesi di realizzazione di un vallo deviatore.

5.3.1 Simulazione A

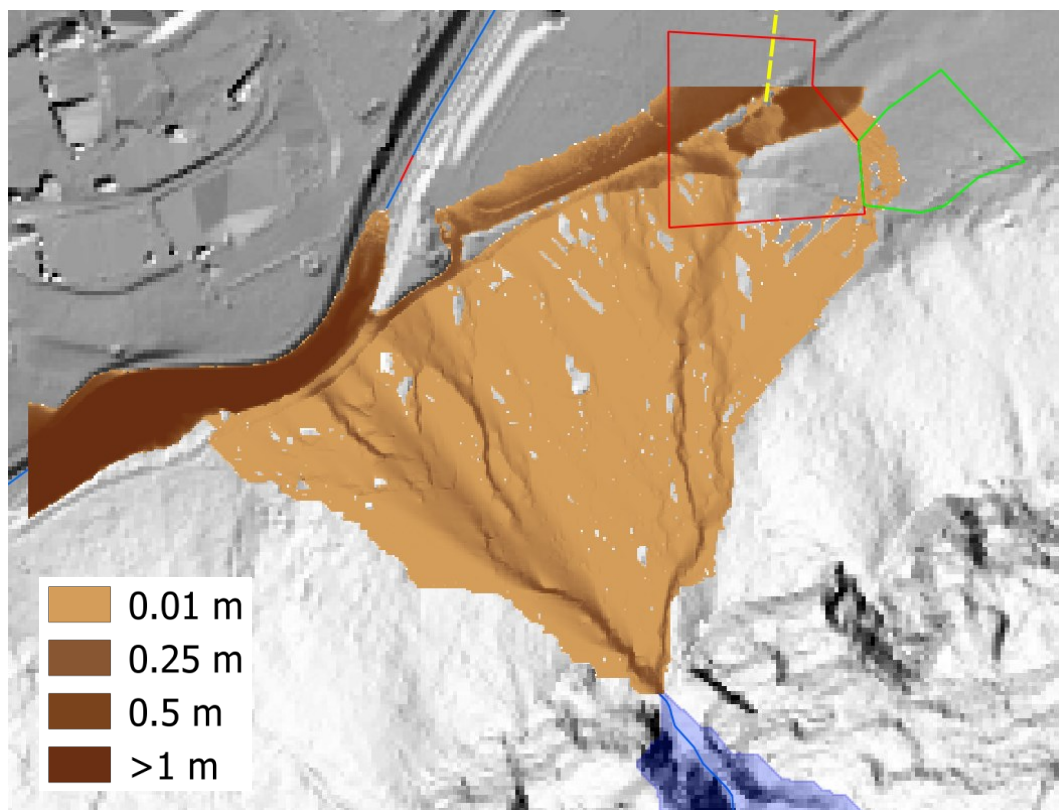


Figura 5.2: simulazione A: spessore della colata massimo [m].

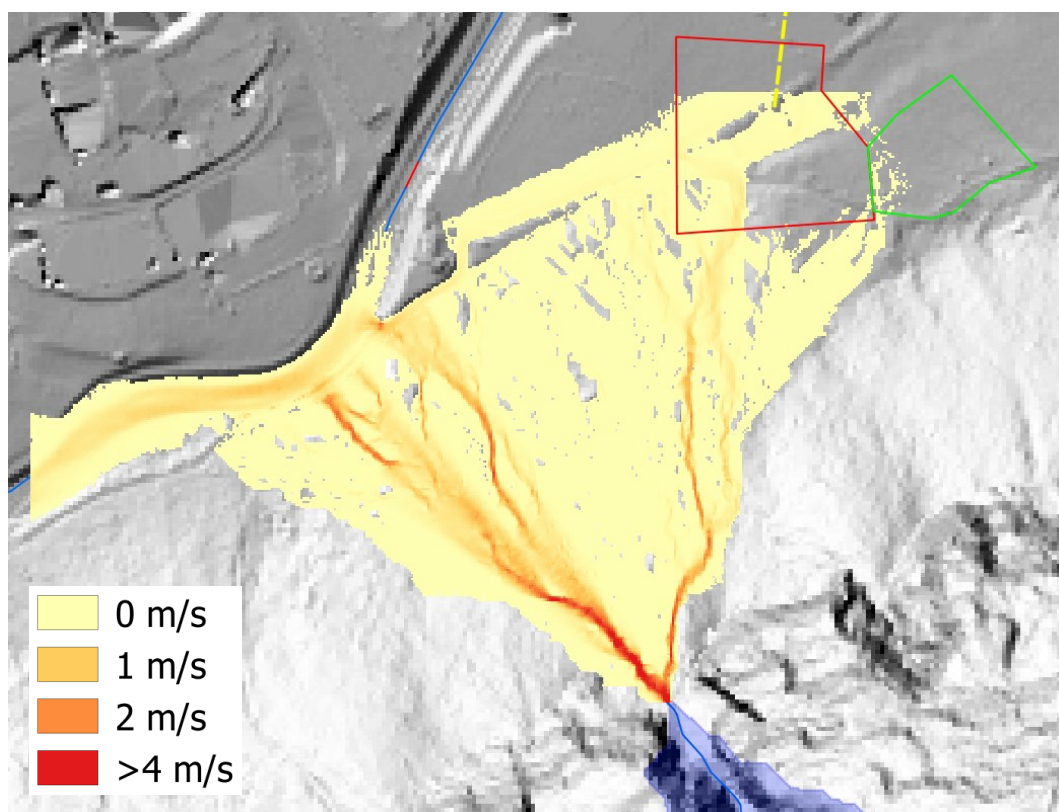


Figura 5.3: simulazione A: velocità massima [m/s].

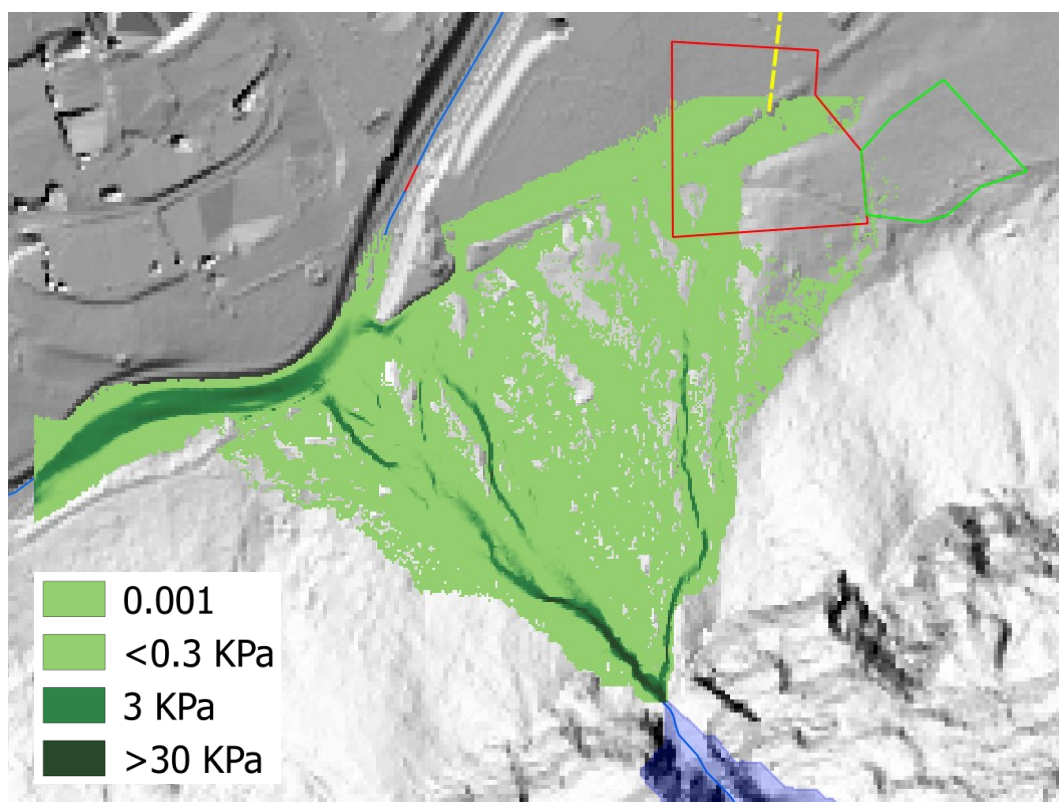


Figura 5.4: simulazione A: pressione massima [m/s].

5.3.1 Simulazione B

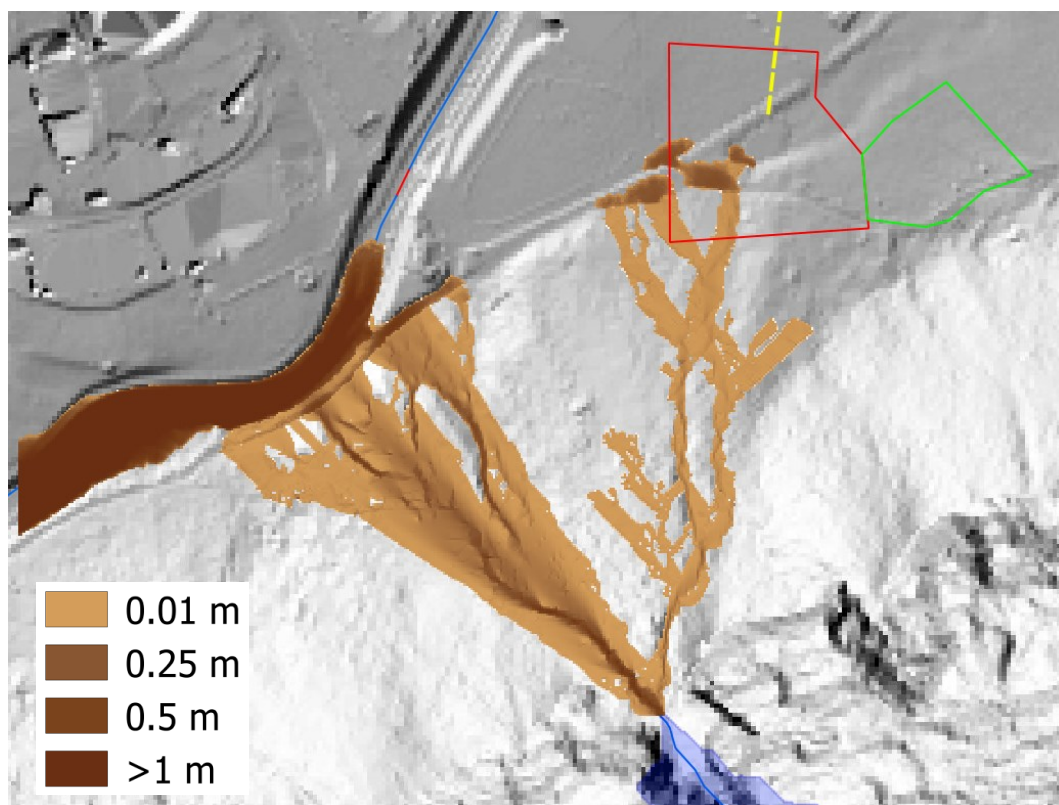


Figura 5.5: simulazione B: spessore della colata massimo [m].

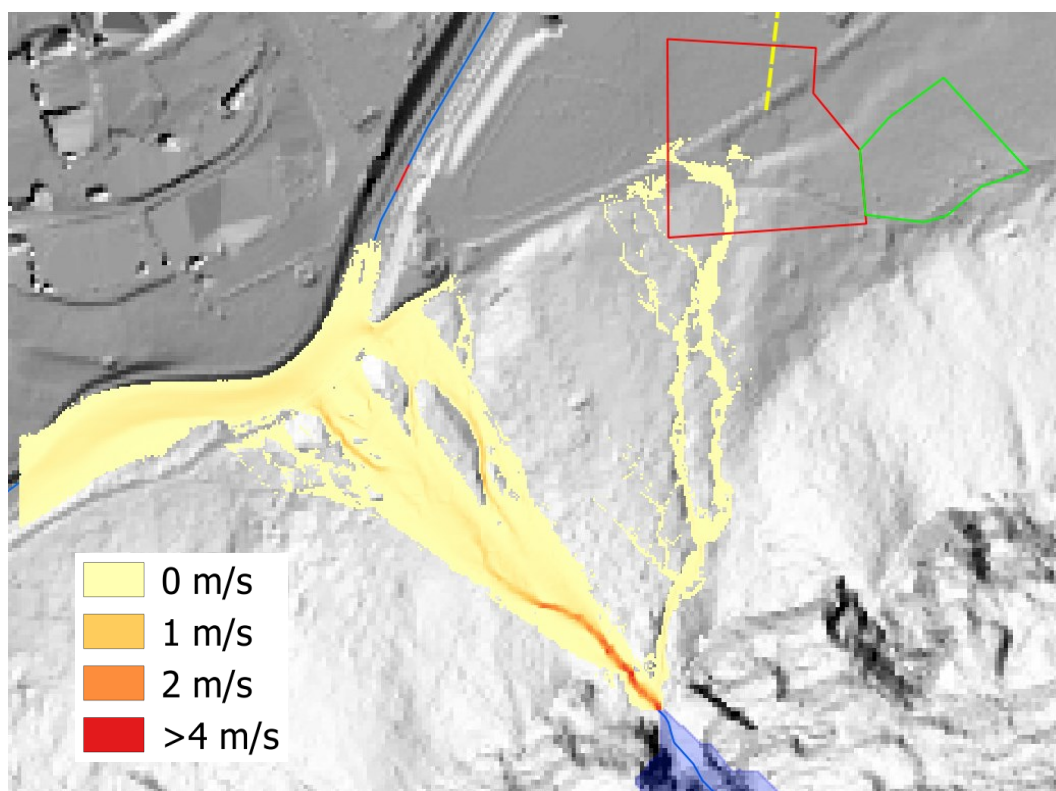


Figura 5.6: simulazione B: velocità massima [m/s].

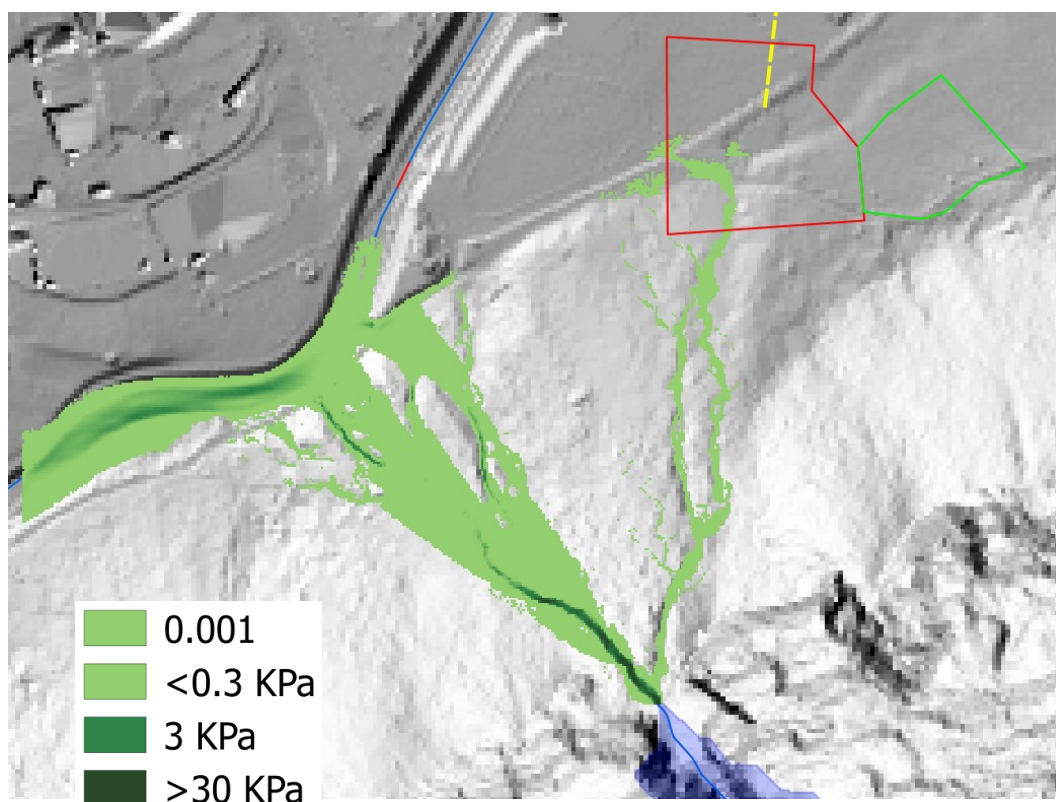


Figura 5.7: simulazione B: pressione massima [m/s].



6 Conclusioni

Nel presente studio si è valutato l'idrogramma di piena di una colata detritica con tempo di ritorno 200 anni e si è simulata la sua propagazione lungo il conoide in oggetto fino alla confluenza con il torrente Avisio.

L'analisi ha mostrato che la posizione presso cui si propone di realizzare la stazione di partenza della funivia Col Rodella è sede di colata di detrito.

Il flusso principale della colata non si prevede investa direttamente la zona presso cui si realizzerà la nuova stazione, tuttavia i canali incisi limitrofi alla zona si prevede siano sede di flussi piuttosto intensi con tiranti di 40-50 cm, velocità di 2-3 m/s e pressioni fino a 7 KPa. Le simulazioni per lo stato attuale sono state eseguite considerando un idrogramma di colata che si sviluppa a partire dall'apice del conoide; in fase di progettazione esecutiva si potranno ipotizzare altre posizioni dell'idrogramma di piena in modo da considerare anche altre direzioni di propagazione che magari andranno ad interessare in modo più diretto la nuova costruzione.

Per la difesa della nuova stazione si prevede la realizzazione di un vallo in terra in grado di assorbire l'energia della colata in arrivo e di deviarne il flusso verso la destra orografica; a destra dell'opera vi è infatti la disponibilità di alcuni terreni attualmente a prato. Il lato rivolto verso monte del vallo dovrà essere protetto con massi di grandi dimensioni in modo tale che il flusso in arrivo non scalzi l'opera in terra.

La realizzazione della nuova stazione potrà quindi considerarsi compatibile con il fenomeno idraulico atteso solo con la realizzazione di un'opera di difesa adeguata quale un tomo in terra. Le valutazioni di dettaglio sulle dimensioni del tomo e sulla sua efficacia rispetto ai fenomeni attesi saranno valutate nel dettaglio con una modellazione 2D da eseguirsi in fase di progettazione esecutiva.



7 Bibliografia

- [1] Associazione Italiana di Idronomia, Calibrazione dei parametri cinematici del modello afflussi-deflussi, Relazione tecnico scientifica, 2003.
- [2] Servizio Bacini Montani, Ufficio di zona 3, Relazione Tecnica, 2008.
- [3] Manuale d'uso del software applicativo AdB-ToolBox (versione 1.5 e superiori) Estensione ANALISI IDROLOGICHE (AI).
- [4] Decreto Ministeriale 26 giugno 2014 - Ministero dei trasporti - "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)".
- [5] Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow, J.Hydraulic Div., ASCE, Vol 104, NoHY8, pp.1153-1169.
- [6] Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia - Servizio territorio montano e manutenzioni, "La prevenzione ed il rischio idrogeologico nei piccolo bacini montani della regione_ esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CatchRisk".
- [7] Giuliani M., Rosatti G., Fraccarollo L., 2004, Calcolo di onde di piena in alvei naturali a fondo mobile, XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento.
- [8] Giuliani M. e Fraccarollo L., 2007, A simplified approach to predict flood in sedimentary stream, XXXII Congress of IAHR, Venice.
- [9] Meyer-Peter E., Mueller R., 1948, Formulas for bed-load transport, Proc. of 2nd Meeting IAHSR, Stockholm, Sweden,. pp. 1-26.
- [10] O'Brien J.S., Julien P.Y., 1985, Physical processes of hyperconcentrated sediment flows, Proc. Of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods and Debris Flow Hazards in Utah, Utah Water Research Laboratory, Series UWRL/g-85/03, 260-279.
- [11] O'Brien, 2006, Flo-2D User Manual.