

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea magistrale in scienze forestali e ambientali

Back-analysis dell'evento di debris flow
verificatosi nel bacino idrografico del rio Rudan,
nel periodo 29-31 agosto 2020

Relatore

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatori

Dott. For. Baggio Tommaso

Dott. For. Bettella Francesco

Laureando

Alessandro Faggin

Matricola n. 1203107

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Riassunto

Nell'alta provincia di Belluno, nella valle del Boite, vi sono numerosi torrenti alpini frequentemente interessati da debris flow. In generale, i debris flow (detti anche colate detritiche) sono eventi di breve durata che si verificano per lo più nel periodo estivo, come quello che si è verificato nel bacino idrografico del rio Rudan. Oggigiorno sono presenti dei modelli che permettono una rappresentazione del fenomeno, in modo da prevedere le conseguenze e le possibili aree d'impatto.

In questo lavoro di tesi è stato studiato il fenomeno da colata detritica sviluppatasi nel bacino idrografico del rio Rudan in data 29 agosto 2020, il quale si trova nel Comune di Peaio (Vodo di Cadore, BL). Infatti, nel 2011 per mitigare gli eventuali danni riconducibili a eventi di debris flow si sono eseguiti degli interventi d'ingegneria idraulica e a seguire, è stato installato un sistema di monitoraggio.

In particolar modo, nella giornata del 29 agosto 2020 a fronte di una precipitazione di 62 mm si è verificata una colata detritica che ha interessato le opere di mitigazione.

Gli obiettivi che si sono prefissati in questo lavoro di tesi sono quelli di determinare i volumi e le portate del flusso in funzione del tempo, riprodurre il fenomeno di colata detritica attraverso il modello di propagazione bidimensionale FLO-2D per valutarne l'accuratezza e quindi confrontare i risultati con le osservazioni in campo.

Con FLO-2D si sono eseguite le simulazioni idrologiche e idrauliche, poi con il metodo volumetrico sono state stimate le portate e i volumi liquidi e solidi, così da paragonarli con quelli calcolati mediante le formule empiriche che trovano applicazione dai rilievi eseguiti in campo.

Dai primi risultati che si sono ottenuti si è colto che non si tratta di un evento eccezionale, ma dal punto di vista pluviometrico ha un tempo di ritorno di tre anni. Mediante la simulazione idrologica si è determinato l'idrogramma liquido e poi con la simulazione idraulica si sono ipotizzati due scenari di progetto. Il primo prevede l'implementazione nella piana di calcolo del modello FLO-2D della briglia rappresentata con i filtri aperti, mentre il secondo scenario tiene conto dei filtri completamente occlusi.

Dai risultati delle simulazioni, il secondo scenario è risultato la rappresentazione più verosimile; infatti, tale simulazione ha riprodotto quello che è veramente accaduto il 29 agosto 2020, perché la quasi totalità del materiale solido trasportato dalla corrente è stato trattenuto a monte della briglia filtrante per un volume totale stimato in 75.000 m³.

La velocità di avanzamento della colata detritica si attesta attorno ai 4-5 m/s, mentre la profondità massima si è attestata sui 5,30 m a monte della gaveta e di 6,30 m sulle ali dell'opera in quanto hanno una quota maggiore.

Per quanto riguardano invece i risultati delle formule empiriche, si sono ottenuti valori di portata e di volume eccessivi, al contrario dei valori ottenuti con il metodo volumetrico che invece sono da considerarsi realistici.

La performance del modello FLO-2D per la *back-analysis* del debris flow è risultata buona, in quanto è stata riprodotta la dinamica di propagazione della colata detritica secondo il comportamento reologico assegnato.

Si è trattato di un debris flow granulare e data la sua competenza è riuscito a trasportare legname in alveo, che è stato stimato in circa 18 metri cubi in volume (metro stereo).

In conclusione, la briglia filtrante ha funzionato come trattenuta del materiale solido, lasciando defluire la portata liquida con una parte esigua di sedimenti; inoltre si può dire che il comportamento della briglia è stato simulato in modo accurato e questo lo si riscontra anche osservando il video registrato dalla videocamera dell'Arpav, pertanto FLO-2D è stato un modello adatto a simulare l'evento di debris flow del 29 agosto 2020.

Abstract

In Belluno, in the Boite valley, many alpine streams are affected by debris flow events. In general, the debris flow are short events that occur in the summer, such as the one that occurred in Rio Rudan hydrograph basin.

Nowadays, there are models for representation this phenomenon and in order to predict possible impacts and aftermaths.

In this thesis, it considered the debris flow event that occurred on the 29 August 2020 in the Rio Rudan hydrograph basin that is located in Peaio (Vodo di Cadore, BL). In 2011, a monitoring system was installed to mitigate any damage from debris flow events.

Last summer, in particular on the 29th of august 2020 due to a rainfall event of 62 mm, a new debris flow event took place, which had an impact on the mitigation works.

In this work, the goals are to define volumes and flow hydrographs firstly. Secondly, the aim was the debris flow simulation using the FLO-2D model and result comparison with field observations.

With FLO-2D model, we run two simulations: the first one, the hydrological simulation, and the second one, the hydraulic simulation. After we applied the volumetric method for estimate volumes and flows, so as compare the values with those calculated with the empirical formulas.

From the first results obtained, the magnitude of this specific event is not very high, but the return time resulted in three years in terms of rainfall severity.

Through the hydrological simulation, we assessed the water hydrograph and then we hypothesized two scenarios with the hydrodynamic simulation. The first, involves the implementation of the modeling floodplain plane concerning the retention check dam with the open filters, on the contrary, the second scenario considers the filter completely clogged.

From the output of the hydraulic simulation, the second scenario is most realistic and it reproduces more consistently the situation that occurred on 29 August 2020 in the Rio Rudan, because almost all of the solid volume was trapped by the check dam.

The debris flow velocity is around 4-5 m/s, the maximum depth corresponds to 5,30 m at the spillway and 6,30 m in the wing zone.

The values of discharge and volume that are obtained according to the volumetric method are very realistic. The performance of FLO-2D model for the back-analysis of the debris flow is satisfactorily, and this software confirmed to be accurate for debris flow simulation.

It was the granular debris flow event and transported large wood, it is estimated to 18 m³ (metro stero).

In conclusion, the filter of the check dam proved a correct functioning holding the sediments and let passing the liquid component of the debris flow. This was in accordance with the video registered by ARPAV monitoring system.

Indice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introduzione | 15 |
| 1.1 | Inquadramento e descrizione delle colate detritiche | 16 |
| 1.2 | Caratterizzazione morfometrica dei bacini da debris flow | 20 |
| 1.3 | Dinamiche della colata detritica | 21 |
| 1.3.1 | Zona d'innescio | 22 |
| 1.3.2 | Canale di scorrimento | 24 |
| 1.3.3 | Zona di arresto | 26 |
| 1.4 | Classificazioni reologiche delle colate detritiche | 28 |
| 1.4.1 | Tipologie di colate detritiche | 31 |
| 1.4.2 | Classificazione secondo Jacob (2005) | 32 |
| 1.5 | Il legname in alveo | 33 |
| 1.5.1 | Rilievo del legname in alveo | 36 |
| 1.5.2 | Gli effetti del legname in alveo | 36 |
| 1.6 | Le analisi idrologiche | 37 |
| 1.7 | Le analisi idrauliche | 38 |
| 1.7.1 | Determinazione del debrisgramma: i metodi empirici | 39 |
| 1.7.2 | Il metodo volumetrico | 40 |
| 1.8 | FLO-2D: un modello per le simulazioni idrologiche e le simulazioni idrauliche | 44 |
| 1.8.1 | Il modello matematico di base in FLO-2D | 46 |
| 2 | Obiettivi del lavoro | 50 |
| 3 | Materiali e metodi | 51 |
| 3.1 | Estrazione del bacino idrografico del rio Rudan in GIS | 51 |
| 3.2 | Inquadramento geografico e parametri morfometrici del bacino idrografico del rio Rudan | 52 |
| 3.2.1 | Mappa delle pendenze e delle isoipse | 55 |
| 3.2.2 | Curva ipsometrica dimensionale a adimensionale | 56 |
| 3.3 | Il monitoraggio del Rio Rudan | 58 |
| 3.3.1 | Le stazioni pluviometriche | 58 |
| 3.3.2 | Sistema di allarme per la sicurezza del centro abitato di Peaio | 62 |
| 3.3.3 | Monitoraggio mediante videocamera | 63 |
| 3.4 | Indagini di campo | 64 |
| 3.4.1 | Granulometria in corsi d'acqua montani | 64 |
| 3.4.2 | Rilievo granulometrico del torrente Rudan | 65 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.4.3 | Sezioni del torrente Rudan nel post evento | 72 |
| 3.5 | La modellazione idrologica | 73 |
| 3.5.1 | Il metodo SCS CN | 73 |
| 3.5.2 | Il coefficiente di scabrezza di Manning | 76 |
| 3.5.3 | FLO-2D..... | 77 |
| 4 | Risultati | 84 |
| 4.1 | Mappa dell'uso del suolo | 84 |
| 4.2 | Mappa della litologia..... | 85 |
| 4.3 | Mappa del Curve Number (CN)..... | 86 |
| 4.4 | Risultati del monitoraggio del rio Rudan..... | 87 |
| 4.4.1 | Analisi del video che riprende la colata detritica..... | 87 |
| 4.4.2 | Elaborazione dei dati pluviometrici..... | 88 |
| 4.5 | Stima della severità dell'evento | 90 |
| 4.6 | Risultati delle indagini di campo | 90 |
| 4.6.1 | Elaborazione delle analisi granulometriche..... | 90 |
| 4.6.2 | Rilievo delle sezioni e tracciamento dei profili | 96 |
| 4.7 | Stima della portata e del volume solido del debris flow..... | 99 |
| 4.7.1 | Applicazione delle formule empiriche..... | 99 |
| 4.8 | La simulazione idrologica con FLO-2D..... | 100 |
| 4.9 | La simulazione idraulica con FLO-2D..... | 103 |
| 4.10 | Quantità di legname trasportato in senno alla corrente..... | 108 |
| 5 | Discussioni..... | 108 |
| 6 | Conclusioni | 110 |
| | Bibliografia | 112 |

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1. Zone di innesco, movimento e deposito dei debris flow..... | 17 |
| Figura 2. Cono di deiezione..... | 18 |
| Figura 3. Forma tipica di un debris-flow (D'Agostino 2020)..... | 19 |
| Figura 4. Caratteristiche morfometriche dei bacini da debris flow..... | 21 |
| Figura 5. Zona di innesco | 22 |
| Figura 6. Innesco per effetto idrante, Tognacca 2000 | 23 |
| Figura 7. Zona di scorrimento (Foto Pastorello R.)..... | 24 |
| Figura 8. Erosione spondale (Foto di R. Pastorello)..... | 25 |
| Figura 9. Cordoni di sponda | 26 |
| Figura 10. Zona di arresto | 26 |
| Figura 11. Massima dispersione in conoide (a sinistra) e runout (R) (a destra) .. | 27 |
| Figura 12. Distinzione dei fluidi per reologia | 30 |
| Figura 13. Legname in alveo: reclutamento (in alto), trasporto (in basso a sinistra) e deposito (in basso a destra) | 34 |
| Figura 14. Effetto di stabilizzazione/destabilizzazione del sistema suolo-pianta .. | 35 |
| Figura 15. Idrogramma liquido (Elaborazione D'Agostino V. 2017) | 38 |
| Figura 16. Debrisgramma: schema dell'onda di un debris flow | 38 |
| Figura 17. Concentrazione volumetrica (C_v) | 42 |
| Figura 18. Formazione di un debris flow: rapporto tra la portata liquida liberata dal letto Q'' e la portata innescante Q' in funzione della concentrazione volumetrica C_v | 44 |
| Figura 19. Cella "tipo" di direzione del flusso | 45 |
| Figura 20. Dominio di calcolo in FLO-2D (elaborazione D'Agostino V.)..... | 47 |
| Figura 21. Depittaggio, per risoluzione dei pit..... | 51 |
| Figura 22. Esempificazione dell' algoritmo di QGIS, direzione del deflusso | 52 |
| Figura 23. Inquadramento geografico del bacino idrografico del rio Rudan | 53 |
| Figura 24. Mappa delle isoipse (a sinistra) e delle pendenze (a destra)..... | 55 |
| Figura 25. Istogramma delle aree | 56 |
| Figura 26. Curva ipsometrica dimensionale..... | 57 |
| Figura 27. Curva ipsometrica adimensionale..... | 57 |
| Figura 28. Pluviometro a bascula (la foto di sinistra è stata scattata dall'autore) .. | 59 |
| Figura 29. Prospetto dei cavi a strappo (tratto da Bottacin G.) | 62 |
| Figura 30. Sistema di allarme per l'abitato di Peaio (Vodo di Cadore)..... | 63 |
| Figura 31. Disegno esemplificativo di un sedimento..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32. Piastra forata per il rilievo granulometrico (Foto di Masiero F. 2015) . | 66 |
| Figura 33. Curve di frequenza cumulata e relativa | 68 |
| Figura 34. Modulo di uniformità, Kramer | 70 |
| Figura 35. Deviazione standard..... | 71 |
| Figura 36. Interfaccia grafica di FLO-2D | 77 |
| Figura 37. Valori di Pioggia "RAIN.DAT" | 78 |
| Figura 38. Griglia di calcolo e visualizzazione numerazione delle celle | 79 |
| Figura 39. Modello concettuale per la simulazione idrologica | 80 |
| Figura 40. Area della simulazione idraulica | 82 |
| Figura 41. "INFLOW.DAT" | 82 |
| Figura 42. Griglia di calcolo (GRID) e INFLOW per la simulazione idraulica | 83 |
| Figura 43. Mappa dell'uso del suolo | 84 |
| Figura 44. Mappa della litologia..... | 86 |
| Figura 45. Mappa del CN..... | 87 |
| Figura 46. Analisi del video registrato dalla videocamera dell'ARPAV | 88 |
| Figura 47. Piogge del 29 agosto 2020 | 89 |
| Figura 48. Pioggia del 30 agosto 2020 | 89 |
| Figura 49. Analisi granulometrica 1 | 91 |
| Figura 50. Curve di frequenza e cumulata (analisi granulometrica 1)..... | 92 |
| Figura 51. Modulo di uniformità di Kramer (analisi granulometrica 1)..... | 93 |
| Figura 52. Analisi granulometrica 2 | 94 |
| Figura 53. Curve di frequenza e cumulata (analisi granulometrica 2)..... | 95 |
| Figura 54. Modulo di uniformità di Kramer (analisi granulometrica 2)..... | 96 |
| Figura 55. Sezioni del torrente Rudan, rilevate ne post evento..... | 97 |
| Figura 56. Profili del torrente Rudan | 98 |
| Figura 57. Dati di output della simulazione idrologica | 101 |
| Figura 58. Idrogramma | 102 |
| Figura 59. Debrisgramma..... | 103 |
| Figura 60. Profondità del flusso: scenario con briglia filtrante | 104 |
| Figura 61. Velocità del flusso, scenario con briglia filtrante..... | 105 |
| Figura 62. Profondità del flusso: scenario con occlusione dei filtri della briglia . | 106 |
| Figura 63. Velocità del flusso: scenario con occlusione dei filtri della briglia | 107 |

Indice delle tabelle

| | |
|--|-----|
| Tabella 1. Principali tipologie di colata | 32 |
| Tabella 2. Classificazione di debris-flow secondo Jacob (2005)..... | 33 |
| Tabella 3. Formule per il calcolo della portata al picco | 40 |
| Tabella 4. Caratteristiche morfometriche | 54 |
| Tabella 5. Precipitazioni rio Rudan, 29 agosto 2020 | 60 |
| Tabella 6. Granulometria tipica dei torrenti | 64 |
| Tabella 7. Classificazione dell'American Geophysical Union (AGU)..... | 67 |
| Tabella 8. Coefficiente di classazione | 71 |
| Tabella 9. Coefficienti di asimmetria | 72 |
| Tabella 10. Gruppi idrologici | 75 |
| Tabella 11. Destinazione d'uso del suolo e relativi valori di CN | 75 |
| Tabella 12. Coefficienti e scabrezza di Manning | 76 |
| Tabella 13. Parametri reologici per la simulazione idraulica | 83 |
| Tabella 14. Precipitazioni 28-31 agosto 2020 | 88 |
| Tabella 15. Stima della severità del debris flow | 90 |
| Tabella 16. Percentili diametrici, rilievo 1 | 92 |
| Tabella 17. Parametri granulometrici, rilievo 1 | 93 |
| Tabella 18. Percentili diametrici, rilievo 2 | 94 |
| Tabella 19. Parametri granulometrici, rilievo 2..... | 95 |
| Tabella 20. Parametri idraulici delle sezioni..... | 99 |
| Tabella 21. Portate calcolate con le formule empiriche | 99 |
| Tabella 22. Volume solido calcolato con le formule empiriche | 100 |
| Tabella 23. Velocità calcolata con le formule empiriche | 100 |
| Tabella 24. Portata e volume liquidi | 102 |
| Tabella 25. Portata solido/liquida e volume solido | 103 |

Capitolo 1

Introduzione

Prima di trattare nello specifico dei corsi d'acqua e delle tipologie di trasporto solido è opportuno fornire una definizione di bacino idrografico.

La delimitazione del bacino idrografico avviene attraverso l'uso di software GIS (Geographic Information System), dove si distingue la linea di displuvio (o linea di cresta) che rappresenta il perimetro del bacino all'interno del quale le precipitazioni raggiungono la rete idrografica; essa può essere identificata prendendo come riferimento i punti di quota più elevati e lo sviluppo delle reti idrografiche limitrofe a quella in esame (Ferro 2006).

Ai fini di questo lavoro è importante introdurre e definire i corsi d'acqua di montagna, ovvero i torrenti, i quali presentano pendenze più elevate rispetto a quelli di pianura ed in tal senso hanno capacità di trasportare notevoli quantità di materiale solido (Lenzi 2000).

In virtù di questo, si può far riferimento alla classificazione introdotta in Italia dal de Horatiis, proprio per quanto riguarda i torrenti montani, infatti egli ha distinto i torrenti di trasporto dai torrenti di scavo (Ferro 2006).

I torrenti di trasporto sono così definiti perché l'apporto solido proveniente dai versanti è molto elevato, perciò la corrente liquida è appena in grado di trasportarlo verso valle, senza provocare scavi.

Al contrario, nei torrenti di scavo la corrente idrica ha un contenuto energetico sufficiente a trasportare non solo il materiale solido proveniente dall'erosione dei versanti ma anche a prelevare particelle di sedimento dal fondo dell'alveo e dalle sponde (Ferro 2006).

I torrenti possono anche essere classificati in due categorie: quelli ad alvei a fondo fisso e quelli costituiti da un alveo a fondo mobile (Lenzi 2000).

Gli alvei a fondo fisso scorrono sulla roccia e sono pressoché privi di sedimenti, perciò la loro morfologia dipende in gran parte dalle caratteristiche geologiche su cui sono incisi e dalle caratteristiche idrauliche della corrente.

I corsi d'acqua con alveo a fondo mobile (o alluvionali) sono i più comuni perché scorrono sui propri sedimenti, poi vanno incontro ad adattamenti morfologici (in termini di dimensioni, forma, pendenza e tracciato) e questo dipende dal regime di deflusso idrico, dagli apporti idrici, dalla fornitura e dalla distribuzione di sedimenti (Billi, 1994).

Nel momento in cui un corso d'acqua alluvionale è indisturbato, questo tende a raggiungere una condizione di equilibrio tale per cui i processi erosivi e deposizionali risultano essere trascurabili (Simonetto 2011).

Nello specifico i corsi d'acqua alluvionali hanno il fondo e le sponde dell'alveo che sono soggette ad erosione, soprattutto quando si verifica un evento di debris flow che provoca un'incisione dell'alveo (D'Agostino 2020).

Ai fini di questo lavoro è importante definire le varie tipologie di trasporto che avvengono nei torrenti montani, in particolar modo i *debris flow* (colate detritiche). In primo luogo si ha il trasporto solido di fondo, con i sedimenti che si muovono prevalentemente per rotolamento, trascinamento o reptazione sul fondo dell'alveo; oppure si parla di trasporto di massa, che se ampiamente sviluppato, si trasforma in debris-flood (corrente iperconcentrata, ma con caratteristiche del fluido ancora newtoniane) o nel caso più estremo, ci può essere l'innescò di debris flow (o colata di detriti con caratteristiche che si differenziano dal fluido newtoniano) (D'Agostino 2020).

1.1 Inquadramento e descrizione delle colate detritiche

In un bacino idrografico interessato da debris flow si possono distinguere tre zone geomorfologiche: la testata del bacino dove si innesca la colata detritica (R), la zona di transito dove si sviluppa il canale collettore (C) e infine nella parte bassa si trova il conoide detto anche cono di deiezione (D), così come è stato schematizzato in figura 1 (D'Agostino 2020).

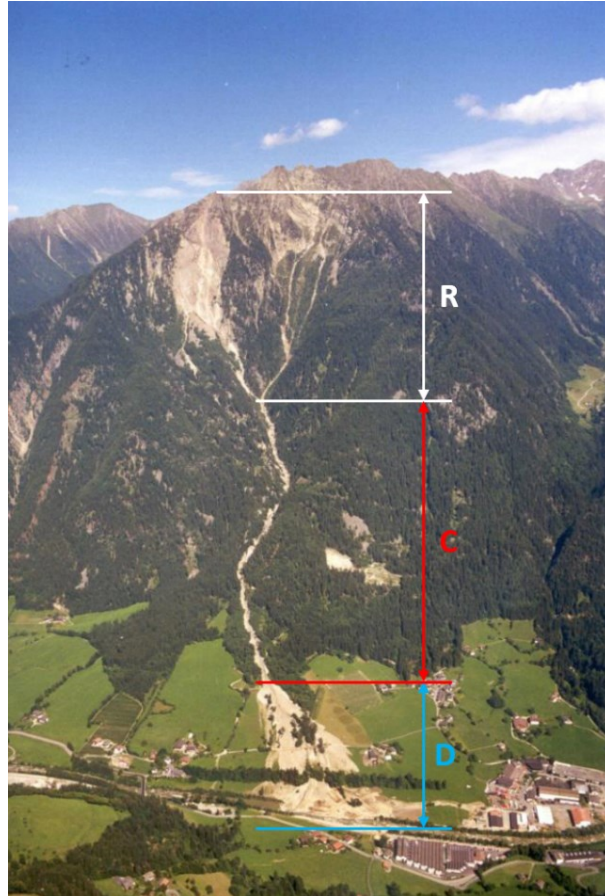


Figura 1. Zone di innesco, movimento e deposito dei debris flow

Nello specifico, le colate detritiche sono flussi costituiti da acqua e da materiale solido, con una concentrazione volumetrica dei sedimenti tale per cui il loro movimento non è più assimilabile a quello dell'acqua (che è un fluido newtoniano), a causa di una viscosità con diversi ordini di grandezza più elevata (D'Agostino 2020).

La concentrazione volumetrica (C_v) è una variabile fisica molto importante perché esprime il rapporto tra volume solido e volume totale di sedimento che si muove in alveo (D'Agostino 2020).

Ogni tipologia di trasporto ha una sua concentrazione volumetrica, normalmente un debris flow assume una C_v compresa tra il 25% e il 70%, mentre per un debris flood si attesta attorno a valori del 20% - 40% (D'Agostino 2020).

È altrettanto vero poi che esiste una relazione inversamente proporzionale tra C_v e velocità del flusso, ovvero a una maggiore C_v corrisponderà una velocità minore di movimento all'interno dell'alveo (D'Agostino 2020).

Se poi si segue il movimento di una colata detritica, questa di norma si innesca nella porzione superiore del bacino, in una zona di forte dissesto e ad elevata pendenza; successivamente la colata raggiunge la zona di trasporto continuando il suo moto di scorrimento perché sussistono sia le condizioni di pendenza, sia perché lubrificata dalla componente liquida.

Quando la colata raggiunge il conoide di deiezione normalmente rallenta fino ad arrestarsi, perché la pendenza è solitamente inferiore rispetto alla zona di trasporto e infatti si ha una perdita energetica (dove per energia si intende la quota che il fluido perde per unità di percorso).

In molti casi, la fase di rallentamento della colata detritica coincide con l'apice del conoide, laddove si ha la fuoriuscita del flusso dalle sponde laterali del torrente ed espandendosi lateralmente “disegna” sul territorio un deposito, con la caratteristica forma a ventaglio come rappresentato in figura 2 (D'Agostino 2020).

È interessante evidenziare come i conoidi alpini possano essere indicatori del tipo di processo deposizionale che caratterizza il bacino e questo lo si può tradurre considerando la sua pendenza: infatti tanto più è pendente tanto più si verificano eventi impulsivi e con flussi viscosi carichi di sedimento (e.g. debris flow); al contrario dei conoidi a minor pendenza che sono indicatori di processi non massivi (e.g. debris flood).



Figura 2. Cono di deiezione

Dal punto di vista dinamico, i debris flow hanno una tipica forma ad onda che può essere suddivisa in tre parti: il fronte (o testa), il corpo e la coda, come evidenziato in figura 3.

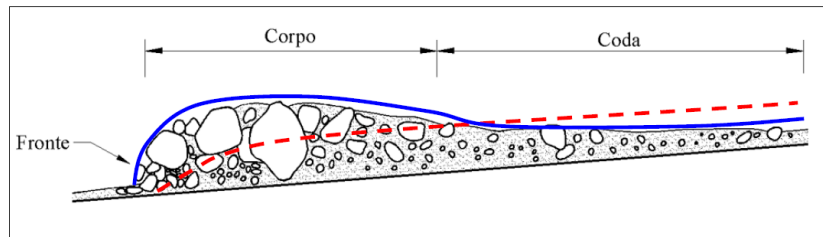


Figura 3. Forma tipica di un debris-flow (D'Agostino 2020)

Le colate detritiche pietrose o granulari sono caratterizzate da una specifica forma del fronte: ovvero presentano un grosso rigonfiamento (linea blu, figura 3), al contrario delle colate detritiche fangose che sono caratterizzate da un fronte più appiattito e a forma di cuneo (linea rossa tratteggiata in figura 3).

Normalmente il fronte di un debris flow granulare ha una concentrazione solida volumetrica (C_v) più elevata rispetto alle colate fangose, perché in esso si concentrano i *boulder* ed eventualmente materiale legnoso (Pastorello 2014).

Il corpo è un flusso piuttosto omogeneo e la coda ha una C_v molto inferiore rispetto al fronte perché prevale la componente liquida, quasi paragonabile a un *debris flood* (Pastorello 2014).

Stimare l'altezza del fronte è fondamentale ai fini della sicurezza idraulica, soprattutto a protezione di attraversamenti stradali o altre intersezioni del torrente con infrastrutture antropiche (D'Agostino 2020).

La colata detritica è un fluido viscoso, perciò, durante il suo moto traslativo si generano attriti, azioni d'urto e pressioni dispersive tra le particelle di sedimento. Gli elementi più grossolani quindi si ritrovano nella parte alta del flusso perché si generano delle pressioni dispersive dipendenti dal quadrato del loro diametro, tali per cui i massi non riescono a controbilanciare la pressione che loro esercitano rispetto ai sedimenti di piccole dimensioni; di conseguenza quest'ultimi subiscono pressioni dispersive uguali o superiori rispetto ai massi e per questo si localizzano nella parte inferiore del flusso colata detritica (D'Agostino 2020).

In campo si può anche osservare l'orientamento dei massi depositati, laddove si può dedurre che durante il trasporto si orientano con il diametro maggiore parallelo alla direzione del flusso, perché in questo modo ne è facilitato il trasporto (D'Agostino 2020).

1.2 Caratterizzazione morfometrica dei bacini da debris flow

D'Agostino e Marchi (2004) hanno analizzato 127 bacini delle Alpi orientali che sono stati interessati da eventi di debris flow, in particolare essi hanno considerato tre variabili morfometriche: l'area del bacino, la lunghezza e la pendenza media del collettore principale, come mostrato in figura 4.

I risultati hanno evidenziato che il 73% degli eventi di debris flow raggiungono il conoide in bacini di piccole dimensioni e cioè inferiori a 5 km^2 (raramente su bacini che con un'area maggiore di 15 km^2). Nei bacini di grandi dimensioni (e.g. 30 km^2) le colate detritiche spesso si arrestano all'interno del bacino stesso, quindi non necessariamente raggiungono il conoide (D'Agostino e Marchi 2004).

Per quanto concerne il collettore si evince che entro i 4 km di lunghezza, la colata detritica riesce ad arrestarsi nella zona conoidale, cosa che non succede se si tiene conto di una rete idrografica che ha lunghezze via via maggiori (D'Agostino e Marchi 2004).

L'intervallo di pendenza media del collettore favorevole al trasporto di una colata detritica è compreso fra il 20% (11°) e 70% (35°) affinché questa arrivi al conoide, mentre a fronte di pendenze inferiori a 11° , la perdita di energia potenziale che caratterizza il debris flow non è sufficiente a mantenere a regime il moto.

Con pendenze superiori a 35° non si ha in genere disponibilità di sedimento in canale (tipico dei canali in roccia) perché a causa dell'elevata pendenza i sedimenti non riescono ad essere neanche temporaneamente invasati in alveo (D'Agostino e Marchi 2004).

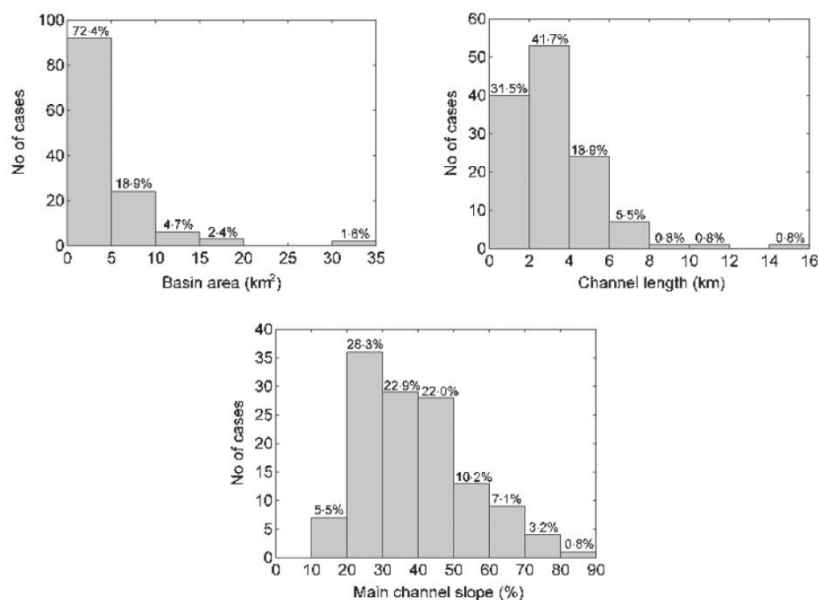


Figura 4. Caratteristiche morfometriche dei bacini da debris flow (D'Agostino e Marchi 2004)

Il numero di Melton è un altro parametro morfometrico che indica la potenzialità del bacino idrografico di generare o meno debris flow e si calcola mediante un'espressione adimensionale (equazione 1).

$$Mel = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Al numeratore dell'equazione si ha la differenza di quota tra la zona di testata del bacino e la sua sezione di chiusura (ΔH) e a denominatore l'area dello stesso (A).

I bacini idrografici propensi a dar luogo a colate detritiche manifestano un numero di Melton maggiore di 0,5 oppure tenendo conto della pendenza del conoide (S_f), dev'essere verificata la disequazione 2, (D'Agostino 1996).

$$S_f > 7^\circ - 14 \text{ Mel} \quad (2)$$

1.3 Dinamiche della colata detritica

Nei paragrafi successivi si spiegherà in modo succinto la zona d'innescò, la zona di trasporto e la zona di deposito di un debris flow.

1.3.1 Zona d'innescò

Normalmente un debris flow si innesca a seguito di un evento precipitativo anche breve e intenso in una zona con elevata pendenza dove vengono soddisfatte le condizioni di disponibilità di sedimento e di saturazione idrica (Bertoldi 2014).

Le più comuni situazioni d'innescò possono essere dovute da una frana superficiale (figura 5), cedimento di fronti morenici, sbarramenti nivali oppure collasso di opere di difesa idraulica e quindi, la disponibilità di sedimento ha un ruolo prioritario per innescare le colate detritiche (Sattler et al. 2011, Braishaw e Hassan 2009, Costa 1984).



Figura 5. Zona di innescò

Nelle Dolomiti a seguito di eventi pluviometrici intensi è tipico che si abbia un innescò per “effetto idrante”: si tratta di una corrente idrica a getto (assimilabile a una cascata) che impatta sulla falda detritica ai piedi delle pareti rocciose, provocandone la saturazione e avente un’elevata capacità demolitoria e solo quando il materiale detritico non si trova più al limite dell’equilibrio questo viene movimentato (Tognacca et al. 2000).

Di seguito si spiega in dettaglio lo studio condotto da Tognacca e Bezzola (1997) per quanto concerne l’effetto idrante.

A seguito di una forzante idrologica si ha una portata liquida che proviene da una forra rocciosa inerosibile, la quale va ad impattare su una coltre di detriti sciolti

provocandone un'erosione localizzata. A questo punto il getto si infiltra (anche a fronte di una portata moderata), innalzandone la falda freatica. Se la portata aumenta, di conseguenza anche l'erosione aumenta, perciò i sedimenti asportati iniziano a creare un lobo di accumulo e se ulteriormente lubrificati si immetteranno nel collettore (figura 6).

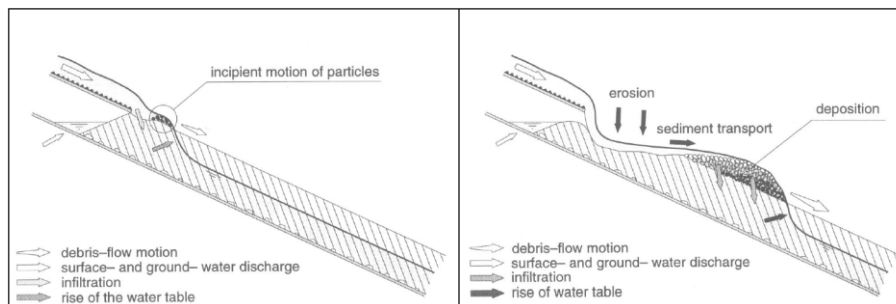


Figura 6. Innesco per effetto idrante, Tognacca 2000

Tognacca (1997) per quantificare la portata critica innescante (Q_{DI}) di un debris flow ha considerato la pendenza della zona di innesco e il diametro medio dei sedimenti, a livello analitico essa è calcolata come la differenza tra la portata liquida in arrivo (Q_{SW}) e la portata infiltrata (Q_{hu}), come evidenziato nell'equazione 3.

$$Q_{DI} = Q_{SW} - Q_{hu} \quad (3)$$

Ne deriva di conseguenza la portata unitaria q_{DI} , cioè il rapporto tra la portata critica innescante e la larghezza del canale.

Da esperimenti condotti in laboratorio, Tognacca (1997), passando per un'equazione adimensionale, definisce la portata critica unitaria di innesco. Riscrivendo in forma dimensionale l'equazione di Tognacca si ottiene la (4):

$$q_c = \frac{Q_c}{B} = 4 \cdot \frac{d_m^{1,5}}{(\tan\theta)^{1,17}} \quad (4)$$

dove Q_c è la portata critica d'innesco, B la larghezza dell'alveo, d_m il diametro medio dei sedimenti e θ è la pendenza del canale.

Si conoscono anche altre modalità di innesco: come lo svuotamento di un piccolo invaso presente al fronte di un ghiacciaio, o in seguito al collasso della morena frontale; poi ancora per cedimento di opere idrauliche (esempio briglie) o anche rimaneggiamento di materiale già presente in alveo (D'Agostino 2020).

1.3.2 Canale di scorrimento

A valle della zona d'innescò si ha la zona di scorrimento, generalmente corrisponde alla parte centrale del bacino idrografico e si concretizza nel collettore principale (figura 7). Le due tipologie di collettori che si possono incontrare in questa zona possono essere di tipo alluvionale o in roccia.

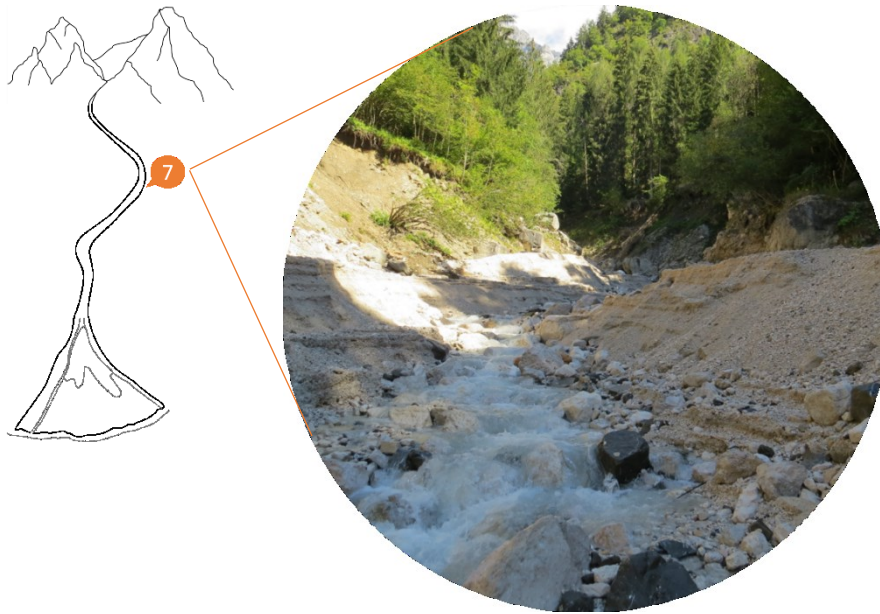


Figura 7. Zona di scorrimento (Foto Pastorello R.)

Nella zona di scorrimento quando transita una colata detritica una parte di sedimenti proviene dalla testata del bacino, mentre un'altra quantità di clasti verrà prelevata dall'alveo o dalle sue sponde laterali (D'Agostino 2020).

Molto spesso nei torrenti montani l'erosione spondale non è solo sinonimo di inclusione di sedimento ma anche di materiale legnoso, ovvero alberi che perdono stabilità e che entrano in alveo (figura 8). Quest'ultimi rappresentano un problema non poco rilevante perché possono costituire temporanee zone di sbarramento e di trattenuta del materiale, nel caso di eventi di debris flow cedono e sprigionano il sedimento precedentemente intercettato, aumentandone la magnitudo dell'evento.



Figura 8. Erosione spondale (Foto di R. Pastorello)

Dopo che si è verificata una colata detritica il canale avrà sezioni trasversali che saranno notevolmente cambiate rispetto a prima, cioè si vedrà un forte approfondimento del canale, sponde molto ripide e i depositi rimasti in alveo vengono rimaneggiati dalla corrente, la quale andrà a formare il suo nuovo andamento planimetrico (D'Agostino 2020).

Infine, spostandosi nella zona di pre-conoide (parte bassa del bacino idrografico) si troverà un alveo più largo rispetto a un tratto d'alta quota così come si potranno osservare depositi laterali di massi al di sopra delle sponde (cordoni laterali).

I cordoni di sponda risultano asimmetrici in curva per effetto centrifugo e risultano essere più spessi nell'estradosso (Figura 9).

Non appena la colata detritica fuoriesce dall'alveo la pendenza locale può essere non sufficiente a sostenere un moto molto viscoso ed allora si deposita; diversamente, se per assurdo il flusso fosse costituito solamente da acqua, nel momento in cui superasse la quota della sponda defluirebbe anche a fronte di pendenze infime (Van Dine 1996).

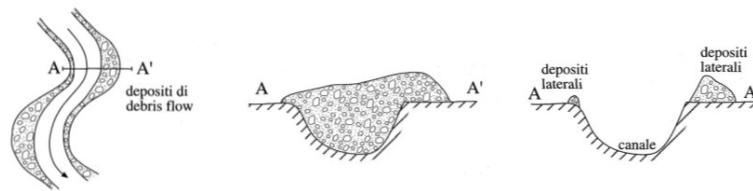


Figura 9. Cordoni di sponda

1.3.3 Zona di arresto

Nella zona di arresto la colata detritica generalmente inizia a rallentare a partire dall'apice del conoide (figura 10) a causa di una riduzione della pendenza, oppure per allargamento della sezione o una discontinuità topografica quale può essere l'intersezione del torrente con la rete viaria (Pastorello 2014).



Figura 10. Zona di arresto

Sul territorio si possono ricavare le seguenti informazioni: la distanza di arresto (o *runout*), la dispersione massima e lo spessore massimo del deposito.

La distanza di arresto (figura 11) viene calcolata in proiezione orizzontale ed è lo spazio che separa planimetricamente il punto in cui la colata inizia a rallentare (normalmente in corrispondenza dell'apice del conoide), con il punto più lontano in cui si è effettivamente arrestata (D'Agostino e Cesca 2009).

La *runout* (R) della colata può essere influenzata dalla componente granulometrica del flusso e dalla sua concentrazione volumetrica: un debris flow granulare tende ad arrestare prima, perché le dissipazioni dovute agli attriti fra i sedimenti sono maggiori rispetto a quelle di una colata detritica fangosa; per lo stesso motivo il fronte delle colate granulari è generalmente maggiore rispetto a quello delle colate fangose (D'Agostino 2020).

La massima dispersione invece misura la divagazione laterale planimetrica del deposito e normalmente risulta compresa in un range tra 0.2 - 1.0 R (D'Agostino e Bettella 2018).

Infine, a livello cartografico, è possibile individuare la dispersione della colata detritica osservando la sua massima espansione laterale, come mostrato in figura 11 dalle linee parallele (tratteggiate in rosso) ortogonali alla massima pendenza. (D'Agostino 2020).

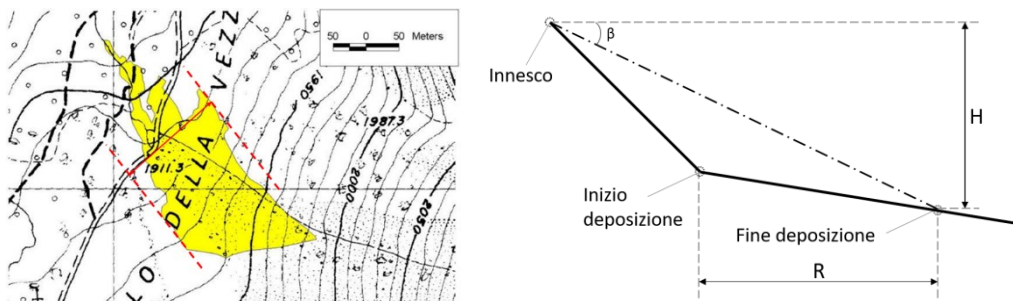


Figura 11. Massima dispersione in conoide (a sinistra) e *runout* (R) (a destra)

1.4 Classificazioni reologiche delle colate detritiche

I debris flow si possono classificare nella seguente modalità:

- cause esogene di innesco;
- situazioni geomorfologiche e idrauliche di innesco;
- caratteristiche del mezzo fluido.

Con cause esogene d'innesco s'intende la forzante idrologica come può essere ad esempio uno scroscio, lo scioglimento nivale o il collasso di un invaso d'acqua.

Wieczorek (1987) ha studiato gli eventi di debris flow della California centrale e ha tentato di definire il valore di precipitazione innescante.

Dal momento che le colate detritiche dipendono anche dalle condizioni di umidità del bacino idrografico, per piogge stagionali antecedenti e maggiori a 280 mm, Wieczorek (1987) ha ricavato l'intensità di pioggia critica I (equazione 5).

$$I=1.7+(9/t) \quad (5)$$

Viceversa, in caso di piogge stagionali antecedenti e inferiori a 280 mm, secondo lo studio di Wieczorek (1987), non si verificano debris flow.

Questa combinazione non è sempre valida e infatti ogni bacino deve essere monitorato al fine di determinare la quantità di precipitazione soglia, o di allarme, ad esempio installando nella testata del bacino un pluviometro che lavora in questo senso (D'Agostino 2020).

Gli studi condotti da Wieczorek (1987) se rapportati alla realtà sono comunque soggetti ad errori dovuti alla sua previsione empirica, per esempio si hanno situazioni sottosoglia e valori di intensità che risultano essere bassi, ovvero riferiti a scrosci brevi e intensi.

Altri autori hanno cercato di identificare un'intensità di pioggia generatrice di debris-flow: Caine (1980) equazione 6, poi Gregoretti e Dalla Fontana (2007), equazione 7:

$$I= 14.82 t^{-0.39} \quad (6)$$

$$I= 21 D^{-0.55} \quad (7)$$

(“ D ” è l'equivalente di “ t ” ovvero il tempo).

In particolar modo Gregoretti e Dalla Fontana (2007) hanno identificato una soglia d'allarme specifica per le Dolomiti, che lavorando in maniera cautelativa fa attivare una situazione d'allerta anche quando la colata non raggiunge il conoide.

L'innesco geomorfologico e idraulico può essere causato da uno scroscio che va a lubrificare una frana prossima al reticolo idrografico; si tratta di una frana di versante il cui materiale viene destabilizzato fino ad arrivare in alveo, trasformandosi in debris flow.

Un'altra modalità d'innesco, sempre afferente a questo gruppo, può derivare da una frana di grande scala che va ad ostruire temporaneamente l'alveo nella parte retrostante a questa barriera dove si accumula sia materiale lapideo e sia materiale legnoso, dunque con l'azione combinata della spinta dell'acqua e dell'erosione al piede fa sì che questa massa inizi a muoversi per effetto del peso proprio. Infine, anche la fusione nivale per effetto del rialzo termico è un fattore innescante, così come terremoti intensi che possono provocare fenomeni franosi, anche se quest'ultimi sono più rari (D'Agostino 2020).

Il terzo punto è altrettanto importante per classificare le colate detritiche, infatti si considerano le caratteristiche del mezzo fluido (la reologia).

La reologia è dunque un termine che deriva dalla parola greca "reo" che significa scorrere, indica il comportamento che assume un fluido e viene descritto da due parametri, ovvero dalla deformazione angolare ($\partial v/\partial y$) e dallo sforzo tangenziale (τ) (D'Agostino 2020).

Un fluido newtoniano ha una viscosità costante e lo sforzo tangenziale è calcolato come in equazione 8. Le variabili che lo descrivono sono: la deformazione angolare ($\partial v/\partial y$), la viscosità (μ) e lo sforzo tangenziale (τ) che esprime il gradiente velocità.

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

È necessario uno sforzo tangenziale molto ridotto affinché il medesimo fluido si muova e infatti questo è verificato dal fatto che l'acqua si muove anche a bassissime pendenze.

Nei fluidi di tipo Bingham affinché le particelle di sedimento si muovano non basta semplicemente applicare loro uno sforzo tangenziale maggiore a zero (come per l'acqua), ma dev'essere maggiore di un valore limite (τ_0): solo quando τ è maggiore di τ_0 allora il fluido si muove come un fluido newtoniano, vedasi equazione 9 (Pastorello 2014).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (9)$$

Nella pratica la deformazione angolare cioè il rapporto $\frac{\partial v}{\partial y}$ può essere approssimata pensando che il ∂y massimo valga tutta la profondità della corrente, mentre ∂v è la differenza fra la velocità della colata in superficie e la velocità della stessa in vicinanza al fondo.

Infine, lo sforzo tangenziale nel modello pseudo-plastico viene calcolato come in equazione 10.

$$\tau = \tau_0 + v \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^{1/n} \quad (10)$$

L'esponente n è un coefficiente che varia a seconda si tratti di un fluido dilatante ($n < 1$) o pseudo-plastico ($n > 1$).

Un fluido dilatante ($n < 1$) a mano a mano che si deforma diventa meno cedevole e più resistente a deformazione, com'è tipico delle colate granulari. Il fluido pseudo-plastico ($n > 1$) è l'opposto, ovvero all'aumentare della deformazione questo perde resistenza e assume il comportamento delle colate fangose (D'Agostino 2020).

In figura 12 si riporta uno schema riassuntivo.

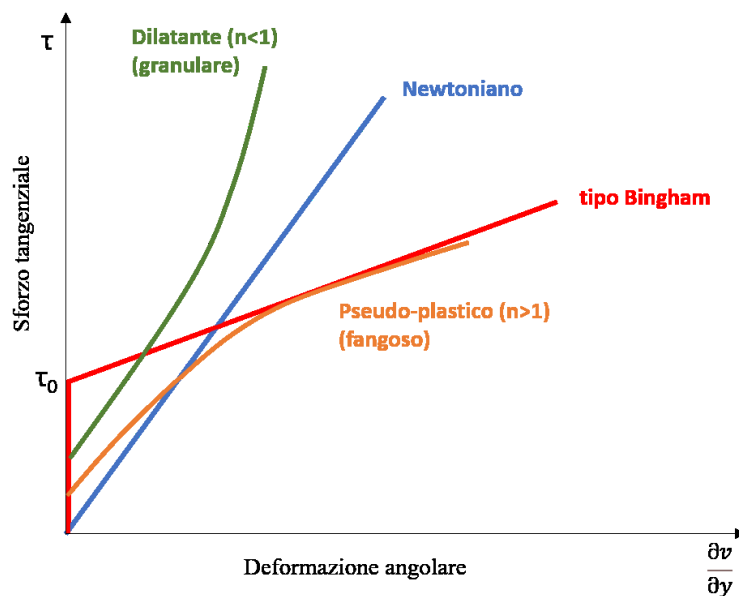


Figura 12. Distinzione dei fluidi per reologia

1.4.1 Tipologie di colate detritiche

Una colata macro-viscosa è costituita da un regime monofasico quando non si distingue la matrice dal materiale trasportato e per questo si ha un movimento simile a un fluido laminare.

Il regime macro-viscoso è dunque costituito da una concentrazione volumetrica del 45/50%, per cui nella corrente si ha un'elevata concentrazione di grani (senza considerare i sedimenti fini). Se si ha un fluido interstiziale costituito da molta argilla si tratta comunque di un regime macro-viscoso con una concentrazione anche del 25-30% (D'Agostino 2020).

Lo *stony debris flow* (corrente detritica matura) ha una matrice fluidificata e il materiale trasportato è in prevalenza costituito da ghiaie, ciottoli e piccoli massi. Questo rappresenta per definizione la colata detritica con una concentrazione solida volumetrica di almeno il 20% e in grado di sospingere verso l'alto i sedimenti di maggiori dimensioni.

Un altro tipo di fluido può essere il debris flow "immaturo", esso si presenta con un regime turbolento e bifasico perché i sedimenti sono prevalentemente concentrati nella parte bassa della corrente (in vicinanza al fondo), mentre la parte superiore è costituita da un regime più laminare (acqua).

Questo regime può rimanere tale, oppure evolvere in uno *stony debris flow* (D'Agostino 2020).

Infine, si ha l'inerziale ibrida con un regime che può essere monofasico o bifasico, con una corrente fangosa.

In tabella 1 si riporta uno schema riassuntivo dei tipi di debris flow appena descritti.

Tabella 1. Principali tipologie di colata

| Tipo | Materiale trasportato | Matrice | Regime |
|---------------------|--|--|--|
| Macro-viscoso | Prevalente grana fine | Argilla, limo (sabbia e ghiaia fine) | Laminare: monofasico |
| Inerziale detritica | Granulare e massi | Sabbie, ghiaia (terre a grana fine) | Limite superiore laminare, o debolmente monofasico |
| Inerziale fangosa | Prevalente grana fine | | Turbolento: monofasico |
| Inerziale immatura | Granulare fino, ciottoli di medie dimensioni e qualche masso | Terre a grana fine, sabbie | Turbolento: bifasico |
| Inerziale ibrida | Granulare, piccoli massi e materiale fangoso | Eterogenea: terre a grana fine, sabbie | Turbolento: mono/bifasico |

1.4.2 Classificazione secondo Jacob (2005)

Rispetto alle precedenti classificazioni, nel 2005 Jacob ha classificato le colate detritiche in base alla magnitudo e le ha divise in sette classi; i parametri da lui considerati sono il volume (m^3), la portata (m^3/s) e l'area mediamente inondata (ha), nonché i potenziali danni a infrastrutture, strutture e implicitamente anche dell'incolumità delle persone.

In tabella 2 si riportano le sette classi definite da Jacob (2005), ma in realtà i debris flow che si verificano nei bacini montani sono compresi tra la prima e la sesta classe, perché la settimana riguarda colate detritiche di natura vulcanica.

Il numero ordinale di ciascuna classe è associato al limite inferiore dell'intervallo riportato nella colonna del volume.

Tabella 2. Classificazione di debris-flow secondo Jacob (2005)

| Classe | Volume totale (m ³) | Portata al picco (m ³ /s) | Area inondata (ha) | Conseguenze potenziali |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--|
| 1 | <10 ² | <5 | 0,04 | Danni localizzati, interessato reticolo minore, danni a piccoli edifici |
| 2 | 10 ² - 10 ³ | 5 - 30 | 0,04 - 0,2 | Seppellimento auto, distruzione edifici in legno, rottura alberi, ostruzione tombini, deragliamento treni |
| 3 | 10 ³ - 10 ⁴ | 30 - 200 | 0,2 - 0,9 | Danneggiamento grossi edifici, pile di ponti in CLS, blocco o danni a grandi vie di comunicazione e tubidotti |
| 4 | 10 ⁴ - 10 ⁵ | 200 - 1500 | 0,9 - 4,0 | Distruzione parti di villaggi, distruzione di parti di infrastrutture di attraversamento e di ponti, ostruzione di corsi d'acqua vallivi |
| 5 | 10 ⁵ - 10 ⁶ | 1500 - 12000 | 4,0 - 20,0 | Distruzione parti di paesi, distruzione di parti di foreste (2 km ²), ostruzione di torrenti, rii e piccoli torrenti |
| 6 | 10 ⁶ - 10 ⁷ | >12000 | >20 | Distruzione di cittadine, modifica di parti di valle e conoide fino a diverse decine di km ² , ostruzione di fiumi |
| 7 | 10 ⁷ - 10 ⁸ | non osserv. | non osserv. | non osserv. |

1.5 Il legname in alveo

In questo paragrafo si tratta il tema del legname in alveo (*large wood*) che per Jackson & Sturm (2002) è costituito da tutto il legname presente in alveo che presenta una lunghezza di almeno 1 m o un diametro di almeno 10 cm.

È importante trattare questo tema perché durante un evento di debris flow, in specifiche condizioni, il legname può essere soggetto a dinamiche di reclutamento, trasporto e di accumulo (D'Agostino 2020).

La figura 13 (a pagina successiva) riportano alcune fotografie esplicative e tratte lungo il collettore del torrente Rudan.

L'origine può essere di diversa natura, ma normalmente avviene per cause naturali (mortalità), a seguito di un disturbo (schianti da vento, da neve o con un incendio

boschivo) o dipende dalla configurazione geologica al di sotto del sistema suolo-pianta (Lenzi 2019 e D'Agostino 2020).



Figura 13. Legname in alveo: reclutamento (in alto), trasporto (in basso a sinistra) e deposito (in basso a destra)

Per valutare la stabilità dei versanti forestati è importante considerare l'interazione del sistema suolo-pianta, nonché l'apparato radicale delle specie che costituiscono il popolamento forestale e la configurazione geologica al di sotto dello stesso (D'Agostino 2020).

Il presupposto per la stabilità, o al contrario l'instabilità, è dettata a partire da un evento pluviometrico perché apporta contenuto idrico al suolo e provocandone la saturazione.

Si descrivono le quattro situazioni (A-D) più frequenti che si possono ritrovare in campo e rappresentate in figura 14 (D'Agostino 2020).

- A. Rappresenta la situazione più sfavorevole con uno spessore di suolo sub-metrico e un apparato radicale superficiale, in condizioni di apporto idrico elevato si ha un'elevata probabilità di slittamento del materiale in alveo.

- B. In questo caso la stabilità è favorita dal fatto che l'apparato radicale delle specie che costituiscono il popolamento forestale, riesce a svilupparsi in profondità e a penetrare nelle fessure delle rocce. Questo sistema risponde in modo positivo durante un evento pluviometrico intenso, per l'elevata stabilità meccanica che si è instaurata in bosco.
- C. Rispetto al punto precedente (B) essendoci uno strato di transizione fra il substrato terroso e la geologia, non si escludono eventuali movimenti millimetrici del suolo durante un evento pluviometrico. Si ha una condizione leggermente sfavorevole rispetto alla situazione "B", ma comunque positiva.
- D. Se si hanno suoli molto profondi, gli apparati radicali riescono a svilupparsi in profondità, ma nell'interfaccia suolo-roccia si crea uno strato di scorrimento che si mobilita durante un evento piovoso, perché le radici non riescono ad ancorarsi alla roccia.


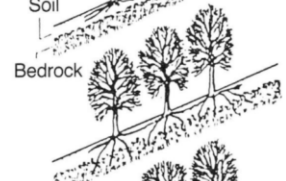


| <i>Slope type</i> | <i>Description</i> | <i>Stabilizing effect of roots</i> |
|---|---|--|
|  <p>Soil Bedrock</p> | A. Relatively thin soil mantle, fully reinforced with tree roots, underlain by massive bedrock impenetrable to roots | Slight – plane of Weakness occurs at Bedrock interface |
|  | B. Similar to type A, except bedrock contains discontinuities which are penetrable by roots; trunks and roots act in the same way as toe piles | Major |
|  <p>Transition layer</p> | C. Thicker soil mantles containing a transition layer with soil density and shear strength increasing with depth; roots penetrating the transition layer provide a stabilizing force to the slope | Substantial |
|  | D. Thick soil mantles below root zone; trees floating on unrooted underlying soil | Little effect on deep-seated instability |

Figura 14. Effetto di stabilizzazione/destabilizzazione del sistema suolo-pianta (elaborata, D'Agostino 2020)

Nelle Alpi orientali i popolamenti forestali adiacenti alla rete idrografica sono costituiti prevalentemente da boschi di conifere e da boschi di latifoglie.

Nel caso di boschi di conifere, il legname che entra in alveo ha un basso peso specifico e per questo si muove prevalentemente per fluitazione, al contrario del legno dei boschi di latifoglie che è ramificato e ha un elevato peso specifico, per cui viene favorito il deposito (Malacarne 2015).

Il peso specifico dipende poi dalle caratteristiche della specie e dal suo grado di deterioramento qualora dovesse permanere in alveo per lunghi periodi.

1.5.1 Rilievo del legname in alveo

È molto importante saper stimare il quantitativo di *large wood* e i due metodi più usati per misurarlo sono il rilievo in campo e le misure da remoto.

Il rilievo in campo può essere svolto attraverso delle aree campione o con un rilievo completo, a seconda dell'obiettivo del lavoro e del grado di dettaglio che si vuole ottenere.

Se l'approccio operativo si basa su aree campione il lavoro risulterà più rapido ma meno preciso, al contrario di un rilievo completo che sarà più dettagliato seppure più costoso e più duraturo (Lenzi 2019).

Negli ultimi anni grazie all'avvento delle nuove tecnologie si possono eseguire misure da remoto e cioè interpretazioni di fotografie aeree, prodotti da laser scanner o da satellite, successivamente elaborate attraverso i software GIS (Lenzi 2019).

1.5.2 Gli effetti del legname in alveo

Il legname in alveo influisce in modo diverso sia all'interno del sistema fluviale e sia nei corsi d'acqua torrentizi, ma ai fini di questo lavoro considereremo i potenziali effetti geomorfologici, idraulici ed ecologici nei torrenti montani (Lenzi 2019).

In un torrente montano l'effetto geomorfologico è dato dalla creazione di *log-step* e *pool*, del tutto simile a una morfologia a gradinata che si otterrebbe costruendo delle opere idraulico-forestali, portando a una riduzione della pendenza (Montgomery & Buffington 1997).

Il medesimo effetto si forma per due motivi: il primo può essere dato dallo schianto di una pianta intera che si depona trasversalmente all'alveo, oppure tronchi di legno che si fermano in prossimità di un restringimento dell'alveo, accumulandosi e rimanendoci per un certo periodo di tempo.

Nel momento in cui la spinta idrodinamica dell'acqua opera un'erosione al piede dell'accumulo, ne provoca un cedimento e si avrà l'effetto "dam-break" (Lenzi 2019 e D'Agostino 2020).

Il legname in alveo può avere anche effetti benefici nei confronti degli habitat naturali, della fauna ittica, che trova riparo e alimentazione (Lenzi 2019).

1.6 Le analisi idrologiche

Finora si sono definite e classificate le colate detritiche perché è il tema centrale di questo lavoro di tesi, ma si parte sempre dal presupposto che vengono innescate da un evento meteorico. Per tale motivo diviene importante l'idrologia: una disciplina rilevante da un punto di vista scientifico e pratico, atta ad analizzare i deflussi liquidi e solidi attraverso l'analisi statistica, o attraverso l'impiego di modelli probabilistici per stimare i valori di pioggia e di portata (D'Agostino 2017 e Borga 2015).

Il primo approccio è quello di ottenere un idrogramma di piena, in quanto spiega la trasformazione degli afflussi in deflussi superficiali che vengono generati da un certo evento meteorico e, osservati nella sezione del corso d'acqua ove si è chiuso il bacino idrografico (D'Agostino 2017 e Borga 2015).

L'andamento tipico di un idrogramma è rappresentato in figura 15, laddove si osserva una fase di crescita in cui la portata aumenta sempre più rapidamente finché poi non si raggiunge la portata al colmo (fase di stanca) e infine con la fase di esaurimento (detta anche fase di recessione) si ha una progressiva diminuzione della medesima portata, ma con una durata più prolungata rispetto alla prima fase (Dalla Fontana 2014).

In sintesi, si ottiene una portata per unità di tempo e un volume liquido che è dato dall'area sottesa alla curva.

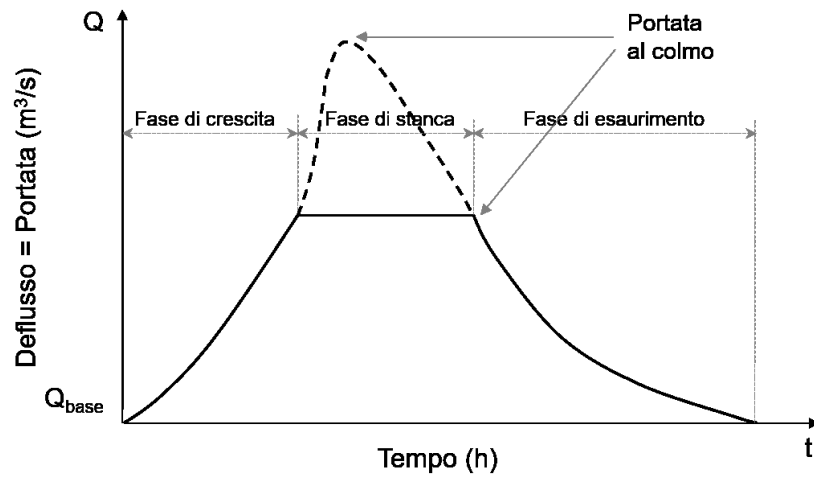


Figura 15. Idrogramma liquido (Elaborazione D'Agostino 2017)

1.7 Le analisi idrauliche

Una volta noto l'idrogramma liquido si può stimare un debrisgramma che assumerà anch'esso un andamento del tutto simile all'idrogramma mostrato in figura 15.

Il debrisgramma (figura 16) riproduce una portata solida per unità di tempo, che risulta essere amplificata, secondo il metodo volumetrico di Takahashi (1978), di un fattore k rispetto alla portata liquida. Per applicare il metodo volumetrico occorre assegnare la concentrazione volumetrica in funzione del tempo (D'Agostino 2020).

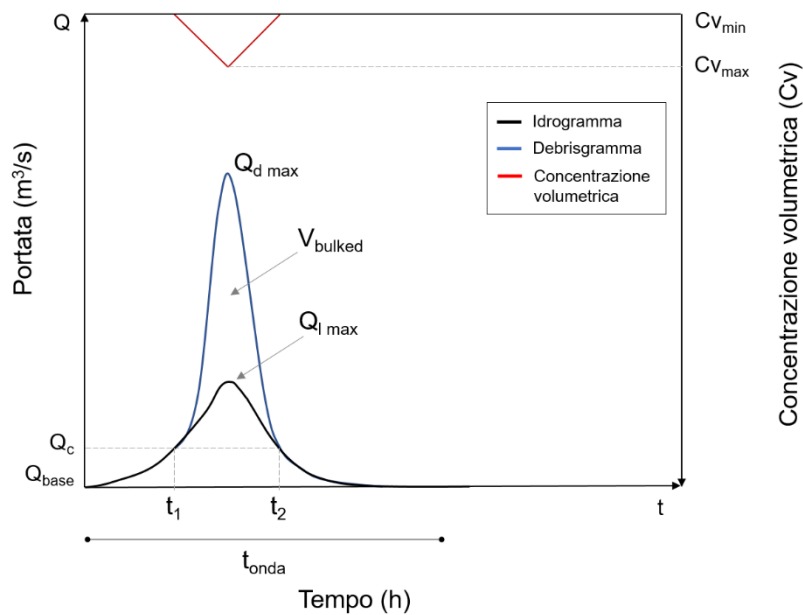


Figura 16. Debrisgramma: schema dell'onda di un debris flow

1.7.1 Determinazione del debrisgramma: i metodi empirici

In questo paragrafo si tratteranno i metodi empirici, che permettono di calcolare la portata totale al picco associata a un debris flow una volta che si sia osservata l'altezza del fronte che transita in una sezione del canale di scorrimento (D'Agostino 2020).

L'equazione 11 propone il moto turbolento: il quale mette in relazione la portata unitaria (q) con il raggio idraulico (R_h) e la pendenza (β) espressa in gradi.

$$q = 10 \cdot R_h^{5/3} \cdot (\text{sen}\beta)^{0,5} \quad (11)$$

Per la stima della velocità basta dividere l'espressione sopra riferita a q per la profondità media del flusso.

In alternativa si ha il moto laminare, il quale rispetto all'equazione 14, tiene conto dei seguenti fattori: peso specifico del debris flow (γ_b) che si può porre pari a 20.000 Nm⁻³ e della viscosità newtoniana apparente del fluido (μ), che porge un valore di 3.000 Pa s, come descritto nell'equazione nella 12.

$$q = \frac{\gamma_b}{3\mu} \cdot R_h^3 \cdot (\text{sen}\beta)^{0,5} \quad (12)$$

Con il fluido dilatante (Bagnold, 1954) la portata unitaria è calcolata in equazione 13.

$$q = \frac{2}{3} \cdot \xi \cdot S^{0,5} \cdot R_h^{3/2} \quad (13)$$

Hungr et al. (1984) hanno messo a punto l'espressione 14, che è così scritta:

$$q = 0,55 \cdot h^{3/2} \cdot S^{0,5} + 4,59 \quad (14)$$

Dove h è il tirante idrico e il simbolo S esprime la pendenza (m/m).

Nell'equazione 15 si calcola poi la portata al colmo (Q_p) che è data dal prodotto tra la portata unitaria (q) e la larghezza della sezione (B) a cui fa riferimento.

$$Q_p = q \cdot B \quad (15)$$

Rickenmann (1999) ottenne un'espressione empirica, la (16), ovvero lega il tirante idrico (h) alla pendenza (S) mediante un rapporto moltiplicativo a due coefficienti numerici.

$$Q_p = 4,47 \cdot h^{2/3} \cdot S^{0,5} + 1,71 \quad (16)$$

In tabella 3 si riportano le altre formule empiriche presenti in letteratura, ma essendo state calibrate su eventi e su ambienti molto diversi tra loro, la loro applicazione richiede cautela (Pastorello 2014).

Tabella 3. Formule per il calcolo della portata al picco

| Tipologia debris flow | Formula | Autori |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Colate granulari (Giappone) | $Q_d = 0,135 V^{0,78}$ | Mizuyama et al. (1992) |
| Colate fangose (Giappone) | $Q_d = 0,0188 V^{0,79}$ | |
| Colate granulari (Canada) | $Q_d = 0,0497 V^{0,901}$ | Bovis e Jacob (1999) |
| Colate fangose (Canada) | $Q_d = 0,0028 V^{1,01}$ | |
| Colate derivanti da frana | $Q_d = 0,0293 V^{0,56}$ | Costa (1988) |
| Colate da scioglimento ghiacciaio | $Q_d = 0,00163 V^{0,64}$ | |

1.7.2 Il metodo volumetrico

In questo lavoro di tesi si dà particolare importanza al metodo volumetrico, che è atto a valutare la portata solida ed il volume associato a un debris flow (D'Agostino 2020).

Le equazioni che sono proposte in letteratura testimoniano la possibilità di quantificare la portata al picco conoscendo relativamente ad un evento osservato (noto il volume oppure l'altezza del fronte o la sua velocità). Per quanto riguarda il trasporto selettivo si può fare riferimento alle equazioni che vanno a stimare la capacità di trasporto solido teorica (D'Agostino 2006).

Per capacità di trasporto solido teorica s'intende la competenza della corrente nel veicolare una certa portata solida su un corso d'acqua alluvionale, che a sua volta è alimentato da materiale solido e che la medesima corrente è in grado di trasportare (D'Agostino e Lenzi 1994).

Normalmente molto prima che si sviluppi una colata detritica ha luogo il traposto solido di fondo, il cui inizio viene calcolato con l'equazione (17) di Schoklitsch (1962).

$$Q_c = 0,26 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{5/3} \frac{D_{40}^{1,5}}{s^{7/6}} B \quad (17)$$

La portata critica di inizio trasporto solido di fondo è espressa in m^3/s e tiene conto di diversi fattori: in primis la densità dei sedimenti ($\rho_s = 2600/2700 \text{ kg/m}^3$) e la

densità dell'acqua ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), poi il percentile diametrico derivato dall'analisi granulometrica (D_{40}), la pendenza del fondo (S) e infine tiene conto anche della larghezza dell'alveo (B).

Poiché nell'equazione (17) la densità dell'acqua e la densità dei sedimenti sono considerate due costanti, l'equazione può essere riscritta in forma abbreviata come in (18).

$$Q_c = 0,60 B \frac{D_{40}^{1,5}}{S^{7/6}} \quad (18)$$

Il deflusso liquido minimo perché si sviluppi un debris flow dovrà dunque essere molto superiore a quello dell'inizio del trasporto selettivo, che inizia più a non essere tale (ma a tendere verso l'equimobilità dei sedimenti) quando la portata liquida è intorno a 2.5-3 volte il valore indicato nell'equazione sopra.

Per stimare la portata solida da associare a un debris flow, prima di tutto bisogna calcolare la concentrazione di equilibrio (C_v) pertanto si può ricorrere all'equazione di Takahashi (1978) ed è ritenuta la più prudente poiché si concentra solo sul fronte della stessa colata detritica.

La concentrazione volumetrica C_v è espressa in funzione della pendenza del canale ($\tan\beta$), dell'angolo di attrito statico del materiale solido (φ) e delle densità dell'acqua e dei sedimenti (come in equazione 19).

$$C_v = \frac{\rho \tan\beta}{(\rho_s - \rho)(\tan\varphi - \tan\beta)} \quad (19)$$

La particolarità di questa espressione (19) è che raggiunge un valore massimo ($C_{v \max}$) attorno a una pendenza di 20° , invece per pendenze più elevate si considera costante, come si può notare in figura 17 (D'Agostino 2006).

Ou-Mizuyama (1994) hanno invece ottenuto un'equazione sperimentale (20) la quale considera sia il fronte e sia la coda del debris flow, pertanto si ha una valutazione globale della colata.

$$C_v = \frac{4,3 c_* (\tan\beta)^{1,5}}{1 + 4,3 c_* (\tan\beta)^{1,5}} \quad (20)$$

L'equazione riportata appena sopra, rispetto a quella di Takahashi, risulta essere sempre crescente e anch'essa viene riportata in figura 17.

Particolare attenzione va data al fattore c_* (presente sempre nell'equazione 20), perché rappresenta la concentrazione volumetrica di massimo impaccamento, cioè

quando le particelle di sedimento sono a stretto contatto tra loro, prima che siano interessate dall'innesco della colata e di norma assume un valore di 0,65.

D'Agostino e Marchi (2004) a partire da queste ultime due espressioni hanno dedotto una relazione semi-empirica, che deriva dall'elaborazione di 127 eventi di debris flow che si sono verificati nell'Italia nord orientale e riportata in equazione 21.

$$\frac{V_s}{V} = 2,9 (\tan\beta)^2 \quad (21)$$

Con il fattore V_s s'intende il volume solido e con V il volume liquido dell'idrogramma generatore dell'evento di debris flow.

Nota l'equazione della concentrazione solido-volumetrica (22):

$$C_v = \frac{V_s}{V_s+V} \quad (22)$$

Se si inserisce l'equazione 21 nella 22, si ottiene l'equazione 23:

$$C_v = \frac{2,9 (\tan\beta)^2}{1+2,9 (\tan\beta)^2} \quad (23)$$

L'equazione 26 di D'Agostino e Marchi (2004) è semi-empirica, ma se la si osserva attentamente si riscontra che è molto simile a quella di Ou-Mizuyama (1994), anche se la 23 è stata ottenuta in laboratorio. A fini comparativi l'espressione di D'Agostino e Marchi è riportata graficamente in figura 17.

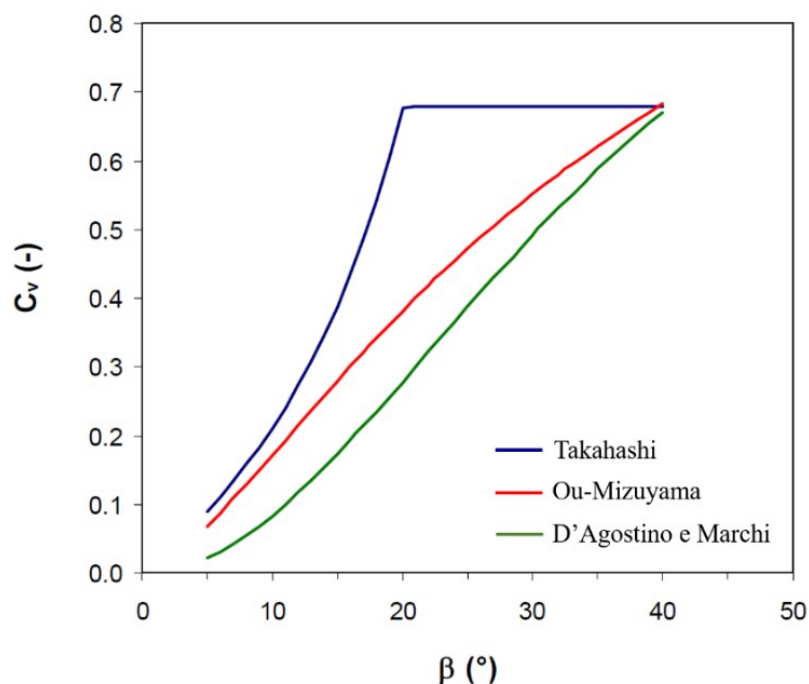


Figura 17. Concentrazione volumetrica (C_v)

Una volta assegnata la concentrazione volumetrica si procede con il calcolo vero e proprio della portata solido-liquida totale del debris flow (equazione 24).

$$Q_t = \left(\frac{c_*}{c_* - C_v} \right) Q' \quad (24)$$

Q' è la portata d'acqua innescante e Q_t invece è la portata solido-liquida e cioè costituita da acqua e da sedimenti. All'equazione 27 si deve aggiungere il grado di saturazione del letto dell'alveo, attribuendogli così un valore pari all'unità (D'Agostino 2020); l'equazione 25 è così scritta:

$$Q_t = \left\{ \frac{c_*}{c_* - s + \frac{(1-s)}{c_*} \cdot C_v} \right\} \cdot Q' = k Q' \quad (25)$$

Così come si può notare si è introdotto fattore di amplificazione della portata totale (k) che in genere è compreso in un range di valori tra 2 e 10 rispetto alla portata liquida (Q').

Se il grado di saturazione del letto fosse pari a zero, l'equazione 28 sarebbe ricondotta a quella di Costa (1984): $Q_t = Q'/(1-C_v)$.

Queste ultime espressioni permettono di stimare la portata complessiva della colata, ma in realtà la portata totale (Q_t) è data dalla somma di tre componenti: la portata liquida detta anche portata innescante (Q'), la portata "liberata" dal pendio canale (Q'') destabilizzato e la portata solida (Q_s) (D'Agostino 2020).

In condizioni di massima saturazione ($s=1$) e di massima concentrazione volumetrica ($C_v \text{ max}$) la portata liquida liberata dal letto dell'alveo (Q'') è da considerarsi come in equazione 26.

$$Q'' \cong 0,22 (Q_t - Q') \quad (26)$$

In figura 18 si evidenzia come il contributo idrico del pendio canale, parzialmente saturo o saturo, sia in grado di influire in modo significativo sulla portata solida di una colata detritica.

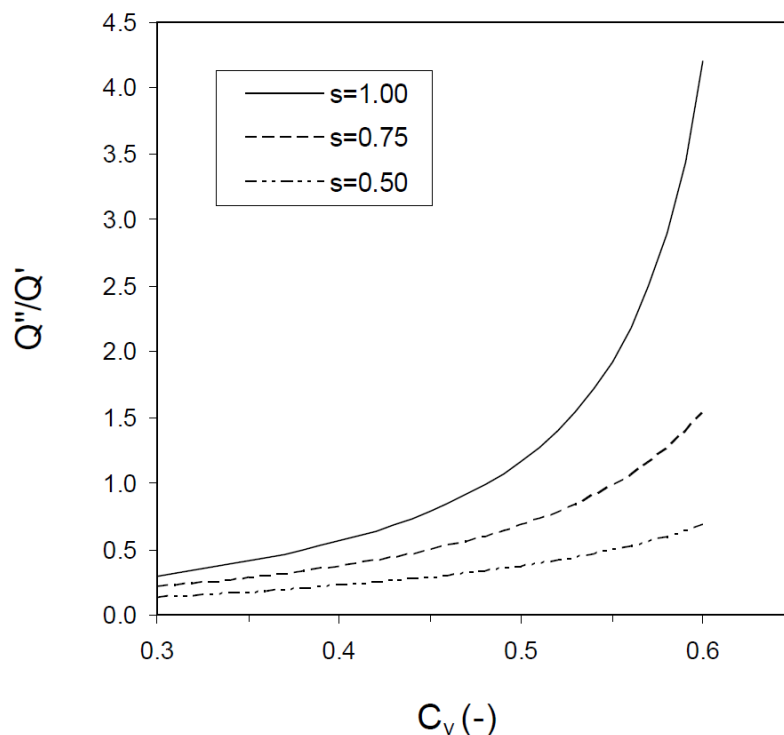


Figura 18. Formazione di un debris flow: rapporto tra la portata liquida liberata dal letto Q'' e la portata innescante Q' in funzione della concentrazione volumetrica C_v

1.8 FLO-2D: un modello per le simulazioni idrologiche e le simulazioni idrauliche

FLO-2D (O'Brien et al. 1993) è un software bidimensionale che viene utilizzato per le modellazioni idrologiche e idrauliche: ovvero per la simulazione della propagazione di flussi newtoniani (piene liquide e trasporto solido di fondo) e di flussi non newtoniani (colate detritiche).

Nei riguardi della simulazione di flussi non newtoniani tale modello non tiene conto del fenomeno dell'erosione, perciò si basa su un modello a fondo fisso, contrariamente alle simulazioni di trasporto solido di fondo, laddove si ha un modello a fondo mobile. (Bettella 2013).

Inoltre, FLO-2D non è in grado di eseguire contemporaneamente simulazioni di trasporto di cernita, unitamente a quelle di debris flow (Bettella 2013).

Questo modello è inoltre costituito da diverse funzionalità (O'Brien 2009), le quali sono suddivise tra pre e post-processor, come elencato in seguito.

Le funzionalità di pre-processor sono:

- *Grid Developer System* (GDS), che è atto a creare il dominio di calcolo e modificare gli attributi delle celle;
- *Profile*, grafica il profilo del fondo, modifica ed interpola la geometria del canale;
- *Floenvir* permette di inserire i dati che sono distribuiti spazialmente nella griglia di calcolo, come ad esempio le precipitazioni.

Nel post-processor, invece si ha:

- *Maxplot*, tramite il quale è possibile avere una visualizzazione grafica dei dati di output;
- *Mapper*, per produrre delle mappe tematiche, ad esempio le quote topografiche, tiranti idrici, velocità, erosioni e depositi (esportabili come shapefile), oppure per creare animazioni;
- *Hydrog* permette di avere una visualizzazione grafica dell'idrogramma per ogni cella canale;
- *Profiles* per visualizzare graficamente la superficie libera e il fondo canale.

Nello specifico si tratta di un modello fisico che calcola il deflusso superficiale che avviene in un arco temporale finito, a partire da dati di input e basandosi sulla conservazione del volume.

Il flusso si muove su otto direzioni (come schematizzato in figura 19), è di tipo bidimensionale e avviene all'interno di una griglia di calcolo (detta GRID).

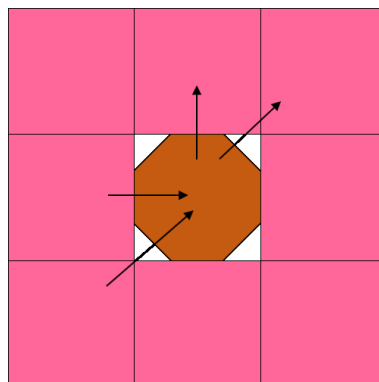


Figura 19. Cella "tipo" di direzione del flusso

Attraverso l'interfaccia di FLO-2D si andranno a inserire i dati di input, affinché abbia inizio la simulazione idrologica e successivamente quella idraulica.

Di conseguenza si avvierà una modellizzazione e uno scambio di flusso tra le celle versante e le celle che costituiscono il canale; però nel momento in cui il flusso oltrepassa il canale, si disperderà in altri elementi della griglia terrestre (ad esempio la piana alluvionale) in base alla topografia, alle asperità o eventuali ostruzioni.

1.8.1 Il modello matematico di base in FLO-2D

In FLO-2D il volume di afflusso si muove lungo una griglia regolare e rispondendo all'equazione completa del moto di un'onda dinamica come in (27).

$$i = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} \quad (27)$$

I parametri presenti in (27) sono i seguenti:

- i intensità di pioggia efficace;
- h profondità del flusso;
- V_x velocità del flusso lungo l'asse x;
- V_y velocità del flusso lungo l'asse y;

Invece l'equazione di conservazione della quantità di moto è calcolata su una profondità lungo due direzioni, x (28) e y (28b).

$$S_{fx} = S_{ox} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} - \frac{1 \partial V_x}{g g \partial t} \quad (28)$$

$$S_{fy} = S_{oy} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y \partial V_y}{g \partial y} - \frac{1 \partial V_y}{g g \partial t} \quad (28b)$$

essendo:

- S_{fx} : pendenza della linea dell'energia nella direzione x e calcolata con l'equazione di Manning;
- S_{fy} : pendenza della linea dell'energia nella direzione y;
- S_{ox} : pendenza lungo la direzione x;
- S_{oy} : pendenza lungo la direzione y.

Come accennato precedentemente, il dominio di calcolo è discretizzato mediante una griglia di celle quadrate e aventi una grandezza uniforme. In ciascuna cella è poi possibile visualizzare i valori del GRID, i valori di quota e infine i valori di scabrezza come riportato in figura 20.

A livello informatico l'analisi della propagazione della piena (*overland flow*) consiste nel calcolare la portata attraverso le otto potenziali direzioni di deflusso (quattro ortogonali ai bordi della cella e altre quattro in diagonale); invece la velocità del flusso che attraversa il confine tra due celle è calcolata risolvendo l'equazione di conservazione della quantità di moto.

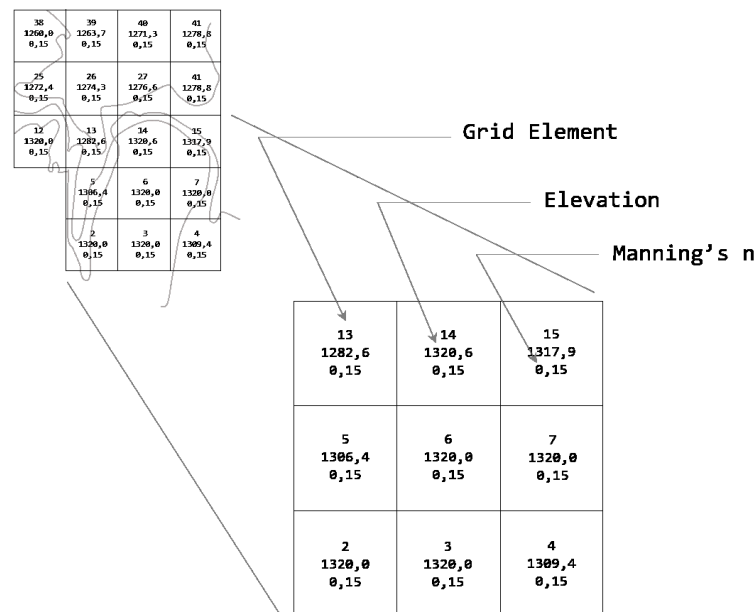


Figura 20. Dominio di calcolo in FLO-2D (elaborazione D'Agostino V.)

FLO-2D riesce anche a simulare la propagazione di colate detritiche o fangose, trattandole come un mezzo continuo e allo stesso tempo viscoso (Bettella 2014).

La propagazione di un debris flow dev'essere considerata come un continuum di acqua e sedimenti (modellazione monofasica); inoltre trattandosi di un fluido non-Newtoniano è necessario che venga superato lo *yield stress* (τ_0) perché vi sia movimento delle particelle immerse nella matrice.

In flussi turbolenti, bisogna tener conto anche di una componente addizionale dello sforzo, ovvero lo *shear stress* dispersivo, il quale si verifica quando le grandi particelle di sedimento sono dominanti rispetto alla percentuale di sedimento fine e coesivo (Bettella 2014).

FLO-2D utilizza un modello reologico quadratico (O'Brien e Julien, 1985, 1988; Julien e Lan, 1991; O'Brien et al., 1993) per predire gli sforzi viscosi rispetto alla concentrazione volumetrica che assume la colata detritica.

Tuttavia, al variare della concentrazione di sedimento, per un dato elemento della griglia, vengono simulati effetti di diluizione, cessazione della colata e l'eventuale rimobilizzazione del deposito (Bettella 2014).

In questo modello lo sforzo tangenziale viene calcolato in funzione del gradiente di velocità (du/dy) come scritto nell'equazione 29, laddove μ_n è la viscosità dinamica e C è il coefficiente dello sforzo inerziale (Bettella 2014).

$$\tau = \tau_y + \mu_n \left(\frac{du}{dy} \right) + C \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (29)$$

I primi due termini riportati nell'equazione (29) rimandano allo sforzo tangenziale di Bingham, mentre l'ultimo termine è la somma dello sforzo tangenziale dispersivo e turbolento, che è funzione quadrata del gradiente velocità.

Il coefficiente dello sforzo tangenziale (C_i) è calcolabile come in equazione 30.

$$C_i = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) D^2 \quad (30)$$

I fattori espressi in 33 sono:

- ρ_m è la densità del fluido non-Newtoniano;
- C_v concentrazione volumetrica;
- D diametro del sedimento

A questo punto si ricava l'espressione 31 che risponde al modello reologico quadratico ed è così scritta:

$$S_e = \frac{\tau_y}{\gamma_m h_f} + \frac{k \mu_n u}{8 \gamma_m h_f^2} + \frac{n_{td}^2 u^2}{h_f^{4/3}} \quad (31)$$

Essendo k il parametro di resistenza che varia a seconda della scabrezza e del tipo di sezione (O'Brien 2009), poi si ha la scabrezza turbolento-dispersiva (n_{td}) che varia a seconda della concentrazione volumetrica ed esplicitato nella (32) come funzione esponenziale della concentrazione di sedimento (Bettella 2014):

$$n_{td} = n b e^{m C_v} \quad (32)$$

Dove n identifica la scabrezza di Manning, mentre b è un coefficiente pari a 0,0538, rispetto a m che porge un valore di 6,09 (Bettella 2014).

Una soluzione dell'equazione 31 sulla pendenza energetica complessiva dissipata (S_e), è stata formulata in FLO-2D per il calcolo della velocità del flusso nell'espressione di conservazione della quantità di moto. Di conseguenza la velocità del flusso calcolata attraverso ogni lato del GRID, o del canale, può avvenire usando la profondità media del flusso tra gli elementi; dopodiché si attribuiranno valori

ragionevoli di K e n di Manning per la resistenza al moto nel canale e sulla piana inondabile. Il peso specifico della matrice fluida (γ_m) aumenta con la concentrazione del sedimento, mentre lo sforzo (τ_y) e la viscosità (μ_N) variano con la concentrazione del sedimento (Bettella 2014). Per calcolare rispettivamente la viscosità e lo sforzo tangenziale possono essere usate le seguenti relazioni empiriche (33 e 34).

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (33)$$

$$\mu_n = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (34)$$

Dove: α_1 e α_2 e β_1 e β_2 sono coefficienti empirici definiti in laboratorio e si differenziano a seconda della reologia della colata detritica (O'Brien e Julien, 1988).

Obiettivi del lavoro

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la *back-analysis* dell'evento di debris flow che si è verificato nel torrente Rudan, nella giornata del 29 agosto 2020.

Il primo importante approccio è stato quello di visionare il video prodotto dalla videocamera installata nei pressi della briglia filtrante e che ha testimoniato l'avvenimento della colata detritica.

Il passo successivo è stato quello di determinare l'idrogramma liquido per poi applicare il metodo volumetrico al fine di ottenere il debrisgramma, il quale a partire dalla concentrazione volumetrica permette di stimare la portata e il volume solido associati alla colata detritica. Quest'ultimi verranno poi confrontati con i valori ottenuti con le formule empiriche.

In particolar modo, le formule empiriche trovano applicazione perché nel post evento sono state rilevate alcune sezioni del torrente Rudan, sulle quali si sono calcolati i parametri sopra citati.

Per assolvere all'obiettivo prefissato, il comportamento della colata detritica verrà ricostruito applicando il modello FLO-2D; nello specifico verranno condotte delle simulazioni idrauliche e in base ai risultati ottenuti si potrà valutare la performance di questo software.

Materiali e metodi

3.1 Estrazione del bacino idrografico del rio Rudan in GIS

L'estrazione di un bacino idrografico avviene in modo informatizzato con l'utilizzo dei software GIS, utilizzando come dato di input un *Digital Terrain Model* (DTM). Il DTM di partenza deve essere elaborato, perché possono esserci delle celle con depressioni locali (pit) che in alcuni casi esistono realmente (ad esempio per la presenza di laghi o doline), ma in altri casi sono un prodotto accidentale nella costruzione del modello digitale.

Un pit è una cella (o un gruppo di celle) circondata da altre celle aventi quote più elevate e per questo motivo non si ha un'uscita per via superficiale del deflusso idrico, quindi sono come “pozzi” che isolano porzioni del bacino dalla sezione di chiusura.

Utilizzando gli appositi strumenti GIS, ad ogni cella viene associata una, delle otto possibili direzioni di deflusso, scegliendo la direzione di massima pendenza verso valle. Il problema dei “pit” viene dunque risolto “riempiendo” la depressione: ovvero la quota della cella in esame viene rialzata in modo da superare la più bassa tra le otto adiacenti: determinando così la direzione di deflusso (figura 21).

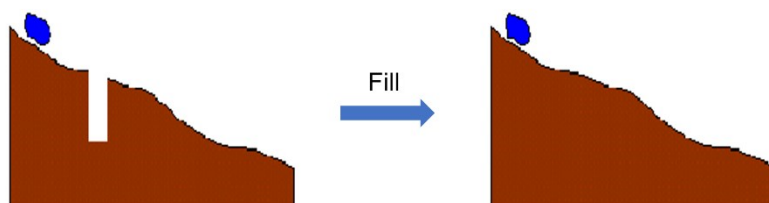
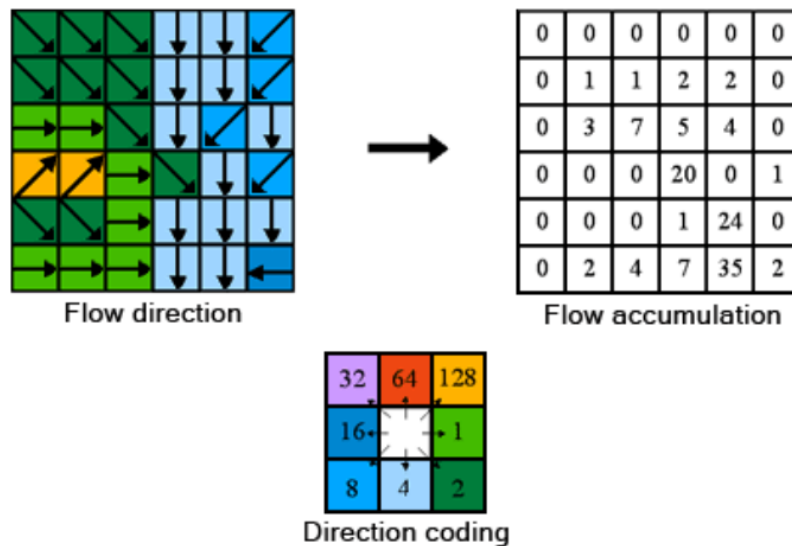


Figura 21. Depittaggio, per risoluzione dei pit

L'area drenata, o l'area contributiva, viene calcolata sommando progressivamente il numero di celle che si trovano lungo i percorsi dello spartiacque fino ad arrivare alla sezione di chiusura (figura 22).

Ogni cella assume quindi un valore pari al numero di celle drenate e tale valore corrisponde quindi alla superficie del bacino sotteso, espresso in numero di celle.



Determining the accumulation of flow

Figura 22. Esempificazione dell'algorithmo di QGIS per la direzione del deflusso

A partire dal raster dell'area drenata si seleziona un'area di soglia (la cui estensione sarà prescelta in base alla precisione che si intende ottenere), quindi tutte le celle con un'area drenata maggiore dell'area di soglia apparterranno alla rete idrografica, tutte le altre saranno catalogate come "celle versante".

A questo punto si procede all'estrazione del bacino idrografico definendo il punto in cui si posiziona la sezione di chiusura: le celle di tipo area drenata seguono la direzione di deflusso, giungendo alla sezione di chiusura e permettendo in questo modo l'identificazione della linea di spartiacque.

3.2 Inquadramento geografico e parametri morfometrici del bacino idrografico del rio Rudan

Il torrente Rudan scorre lungo il versante Sud del Monte Antelao nelle Dolomiti Bellunesi, per poi confluire nel torrente Boite subito a valle della Strada Statale n. 51 Alemagna.

Si tratta di un bacino idrografico con un'estensione di 2,7 km² (figura 23) e la sezione di chiusura è posta in prossimità della località Peaio (Comune di Vodo di Cadore, BL).

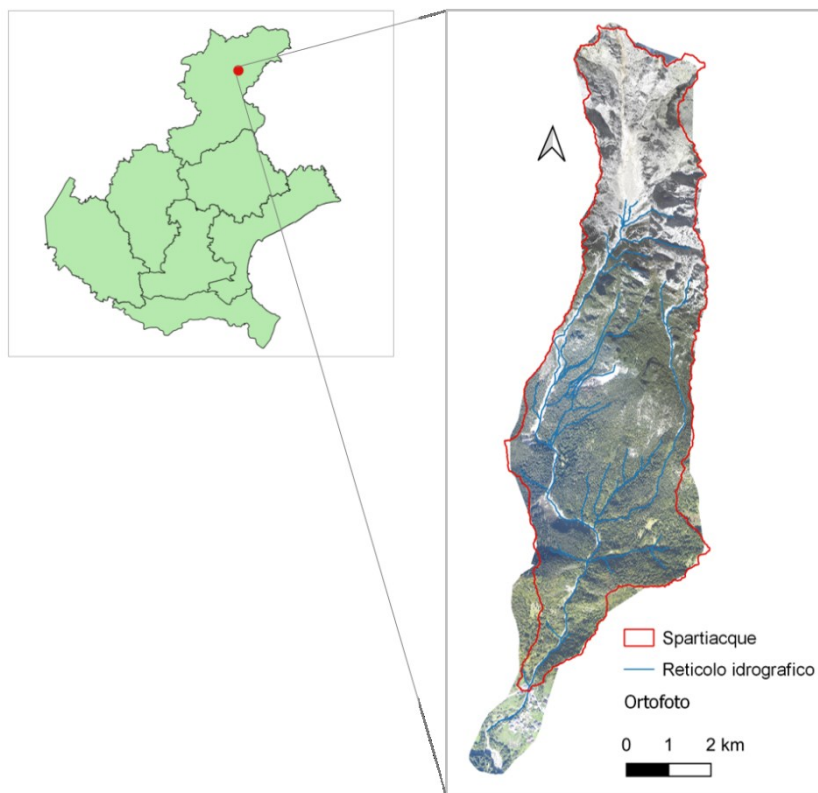


Figura 23. Inquadramento geografico del bacino idrografico del rio Rudan

È stato elaborato il modello digitale del terreno (DTM) del 2015, con risoluzione 1m x 1m al fine di ricavare le principali caratteristiche morfometriche del bacino idrografico oggetto di studio e poi riassunte in tabella 4.

Il suddetto bacino (figura 23) si sviluppa da una quota massima di 3255m s.l.m. (cima del Monte Antelao) fino ad una quota minima di 880 m s.l.m. (in corrispondenza del centro abitato della località Peaio); mentre a quota 2000/2500 m s.l.m. si trova il Vallon dell'Antelao, che è un canalone scosceso e molto ripido. La sezione di chiusura è posta a 880 m s.l.m. a monte del centro abitato di Peaio e questa zona risulta essere critica a fronte degli eventi di debris flow, quindi per perseguire la sicurezza idraulica sullo stesso centro abitato e sull'attraversamento stradale della Strada Statale 51 Alemagna, D'Agostino et al. (2002) hanno eseguito degli studi approfonditi sull'intero bacino.

Nel 2011 per conto della Regione Veneto è stata realizzata una briglia filtrante a gaveta trapezia, costituita da tre filtri verticali con una luce di 1,30 m ciascuno e i relativi contrafforti inclinati di 27°, poi a valle si sviluppa un cunettone con sponde in cemento armato (Bertoldi 2014).

Il reticolo idrografico ha invece una lunghezza di circa 5 km e, secondo il metodo Horton-Strahler, il collettore principale risulta di ordine 3.

Il collettore principale ha una lunghezza di circa 3,4 km e una pendenza media di 0,38 m/m.

È poi importante prendere in considerazione il numero di Melton, perché indica la propensione del bacino idrografico a generare debris flow (D'Agostino 1996).

Per il rio Rudan risulta pari a 1,41 confermando la propensione del bacino al verificarsi di colate detritiche.

L'ultimo parametro morfometrico qui presentato è l'indice di torrenzialità (D_t) che si ottiene dal rapporto tra il numero di segmenti di primo ordine (N_1) e l'area del bacino idrografico (A_k) e porge un valore di 10,6 km⁻², come nella formula di Puglisi (equazione 35).

$$D_t = \frac{N_1}{A_k} \quad (35)$$

In tabella 4 si riassumono tutte le caratteristiche morfometriche descritte in precedenza.

Tabella 4. Caratteristiche morfometriche

| Riferimento | Parametri morfometrici bacino Rudan | |
|-----------------------------|---|-------|
| Bacino idrografico | Area (km ²) | 2,73 |
| | Perimetro (m) | 1,49 |
| | Quota minima (m s.l.m.) | 880 |
| | Quota massima (m s.l.m.) | 3.255 |
| | Quota media (m s.l.m.) | 1.781 |
| | Pendenza minima (°) | 22,00 |
| | Pendenza massima (°) | 88,00 |
| | Pendenza media (°) | 1,07 |
| Reticolo idrografico | Lunghezza reticolo idrografico (km) | 4,20 |
| | Lunghezza del collettore (km) | 3,37 |
| | Pendenza collettore (m/m) | 0,38 |
| | Ordine del bacino, Horton | 3,00 |
| | Numero di Melton | 1,41 |
| | Indice di torrenzialità (km ⁻²) | 10,00 |

3.2.1 Mappa delle pendenze e delle isoipse

Attraverso l'analisi del modello digitale del terreno (DTM) è stato possibile creare la carta delle pendenze e la carta con le curve di livello (isoipse) come mostrato in figura 24.

Le isoipse (o curve di livello) sono delle linee che uniscono punti del territorio di egual quota (Carton 2015); in questo caso si riportano le isoipse principali ogni 100 m di dislivello e le isoipse secondarie ogni 20 m, entrambe in sovrapposizione al DTM.

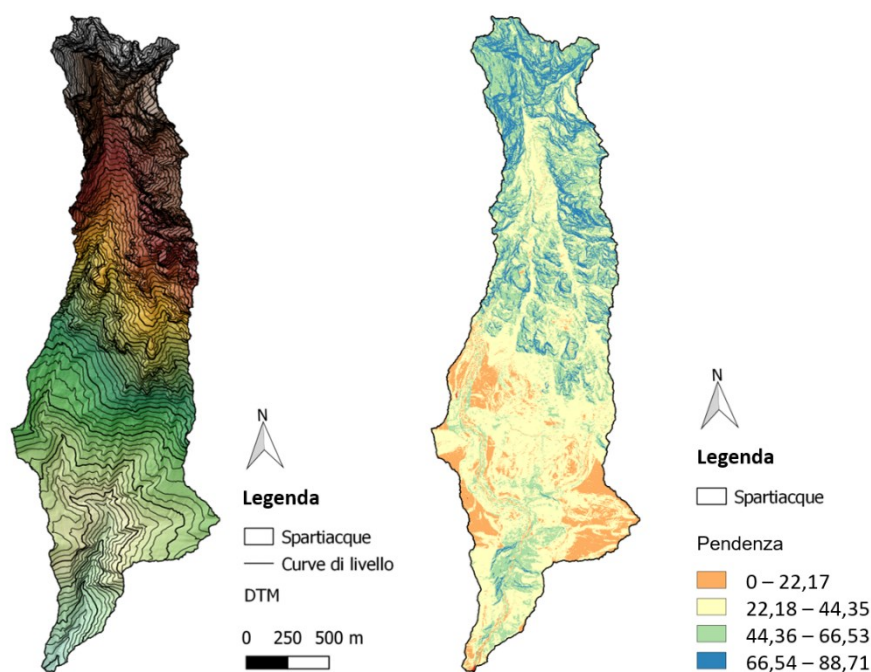


Figura 24. Mappa delle isoipse (a sinistra) e delle pendenze (a destra)

Sempre in figura 24 è possibile leggere anche le quote ortometriche, ovvero l'elevazione del terreno rispetto al livello medio del mare.

La vicinanza o la lontananza delle medesime sono un indicatore importante perché danno informazioni rapide sull'andamento del terreno e quindi sulle pendenze.

Infatti, nella zona di testata del bacino Rudan si notano curve di livello molto più ravvicinate rispetto alle zone più a valle e questo fa capire l'elevato dislivello e di conseguenza l'elevata pendenza (si veda la carta delle pendenze).

Per quanto concerne l'intervallo di pendenze del bacino, si passa da una quota minima di 22° a una quota massima di 88°, anche se c'è un cambio di pendenza piuttosto importante subito a valle del Vallon dell'Antelao.

È interessante mostrare l'istogramma della distribuzione delle aree del bacino idrografico (in ordinata) per ciascuna fascia altimetrica (in ascissa).

Il medesimo istogramma è rappresentato in figura 25 e mostra che il bacino è più ampio a partire dalle quote 1501-1550 m fino a 1151-1200 m, rispetto alle alte quote in cui invece tende a restringersi e di conseguenza ha una minore superficie.

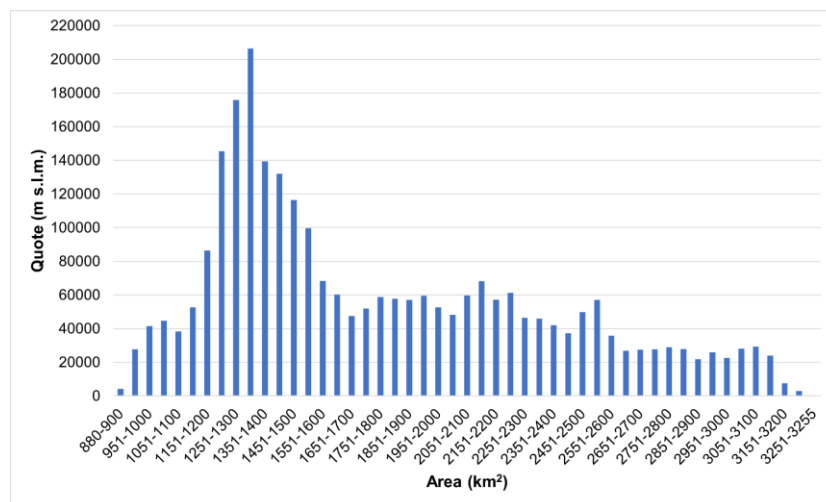


Figura 25. Istogramma delle aree

3.2.2 Curva ipsometrica dimensionale a adimensionale

La curva ipsometrica (o ipsografica) dimensionale è utile per poter calcolare un idrogramma di piena e a livello grafico viene determinata ponendo in ordinata i valori di quota espressi in metri (h_i) e in ascissa l'area cumulata (A) in km^2 , così come mostrato in figura 26.

In figura viene riportata anche la retta che indica la quota media pari a 1781 m s.l.m.

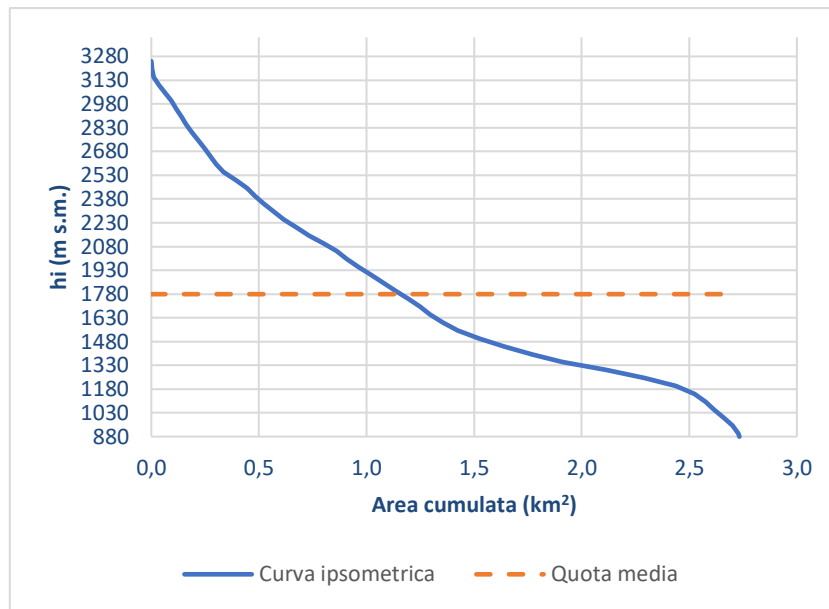


Figura 26. Curva ipsometrica dimensionale

La curva ipsometrica adimensionale (figura 27) va invece ad analizzare lo stato evolutivo del bacino idrografico.

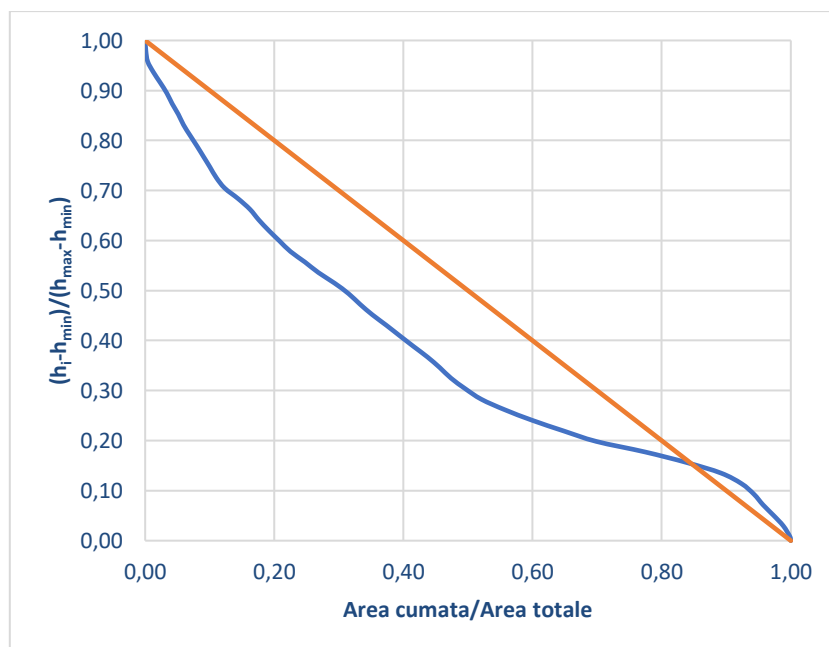


Figura 27. Curva ipsometrica adimensionale

A livello grafico la curva è stata ottenuta ponendo nell'asse delle ascisse l'area adimensionale rispetto all'area totale (o percentuale) (A_{ad}/A_{tot}) e nell'asse delle ordinate il dislivello adimensionale (H_{ad}).

Il dislivello adimensionale è calcolato come nell'equazione 36.

$$H_{ad} = \frac{\Delta h_i}{h_{max} - h_{min}} \quad (36)$$

Osservando l'andamento della curva, si desume che si trova apparentemente in stato di maturità perché la curva è al di sotto della bisettrice (rappresentata dalla retta arancione). In realtà nella parte alta del bacino i processi di disfacimento e dissesto risultano ancora molto attivi.

3.3 Il monitoraggio del Rio Rudan

Il torrente Rudan è interessato da frequenti fenomeni di debris flow per questo motivo l'ARPAV, su incarico della Regione Veneto, ha progettato un sistema di monitoraggio e di allarme che entrambi servono a proteggere le vie di comunicazione e l'abitato di Peaio (Vodo di Cadore).

Nella fattispecie le precipitazioni sono monitorate dalle due stazioni pluviometriche presenti sul bacino idrografico; poi a valle si ha un sistema di allarme che ha l'obiettivo di interdire il transito di persone e/o veicoli lungo le principali vie di comunicazioni di Peaio.

3.3.1 Le stazioni pluviometriche

Il pluviometro è uno degli strumenti atto a misurare le precipitazioni, viene installato a un'altezza di circa 2 m dal suolo, è sorretto da un palo in alluminio e lontano da pareti rocciose, da alberi o da tutti quegli elementi che possono alterare il quantitativo d'acqua che può cadere al suo interno durante un evento meteorico. (Faggin 2018).

Nello specifico si tratta di un pluviometro a bascula (figura 28), con un recipiente cilindrico in alluminio alto 50 cm e al suo interno c'è un imbuto raccoglitore con una bocca di 1000 cm². Nella parte inferiore vi è un foro terminale di dimensioni piuttosto piccole per evitare eventuali perdite per evapotraspirazione, oppure la caduta di corpi solidi che possono alterare o inibire la misurazione della precipitazione (ARPAV, 2013).

Il gruppo basculante è stato tarato in modo che venga raccolta una quantità di pioggia pari a 0,2 mm (20 g d'acqua se si riferisce all'apertura della bocca di 1000 cm²).



Figura 28. Pluviometro a bascula (la foto di sinistra è stata scattata dall'autore)

Nel bacino idrografico del rio Rudan l'ARPAV ha installato due pluviometri, uno localizzato nel Vallon dell'Antelao e l'altro è situato appena a valle della forra rocciosa superiore.

Queste due stazioni meteorologiche sono automatiche e ogni 5 minuti rilevano i dati giornalieri di precipitazione.

La data e l'orario di acquisizione dei dati sono sempre riferiti all'ora solare, pertanto i pluviometri vengono periodicamente controllati dall'Ente preposto, in questo caso dall'ARPAV, il quale ha fornito i dati di pioggia utilizzati in questo lavoro.

3.3.1.1 Gli eventuali errori di misura

L'Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione dell'Ambiente del Veneto (ARPAV) spiega che le misure pluviometriche possono essere soggette a errori sistematici o casuali e i più frequenti sono:

- il flusso del vento può deviare le particelle d'acqua in prossimità della bocca del pluviometro portando a sottostimare la misura della precipitazione; si ha quindi un errore che può variare dal 2% al 10% nel caso di precipitazione liquida, o dal 10% al 50% se si tratta di una precipitazione solida;
- perdite marginali per adesione dell'acqua alle pareti del pluviometro;

- nel caso di precipitazioni di breve durata ci possono essere perdite per evapotraspirazione;
- eventuale perdita d'acqua durante l'arco temporale di oscillazione delle due vaschette basculanti.

3.3.1.2 Precipitazioni registrate dall'ARPAV nel Rio Rudan

In tabella 5 si riportano i valori registrati dalla stazione pluviometrica dell'ARPAV nella giornata del 29 agosto 2020 e con un intervallo orario di 5 minuti.

Tabella 5. Precipitazioni rio Rudan, 29 agosto 2020

| Data e ora | mm | Data e ora | mm |
|------------------|------|------------------|------|
| 29/08/2020 14:10 | 0,20 | 29/08/2020 16:05 | 1,00 |
| 29/08/2020 14:15 | 0,00 | 29/08/2020 16:10 | 1,60 |
| 29/08/2020 14:20 | 0,20 | 29/08/2020 16:15 | 0,60 |
| 29/08/2020 14:25 | 0,40 | 29/08/2020 16:20 | 0,60 |
| 29/08/2020 14:30 | 2,40 | 29/08/2020 16:25 | 0,60 |
| 29/08/2020 14:35 | 3,20 | 29/08/2020 16:30 | 0,20 |
| 29/08/2020 14:40 | 1,60 | 29/08/2020 16:35 | 0,40 |
| 29/08/2020 14:45 | 1,00 | 29/08/2020 16:40 | 0,40 |
| 29/08/2020 14:50 | 0,00 | 29/08/2020 16:45 | 0,60 |
| 29/08/2020 14:55 | 2,70 | 29/08/2020 16:50 | 1,40 |
| 29/08/2020 15:00 | 3,80 | 29/08/2020 16:55 | 1,60 |
| 29/08/2020 15:05 | 0,80 | 29/08/2020 17:00 | 1,20 |
| 29/08/2020 15:10 | 2,20 | 29/08/2020 17:05 | 0,60 |
| 29/08/2020 15:15 | 0,80 | 29/08/2020 17:10 | 1,20 |
| 29/08/2020 15:20 | 1,40 | 29/08/2020 17:15 | 0,80 |
| 29/08/2020 15:25 | 0,20 | 29/08/2020 17:20 | 0,20 |
| 29/08/2020 15:30 | 0,60 | 29/08/2020 17:25 | 0,60 |
| 29/08/2020 15:35 | 1,00 | 29/08/2020 17:30 | 0,20 |
| 29/08/2020 15:40 | 0,80 | 29/08/2020 17:35 | 0,20 |
| 29/08/2020 15:45 | 0,40 | 29/08/2020 17:40 | 0,40 |
| 29/08/2020 15:50 | 0,60 | 29/08/2020 17:45 | 0,40 |
| 29/08/2020 15:55 | 0,40 | 29/08/2020 17:50 | 0,60 |
| 29/08/2020 16:00 | 0,60 | 29/08/2020 17:55 | 0,40 |

| Data e ora | mm |
|------------------|------|
| 29/08/2020 18:00 | 0,60 |
| 29/08/2020 18:05 | 0,60 |
| 29/08/2020 18:10 | 0,20 |
| 29/08/2020 18:15 | 1,00 |
| 29/08/2020 18:20 | 0,60 |
| 29/08/2020 18:25 | 0,40 |
| 29/08/2020 18:30 | 0,60 |
| 29/08/2020 18:35 | 0,40 |
| 29/08/2020 18:40 | 0,40 |
| 29/08/2020 18:45 | 0,20 |
| 29/08/2020 18:50 | 0,20 |
| 29/08/2020 18:55 | 0,20 |
| 29/08/2020 19:00 | 0,40 |
| 29/08/2020 19:05 | 0,60 |
| 29/08/2020 19:10 | 1,20 |
| 29/08/2020 19:15 | 0,40 |
| 29/08/2020 19:20 | 0,20 |
| 29/08/2020 19:25 | 0,40 |
| 29/08/2020 19:30 | 0,20 |
| 29/08/2020 19:35 | 0,40 |
| 29/08/2020 19:40 | 0,20 |
| 29/08/2020 19:45 | 0,40 |
| 29/08/2020 19:50 | 0,80 |
| 29/08/2020 19:55 | 0,80 |
| 29/08/2020 20:00 | 0,40 |
| 29/08/2020 20:05 | 0,20 |
| 29/08/2020 20:10 | 0,40 |
| 29/08/2020 20:15 | 0,60 |
| 29/08/2020 20:20 | 0,00 |
| 29/08/2020 20:25 | 0,20 |
| 29/08/2020 20:30 | 0,20 |
| 29/08/2020 20:35 | 0,20 |
| 29/08/2020 20:40 | 0,20 |

| Data e ora | mm |
|------------------|------|
| 29/08/2020 20:45 | 0,00 |
| 29/08/2020 20:50 | 0,00 |
| 29/08/2020 20:55 | 0,00 |
| 29/08/2020 21:00 | 0,20 |
| 29/08/2020 21:05 | 0,00 |
| 29/08/2020 21:10 | 0,00 |
| 29/08/2020 21:15 | 0,00 |
| 29/08/2020 21:20 | 0,80 |
| 29/08/2020 21:25 | 0,60 |
| 29/08/2020 21:30 | 0,60 |
| 29/08/2020 21:35 | 0,20 |
| 29/08/2020 21:40 | 0,20 |
| 29/08/2020 21:45 | 0,20 |
| 29/08/2020 21:50 | 0,20 |
| 29/08/2020 21:55 | 0,20 |
| 29/08/2020 22:00 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:05 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:10 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:15 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:20 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:25 | 0,0 |
| 29/08/2020 22:30 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:35 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:40 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:45 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:50 | 0,00 |
| 29/08/2020 22:55 | 0,40 |
| 29/08/2020 23:00 | 0,60 |
| 29/08/2020 23:05 | 0,40 |
| 29/08/2020 23:10 | 0,00 |
| 29/08/2020 23:15 | 0,80 |
| 29/08/2020 23:20 | 0,80 |
| 29/08/2020 23:25 | 0,20 |

3.3.2 Sistema di allarme per la sicurezza del centro abitato di Peaio

L'ARPAV ha progettato un sistema di allarme a protezione della Strada Statale n.51 Alemagna, della pista ciclabile Pieve di Cadore - Cortina e sia nei confronti del centro abitato di Peaio (Vodo di Cadore).

In pratica, nei pressi della briglia filtrante sono stati installati sette cavi di acciaio che sono tesi ad altezze comprese tra 1 m e 3 m trasversalmente al fondo dell'alveo, quindi nel momento in cui la colata detritica dovesse strappare anche solo due dei cavi presenti, automaticamente si innesca un sistema d'allarme. In figura 29 si riporta la pianta ed il prospetto di quanto appena descritto.

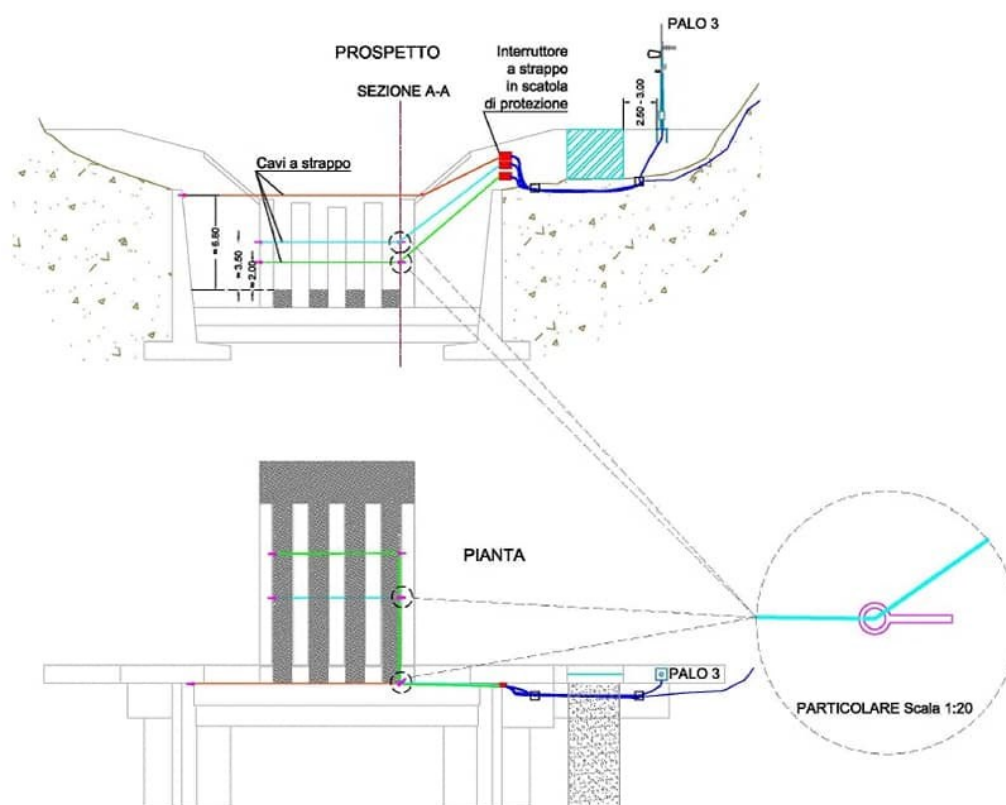


Figura 29. Prospetto dei cavi a strappo (Bottacin)

L'allarme è collegato a due semafori (figura 30) che vanno a interdire il passaggio di veicoli lungo la S.S. n. 51 e tale da impedire il transito sulla ciclabile, in più sul campanile della chiesa di Peaio è stata installata una sirena ad alta potenza. Infine, se un evento di debris flow dovesse avvenire di notte, questo è ancor più segnalato

da due lampeggianti rossi sul ponte della pista ciclabile e da tre fari LED lungo il rio Rudan.



Figura 30. Sistema di allarme per l'abitato di Peaio (Vodo di Cadore)

3.3.3 Monitoraggio mediante videocamera

Un altro importante sistema di monitoraggio è dato dalla videocamera che è stata installata dall'ARPAV, in prossimità della briglia filtrante.

Si tratta di una videocamera ad alta risoluzione che è orientata sull'alveo del torrente, per questo è stata in grado di riprendere completamente il debris flow che si è verificato il 29 agosto 2020 e ai fini di questo lavoro si è rivelato uno strumento utile per poter ricostruire la dinamica dell'evento.

3.4 Indagini di campo

Nella giornata del 9 settembre 2020 si sono svolte delle indagini di campo: si sono eseguiti due rilievi granulometrici e in più, si sono rilevate quattro sezioni del torrente utilizzando un distanziometro e una palina. Nei successivi paragrafi si spiegheranno nel dettaglio.

3.4.1 Granulometria in corsi d'acqua montani

I sedimenti che costituiscono i corsi d'acqua montani sono elementi granulari che vengono classificati in base al loro diametro, per poi eseguire delle analisi granulometriche.

Le analisi granulometriche sono elaborazioni statistiche di un campione rappresentativo dell'intera popolazione realmente presente in loco (Lenzi 2016).

Le erosioni spondali o di versante sono situazioni tipiche nei torrenti montani, a tal punto da essere delle sorgenti di sedimenti che in specifiche condizioni vengono trasportati dalla corrente sotto forma di trasporto di fondo, di debris flood e se le condizioni sono estreme può originarsi un debris flow (Lenzi 2019).

La granulometria dei torrenti alpini alluvionali è eterogenea e infatti si possono ritrovare sedimenti fini, come le argille, così come i grossi massi e in tabella 6 li si distinguono in base al loro diametro.

Tabella 6. Granulometria tipica dei torrenti

| Denominazione | Diametro |
|---------------|--------------------|
| Massi | >256 mm |
| Ciottoli | 65 mm - 256 mm |
| Ghiaia | 2 mm - 64 mm |
| Sabbia | 1/16 mm - 2 mm |
| Limo | 1/256 mm - 1/16 mm |
| Argilla | <1/256 mm |

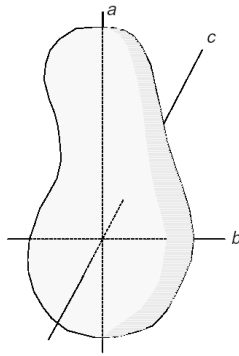


Figura 31. Disegno esemplificativo di un sedimento

Una particella di sedimento può essere schematizzata come un ellissoide (figura 31) e dove è possibile distinguere tre diversi diametri. Si ha un diametro maggiore (asse a), un diametro intermedio (asse b) e uno inferiore (asse c).

Normalmente, quando si esegue un rilievo in campo si misura sempre il diametro B.

Noti i tre diametri si può anche conoscere il coefficiente di forma secondo Corey, come riportato in equazione 37.

$$C = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \quad (37)$$

3.4.2 Rilievo granulometrico del torrente Rudan

I rilievi granulometrici si svolgono mediante il metodo ponderale oppure numerale; nel caso specifico del torrente Rudan si è adottato il metodo numerale.

Questo metodo trova applicazione su campioni superficiali e si basa sul conteggio dei sedimenti che appartengono a una certa classe diametrica (Lenzi 2016).

Il rilievo è stato poi sistematico e cioè si sono prelevati i sedimenti a intervalli regolari e lungo una linea di campionamento creata con una cordella metrica.

La distanza di campionamento deve essere 1-2 volte il diametro massimo in sito, in modo da evitare doppi conteggi degli elementi grossolani (Lenzi 2019).

Gli strumenti che sono utilizzati in campo per le misurazioni sono il calibro e la piastra forata. Il calibro può essere digitale e dotato di display dove poter leggere il diametro, oppure di tipo analogico con la lettura del diametro sulla riga graduata; la piastra forata invece permette di misurare i sedimenti che rientrano in un range da 2 mm a 180 mm (fori a intervalli di 0,5/0,25 phi) (Lenzi 2018).

In figura 32 si mostra un esempio di piastra forata (Masiero 2015).

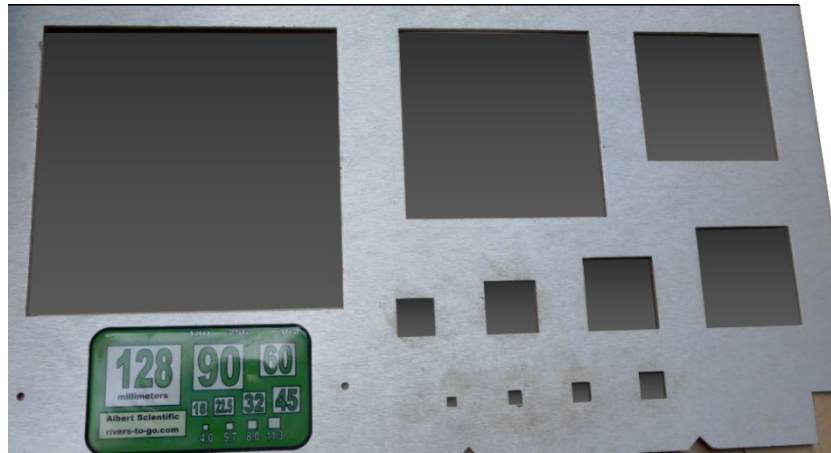


Figura 32. Piastra forata per il rilievo granulometrico (Foto di Masiero 2015)

3.4.2.1 Classificazione e analisi granulometrica

La tabella 6 esprime già una prima classificazione ma è piuttosto schematica e per questo motivo si adotta la classificazione dell'*American Geophysical Union* (AGU) riportata in tabella 7 (Lenzi 2016).

In virtù dell'elevata variabilità granulometrica, l'assegnazione delle relative classi granulometriche non può avvenire in progressione aritmetica (1-2, 2-3, 3-4 mm) altrimenti si otterrebbe una distribuzione log-normale con una "coda" allungata sul materiale grossolano (Lenzi 2016).

Si adotta quindi una progressione geometrica di "passo 2" (2-4, 4-8, 8-16 mm) che è utile per l'analisi delle curve di frequenza (Scala di Wentworth) e in questo modo i diametri raddoppiano all'aumentare di una classe diametrica (Lenzi 2016).

Noto il diametro (D) espresso in mm, si può trasformare la distribuzione log-normale in una distribuzione gaussiana mediante l'indice ϕ (*phi*) che fa riferimento a una scala aritmetica (equazione 38).

$$\phi = -\log_2 D \quad (38)$$

Nella la classificazione AGU (tabella 7) il diametro $D = 2$ mm ($\phi = -1$) è il valore che convenzionalmente separa il sedimento fine (ovvero più fine della sabbia) da quello grossolano.

Tabella 7. Classificazione dell'American Geophysical Union (AGU)

| Classe granulometrica | $\phi = -\log_2$ | mm | $\psi = \log_2$ |
|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|
| | -12,0 | 4096 | 12,0 |
| molto grossi | -11,5 | 2896 | 11,5 |
| | -11,0 | 2048 | 11,0 |
| grossi | -10,5 | 1448 | 10,5 |
| Massi | -10,0 | 1024 | 10,0 |
| medi | -9,5 | 724 | 9,5 |
| | -9,0 | 512 | 9,0 |
| piccoli | -8,5 | 362 | 8,5 |
| | -8,0 | 256 | 8,0 |
| grossi | -7,5 | 181 | 7,5 |
| Ciottoli | -7,0 | 128 | 7,0 |
| piccoli | -6,5 | 90,5 | 6,5 |
| | -6,0 | 64 | 6,0 |
| molto grossa | -5,5 | 45,3 | 5,5 |
| | -5,0 | 32,0 | 5,0 |
| grossa | -4,5 | 22,6 | 4,5 |
| Ghiaia | -4,0 | 16 | 4,0 |
| media | -3,5 | 11,3 | 3,5 |
| | -3,0 | 8,0 | 3,0 |
| fine | -2,5 | 5,66 | 2,5 |
| | -2,0 | 4,00 | 2,0 |
| molto fine | -1,5 | 2,83 | 1,5 |
| | -1,0 | 2,00 | 1,0 |
| molto grossa | -0,5 | 1,41 | 0,5 |
| | 0 | 1,00 | 0 |
| grossa | 0,5 | 0,707 | -0,5 |
| | 1,0 | 0,500 | -1,0 |
| Sabbie | 1,5 | 0,354 | -1,5 |
| media | 2,0 | 0,350 | -2,0 |
| | 2,5 | 0,177 | -2,5 |
| fine | 3,0 | 0,125 | -3,0 |
| | 3,5 | 0,088 | -3,5 |
| molto fine | | | |
| | 4,0 | 0 | -4,0 |
| Limo | | | |
| | 8,0 | 0,0039 | -8,0 |
| Argilla | | | |
| | 12,0 | 0,00024 | -12,0 |

3.4.2.2 Curva di frequenza cumulata e relativa

La curva di frequenza relativa (f) esprime per ogni classe diametrica la percentuale rispetto al totale del campione analizzato; mentre la curva di frequenza cumulata (F) rappresenta la percentuale sul totale del campione di sedimento più fine (detto anche passante) sempre per ciascuna classe diametrica (figura 33).

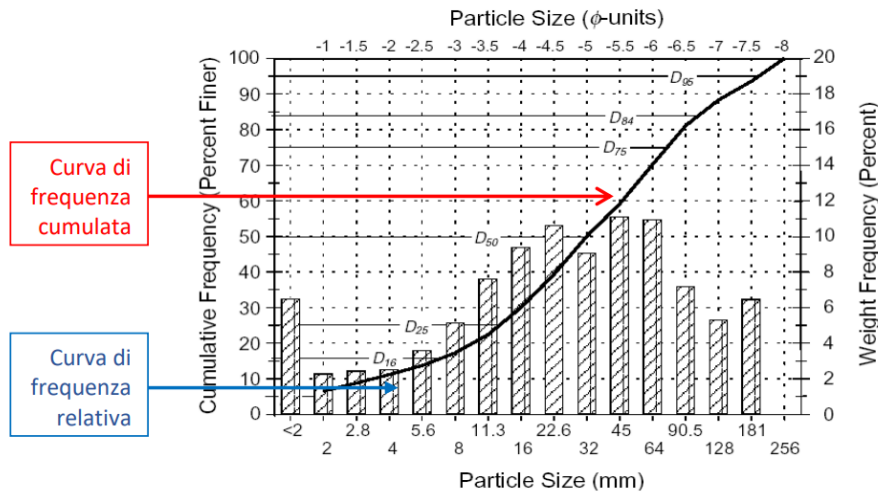


Figura 33. Curve di frequenza cumulata e relativa

La curva di frequenza relativa (f) è solitamente una gaussiana, da cui è possibile ricavare il diametro medio e modale (in alcuni casi si può avere anche più di un valore modale); a livello matematico è la derivata della curva di frequenza cumulata e la si può calcolare valutando in quale percentuale il campione contiene valori che ricadono in ciascuna classe.

La curva di frequenza cumulata è di conseguenza calcolata come l'integrale della precedente, è di tipo crescente e con valore massimo pari a 100 e un punto di flesso in corrispondenza dei valori modal di f (Faggin 2018).

I percentili diametrici sono di norma calcolati secondo l'equazione 39.

$$\phi_x = \phi_{inf} + \frac{\phi_{sup} - \phi_{inf}}{F_{sup} - F_{inf}} \cdot (F_x - F_{inf}) \quad (39)$$

La ϕ_x è l'indice relativo al percentile da calcolare (F_x), mentre ϕ_{inf} (phi inferiore) e ϕ_{sup} (phi superiore) sono gli estremi di classe, mentre F_{sup} e F_{inf} le relative classi di frequenza cumulata.

Solo dopo aver calcolato l'indice phi si calcola il diametro in millimetri come in (40).

$$D = 2^{\phi_x} \quad (40)$$

3.4.2.3 Parametri delle distribuzioni

In virtù della variabilità granulometrica che caratterizza i torrenti, sono stati messi a punto dei parametri che studiano la distribuzione campionaria dei sedimenti raccolti in campo. I suddetti parametri sono:

- tendenza centrale (media, moda e mediana). Questi tre valori coincidono se si ha una gaussiana perfetta (curva simmetrica);
- ampiezza della distribuzione (deviazione standard, indici di gradazione e modulo di uniformità);
- simmetria rispetto alla coda;
- appiattimento della curva (ma è poco usato).

Diametro medio

La tendenza centrale (o diametro medio) viene calcolata come una media ponderata a partire dall'indice ϕ (equazione 41).

$$\phi_m = \frac{\sum f_i \cdot \phi_i}{100} \quad (41)$$

Noto l'indice ϕ si calcola il diametro medio espresso in millimetri, come scritto in equazione 42.

$$D_m = 2^{-\phi_m} \quad (42)$$

Solitamente nei corsi d'acqua montani il diametro medio è maggiore del D_{50} , per via dell'asimmetria della curva di frequenza relativa, verso i sedimenti più grossolani (Faggin 2018).

Moda

La moda rappresenta il picco della curva di frequenza relativa e per tanto si possono avere distribuzioni unimodali (un solo valore modale), bimodali (due valori modal) o plurimodali (più valori modal).

Mediana

La mediana è il centro della distribuzione cumulata e divide questa curva in due aree equivalenti, tali da poter individuare il diametro percentile che corrisponde al 50% (o D_{50}).

Il parametro che si unisce alla mediana è il modulo di Kramer, che è dato dal rapporto tra le due aree divise dal D_{50} (area inferiore e area superiore); esso è più preciso del precedente perché valuta integralmente la curva di frequenza cumulata (figura 34) (Lenzi 2016).

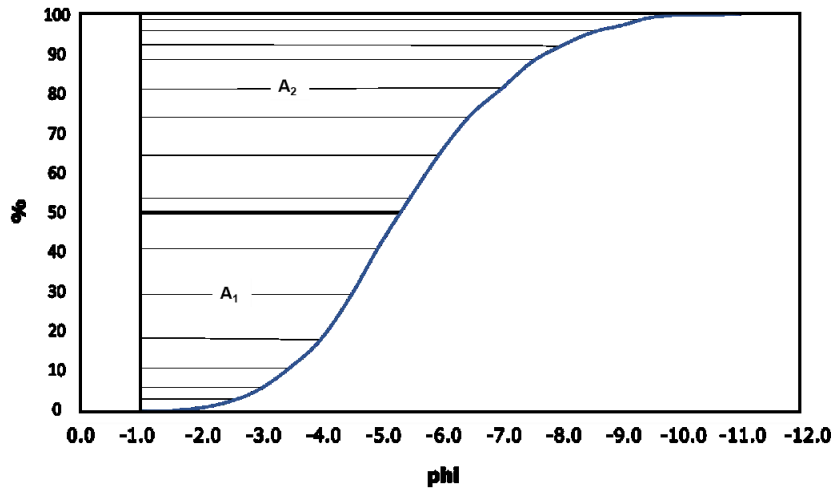


Figura 34. Modulo di uniformità, Kramer

Il primo dei parametri relativi all'ampiezza della distribuzione è la deviazione standard (σ), ovvero esprime un valore numerico che indica di quanto i valori si discostano dal diametro medio. In equazione 43 si mostra il rapporto tra il D_{84} (sedimenti grossolani) e il D_{16} (prossimo ai sedimenti fini) e sotto radice quadrata.

$$\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (43)$$

La stessa deviazione standard può essere espressa anche a livello grafico (figura 35) con in ascissa il diametro dei sedimenti e in ordinata la frequenza cumulata.

Se si ha una curva di frequenza cumulata simmetrica, invece di calcolare la sola deviazione standard è più opportuno ricorrere all'indice di gradazione (G) come in equazione 44.

$$G = \frac{\frac{D_{84} + D_{50}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}}}{2} \quad (44)$$

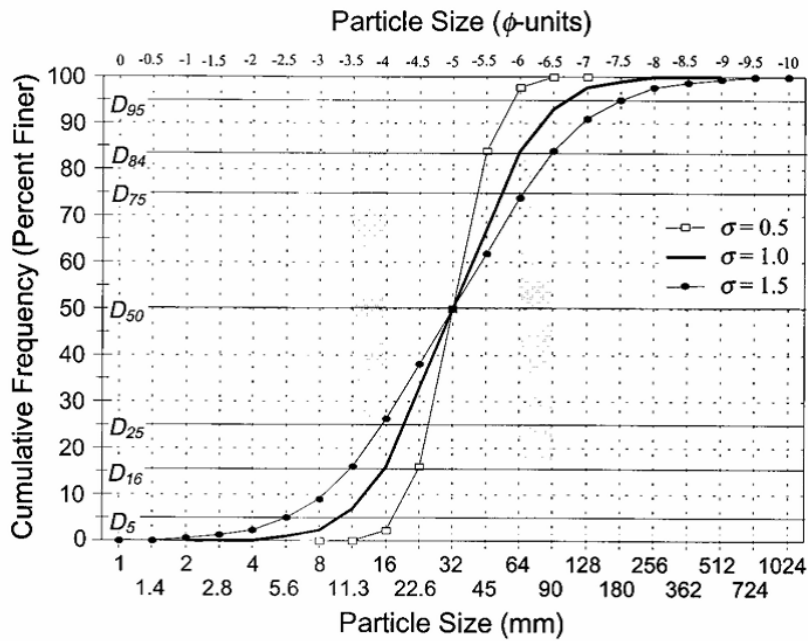


Figura 35. Deviazione standard

Infine, il coefficiente di classazione (equazione 45) descrive il grado di variabilità medio dei clasti, se questo porge valori bassi, significa che si ha un elevato grado di classazione ovvero curva uniforme con sedimento omogeneo e viceversa per valori elevati (Folk e Ward, 1957).

$$s = \left| \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} \right| + \left| \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \right| \quad (45)$$

In tabella 8 si riportano i valori soglia che lo descrivono.

Tabella 8. Coefficiente di classazione

| Coefficiente di classazione | Grado di classazione |
|-----------------------------|-----------------------|
| >4 | Estremamente basso |
| 2-4 | Molto basso |
| 1-2 | Basso |
| 0.71-1 | Moderato |
| 0.50-0.71 | Moderatamente elevato |
| 0.35-0.50 | Elevato |
| <0.35 | Molto elevato |

L'ultimo parametro che si prende in considerazione è il grado di asimmetria (Folk and Ward, 1957), calcolato nella (46).

$$sk = \left| \frac{\phi_{84} - \phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{16}} \right| + \left| \frac{\phi_{50} - \phi_5}{\phi_{95} - \phi_5} \right| \quad (46)$$

Dal momento in cui le curve dei sedimenti fluviali tendono spesso ad essere log-normali, cioè con una forte asimmetria verso la parte grossolana, si adotta l'indice ϕ per avere una sua distribuzione di tipo gaussiano; nonostante ciò, preserveranno sempre un certo grado di asimmetria secondo anche quanto riportato in tabella 9.

Tabella 9. Coefficienti di asimmetria

| Coefficiente di asimmetria | Descrizione |
|----------------------------|---------------------------------------|
| -0.3 a -1 | Molto asimmetrica verso il fine |
| -0.1 a -0.3 | Asimmetria verso il fine |
| -0.1 a 0.1 | Quasi simmetrica |
| 0.1 a 0.3 | Asimmetrica verso il grossolano |
| 0.3 a 1 | Molto asimmetrica verso il grossolano |

3.4.3 Sezioni del torrente Rudan nel post evento

L'evento di debris flow che si è verificato nel bacino del rio Rudan il 29 agosto 2020 ha portato a un'incisione dell'alveo e una conseguente erosione spondale, con tratti subverticali.

Per poter ricostruire l'evento si sono rilevate quattro sezioni trasversali utilizzando un distanziometro e una palina, disponendo così di una distanza orizzontale e di una distanza verticale che dovrà essere corretta per l'altezza strumentale.

In generale, ogni sezione trasversale viene rappresentata come l'andamento poligonale che si ottiene collegando i punti di quota con la distanza misurata, al fine di poterne rappresentare il contorno ed il relativo tirante idraulico (Ferro 2006).

Ciascuna sezione riporta anche due dati d'interesse idraulico molto importanti: la destra e la sinistra idrografica, giacché ognuna di queste è stata rilevata nel verso del moto e cioè da monte verso valle (Ferro 2006).

È opportuno conoscere anche il profilo longitudinale per poter calcolare la pendenza di ciascun tratto d'alveo in corrispondenza di ciascuna sezione trasversale.

Nota la pendenza, il tirante idraulico, la larghezza dell'alveo e l'area delle sezioni si può calcolare la velocità e la portata al picco con i metodi empirici definiti in letteratura.

3.5 La modellazione idrologica

La modellazione idrologica riproduce in forma semplificata un evento reale, infatti in questo lavoro è utile ai fini della *back-analysis* del debris flow verificatosi il 29 agosto 2020, nel bacino idrografico del rio Rudan.

In questo caso specifico, la modellazione idrologica verte sull'applicazione del metodo SCS CN (paragrafo 3.5.1), che è un dato di input da inserire in FLO-2D (paragrafo 3.5.3), ovvero un software che permette di eseguire simulazioni sia idrologiche e sia idrauliche.

3.5.1 Il metodo SCS CN

Il metodo SCS (*Soil Conservation Service*, 1972) è uno dei metodi più diffusi per valutare la propensione a generare deflusso superficiale di un terreno, attraverso l'utilizzo del parametro CN (*Curve Number*) che è un valore ponderato sull'intero bacino idrografico ed è influenzato dai valori di AMC, dei gruppi idrologici e l'uso del suolo (D'Agostino 2009).

Si utilizza questa metodologia per ottenere il deflusso diretto (pioggia efficace) e da questo sia il picco di piena e sia l'idrogramma liquido riferito a un dato evento (Borga 2014).

Questo metodo assume che il volume specifico di deflusso superficiale (P_e) sia proporzionale alla precipitazione lorda (P), depurata dall'assorbimento iniziale (I_a), secondo il rapporto tra il volume specifico di acqua che riesce a infiltrarsi al suolo (F) e di saturazione del terreno (S) (Borga 2014).

Nell'equazione 47 si riportano tutti questi fattori che sono dati in millimetri.

$$P_e = (P - I_a) \cdot \frac{F}{S} \quad (47)$$

Si sostituisce a F l'espressione ottenuta dall'equazione di continuità (48), si ottiene la pioggia efficace (P_e) generatrice di deflusso superficiale (49).

$$F = P_e - I_a - P \quad (48)$$

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (49)$$

In tutte e tre le equazioni che sono state riportate qui sopra ricorre il fattore dell'*initial abstraction* (I_a), ovvero in ambiente alpino bisogna tener conto della quantità di pioggia intercettata dalla vegetazione e sulla base delle osservazioni di campo sono stimate al 20% di S .

Infine, il volume specifico di saturazione del suolo (S) dipende dalla natura del terreno e dall'uso del suolo, rappresentati dal *Curve Number* (CN) secondo l'equazione (50) che ne restituisce il valore in millimetri:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (50)$$

Ai fini di questo lavoro è importante determinare con esattezza il parametro CN, così come definito e spiegato al paragrafo successivo.

3.5.1.1 Il *Curve Number* (CN)

Il *Curve Number* (CN) è un parametro adimensionale che può assumere valori compresi tra 0 e 100 e rappresenta l'attitudine di un bacino idrografico a produrre deflusso superficiale e si stima, sulla base di valori tabellari (Ferro 2006).

I valori di CN sono compresi tra 0 (zero) e 100; teoricamente si ha un valore di CN=0 quando tutta la precipitazione caduta al suolo si infila, al contrario un valore di CN=100 esprime un suolo impermeabile che genera deflusso superficiale.

Il CN può essere calcolato con l'impiego dei GIS, mettendo in relazione l'uso del suolo con i gruppi idrologici, entrambi reperibili dal Geoportale della Regione Veneto.

I gruppi idrologici sono raggruppati in quattro classi e come riportato in tabella 10 si può notare che progredendo dal gruppo 1 al gruppo 4, si riscontra un peggioramento delle caratteristiche idrologiche.

Tabella 10. Gruppi idrologici

| Gruppo idrologico | Descrizione |
|-------------------|--|
| 1 (A) | Suoli con bassissima capacità di scorrimento superficiale e con un elevato tasso d'infiltrazione anche quando sono completamente bagnati. Suoli con presenza cospicua di sabbie e ghiaie (detriti di falda, coperture alluvionali incoerenti) |
| 2 (B) | Suoli con un tasso d'infiltrazione moderato, ma hanno un buon drenaggio. Suoli di un certo spessore con presenza di terreni a grana fine. |
| 3 (C) | Suoli con un tasso d'infiltrazione basso e uno strato che impedisce il movimento discendente dell'acqua oppure suolo con abbondanza di tessiture fini. |
| 4 (D) | Suoli con un tasso d'infiltrazione bassissimo, se bagnati. Suoli argillosi, con falda alta e di spessore modesto su strati impermeabili. |

Cazorzi (1992) ha adattato i valori di CN per i bacini idrografici dell'ambiente alpino e che si trovano in condizioni intermedie di umidità ovvero con CN (II).

Una volta noto il CN (II), a livello cautelativo si dovrà calcolare il CN (III) perché considera il suolo in condizioni di saturazione (equazione 51).

$$CN (III) = \frac{23 CN(II)}{10 + 0,13 CN(II)} \quad (51)$$

In tabella 11 si riporta la classificazione afferente alla destinazione d'uso del suolo definita dallo stesso Cazorzi (1992) e che è stata utilizzata per il bacino del torrente Rudan.

Tabella 11. Destinazione d'uso del suolo e relativi valori di CN

| Uso del suolo Tipologia | Gruppi idrologici | | | |
|----------------------------|-------------------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Prato di alta quota | 37 | 50 | 68 | 75 |
| Ghiaione | 20 | 22 | 24 | 26 |
| Alveo fluviale | 23 | 25 | 28 | 32 |
| Roccia nuda | 80 | 87 | 93 | 96 |
| Rupe vegetata | 40 | 50 | 65 | 75 |
| Fustaia densa | 21 | 31 | 45 | 53 |
| Fustaia rada | 29 | 38 | 54 | 61 |
| Prato vallivo | 41 | 47 | 65 | 76 |

| | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|
| Urbano | 92 | 94 | 96 | 98 |
| Arbusteto | 38 | 45 | 60 | 70 |
| Prato arborato | 35 | 43 | 60 | 72 |
| Superfici d'acqua | 99 | 99 | 99 | 99 |

3.5.2 Il coefficiente di scabrezza di Manning

Il coefficiente di scabrezza di Manning (n) è comunemente usato per rappresentare la rugosità superficiale perché ne condiziona il deflusso idrico. In pratica si tratta di un coefficiente tabulato che viene assegnato per ciascuna classe di uso del suolo. In tabella 12 si riportano i coefficienti di Manning principalmente elaborati per il Trentino, però rispecchiano in modo veritiero le tipiche categorie di uso del suolo dei bacini alpini, come nel caso del bacino idrografico del rio Rudan.

Tabella 12. Coefficienti e scabrezza di Manning

| ID | Tipologia | n | Ks |
|----|--|-------|-------|
| 1 | Fustaia densa di conifere | 0,150 | 6,67 |
| 2 | Fustaia rada di conifere | 0,100 | 10,00 |
| 3 | Bosco di latifoglie | 0,125 | 8,00 |
| 4 | Ceduo scadente | 0,125 | 8,00 |
| 5 | Lariceti, cembrete e larici-cembrete | 0,100 | 10,00 |
| 6 | Pinete di Pino silvestre e/o Pino nero | 0,125 | 8,00 |
| 7 | Pascoli nudi o arborati (0.04 o 0.08) | 0,080 | 12,50 |
| 8 | Prati e colture agrarie | 0,040 | 25,00 |
| 9 | Rupi boscate | 0,100 | 10,00 |
| 10 | Arbusteti e mughete | 0,100 | 10,00 |
| 11 | Improduttivo nudo | 0,055 | 18,18 |
| 12 | Aree urbanizzate | 0,035 | 28,57 |
| 13 | Piste da sci | 0,040 | 25,00 |
| 14 | Laghi e corsi d'acqua | 0,050 | 20,00 |
| 15 | Paludi e zone umide | 0,040 | 25,00 |
| 16 | Ghiacciai | 0,030 | 33,33 |

3.5.3 FLO-2D

FLO-2D è il modello impiegato per le simulazioni idrologiche e idrauliche di questo lavoro. Il primo step è stato quello di ricavare la portata liquida e l'idrogramma di piena, per poi proseguire con le simulazioni idrauliche atte a ricostruire la dinamica dell'evento di debris flow che ha avuto luogo nel bacino idrografico del rio Rudan. In figura 36 si riporta l'interfaccia grafica del modello FLO-2D, versione 2009, che è stato impiegato in questo lavoro di tesi.

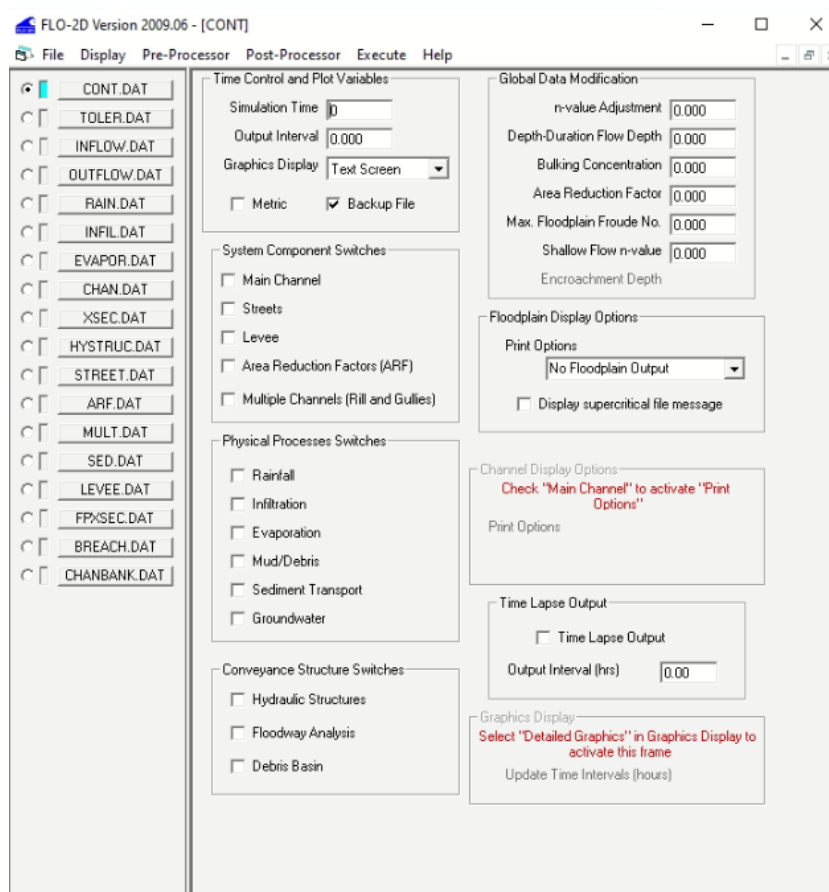


Figura 36. Interfaccia grafica di FLO-2D

3.5.3.1 La simulazione idrologica

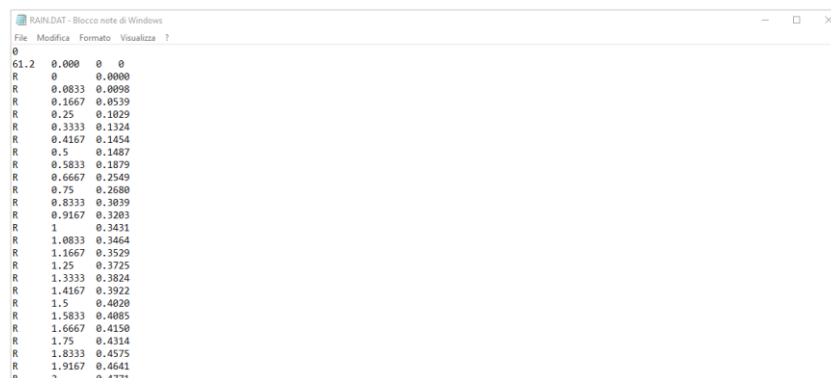
Tale modello si basa sul principio di conservazione del volume, andando a simulare i deflussi superficiali non confinati, partendo dai dati del DTM (modello digitale del terreno) dell'area oggetto di studio.

Dai dati di pioggia (*rainfall*), questo software applica l'equazione completa del moto di un'onda dinamica ed uno schema basato sulle differenze finite con otto potenziali direzioni di flusso e andando a simulare un'inondazione su una

topografia che ha una data scabrezza. La scabrezza deriva dall'elaborazione della mappa dell'uso del suolo che consiste nell'attribuire a ciascuna categoria il relativo coefficiente "n di Manning".

Di seguito si riportano i dati di input che sono stati elaborati in pre-processor dal GDS (*Grid Developer System*) di FLO-2D.

1. DTM del bacino del rio Rudan, con risoluzione 10m x10m in formato "ASCII" e contenente i dati di elevazione del terreno, sul quale poi si va a creare una griglia di calcolo in base alle dimensioni delle celle (in questo caso si imposta un valore pari a 10) e prestando attenzione al posizionamento della griglia, che dev'essere perfettamente centrata.
2. Gli shapefile creati in QGIS, ovvero:
 - 2.1 l'uso del suolo dell'intero bacino idrografico e la relativa scabrezza che è definita dal coefficiente "n di Manning";
 - 2.2 i valori di CN (III) atti a valutare la propensione del bacino a generare deflusso superficiale;
 - 2.3 sezioni significative atte a stimare la portata liquida.
3. I dati di pioggia all'interno di un formato di testo (.txt) intitolato "RAIN.DAT" ed impostato in righe e colonne, come riportato in figura 37. Nello specifico la seconda riga della prima colonna riporta il valore cumulato di pioggia, in questo caso i 61.2 mm del 29 agosto 2020 che hanno dato luogo al debris flow avvenuto nel bacino del rio Rudan; la seconda colonna riporta l'orario espresso in ore, mentre la terza colonna mostra la percentuale di pioggia cumulata per ciascun intervallo orario.



| Valore cumulato di pioggia (mm) | Orario (ore) | Percentuale di pioggia cumulata |
|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| 61.2 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.0000 |
| 0.0833 | 0 | 0.0098 |
| 0.1667 | 0 | 0.0539 |
| 0.25 | 0 | 0.1029 |
| 0.3333 | 0 | 0.1324 |
| 0.4167 | 0 | 0.1454 |
| 0.5 | 0 | 0.1487 |
| 0.5833 | 0 | 0.1879 |
| 0.6667 | 0 | 0.2549 |
| 0.75 | 0 | 0.2680 |
| 0.8333 | 0 | 0.3039 |
| 0.9167 | 0 | 0.3203 |
| 1 | 0 | 0.3451 |
| 1.0833 | 0 | 0.3464 |
| 1.1667 | 0 | 0.3529 |
| 1.25 | 0 | 0.3725 |
| 1.3333 | 0 | 0.3824 |
| 1.4167 | 0 | 0.3922 |
| 1.5 | 0 | 0.4020 |
| 1.5833 | 0 | 0.4085 |
| 1.6667 | 0 | 0.4150 |
| 1.75 | 0 | 0.4314 |
| 1.8333 | 0 | 0.4575 |
| 1.9167 | 0 | 0.4641 |
| 2 | 0 | 0.4771 |

Figura 37. Valori di Pioggia "RAIN.DAT"

Una volta importati tutti i layer di input si definisce la griglia di calcolo (detta GRID) tracciando un poligono semplificato attorno al bacino idrografico oggetto di analisi, come in figura 38; a questo punto comparirà una finestra per l'assegnazione della numerazione delle celle: quindi si sceglie la numerazione “*left to right, top to bottom*”. Infine, attraverso la funzione “*interpolate elevation points*” si esegue l'interpolazione dei punti quotati rispetto alla griglia di calcolo.

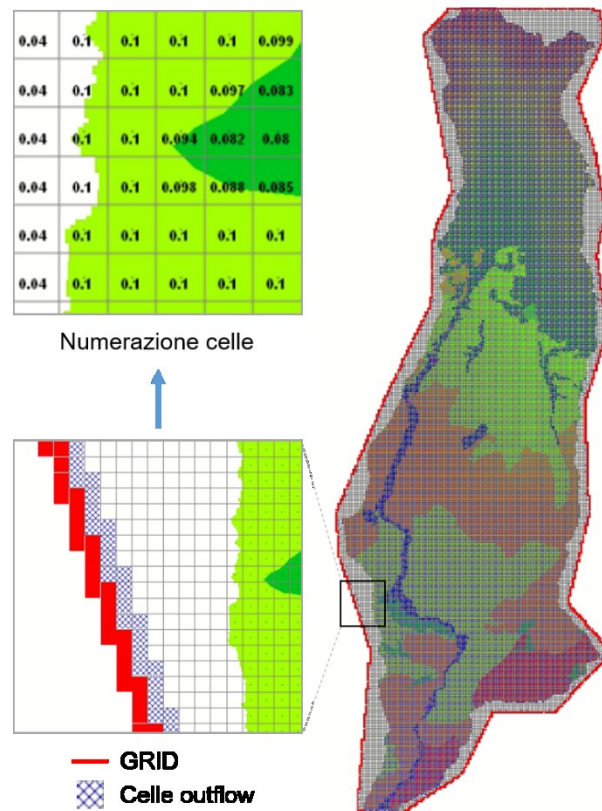


Figura 38. Griglia di calcolo e visualizzazione numerazione delle celle

Al momento del salvataggio, il software chiederà di impostare i parametri specifici della simulazione: la durata (7 ore nel caso specifico), l'intervallo orario (0.016), così come il numero di Froude limite (1.3) e tutti questi dati andranno a costituire il “CONT.DAT”.

Successivamente dal “TOLER.DAT” si è agito sulla “*surface detention*” attribuendo un valore di 0.001 mm, perché al momento dell'avvenimento della colata detritica il suolo era saturo d'acqua.

In figura 39, si riporta in modo schematico e concettuale i dati di input da inserire nell'interfaccia grafica di FLO-2D e indispensabili per poter eseguire la simulazione idrologica, così come gli output che si ottengono dalla medesima.

Ogni qual volta che si esegue una simulazione, il software andrà a creare dei file di testo di output, tra cui si ha il "SUMMARY.OUT" dov'è riportato l'arco temporale della simulazione e il volume defluito sull'intero bacino idrografico.

Il primo e importante approccio ai dati di output sta nel verificare la conservazione del volume, così da valutare l'accuratezza del modello.

I volumi di afflusso-deflusso vengono sommate alla fine di ogni *timestep* e inoltre si riporta anche la variazione di acqua immagazzinata, persa per infiltrazione o evaporazione.

Un altro dato di output molto importante è il file "CROSSQ" in quanto riporta i valori di portata per ogni *timestep* transitati per ciascuna cella canale che interseca le sezioni importate nel modello.

Mediante la funzione "mapper" (figura 39) si ottengono delle mappe in formato shape-file ed esportabili nei software GIS, ad esempio le quote topografiche, il tirante idrico e le velocità del flusso liquido.

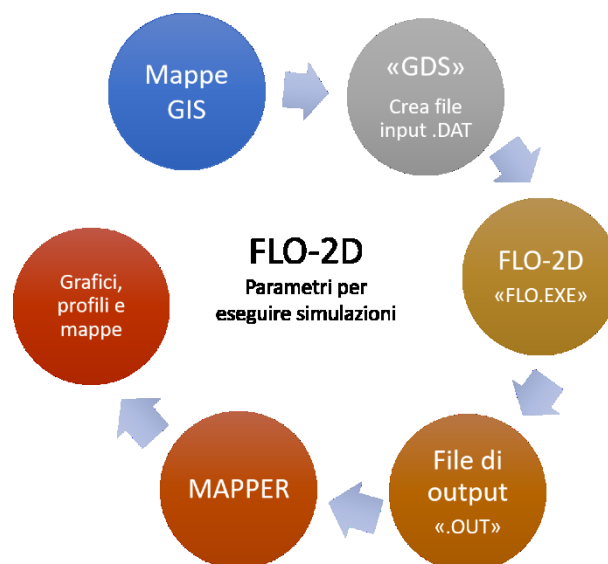


Figura 39. Modello concettuale per la simulazione idrologica

Dai dati della simulazione idrologica si ottiene un idrogramma liquido, necessario per poter applicare il metodo volumetrico al fine poi di ottenere il debrisgramma della colata detritica.

Il debrisgramma rappresenterà un nuovo dato di input per poter proseguire con la simulazione idraulica in FLO-2D.

3.5.3.2 La simulazione idraulica

La simulazione idraulica, similmente a quanto visto per la simulazione idrologica, rispecchia il modello concettuale rappresentato in figura 39.

Per la ricostruzione dell'evento di debris flow si prendono in considerazione due scenari di lavoro: il primo tiene conto dell'effetto della briglia filtrante, mentre il secondo è atto a valutare l'eventuale occlusione dei filtri e in questo modo la briglia si comporta come un'opera tradizionale e a gaveta trapezia.

I dati di input da inserire nel modello sono gli stessi della simulazione idrologica, eccetto il DTM che verrà sostituito con uno a risoluzione maggiore (1x1 m), però dal momento in cui si è visto che non era rappresentata la briglia filtrante, si è dovuto elaborarlo utilizzando il plugin "Serval" di QGIS, ottenendo così una sorta di terrapieno (vedasi la sezione riportata in figura 40).

Allo stesso modo in figura 40 si mostra l'area di pertinenza (piana di calcolo) su cui è stata eseguita la ricostruzione idraulica: inizia a 800 m dalla sezione di chiusura del bacino idrografico, attraversa la Strada Statale n. 51 Alemagna e poi si conclude dopo il centro abitato di Peaio.

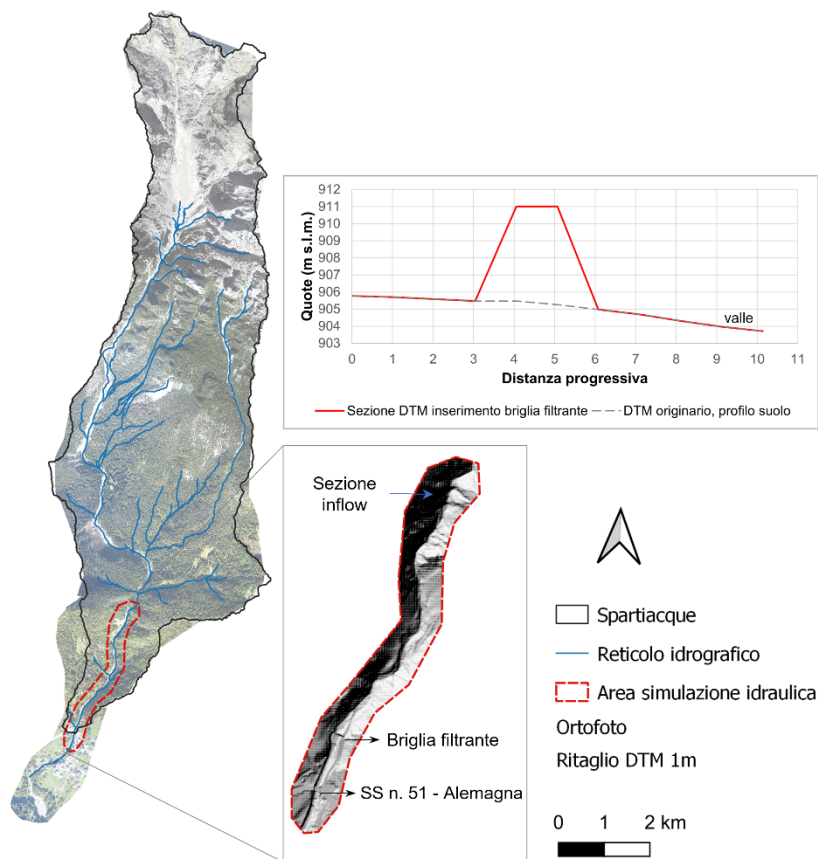


Figura 40. Area della simulazione idraulica

Un altro dato di input, si concretizza nel file intitolato “INFLOW.DAT” il quale è organizzato in righe e colonne, come mostrato in figura 41. La prima colonna riporta il tempo della simulazione, la seconda mostra la portata totale (data dalla somma delle portate liquida e solida) rispetto al numero di celle di *inflow* e infine, sulla terza colonna si ha la concentrazione volumetrica.

| Time | Total Discharge | Concentration |
|------|-----------------|---------------|
| 0 | 0 | 8383 |
| F | 0 | 0.0 |
| H | 0.0 | 0.0 |
| H | 0.02 | 0.29 |
| H | 0.03 | 2.15 |
| H | 0.05 | 4.55 |
| H | 0.07 | 4.23 |
| H | 0.09 | 3.93 |
| H | 0.1 | 3.67 |
| H | 0.12 | 3.43 |
| H | 0.14 | 3.2 |
| H | 0.15 | 3.0 |
| H | 0.17 | 2.83 |
| H | 0.19 | 2.68 |
| H | 0.2 | 2.54 |
| H | 0.22 | 2.4 |
| H | 0.24 | 2.27 |
| H | 0.26 | 2.13 |
| H | 0.27 | 2.03 |
| H | 0.29 | 1.93 |
| H | 0.31 | 1.85 |
| H | 0.32 | 1.76 |
| H | 0.34 | 1.69 |
| H | 0.36 | 1.64 |
| H | 0.37 | 1.58 |
| H | 0.4 | 1.5 |

Figura 41. "INFLOW.DAT"

A questo punto si è in possesso di tutti i dati di input necessari a eseguire la simulazione idraulica.

Avendo sostituito un dato di input, è però di primaria importanza la creazione della nuova griglia di calcolo (GRID) e la definizione della sezione di *inflow* da cui far partire la simulazione, come mostrato in figura 42.

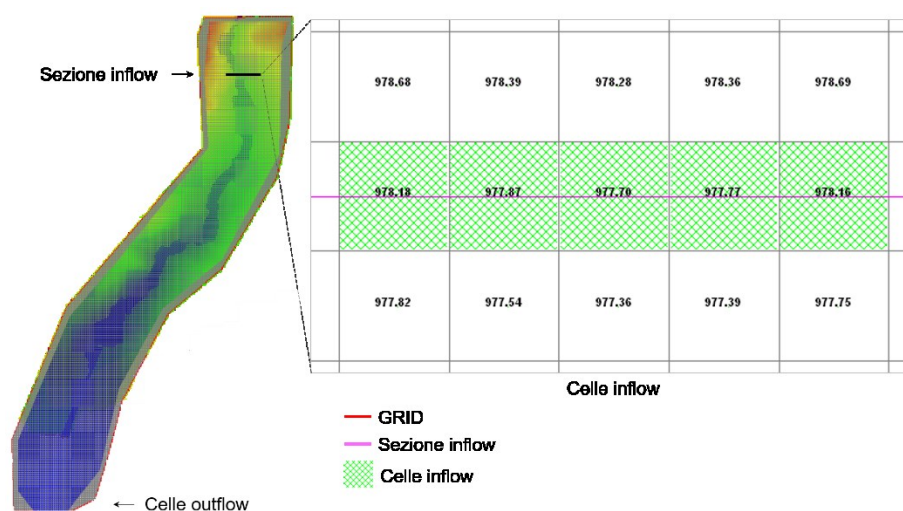


Figura 42. Griglia di calcolo (GRID) e INFLOW per la simulazione idraulica

In fase di salvataggio del progetto si devono impostare i principali parametri da assegnare al modello, ovvero la durata della simulazione (4 ore), l'intervallo orario (0.016), il numero di Froude (1.6) e infine bisogna attivare la voce "Mud/Debris". Successivamente, in FLO-2D si definisce la reologia della colata (scelta la tipologia "Aspen Pit 2") e in tabella 13 si riportano i coefficienti relativi alla viscosità e allo *yield stress*. Per quanto concerne la resistenza al flusso (del termine laminare nel modello reologico di FLO-2D) si attribuisce il valore di $k = 24$.

Tabella 13. Parametri reologici per la simulazione idraulica

| Reologia | Viscosità | | Yield stress | |
|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | Coefficiente | Esponente | Coefficiente | Esponente |
| Aspen Pit 2 | 0.0538 | 14.5 | 2.72 | 10.40 |

Risultati

4.1 Mappa dell'uso del suolo

La mappa dell'uso del suolo è stata reperita dal Geoportale della Regione Veneto, poi è stata elaborata e la si rappresenta in figura 43.

Dalla medesima si evince che la maggior parte della superficie del bacino è costituita da copertura forestale e ascrivibile alla zona mesalpica.

Nella parte superiore, da 3263 m s.l.m. fino a quota 2500 m s.l.m. ci sono rocce nude, poi scendendo attorno a quota 2000 m s.l.m. la formazione forestale tipica è la mugheta microterma e qui il limite del bosco è condizionato dalla morfologia, dalla povertà del suolo e dalla scarsità della risorsa idrica dovuta al substrato calcareo-dolomitico.

A partire da quota 1200 m s.l.m. la specie dominante è il Pino silvestre e in più questa parte del bacino idrografico è interessata da disturbi frequenti; infine, al di sotto di questa altitudine e cioè spostandosi nella parte bassa dello stesso bacino, si ha dominanza di abete rosso e faggio con ingresso del larice (Bertoldi 2014).

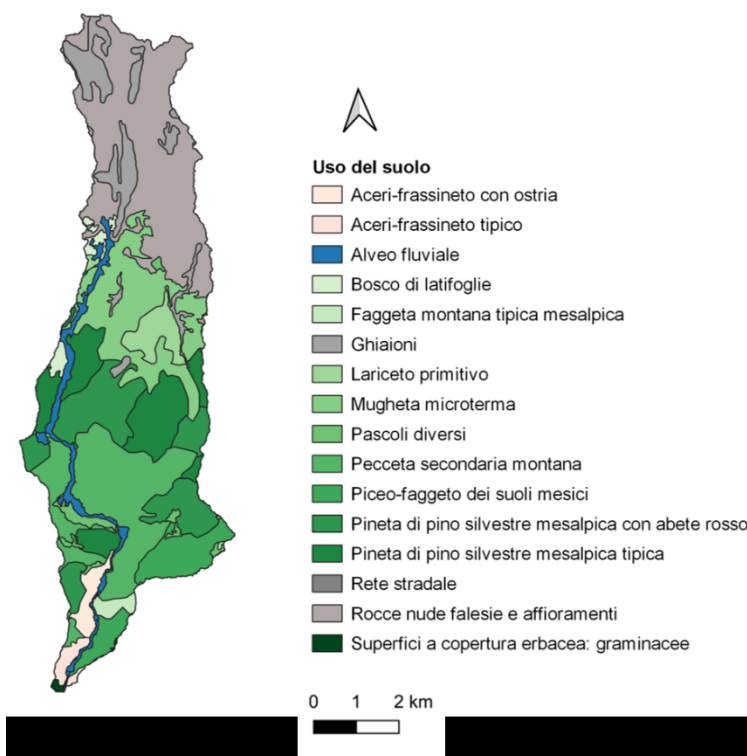


Figura 43. Mappa dell'uso del suolo

Sempre facendo riferimento a ciascuna categoria di uso del suolo è stato attribuito il relativo coefficiente “n di Manning” ($n=1/K_s$; dove K_s è la scabrezza idraulica secondo Strickler) che servirà per le simulazioni condotte con FLO-2D.

I coefficienti usati in questo lavoro sono quelli messi a punto per il Trentino e riportati in tabella 11 (nel capitolo materiali e metodi).

4.2 Mappa della litologia

La mappa della litologia con scala 1:250.000 è stata ottenuta dal Geoportale Veneto. L'ampia scala utilizzata per questa cartografia non permette di fornire indicazioni dettagliate sui gruppi litologici presenti sull'intero bacino, ma è comunque un valido strumento seppur questo fornisce delle indicazioni generali.

Dalla carta della litologia (figura 44) si nota che la zona di testata del bacino idrografico è costituita da pareti rocciose di dolomia con calcari dolomitici; mentre dal Vallon dell'Antelao (da quota 3248 m fino a quota 2000 m s.l.m.) fino alla forra rocciosa di “San Cassiano”, a quota 1600 m sono dominanti rocce marnose e tufacee.

Nella zona intermedia dello stesso bacino e cioè da quota 1600 m fino a quota 1400/1450 m, la mappa riporta la denominazione “depositi a granulometria variabile” e infatti il torrente Rudan scorre su depositi quaternari che, in specifiche condizioni, sono soggetti a processi alternati di erosione e sedimentazione.

Appena all'inizio di questo tratto, il torrente forma un'ansa in vicinanza dello spartiacque dove, per evitare fenomeni avulsivi durante eventi di piena, è stata realizzata una importante scogliera in massi.

Infine, nella parte bassa si hanno rocce vulcaniche di colorazione scura, rocce arenarie e depositi di granulometria varia fino alla sezione di chiusura (880 m).

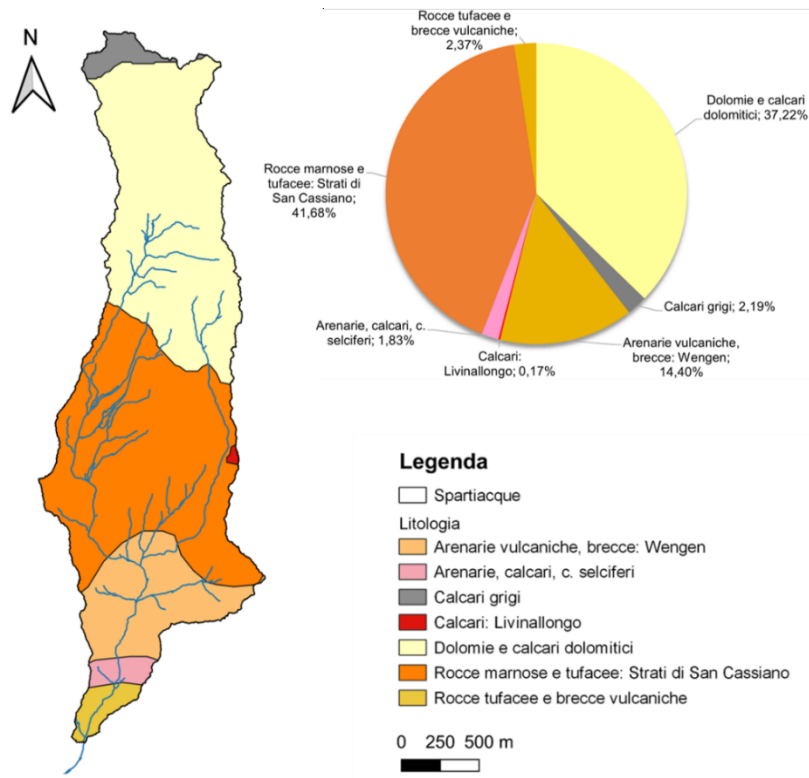


Figura 44. Mappa della litologia

4.3 Mappa del Curve Number (CN)

La mappa del CN mostrata in figura 45 è indispensabile ai fini della simulazione, in quanto mostra l'attitudine del bacino idrografico Rudan a produrre deflusso superficiale.

Essa è stata ottenuta intersecando l'uso del suolo, con i gruppi idrologici presenti nella mappa della litologia, per poi assegnare i valori di CN II e CN III (Cazorzi 1992) per ciascuna destinazione d'uso del suolo. Ai fini della simulazione, però, si terrà conto solo del valore di CN (III), perché è quello più cautelativo in quanto considera il suolo in condizioni di saturazione.

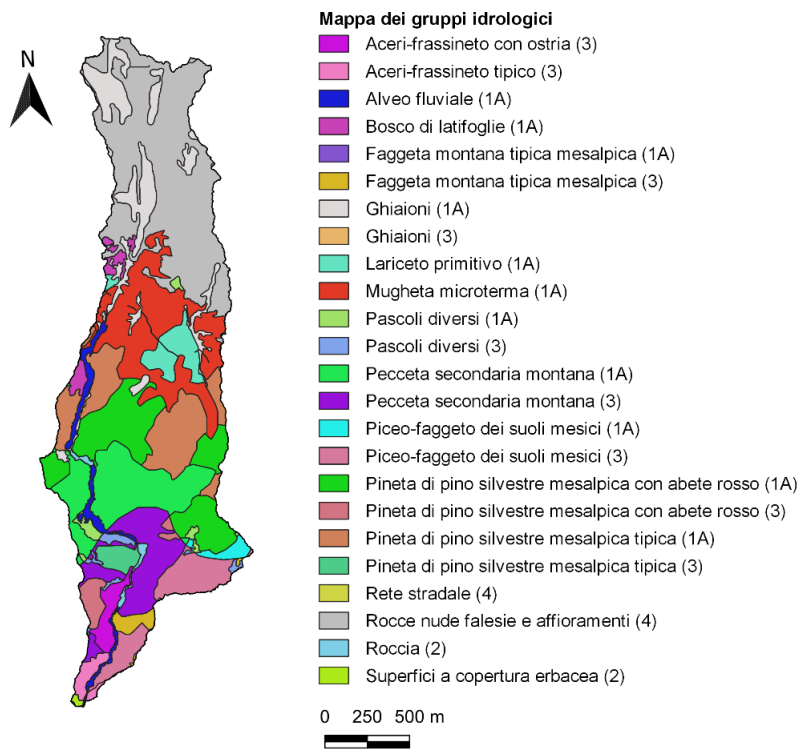


Figura 45. Mapa del CN

4.4 Risultati del monitoraggio del rio Rudan

Nei successivi paragrafi si descriverà il video che ha testimoniato l'evento di debris flow (paragrafo 4.4.1) e i risultati delle analisi pluviometriche (paragrafo 4.4.2).

4.4.1 Analisi del video che riprende la colata detritica

Così come già descritto nel capitolo 3 dei materiali e metodi, uno strumento di monitoraggio del torrente Rudan è la videocamera che è nei pressi della briglia. In figura 46 si riporta lo schema concettuale che evidenzia l'evoluzione della colata detritica e a fini esplicativi sono stati inseriti alcuni fotogrammi rappresentativi.

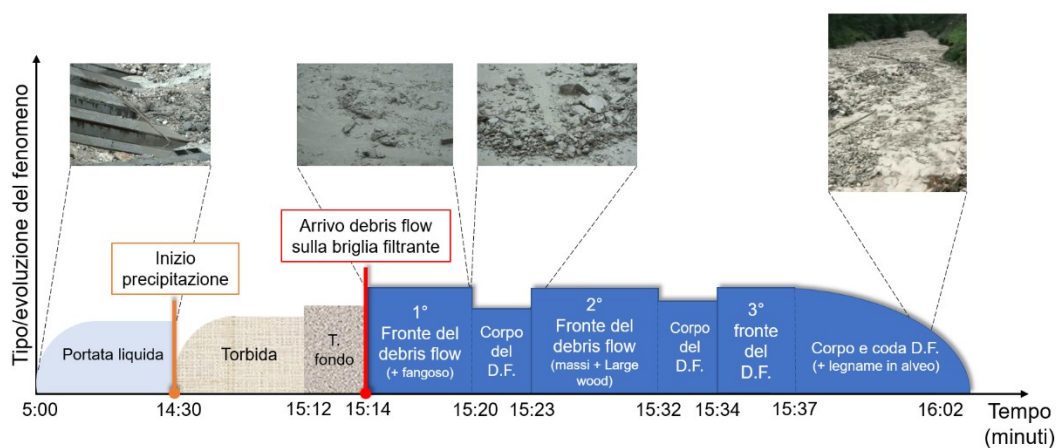


Figura 46. Analisi del video registrato dalla videocamera dell'ARPAV

4.4.2 Elaborazione dei dati pluviometrici

Si analizzano le precipitazioni dei giorni 28/31 agosto 2020 e dai dati acquisiti si comprende che entrambi i pluviometri, seppur essi siano collocati in due punti diversi del bacino, comunque riportano un quantitativo di pioggia molto simile (tabella 14).

I due giorni più piovosi sono stati il 29 e il 30 agosto, tuttavia nella giornata del 29 agosto si sono registrati circa 61 mm e una media di 55 mm nella giornata del 30 agosto.

Tabella 14. Precipitazioni 28-31 agosto 2020

| Data | Localizzazione del pluviometro | |
|------------|--------------------------------|-----------------|
| | Vallon dell'Antelao | Forra superiore |
| 28/08/2020 | 25,1 | 25,4 |
| 29/08/2020 | 61,5 | 61,8 |
| 30/08/2020 | 56,8 | 54,4 |
| 31/08/2020 | 29,0 | 29,0 |

Particolare importanza va attribuita alla giornata del 29 agosto, non solo per essere stato il giorno più piovoso, ma anche perché ha dato luogo all'evento di debris flow. In figura 47 si rappresenta l'istogramma con in ascissa gli intervalli temporali di un'ora, mentre nell'asse delle ordinate i valori di pioggia espressi in millimetri.

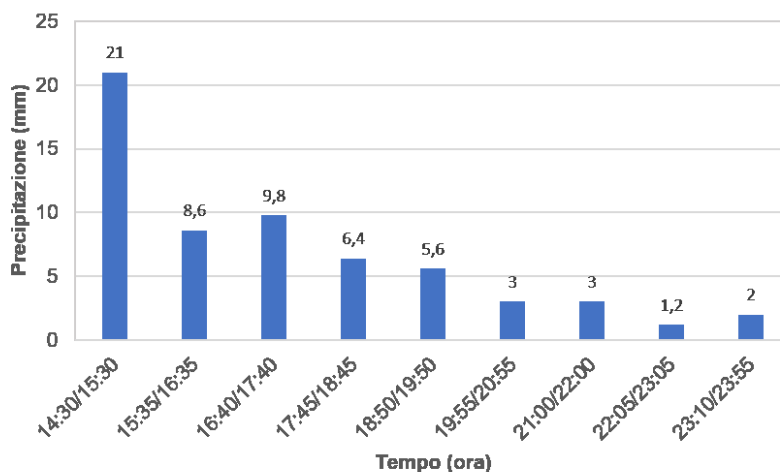


Figura 47. Piogge del 29 agosto 2020

Così come si può notare dal medesimo istogramma (figura 47), il picco di pioggia caduto al suolo in un'ora conta 21 mm, prima che l'evento precipitativo sia andato scemando.

Allo stesso modo, anche per la giornata del 30 agosto si ricostruisce l'istogramma con il trend di pioggia a intervalli orari (figura 48).

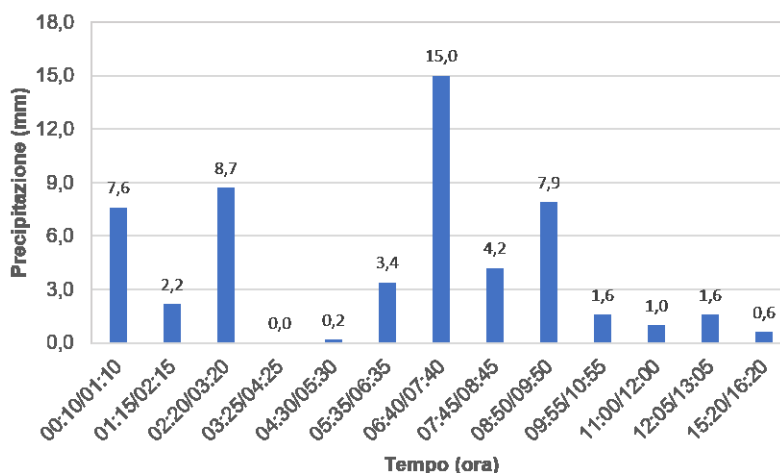


Figura 48. Pioggia del 30 agosto 2020

Come si evince in figura 48 si ha un picco di pioggia di 15 mm, che è sicuramente inferiore a quello del 29 agosto, però è altrettanto vero che è preceduto da due valori non trascurabili: di 7,6 mm e 8,7 mm, scesi al suolo in circa tre ore. Infatti, nell'arco di questa giornata si è verificato un trasporto di cernita.

4.5 Stima della severità dell'evento

Per determinare la severità pluviometrica dell'evento si è confrontato il picco di pioggia del 29 agosto 2020, con i massimi annuali registrati dalla stazione pluviografica dell'ARPAV a Faloria (Cortina D'Ampezzo, BL) che conta una serie storica di 32 anni: dal 1986 al 2018.

Nello specifico si sono elaborati i massimi annuali di pioggia avvenuti in 45 minuti e su un'ora, in modo da esprimerne il relativo tempo di ritorno.

A partire dai massimi annuali si è calcolato il valore medio e la deviazione standard, per poi applicare i parametri di distribuzione della elaborazione statistica di Gumbel.

Il tempo di ritorno è stato stimato in tre anni e questo denota che non si tratta di un evento eccezionale dal punto di vista pluviometrico, ma rientra nel range di frequenze di accadimento che sono tipiche dei debris flow. In tabella 15 si mette a confronto il dato ottenuto dall'elaborazione delle piogge intense, con quello del 29 agosto 2020 e tutti i valori sono espressi in millimetri.

Tabella 15. Stima della severità del debris flow

| TR (anni) | Pioggia su 45 minuti | | Pioggia su 1 ora | |
|-----------|----------------------|------------|------------------|------------|
| | Massimi annuali | 29/08/2020 | Massimi annuali | 29/08/2020 |
| 3 | 18,9 | 19 | 20,7 | 21 |

4.6 Risultati delle indagini di campo

Nei prossimi paragrafi si riportano i risultati delle analisi granulometriche, le sezioni e i profili che si sono rilevati nel post evento.

4.6.1 Elaborazione delle analisi granulometriche

In data 9 settembre 2020 si sono condotti due rilievi granulometrici.

Il primo rilievo è stato condotto nella parte medio bassa del bacino (analisi 1), poi dopo si è eseguito un secondo campionamento più a monte, ovvero a 150 m dalla briglia filtrante (analisi 2).

Particolare importanza va data però al primo rilievo granulometrico perché è quello riconducibile al materiale solido della colata detritica, rispetto al secondo rilievo che invece è riconducibile al trasporto di cernita che è avvenuto il giorno successivo e infatti si nota un materiale più fine.

4.6.1.1 Analisi granulometrica 1

La prima analisi granulometrica è stata effettuata nella parte bassa del bacino e precisamente 100 m a monte della briglia filtrante. In figura 49 si riporta il sito di campionamento da dove si sono misurati i clasti.

Dopo aver effettuato il rilievo in campo si sono calcolati i percentili diametrici (espressi in millimetri) e poi riportati in tabella 16, mentre le curve di frequenza cumulata e relativa sono rappresentate in figura 50.

Noti questi parametri di base, si è poi proceduto calcolando i parametri granulometrici relativi alla variazione rispetto alla media (classazione-gradazione).



Figura 49. Analisi granulometrica 1

Tabella 16. Percentili diametrici, rilievo 1

| Percentili | ϕ_x | D_x (mm) |
|------------------|----------|------------|
| D ₅ | -1,86 | 3,63 |
| D ₁₀ | -2,64 | 6,22 |
| D ₁₆ | -3,16 | 8,93 |
| D ₃₀ | -3,70 | 13,02 |
| D ₅₀ | -4,51 | 22,86 |
| D ₆₀ | -4,81 | 28,08 |
| D ₈₄ | -5,78 | 54,95 |
| D ₉₀ | -6,00 | 63,84 |
| D ₉₅ | -6,97 | 125,80 |
| D ₁₀₀ | -8,50 | 362,04 |
| D _m | -4,45 | 21,90 |

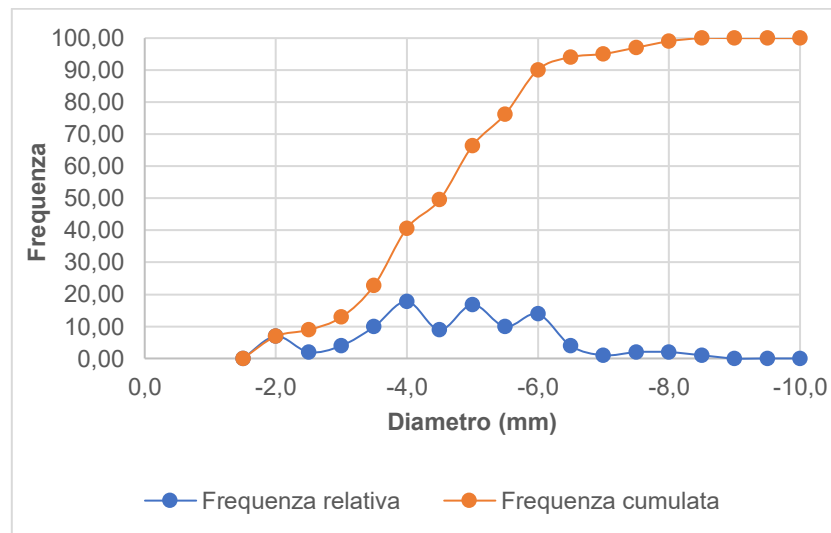


Figura 50. Curve di frequenza e cumulata (analisi granulometrica 1)

I parametri granulometrici del primo rilievo vengono riassunti in forma tabellare (17). La deviazione standard mostra una distribuzione eterogenea perché maggiore di 1,35 e in più si ha un basso grado di classazione (1,43).

Tabella 17. Parametri granulometrici, rilievo 1

| Parametro | | Valore |
|-------------------------------|----------|--------|
| Deviazione standard | σ | 1,35 |
| Indice di gradazione | G | 1,35 |
| Coefficiente di classazione | s | 1,43 |
| Modulo di uniformità (Kramer) | M | 0,15 |

Il modulo di uniformità di Kramer valuta integralmente la curva di frequenza cumulata (figura 51), porge un valore di 0,15 ed è dato dal rapporto tra le due aree divise dal percentile diametrico D_{50} .

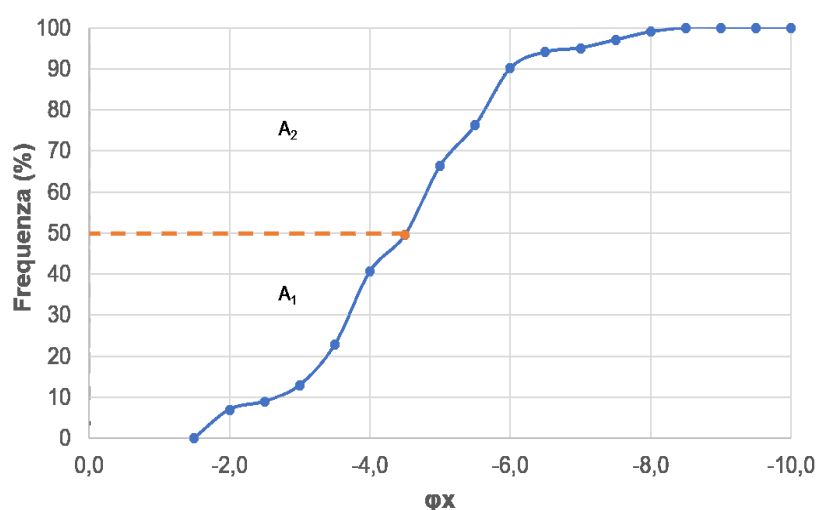


Figura 51. Modulo di uniformità di Kramer (analisi granulometrica 1)

4.6.1.2 Analisi granulometrica 2

Il secondo rilievo granulometrico è stato svolto 150 m a monte della briglia filtrante e in figura 52 si riporta il sito di campionamento.



Figura 52. Analisi granulometrica 2

Come si è fatto per il primo rilievo granulometrico si riportano i percentili diametrici (tabella 18) e le curve di frequenza cumulata e relativa (figura 53).

Tabella 18. Percentili diametrici, rilievo 2

| Percentili | ϕ_x | D_x (mm) |
|----------------------|--------------|---------------------------|
| D ₅ | -1,17 | 2,25 |
| D ₁₀ | -1,35 | 2,54 |
| D ₁₆ | -1,77 | 3,42 |
| D ₃₀ | -2,59 | 6,01 |
| D ₅₀ | -3,02 | 8,11 |
| D ₆₀ | -3,23 | 9,37 |
| D ₈₄ | -3,86 | 14,47 |
| D ₉₀ | -4,20 | 18,38 |
| D ₉₅ | -4,78 | 27,47 |
| D ₁₀₀ | -6,00 | 64,00 |
| D_m | -2,97 | 7,81 |

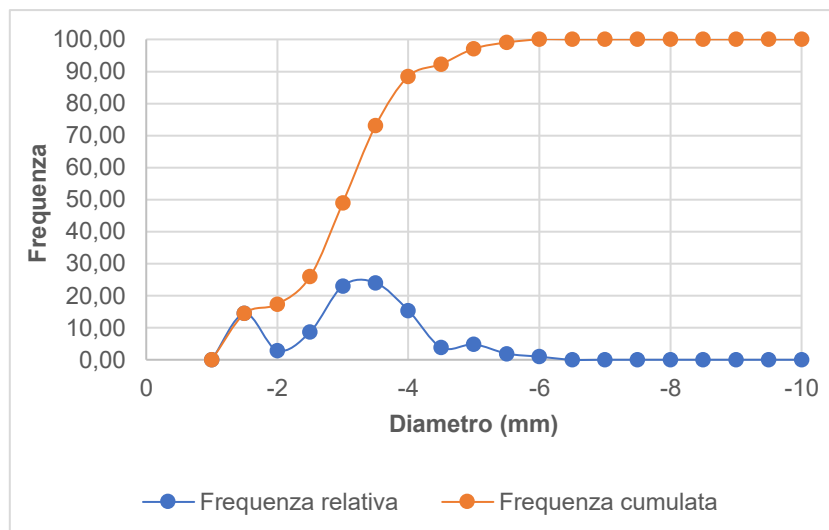


Figura 53. Curve di frequenza e cumulata (analisi granulometrica 2)

Dai parametri granulometrici del secondo rilievo emerge che si ha comunque una distribuzione eterogenea (deviazione standard >1,35), ma rispetto alla precedente analisi, i sedimenti hanno un minor grado di classazione (prossimo all'unità).

I medesimi parametri sono riassunti in tabella 19.

Tabella 19. Parametri granulometrici, rilievo 2

| Parametro | | Valore |
|-------------------------------|----------|--------|
| Deviazione standard | σ | 1,47 |
| Indice di gradazione | G | 1,49 |
| Coefficiente di classazione | s | 1,07 |
| Modulo di uniformità (Kramer) | M | 0,22 |

In particolar modo il modulo di uniformità di Kramer porge un valore di 0,22 che è ottenuto dal rapporto delle due aree divise dal percentile D₅₀ (figura 54).

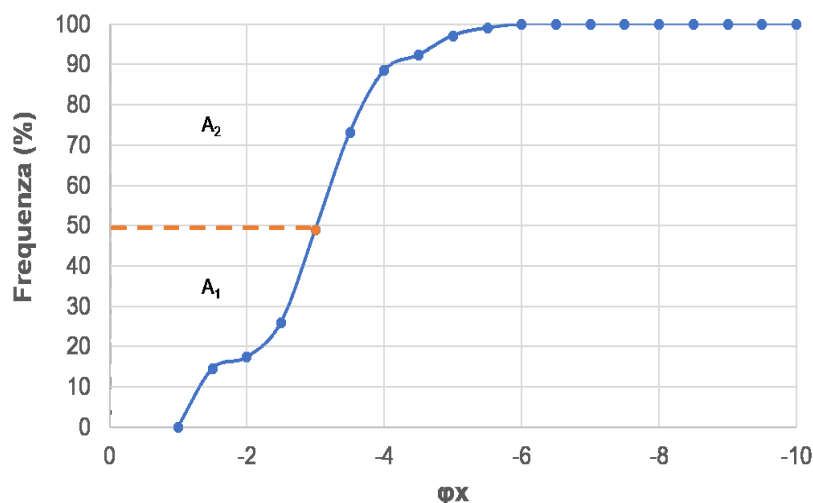


Figura 54. Modulo di uniformità di Kramer (analisi granulometrica 2)

4.6.2 Rilievo delle sezioni e tracciamento dei profili

Nella giornata del 9 settembre 2020 nella parte medio bassa del bacino idrografico si sono rilevate quattro sezioni trasversali al torrente mostrate in figura 55.

Le medesime sezioni sono tutte rappresentative del tratto di torrente ove si sono rilevate, eccetto la sezione 3 perché non permette di capire l'effettiva profondità del fondo del canale. A ciascuna sezione è stata poi affiancata una foto dell'area per una maggiore chiarezza.

I profili (riportati in figura 56) sono stati invece ottenuti utilizzando un DTM ad alta risoluzione (1x1 m) da cui si è ricavata la pendenza relativa al tratto a monte della sezione misurata.

È importante però menzionare il quarto profilo, perché presenta una pendenza maggiore rispetto agli altri (22,3°), infatti questo è dettato dalla morfologia a step-pool, pertanto, se si considera il tratto appena a monte o subito a valle si riscontra una pendenza di 10,2° del tutto simile a quella del profilo tre.

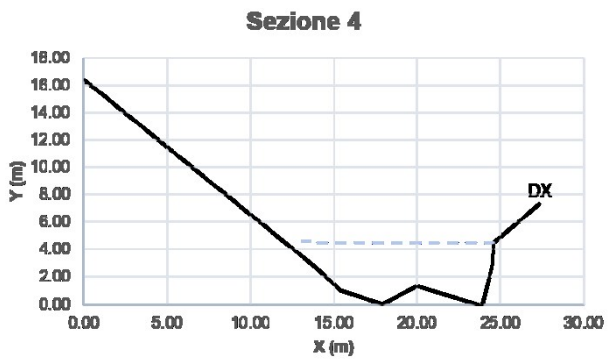
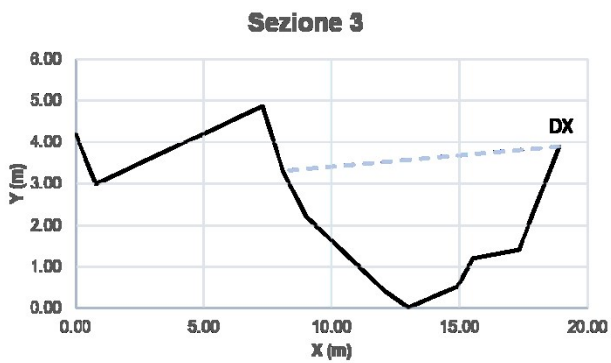
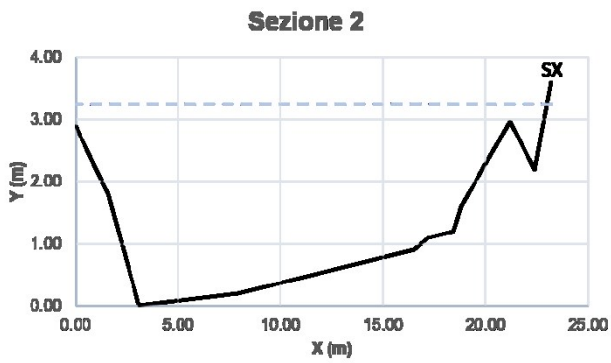
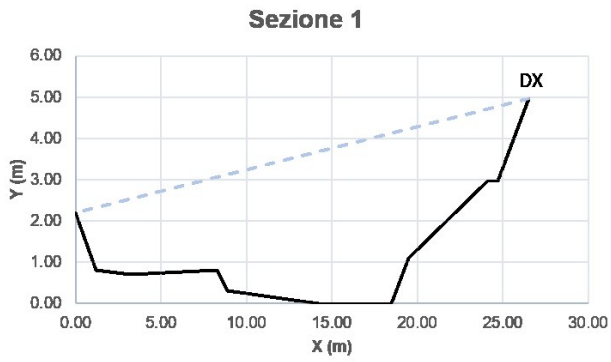


Figura 55. Sezioni del torrente Rudan, rilevate ne post evento

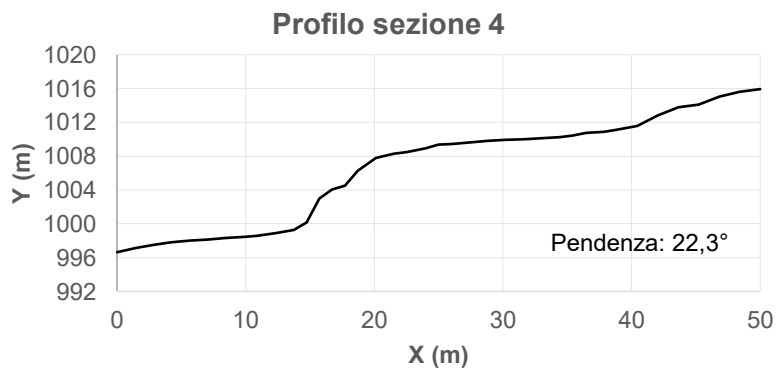
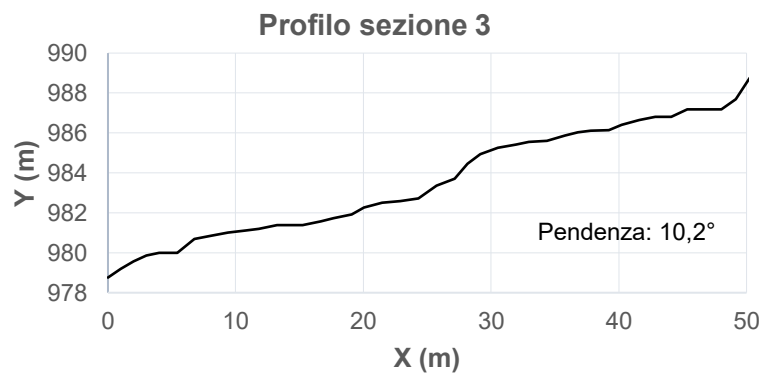
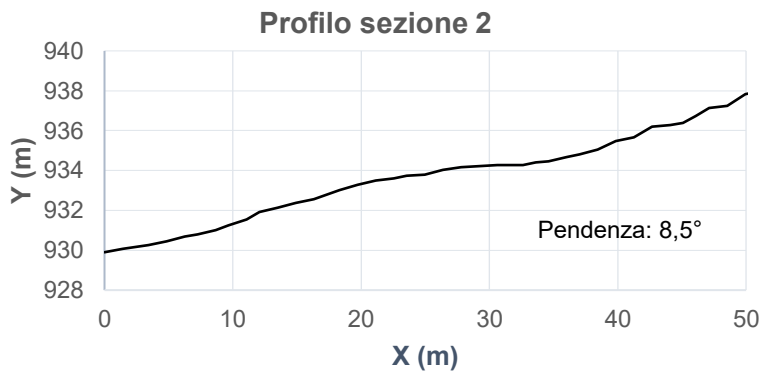
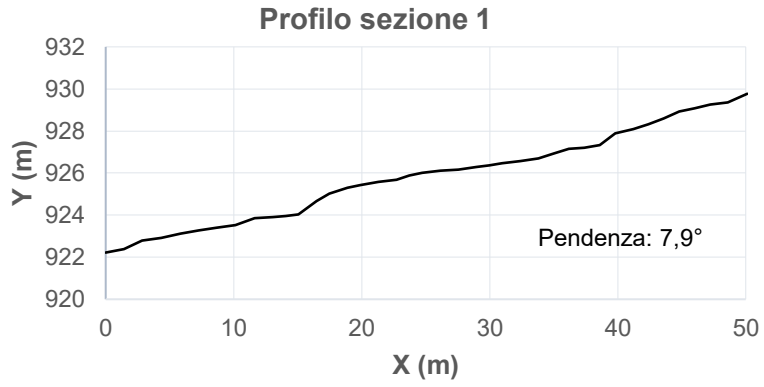


Figura 56. Profili del torrente Rudan

4.7 Stima della portata e del volume solido del debris flow

La portata al picco del fronte e il volume solido associato al debris flow avvenuto il 29 agosto 2020, sono stati stimati attraverso le formule empiriche (si veda paragrafo 4.7.1) e con il metodo volumetrico, a seguito della simulazione idrologica condotta con FLO-2D.

4.7.1 Applicazione delle formule empiriche

A partire dalle sezioni rappresentate in figura 55, si sono calcolati la larghezza dell'alveo (B), il contorno bagnato, il tirante medio, l'area e la pendenza (tratta dai profili). Tutti questi dati sono riassunti in tabella 20.

Invece, in tabella 21 si riportano le portate ottenute applicando le diverse formule empiriche presenti in letteratura, ovvero si vedano le equazioni 14, 15, 16, 17 e 19 (paragrafo 1.7.1).

Tabella 20. Parametri idraulici delle sezioni

| ID Sezione | B (m) | Contorno bagnato (m) | Tirante medio (m) | Area (m ²) | Pendenza (m m ⁻¹) | Pendenza (°) |
|------------|----------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 26,50 | 30,67 | 3,59 | 63,00 | 0,14 | 7,97 |
| 2 | 23,20 | 25,98 | 3,25 | 52,60 | 0,15 | 8,53 |
| 3 | 18,90 | 13,81 | 4,05 | 29,50 | 0,18 | 10,20 |
| 4 | 10,70 | 18,00 | 3,60 | 27,55 | 0,19 | 10,76 |

Tabella 21. Portate calcolate con le formule empiriche

| Q Manning (m ³ /s) | Q moto lam. adattato (m ³ /s) | Q moto turbolento (m ³ /s) | Q fluido dilatante (Bagnold, 1954) (m ³ /s) | Hungr et al. (1984) (m ³ /s) | Rickenmann (1999) (m ³ /s) |
|----------------------------------|--|---|--|---|---|
| 254 | 93 | 779 | 347 | 377 | 355 |
| 217 | 68 | 656 | 259 | 307 | 290 |
| 138 | 71 | 440 | 221 | 192 | 193 |
| 244 | 163 | 661 | 356 | 263 | 317 |
| 106 | 55 | 242 | 178 | 172 | 173 |

Dalle portate stimate, ne deriva, secondo le relazioni mostrate in tabella 3 (paragrafo 1.7.1), il volume solido calcolato secondo Bovis e Jacob (1999) e Mizuyama et al. (1992) come riportato in tabella 22.

Tabella 22. Volume solido calcolato con le formule empiriche

| Bovis e Jacob (1999) | Mizuyama et al. (1992) |
|-------------------------|---------------------------|
| (m^3) | (m^3) |
| 45.347 | 65.292 |
| 37.518 | 52.475 |
| 24.061 | 31.439 |
| 37.798 | 52.926 |
| 12.391 | 14.626 |

Se si ipotizza che nelle sezioni il flusso sia transitato in condizioni prossime allo stato critico (numero di Froude unitario), si può poi calcolare la velocità del flusso (V) transitata per ciascuna sezione e questo è possibile perché si conoscono larghezza (B) e il tirante medio (tabella 23).

Tabella 23. Velocità calcolata con le formule empiriche

| ID Sezione | Velocità $(9,81 * y_{medio})^{0,5}$ (m/s) |
|---------------|---|
| 1 | 4,83 |
| 2 | 4,72 |
| 3 | 3,91 |
| 4 | 5,03 |

4.8 La simulazione idrologica con FLO-2D

Il primo risultato della simulazione idrologica lo si visualizza consultando il file “summary.out” (mostrato in figura 57), su cui si legge un volume pari a 176.634,70 m³. Osservando i dati di output restituiti dal modello si può dire che la simulazione è accurata, perché viene constatata la conservazione del volume.

Il medesimo valore tiene conto anche della quantità di acqua infiltrata e intercettata, così come si può osservare in figura 57.

SUMMARY.OUT

| *** INFLOW (CU METERS) *** | |
|--|------------|
| TOTAL POINT RAINFALL: | 57.6559 MM |
| | WATER |
| RAINFALL VOLUME | 176634.70 |
| INFLOW HYDROGRAPH | 0.00 |
| INFLOW HYDROGRAPHS + RAINFALL | 176634.70 |
| ===== | |
| *** OUTFLOW (CU METERS) *** | |
| OVERLAND INFILTRATED AND INTERCEPTED WATER | 39.31 MM |
| | WATER |
| OVERLAND FLOW | |
| WATER LOST TO INFILTRATION & INTERCEPTION | 120439.94 |
| FLOODPLAIN STORAGE | 10714.63 |
| FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH | 45480.13 |
| FLOODPLAIN OUTFLOW, INFILTRATION & STORAGE | 176634.70 |
| ===== | |
| *** TOTALS *** | |
| TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM | 45480.13 |
| TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE | 176634.70 |

Figura 57. Dati di output della simulazione idrologica

Il passo successivo è stato quello di ottenere l'idrogramma liquido, ovvero per ciascuna sezione il modello FLO-2D ha simulato per ogni *timestep* i valori della portata defluita per ciascuna cella di *outflow*, di conseguenza ne deriva che la portata complessiva è data dalla somma delle portate delle celle di *outflow*.

Il medesimo idrogramma è mostrato in figura 58, nell'asse delle ascisse si ha il tempo e nell'asse delle ordinate la portata, dove si hanno tre picchi importanti che si susseguono entro le prime 4,5 ore, dopodiché va esaurendosi con due piccole pulsazioni, ma estromesse dalla successiva simulazione se si prende come riferimento l'analisi del video della videocamera dell'ARPAV.

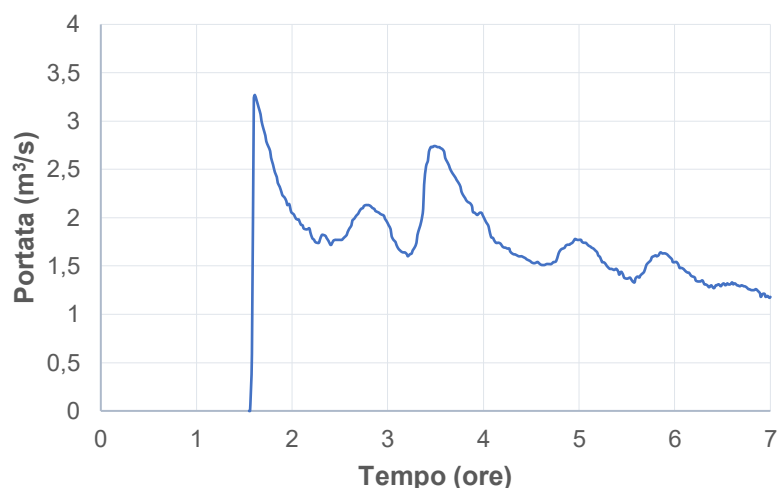


Figura 58. Idrogramma

In tabella 24 si riporta la portata e il volume liquido dell'idrogramma; in particolare modo si riporta il volume per ciascun picco, che è dato dalla somma del tempo di quando inizia a quando finisce e così per tutti e tre i picchi.

Tabella 24. Portata e volume liquidi

| | 1° picco | 2° picco | 3° picco |
|---------------------|----------|----------|----------|
| Portata (m^3/s) | 3,27 | 2,09 | 2,74 |
| Volume (m^3) | 7.816 | 6.435 | 11.882 |

A partire dall'idrogramma rappresentato in figura 58 è stato possibile applicare il metodo volumetrico. Inizialmente è stata determinata la concentrazione volumetrica (C_v), la quale varia da un valore minimo di 0.20 a un valore massimo di 0.541. Dal momento che l'equazione di Takahashi (1978) è ritenuta la più prudente, su questa si è costruito il debrisgramma (figura 59): dove in ascissa si ha il tempo (ore) e nei due assi delle ordinate la portata (m^3/s) e la precipitazione (mm).

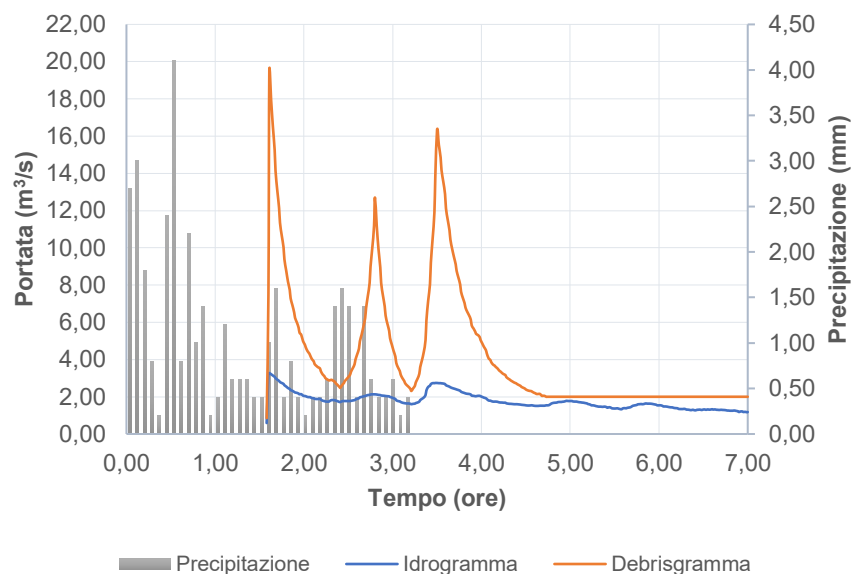


Figura 59. Debrisgramma

In tabella 25 si riportano invece la portata solida + liquida e i volumi solidi, suddivisi per ciascun picco delle tre ondate di debris flow.

Tabella 25. Portata solido/liquida e volume solido

| | 1° picco | 2° picco | 3° picco |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Portata solida + liquida (m^3/s) | 19,50 | 12,70 | 16,34 |
| Volume solido (m^3) | 9.966 | 7.503 | 14.856 |

Infine, il volume totale (solido + liquido) è calcolato per un valore di 75.000 m^3 .

4.9 La simulazione idraulica con FLO-2D

I risultati della simulazione idraulica sono riferiti a due scenari di lavoro:

- il primo scenario tiene conto della piena funzionalità della briglia filtrante, ovvero non tutto il materiale solido del debris flow viene trattenuto;
- il secondo scenario invece tiene conto dell'ipotesi che i filtri possano essere facilmente occlusi dal materiale sopraggiungente alla medesima briglia.

In figura 60 si riporta la mappa del primo scenario, dove si mostrano le profondità massime che sono state raggiunte dal debris flow nel corso della simulazione. Nello specifico la massima profondità è stata registrata a monte della briglia filtrante (4,85

m), poi nella piazza di deposito subito a valle i carichi sono molto ridotti ovvero inferiori a mezzo metro di altezza, poi nel tratto di cunettone si leggono profondità di circa un metro, ma è una sovrastima rispetto a quanto osservato in campo.

La mappa della velocità di propagazione del flusso è mostrata in figura 61 e la massima velocità si riscontra a partire dalla sezione di inflow protraendosi per un tratto di 65 m, così da raggiungere valori attorno ai 9 m/s (classe rossa). A valle il flusso si propaga fino alla briglia filtrante con una velocità media variabile tra i 4 m/s e i 5 m/s, per poi aumentare sulla gaveta della briglia dove si leggono valori attorno agli 8 m/s.

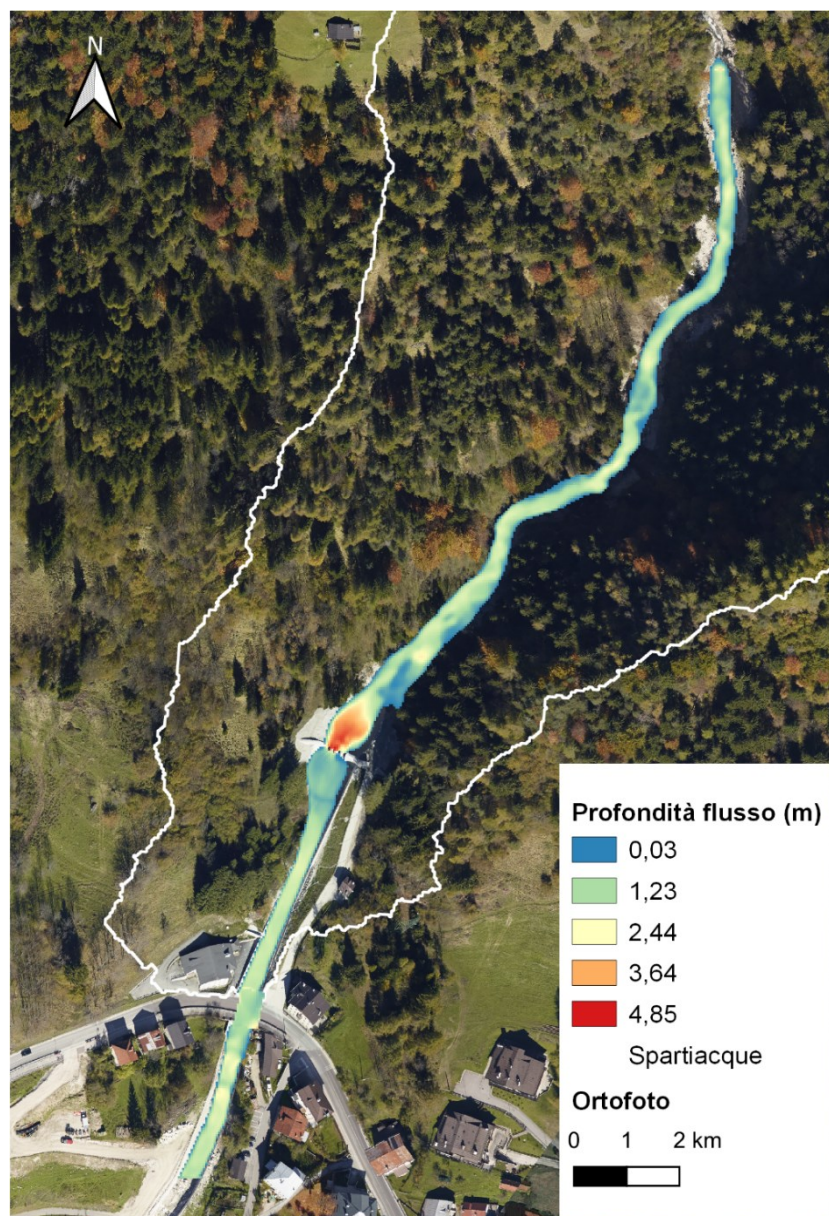


Figura 60. Profondità massima del flusso: scenario con briglia filtrante

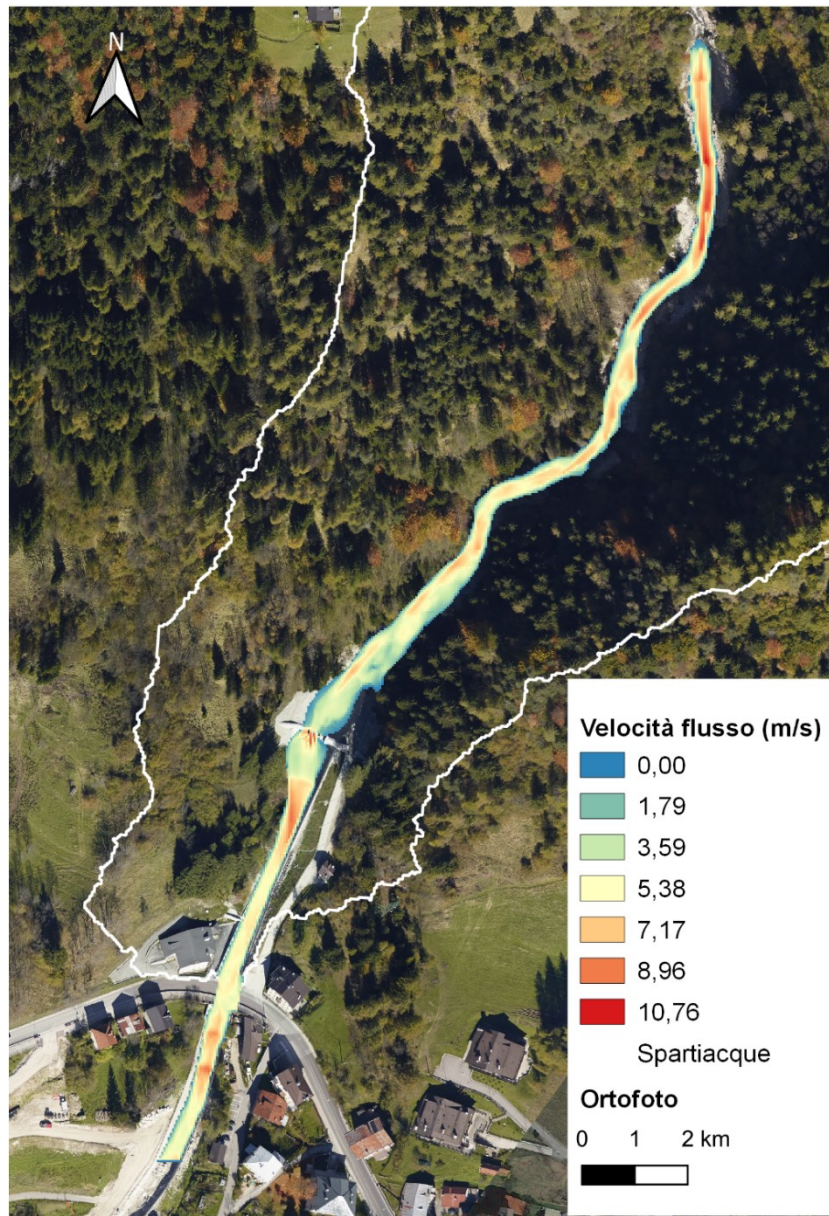


Figura 61. Velocità massima del flusso, scenario con briglia filtrante

Si è proceduto allo stesso modo per lo scenario che tiene conto dell'occlusione dei filtri della briglia in fase di evento.

La mappa della profondità del flusso (figura 62) evidenzia che il sedimento è completamente trattenuto a monte della briglia e porge un valore di 6,33 m.

La mappa della velocità (figura 63) è simile a quella dello scenario precedente, però quando si ha lo stramazzo del flusso qui la velocità è massima: circa 11 m/s.

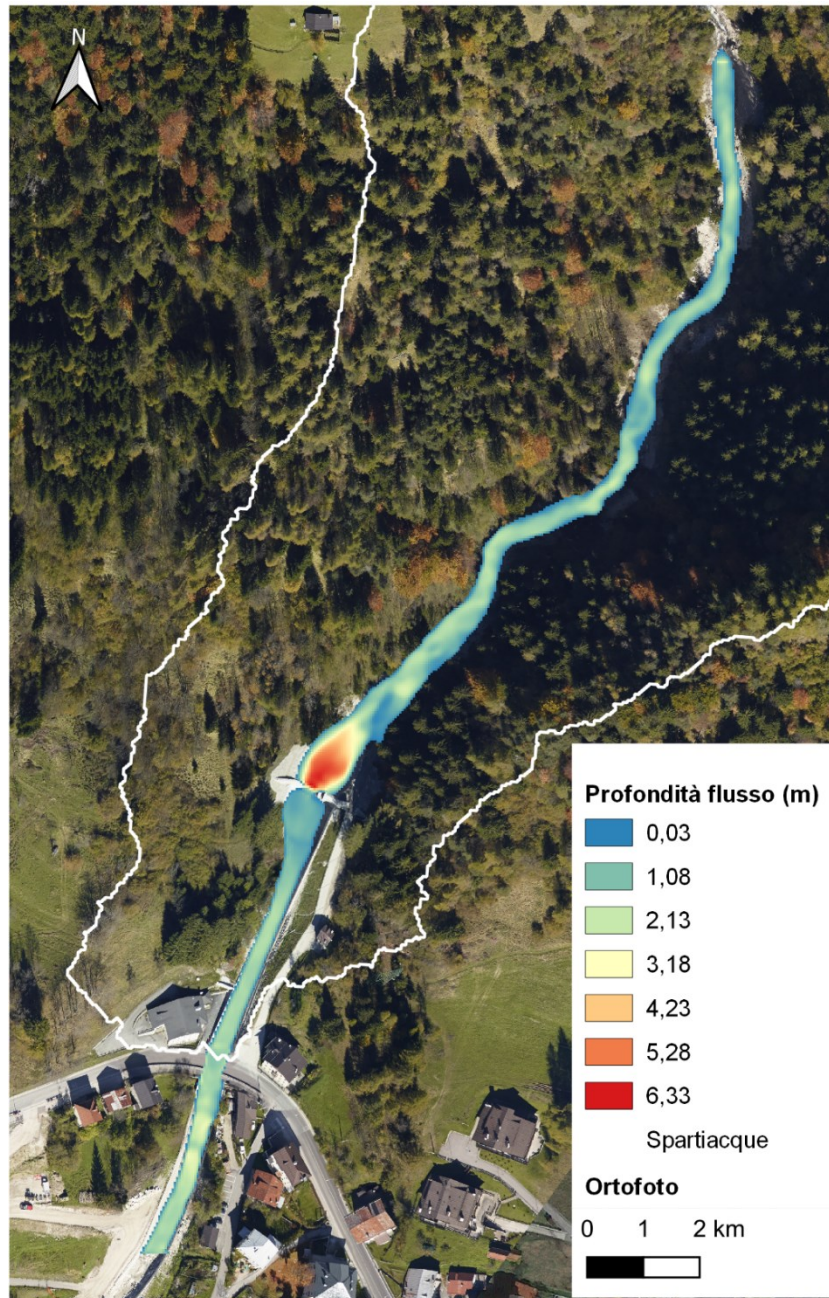


Figura 62. Profondità massima del flusso: scenario con occlusione dei filtri della briglia

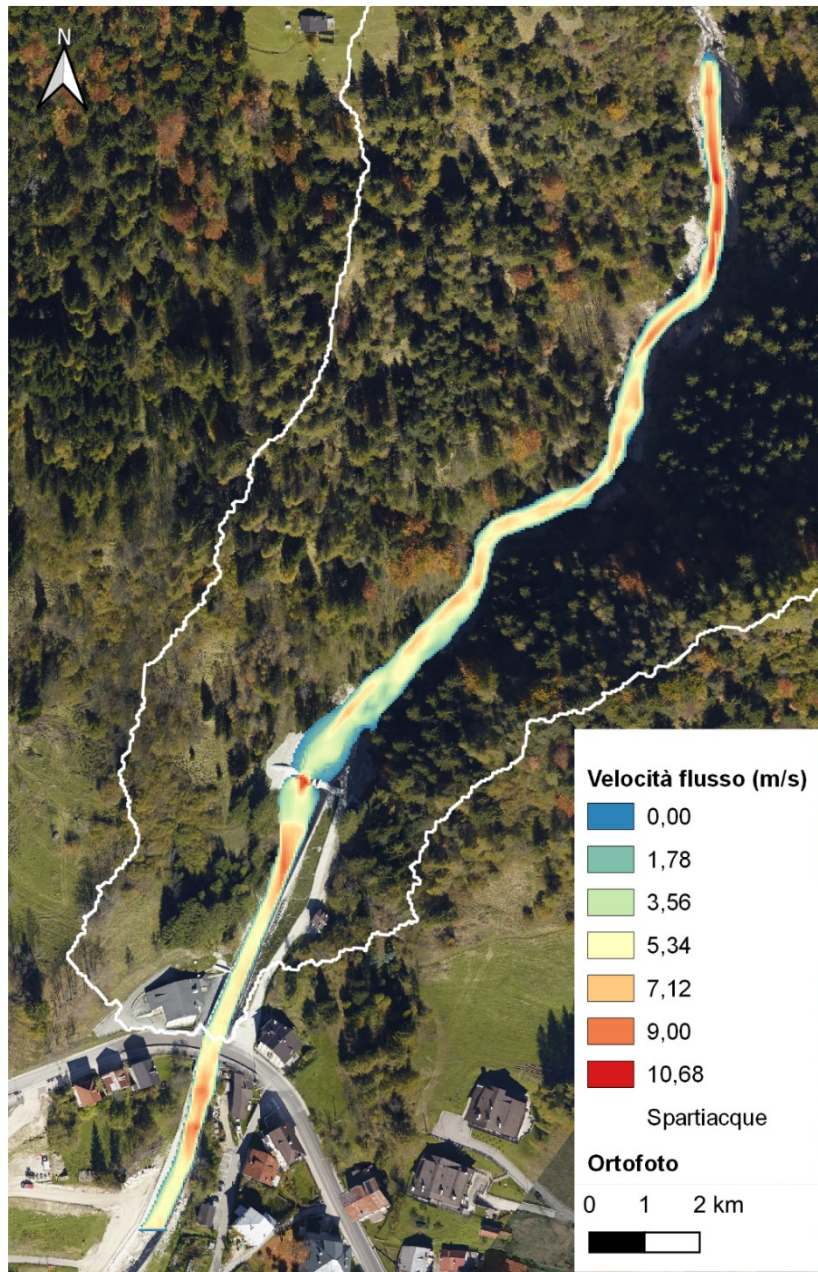


Figura 63. Velocità massima del flusso: scenario con occlusione dei filtri della briglia

Se si consulta il file “summary.out” è constatata la conservazione del volume, quindi la simulazione risulta accurata e il volume è pari a 75.000 m³, così come calcolato con il metodo volumetrico.

4.10 **Quantità di legname trasportato in senno alla corrente**

Il legname trasportato in senno alla corrente del debris flow si era accumulato nei pressi della briglia filtrante. L'impresa esecutrice dei lavori di sghiaimento ha provveduto accatastandolo nella strada forestale antistante la medesima opera, pertanto si è eseguita una stima a vista che corrisponde a un quantitativo di circa 18 metri cubi in volume (metro stereo).

Capitolo 5

Discussioni

I risultati delle analisi hanno messo in evidenza che non si tratta di un evento di colata detritica eccezionale, infatti basandosi sui massimi annuali di precipitazione della stazione pluviometrica di Faloria è stato stimato un tempo di ritorno dell'evento analizzato di tre anni.

Nello specifico il debris flow è avvenuto nella giornata del 29 agosto 2020 a seguito di una pioggia cumulata di 61,5 mm e i pluviometri hanno registrato un picco di 21 mm entro la prima ora (dalle 14:30 alle 15:30).

Siccome nella giornata del 28 agosto aveva già piovuto, si è tenuto conto che il suolo era quasi saturo d'acqua e questo è un aspetto molto importante che si è dovuto considerare ai fini della simulazione idrologica.

Con le indagini di campo del post evento (9 settembre 2020), nella parte bassa del bacino idrografico Rudan si sono rilevate quattro sezioni trasversali a partire da 100 m a monte della briglia, poi in corrispondenza di queste si sono eseguiti due rilievi granulometrici con metodo numerale.

La prima analisi granulometrica è l'unica che riconduce ai sedimenti trasportati dalla colata detritica e infatti si hanno diametri medi di circa 22 mm; la seconda invece riconduce al trasporto di cernita del 30 agosto 2020 con sedimenti molto fini e diametri medi di quasi 8 mm.

Le sezioni trasversali hanno invece messo in luce un forte approfondimento dell'alveo del torrente, poi nota la pendenza del tratto e i parametri idraulici si sono calcolati i valori di portata e di volume, mediante le formule empiriche.

I risultati delle formule empiriche non trovano corrispondenza con quelli del metodo volumetrico perché le prime riportano valori troppo elevati, invece nelle tabelle 24 e 25 si sono riportati i valori di portata e di volume presi in considerazione in questo lavoro e che risultano sicuramente più attendibili.

Buona la performance del modello FLO-2D per eseguire la *back-analysis* del debris flow, la quale è iniziata con l'analisi idrologica per creare l'idrogramma liquido nel quale si riportano i tre picchi.

In applicazione del metodo volumetrico si è calcolata la concentrazione volumetrica che varia da un minimo di 0.20 a un massimo di 0.541 e a partire da questa, si è definito il debrisgramma applicando l'equazione di Takahashi (1978) in quanto è quella più prudente, perché tiene in considerazione la C_v del fronte della colata detritica.

A questo punto si sono condotte delle simulazioni idrauliche atte a ricostruire l'onda del debris flow e ipotizzando due scenari di simulazione.

Il primo scenario è quello che tiene conto dell'effetto della briglia filtrante, mentre il secondo considera l'eventuale occlusione dei filtri e quindi tutto il materiale sopraggiungente sull'opera viene trattenuto.

Il secondo scenario è infatti quello che simula al meglio l'evento studiato, perché come riscontrato dal video registrato dalla videocamera dell'Arpav si vede che tutto il materiale è stato trattenuto dalla briglia, per la quasi totalità.

I sedimenti hanno quindi riempito a tergo la briglia e in corrispondenza della gaveta si ha una profondità massima di 5,30 m, rispetto alle ali dove si legge un valore di 6,33 m. Infine, la velocità di avanzamento del fluido si attesta tra i 4 m/s e i 5 m/s ed effettivamente sono valori attendibili se confrontati con quelli di letteratura; al contrario, non possono essere considerate verosimili velocità di 11 m/s le quali si riscontrano all'inizio della propagazione della colata detritica, così come a valle della briglia.

Se poi si fa un confronto con le velocità calcolate dal modello e la velocità della corrente allo stato critico nelle sezioni oggetto di misura (tabella 23), queste rientrano nel *range* di valori prodotti dalle simulazioni, quindi sono gli unici valori

attendibili al contrario dei valori di portata e volume delle relazioni empiriche, che come si è detto, sono fuori scala.

La simulazione idraulica conferma il volume totale finale di 75.000 m³ così come calcolato con il metodo volumetrico, quindi senza perdite di volume simulato.

Per quanto attiene al legname in alveo, la sua stima riguarda solo il quantitativo che è stato accumulato dalla ditta di sghiaimento, pertanto s'intende sottostimato se si considerano i tronchi depositati lungo la zona di scorrimento della colata detritica.

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro di tesi presentato in questo elaborato tratta la *back-analysis* della colata detritica avvenuta nel bacino idrografico del rio Rudan nella giornata del 29 agosto 2020, di cui è stato studiato il suo comportamento d'innescò, la dinamica di propagazione e di arresto.

Nello specifico, il 29 agosto 2020 a fronte di una precipitazione di 62 mm si è innescata una colata detritica e note le condizioni d'innescò non si tratta di un evento eccezionale, poiché il suo tempo di ritorno è stato stimato in tre anni.

Se si parte dal fatto che già il 28 agosto è stata una giornata piovosa, con il perdurare della precipitazione il suolo aveva raggiunto la saturazione, di conseguenza tutta l'acqua caduta al suolo il giorno successivo (cioè il 29 agosto) si è trasformata in totale deflusso superficiale e a seguire si è innescato il debris flow. È importante aver ribadito questo concetto perché se ne è dovuto tener conto ai fini della sua ricostruzione.

A testimonianza dell'evento vi è la videocamera installata a lato della medesima briglia, quindi a livello visivo è stato possibile dedurre la reologia, la mobilità e osservarne il legname fluitante.

Questo evento ha comportato un forte approfondimento dell'alveo del torrente e anche una modifica del suo tracciato planimetrico, per questo motivo nel post

evento sono state rilevate quattro sezioni trasversali e a partire da queste è stata stimata la portata e il volume solido applicando le formule empiriche. I risultati ottenuti hanno dimostrato essere fuori scala, ma allo stesso tempo si dimostra quanto sia fondamentale eseguire queste valutazioni post-evento e fare riferimento a sezioni trasversali che rimangono stabili tra ante e post evento.

In corrispondenza delle sezioni trasversali si sono eseguite due analisi granulometriche, la prima analisi mostra i diametri grossolani trasportati dalla colata detritica, rispetto alla seconda analisi che invece sembra ricondurre al trasporto di cernita avvenuto nella giornata successiva, ovvero il 30 agosto 2020.

Ai fini di questo lavoro di tesi, la *back-analysis* modellistica si è rivelata un approccio molto utile per poter caratterizzare l'evento.

L'iter è consistito nell'eseguire una prima simulazione idrologica e a seguire una simulazione idraulica utilizzando come dato di input un DTM ad elevata risoluzione (1x1 m).

La simulazione idrologica è servita a definire l'idrogramma liquido con i tre picchi di pioggia, poi in un secondo momento è stato applicato il metodo volumetrico, per la stima della concentrazione volumetrica, inoltre si è scelto di adottare l'equazione di Takahashi (1978) in modo da non sottostimare l'evento che si sta studiando, perché è l'unica che si concentra solo sul fronte del fluido.

Noti i risultati della simulazione idraulica si sono tenuti conto quelli attinenti allo scenario due, cioè con i filtri della briglia occlusi, perché è quello più conforme a quanto realmente accaduto.

La performance del modello FLO-2D è risultata in generale soddisfacente e in più si è rivelato essere un modello adatto a simulare una colata detritica anche a più ondate come quella del 29 agosto 2020.

Per quanto riguardano i tempi dei tre picchi non vi è una perfetta concordanza con quanto restituito dalla modellazione, ovvero questo modello tende a "tagliare" l'inizio e la coda dell'idrogramma per effetto dell'invaso della piana di calcolo.

Infine, la briglia filtrante ha funzionato trattenendo efficacemente il materiale solido, lasciando defluire la portata liquida e una parte esigua di sedimenti fini; inoltre si può dire che il comportamento della briglia è stato simulato in modo accurato e questo lo si riscontra anche osservando il video registrato dalla videocamera dell'Arpav.

Bibliografia

- Arpav. 2013. Strumenti e criteri di osservazione e di gestione dei dati pluviometrici.
Dipartimento Regionale Sicurezza del Territorio.
- Bertoldi G. 2014. Colate detritiche: dinamiche degli apporti di sedimento a scala integrata di bacino. Tesi di dottorato di dottorato di ricerca in Territorio, Ambiente, Risorse e Salute. Ciclo XXVI.
- Bettella F, D'Agostino V. 2018. Stima della distanza di arresto delle colate detritiche. Quaderno di idronomia montana. EdiBios.
- Bettella F. 2013. Reologia e dinamica di propagazione delle colate detritiche: analisi e modellazione a diversa scala. Tesi di dottorato di dottorato di ricerca in Territorio, Ambiente, Risorse e Salute. Ciclo XXV.
- Billi P. 1994. Morfologia dei corsi d'acqua. Verde ambiente 5, 61-70.
- Borga M. 2014/2015. Idraulica e idrologia. Estratto del materiale didattico del corso "idraulica e idrologia".
- Bottacin G. 2019. Avviata installazione monitoraggio e allarme su torrente Rudan a Vodo di Cadore. Regione Veneto.
- Carton A. 2015. Geomorfologia e geografia fisica. Appunti di lezione.
- D'Agostino V. 2019/2020. Debris flow: caratteristiche peculiari. Estratto dal materiale didattico del corso di studio "protezione del rischio idrogeologico".
- D'Agostino V. 2019/2020. Debris flow: distanza di arresto e mappatura del pericolo. Estratto dal materiale didattico del corso di studio "protezione del rischio idrogeologico".
- D'Agostino V. 2006. "Le opere di idraulica torrentizia per il controllo dei sedimenti", Quaderni di Idronomia Montana, 26, Le sistemazioni idraulico-forestali per la difesa del territorio, Saint Vincent (AO), 27 Ottobre 2006, Nuova Bios, Castrolibero (CS), pp. 231-250.
- D'Agostino V. e Marchi L. 2004. Estimation of debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps.

- Faggin A. 2018. Caratterizzazione preliminare dei flussi liquidi e solidi in una valle dolomitica di alta quota. Tesi di laurea triennale in Riassetto del territorio e tutela del Paesaggio.
- Ferro V. 2006. La sistemazione dei bacini idrografici. The McGraw-Hill Companies, Milano.
- Jacob M. (2005). A size classification for debris flows. In: Engineering geology, vol. 79
- Lenzi M. A. 2018/2019. Il Large Wood. Estratto dal materiale didattico.
- Lenzi M. A. 2019/2020. Caratterizzazione fluviomorfologica e caratterizzazione integrata dei corsi d'acqua. Estratto dal materiale didattico di "fluviomorfologia e riqualificazione fluviale".
- Malacarne F. D. 2015. Modellazione GIS del trasporto di legname in alveo durante eventi di piena nel T. Cordevole (BL). Tesi di laurea in Scienze Forestali e Ambientali.
- Marcadella A. 2013/2014. Analisi idro-meteorologica dell'evento di piena improvvisa del 2-3 agosto 2014 del bacino del Rio Lierza nel Comune di Refrontolo (TV). Tesi di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio.
- Masiero F. 2015. Studio dell'alluvione del 4 Agosto 2012 nel bacino del Hoferlahn-graben (Val di Vizze, BZ) e degli effetti della copertura forestale in conoide. Tesi di laurea triennale in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio.
- Montgomery D. R. Buffington J. M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle.
- O'Brien J. S. (2009). FLO-2D Reference Manual, version 2009.06. Nutrioso, Arizona.
- Pastorello R. 2014. Analisi del pericolo da debris flow nella Pfitschertal (Bz) mediante il modello Flow-R. Tesi di laurea in Scienze Forestali e Ambientali.
- Rickenmann D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows.
- Tognacca C. Bezzola G. R. & Minor H. E. 2000. Thresold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. In: debris-flow hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment Wieczorek & Naeser Eds.

Altre consultazioni

FLO-2D Manual and Software Inc.

http://www.appsolutelydigital.com/ModelPrimer/chapter4_section2.html