UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio

Simulazione dell'evento di colata detritica avvenuta il 29 ottobre 2018 nel bacino del Rio Toèl Lench (Canazei, TN) mediante il modello "D.F.R.M.".

Relatore

Dott. Martino Bernard

Laureanda

Maria Giulia Doda

Matricola n.

2045980

ANNO ACCADEMICO 2023 - 2024

Indice

RIASSUNTO .....

ABSTRACT .....

1 LE COLATE DETRITICHE 1

1.1 Caratteristiche delle colate detritiche 1

1.2 Dinamica e fasi di una colata detritica 3

2 L'AREA DI STUDIO 7

2.1 Inquadramento territoriale 7

2.2 Inquadramento bacino di studio 8

2.3 Geologia di bacino 12

2.4 Reticolo idrografico 13

2.5 Parametri morfometrici del bacino 15

3 L'EVENTO VAIA DEL 29 OTTOBRE 2018 17

3.1 L'evento nel bacino di studio 17

3.1.1 Analisi geologica e geomorfologica del bacino 19

3.2 Consolidamento del tratto oggetto di studio 21

4 ANALISI STATISTICO – PROBABILISTICA DELLA PRECIPITAZIONE 23

4.1 Recupero dati di precipitazione 23

4.2 Analisi dati di precipitazione 27

4.2.1 Regolarizzazione statistica secondo Gumbel 28

4.2.2 Test statistico di Matalas 31

4.3 Determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP) 32

5 RISULTATI DELLE PRECIPITAZIONI 35

5.1 Analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni 35

5.1.1 Cartogramma di Gumbel utilizzato 64

5.1.2 Precipitazione attesa per ogni TR 65

5.2 Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP) 66

5.3 Determinazione del Tempo di Ritorno per i data di pioggia registrati 68

6 MODELLO A CELLE PER LA PROPAGAZIONE IDRAULICA DI COLATE DETRITICHE (D.F.R.M.) 71

6.1 Le equazioni che governano il moto 72

6.2 Schema numerico e condizioni interne ed al contorno 74

6.3 I processi con relativi parametri che controllano la propagazione: resistenza al moto e fenomeni di deposito ed erosione 78

6.3.1 Resistenza al moto 79

6.3.2 Processi di erosione e deposito 80

6.4 Influenza della dimensione della griglia sulla simulazione 82

7 APPLICAZIONE DEL MODELLO D.F.R.M. AL BACINO CASO STUDIO 83

7.1 Dominio di calcolo 83

7.2 Digitalizzazione e caratteristiche uso del suolo 84

7.3 Condizioni al contorno e sezioni interne 86

7.4 Idrogramma solido – liquido 87

7.4.1 Determinazione idrogramma solido – liquido con il modello di Gregoretti et al. (2016) e Bernard (2018) e metodologia di determinazione con metodo proposto da Gregoretti et al. (2019) 88

7.5 Parametri della simulazione 93

8 RISULTATI DEL MODELLO “D.F.R.M.” 95

8.1 Simulazione evento Vaia 97

8.2 Simulazione evento Vaia in presenza dell'opera 101

8.3 Simulazione TR200 in assenza dell'opera 105

8.4 Simulazione evento TR200 in presenza dell'opera 109

8.5 Confronto dei risultati 113

8.5.1 Confronto tra l'evento misurato e la simulazione dell'evento Vaia 114

8.5.2 Confronto tra la simulazione dell'evento Vaia ed evento Vaia in presenza dell'opera 117

8.5.3 Confronto tra la simulazione dell'evento TR200 in assenza e simulazione dell'evento TR200 in presenza dell'opera 123

8.5.4 Confronto dei depositi contenuti all'interno del bacino 125

9 CONCLUSIONI 127

BIBLIOGRAFIA 129

Indice delle figure

FIGURA 1 - FORMAZIONE DELLA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA CAUSATA DALL'IMPATTO DELLA CORRENTE LIQUIDA SU UN CORPO DETRITICO. 2
FIGURA 2 - RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UNA COLATA DETRITICA (GREGORETTI, APPUNTI LEZIONI) . 3
FIGURA 3 - SCHEMATIZZAZIONE DEI PROCESSI FISICI CHE FORMANO UNA COLATA DETRITICA (GREGORETTI, APPUNTI LEZIONI) 4
FIGURA 4 - LOCALIZZAZIONE DEL BACINO DI TOÈL LENCH ALL'INTERNO DEL COMUNE DI CANAZEI (TN) ... 7
FIGURA 5 - MAPPA DELLE PENDENZE DEL BACINO TOÈL LENCH 8
FIGURA 6 - MAPPA DELL'ESPOSIZIONE DEL BACINO TOÈL LENCH 9
FIGURA 7 - MAPPA DELL'ALTIMETRIA DEL BACINO TOÈL LENCH 9
FIGURA 8 - CARTA GEOLOGICA DEL BACINO TOÈL LENCH (PROTEZIONE CIVILE TRENTINO – PAT) 13
FIGURA 9 - RETICOLO IDROGRAFICO, BACINO TOÈL LENCH 14
FIGURA 10 - COLATA DETRITICA A MONTE DEL RIO TOÈL LENCH, ALBA DI CANAZEI (TN) 18
FIGURA 11 - COLATA DETRITICA A VALLE DELLA STRADA STATALE N. 641, ALBA DI CANAZEI (TN) 18
FIGURA 12 - SUDDIVISIONE IN ZONE DEL BACINO TOÈL LENCH (RELAZIONE IN.GE.NA) 20
FIGURA 13 - OPERA DI CONSOLIDAMENTO DELL'ALVEO, PIAZZA DI DEPOSITO E BRIGLIA FILTRANTE NEL BACINO DEL RIO TOÈL LENCH 22
FIGURA 14 - LOCALIZZAZIONI STAZIONI METEO RISPETTO AL LUOGO DELL'EVENTO 24
FIGURA 15 - VALORI DEL COEFFICIENTE DI CONDUTTANZA (C) DI COLATE DETRITICHE DI LABORATORIO E REALI IN FUNZIONE DELLA CONCENTRAZIONE VOLUMETRICA DI SEDIMENTO (C) 79
FIGURA 16 - DTM DEL BACINO TOÈL LENCH 83
FIGURA 17 - USO DEL SUOLO ANTE OPERA, BACINO TOÈL LENCH 85
FIGURA 18 - USO DEL SUOLO CON OPERA, BACINO TOÈL LENCH 85
FIGURA 19 - PARAMETRI DELL'USO DEL SUOLO, BACINO TOÈL LENCH 86
FIGURA 20 - CONDIZIONI AL CONTORNO E SEZIONI INTERNE, BACINO TOÈL LENCH 87
FIGURA 21 - IDROGRAMMA SOLIDO - LIQUIDO, METODO DI GREGORETTI ET AL. (2019) 91
FIGURA 22 - IDROGRAMMA SOLIDO - LIQUIDO TR=200 ANNI, BACINO TOÈL LENCH 92
FIGURA 23 - INTERFACCIA E PARAMETRI UTILIZZATI PER UNA SIMULAZIONE D.F.R.M. 94
FIGURA 24 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. SIMULAZIONE EVENTO VAIA. 97
FIGURA 25 - MAPPA CONCENTRAZIONE MASSIMA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA. 98
FIGURA 26 - MAPPA SPESSORE MASSIMO. SIMULAZIONE EVENTO VAIA 99
FIGURA 27 - PROFONDITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 99
FIGURA 28 - MAPPA VELOCITÀ MASSIMA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA 100
FIGURA 29 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 102
FIGURA 30 - MAPPA CONCENTRAZIONE MASSIMA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 102
FIGURA 31 - MAPPA SPESSORE MASSIMO. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 103
FIGURA 32 - MAPPA PROFONDITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 104
FIGURA 33 - MAPPA VELOCITÀ MASSIMA. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA 104
FIGURA 34 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA 106
FIGURA 35 - MAPPA CONCENTRAZIONE MASSIMA. SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA 106
FIGURA 36 - MAPPA SPESSORE MASSIMO. SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA 107
FIGURA 37 - MAPPA PROFONDITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA 108
FIGURA 38 - MAPPA VELOCITÀ MASSIMA. SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA 108
FIGURA 39 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. SIMULAZIONE TR200 CON OPERA 110
FIGURA 40 - MAPPA CONCENTRAZIONE MASSIMA. SIMULAZIONE TR200 CON OPERA 110
FIGURA 41 - MAPPA SPESSORE MASSIMO. SIMULAZIONE TR200 CON OPERA 111
FIGURA 42 - MAPPA PROFONDITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. SIMULAZIONE TR200 CON OPERA 112
FIGURA 43 - MAPPA VELOCITÀ MASSIMA. SIMULAZIONE TR 200 CON OPERA 112
FIGURA 44 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE, SIMULAZIONE EVENTO 29/10/2018. CONFRONTO EROSIONE CON IMMAGINE POST EVENTO 115
FIGURA 45 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. CONFRONTO DOD CON SIMULAZIONE POST EVENTO; CONFRONTO EROSIONE CON IMMAGINI 116

FIGURA 46 - MAPPA EROSIONE/DEPOSITO FINALE. CONFRONTO SIMULAZIONE EVENTO CON E SENZA OPERA 119
FIGURA 47 - MAPPA PROFONDITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. CONFRONTO SIMULAZIONE EVENTO CON E SENZA OPERA 120
FIGURA 48 - MAPPA SPESSORE MASSIMO. CONFRONTO SIMULAZIONE EVENTO CON E SENZA OPERA 121
FIGURA 49 - MAPPA VELOCITÀ MASSIMA CORRENTE SOLIDO-LIQUIDA. CONFRONTO SIMULAZIONE EVENTO CON E SENZA OPERA 122
FIGURA 50 - MAPPA CONCENTRAZIONE MASSIMA DEL FLUSSO. CONFRONTO SIMULAZIONE EVENTO CON E SENZA OPERA 123

Indice delle tabelle

TABELLA 1 - PRINCIPALI PARAMETRI MORFOMETRICI DEL BACINO TOÈL LENCH 16
TABELLA 2 - VOLUMI MOBILIZZABILI, BACINO DI RIO TOÈL LENCH 29/10/2018 21
TABELLA 3 - STAZIONI METEO PIÙ PROSSIME AL BACINO TOÈL LENCH 24
TABELLA 4 - STAZIONE DI PIAN FEDAIA (DIGA): PRECIPITAZIONE CUMULATA DAL 27/10/2018 AL 30/10/2018 25
TABELLA 5 - PRECIPITAZIONE MASSIMA ANNUALE PER INTERVALLO DI TEMPO, STAZIONE DI PIAN FEDAIA (DIGA) DAL 2009 AL 2023 27
TABELLA 6 – PARAMETRI $E\gamma$ E $\sigma\gamma$ IN FUNZIONE DELLA NUMEROSITÀ DEL CAMPIONE (N) (MATALAS ET. AL, 1975) 31
TABELLA 7 – PARAMETRI α E U CALCOLATI 35
TABELLA 8 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 5 MINUTI 36
TABELLA 9 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 5 MINUTI 37
TABELLA 10 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 10 MINUTI 38
TABELLA 11 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 10 MINUTI 39
TABELLA 12 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 15 MINUTI 40
TABELLA 13 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 15 MINUTI 41
TABELLA 14 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 30 MINUTI 42
TABELLA 15 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 30 MINUTI 43
TABELLA 16 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 45 MINUTI 44
TABELLA 17 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 45 MINUTI 45
TABELLA 18 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 1 ORA 46
TABELLA 19 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 1 ORA 47
TABELLA 20 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 3 ORE 48
TABELLA 21 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 3 ORE 49
TABELLA 22 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 6 ORE 50
TABELLA 23 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 6 ORE 51
TABELLA 24 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 12 ORE 52
TABELLA 25 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 12 ORE 53
TABELLA 26 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 24 ORE 54
TABELLA 27 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 24 ORE 55

TABELLA 28 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 48 ORE 56
TABELLA 29 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 48 ORE 57
TABELLA 30 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 72 ORE 58
TABELLA 31 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 72 ORE 59
TABELLA 32 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 96 ORE 60
TABELLA 33 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 96 ORE 61
TABELLA 34 - INDICATORI STATISTICI DEL CAMPIONE DEI MASSIMI ANNUALI DI PRECIPITAZIONE, DURATA 120 ORE 62
TABELLA 35 - VERIFICA TEST DI MATALAS, DURATA 120 ORE 63
TABELLA 36 - VARIABILE RIDOTTA Y PER CIASCUN TR 65
TABELLA 37 - PRECIPITAZIONE ATTESA PER CIASCUN TR E PER CIASCUNA DURATA 65
TABELLA 38 - PARAMETRI A E N PER IL CALCOLO DELLA LSPP, DURATE PARI O INFERIORI A 60 MINUTI 66
TABELLA 39 - PARAMETRI A E N PER IL CALCOLO DELLA LSPP, DURATE SUPERIORI A 60 MINUTI 66
TABELLA 40 - PRECIPITAZIONE CALCOLATA PER CIASCUN TR E PER CIASCUNA DURATA 67
TABELLA 41 - PRECIPITAZIONE CUMULATA, BACINO TOÈL LENCH 68
TABELLA 42 – EQUAZIONE, PARAMETRO R^2 E CALCOLO DEL TR PER LE DURATE CONSIDERATE 68
TABELLA 43 - SCHEMA DELLA PROPAGAZIONE: CELLA DI INGRESSO (BLU) ATTIVATA AL PASSO TEMPORALE I E CELLE DI PROPAGAZIONE (ROSSO) ATTIVATE AI PASSI TEMPORALI SUCCESSIVI 78
TABELLA 44 - PARAMETRI SIMULAZIONE D.F.R.M. 93
TABELLA 45 - CONFRONTO EVENTO MISURATO ED EVENTO SIMULATO. 116
TABELLA 46 – CONFRONTO VOLUMETRIE SIMULAZIONE EVENTO 29/10/2018 E SIMULAZIONE EVENTO CON OPERA 118
TABELLA 47 - CONFRONTO VOLUMETRIE SIMULAZIONE TR200 SENZA OPERA E SIMULAZIONE TR200 CON OPERA 124
TABELLA 48 - VOLUMI DI DEPOSITO CONTENUTI NEL BACINO TOÈL LENCH 125

Indice dei grafici

GRAFICO 1 - ISTOGRAMMA DELLA DISTRIBUZIONE DELLE AREE RISPETTO ALLE FASCE DI QUOTA, BACINO DI TOÈL LENCH 10
GRAFICO 2 - ISTOGRAMMA DELLA DISTRIBUZIONE DELLE PENDENZE MEDIE RISPETTO ALLE FASCE DI QUOTA, BACINO DI TOÈL LENCH 10
GRAFICO 3 - CURVA IPSOGRAFICA, BACINO TOÈL LENCH 11
GRAFICO 4 - CURVA IPSOGRAFICA ADIMENSIONALE, BACINO TOÈL LENCH 12
GRAFICO 5 - PROFILO ALTIMETRICO DEL COLLETTORE, BACINO TOÈL LENCH 14
GRAFICO 6 - ISTOGRAMMA PRECIPITAZIONE, PIAN FEDAIA (DIGA) - 29/10/2018 DALLE 13:30 ALLE 20:30 . 26
GRAFICO 7 - ISTOGRAMMA PRECIPITAZIONE E CURVA DI CUMULATA, PIAN FEDAIA (DIGA) - 29/10/2018 DALLE 17:30 ALLE 20:30 26
GRAFICO 8 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 5 MINUTI 36
GRAFICO 9 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 5 MINUTI 37
GRAFICO 10 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 10 MINUTI 38
GRAFICO 11 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 10 MINUTI 39
GRAFICO 12 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 15 MINUTI 40
GRAFICO 13 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 15 MINUTI 41
GRAFICO 14 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 30 MINUTI 42

GRAFICO 15 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 30 MINUTI 43
GRAFICO 16 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 45 MINUTI 44
GRAFICO 17 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 45 MINUTI 45
GRAFICO 18 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 60 MINUTI 46
GRAFICO 19 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 1 ORA 47
GRAFICO 20 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 3 ORE 48
GRAFICO 21 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL, DURATA 3 ORE 49
GRAFICO 22 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 6 ORE 50
GRAFICO 23 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 6 ORE 51
GRAFICO 24 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 12 ORE 52
GRAFICO 25 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 12 ORE 53
GRAFICO 26 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 24 ORE 54
GRAFICO 27 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 24 ORE 55
GRAFICO 28 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 48 ORE 56
GRAFICO 29 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 48 ORE 57
GRAFICO 30 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 72 ORE 58
GRAFICO 31 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 72 ORE 59
GRAFICO 32 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 96 ORE 60
GRAFICO 33 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 96 ORE 61
GRAFICO 34 - FREQUENZA RELATIVA, DURATA 120 ORE 62
GRAFICO 35 - CARTOGRAMMA DI GUMBEL CON LA PROBABILITÀ EMPIRICA DI WEIBULL E HAZEN, DURATA 120 ORE 63
GRAFICO 36 – CARTOGRAMMA DI GUMBEL – HAZEN PER DURATE PARI O INFERIORI A 60 MINUTI 64
GRAFICO 37 – CARTOGRAMMA DI GUMBEL – HAZEN PER DURATE SUPERIORI A 60 MINUTI 64
GRAFICO 38 - LSPP PER CIASCUN TR 67
GRAFICO 39 - ALTEZZA MASSIMA DI PRECIPITAZIONE PER CIASCUN INTERVALLO DI TEMPO E PER OGNI TR, BACINO TOÈL LENCH 69
GRAFICO 40 - IDROGRAMMA SOLIDO - LIQUIDO CALCOLATO CON IL METODO DI GREGORETTI ET AL. (2019) 91
GRAFICO 41 - IDROGRAMMA SOLIDO - LIQUIDO, TR = 200 ANNI 92
GRAFICO 42 - RELAZIONE PORTATA TOTALE NEL TEMPO. SIMULAZIONE EVENTO VAIA, SEZIONE N.1, 2. 101
GRAFICO 43 - RELAZIONE PORTATA TOTALE NEL TEMPO. SIMULAZIONE EVENTO VAIA CON OPERA, SEZIONE N. 1, 2. 105
GRAFICO 44 - RELAZIONE PORTATA TOTALE NEL TEMPO. SIMULAZIONE TR200, SEZIONE N. 1, 2 109
GRAFICO 45 - RELAZIONE PORTATA TOTALE NEL TEMPO. SIMULAZIONE TR200 CON OPERA, SEZIONE N. 1, 2. 113

RIASSUNTO

Il bacino idrografico del Rio Toèl Lench, localizzato nella parte settentrionale della Val di Fassa nel Comune di Canazei (TN), è stato interessato dalla "Tempesta Vaia" dell'ottobre 2018. Si è verificato un evento di colata detritica nel pomeriggio del 29 ottobre 2018 che ha mobilitato il materiale detritico andando a occupare la Strada Statale "SS 641" e danneggiando alcune abitazioni. Considerata l'eccezionalità dell'evento e il luogo in cui è avvenuto, ossia in prossimità degli impianti sciistici e del centro abitato, al fine di proteggerli e di salvaguardare l'economia data dal turismo, il torrente è stato sistemato con la realizzazione tempestiva di un'opera idraulica di difesa nella parte terminale del bacino, e in particolare con la realizzazione di una piazza di deposito a monte delle infrastrutture e corazzando la parte finale del torrente.

Lo scopo del presente lavoro è quello di ricostruire l'evento di colata detritica che ha interessato il Bacino del Rio Toèl Lench il giorno 29 ottobre 2018, mediante l'utilizzo del modello "D.F.R.M." sviluppato da Gregoretti et al. (2019), il cui plugin è implementato nel software Q-Gis, e del materiale fornito dall' studio di ingegneria "in.ge.na." che ha progettato l'opera.

La prima parte del lavoro consiste nell'inquadramento territoriale e la descrizione del fenomeno di colata detritica relativi al bacino oggetto di studio. Successivamente, a partire dai dati di pioggia dell'evento e dalla serie storica di precipitazione massima annuale, entrambi registrati nella stazione più prossima al bacino, si effettua una analisi statistico – probabilistica al fine di determinare le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) per ciascun Tempo di Ritorno (TR), utili per determinare l'eccezionalità dell'evento.

La seconda parte del lavoro tratta le simulazioni dell'evento di colata. In particolare, le simulazioni sono state ottenute adoperando due differenti idrogrammi: il primo è stato utilizzato per ricostruire l'evento del 29 ottobre 2018 e dello stesso in presenza dell'opera, il secondo per ricostruire lo stesso evento ma di TR200 sia in assenza che in presenza dell'opera. Dopo aver realizzato i file necessari per ciascuna simulazione, si è provveduta alla loro all'analisi mediante Q-Gis. In particolare, la corretta simulazione dell'evento è data dall'inserimento corretto dei parametri. Infine, i risultati vengono confrontati in modo tale da valutare la capacità del modello nel simulare l'evento rispetto all'evento misurato, l'evento in presenza e in assenza dell'opera, e infine l'evento di TR200 in presenza e in assenza dell'opera.

ABSTRACT

The Rio Toèl Lench basin, located in the northern part of Val di Fassa in the Municipality of Canazei (TN), was affected by the Vaia storm in October 2018. A debris flow occurred on the afternoon of 29 October 2018, which mobilized sediment material affecting State Road "SS 641" and damaging houses. Given the exceptional nature of the event and the location where it occurred, near the ski lifts and the residential area, in order to protect them and safeguard the tourism – driven economy, the stream was managed with a hydraulic structure in the lower part of the basin, specifically through a deposition area upstream of the infrastructures and by reinforcing the final reach of the stream.

The objective of this work is to simulate the debris flow event that affected the Rio Toèl Lench basin on 29 October 2018, using the D.F.R.M." model developed by Gregoretti et al. (2019), which utilizes Q-Gis software, and the field report provided by the "in.ge.na." engineering office that designed the project.

The first part of the work consists of the territorial context and the description of the debris flow phenomenon related to the basin under study. Subsequently, using the rainfall data from the event and the historical series of annual maximum precipitation, both recorded at the rain station closest to the basin, a statistical – probabilistic analysis is conducted to determine the Intensity – Duration curve (LSPP) for each Return Time (TR), which are useful for assessing the exceptional nature of the event.

The second part of the work deals with the simulations of the debris flow event. Specifically, the simulations were obtained using two different hydrographs: the first was used to simulate the event of 29 October 2018, both with and without the hydraulic structure, while the second was used to simulate the same event with TR200, again both with and without the hydraulic structure. After creating the necessary raster files for each simulation, they were analysed using Q-Gis. The accurate simulation of the event depends on the correct input of parameters. Finally, the results are compared to assess the model's ability to simulate the event against the measured event, the event with and without the hydraulic structure, and the TR200 event with and without the hydraulic structure.

1 LE COLATE DETRITICHE

Le colate detritiche (in inglese *debris flow*) sono flussi di corrente costituiti da acqua e materiale solido che danno luogo a fenomeni naturali distruttivi e si verificano "*quando sedimenti di varia granulometria sono scossi e mescolati con l'acqua, scorrono lungo un pendio sotto la forza gravitazionale, deformandosi irreversibilmente e mantenendo una superficie libera*" [1]. Sono dei fenomeni frequenti tipici delle aree montane e delle Alpi italiane, e tra i più impattanti di tutti i processi geomorfologici, caratterizzati dalla mancanza di segni premonitori e per questo motivo la loro pericolosità è elevata e può influire a livello socioeconomico.

Una delle condizioni fondamentali per avere l'innesco del fenomeno è la presenza di materiale instabile e roccioso, dato dal collasso di parti di terreno, unito a eventi di precipitazione intensa e assenza di vegetazione lungo il pendio. Il fenomeno e la sua potenza distruttiva dipendono da numerosi fattori, ad esempio: la granulometria e la distribuzione del materiale solido, nonché la loro composizione e concentrazione, e le condizioni idrauliche del flusso costituite dalla velocità e dalla pendenza del canale. Generalmente la concentrazione volumetrica dei sedimenti, ossia il rapporto tra il volume solido rispetto al volume complessivo, è compresa tra il 30% e il 65% nelle zone di testata dove il canale principale, chiamato anche collettore, ha una inclinazione generalmente superiore ai 20° – 30° la quale diminuisce gradualmente fino a raggiungere la zona di conoide, favorito dalle basse pendenze del canale (< 5°).

1.1 Caratteristiche delle colate detritiche

Le colate detritiche avvengono generalmente in ambienti diversi, quali aree semi aride, aree alpine e montane, e aree vulcaniche. Nel presente lavoro si tratteranno solamente le colate che si sviluppano in ambiente alpino. In questo contesto, la colata detritica avviene quando una corrente liquida, causata da una precipitazione intensa, improvvisa e non continua, mobilita e incorpora al suo interno il materiale solido disponibile, chiamato detrito. L'aumento della quantità di sedimenti all'interno di un flusso d'acqua porta alla formazione di un'onda di corrente solido – liquida (Fig. 1). L'onda è composta da acqua e materiale detritico, caratterizzata da una eterogeneità granulometrica e da una distribuzione irregolare del sedimento lungo la profondità del flusso, che si sposta con una velocità elevata come un'unica massa da monte verso valle a causa dell'azione della gravità. Il materiale solido che forma l'onda deriva, a seconda della geologia e morfologia

[1] LORENZINI, G. MAZZA, N. *Debris Flow: Phenomenology and Rheological Modelling*. Wit Press, Southampton Boston, 2004. (pag. 39)

del terreno, in primo luogo da un'erosione del letto dell'alveo principale o dalle sponde del canale, da frane superficiali originate da pendii instabili e da frane in prossimità di pareti rocciose; in secondo luogo, il sedimento deriva dalle parti superiori di falde detritiche poste al piede di una parete rocciosa.

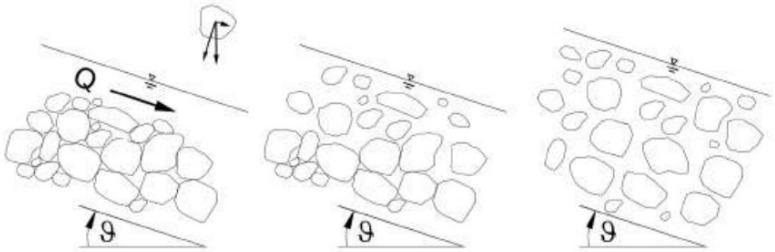

Figura 1 - Formazione della corrente solido-liquida causata dall'impatto della corrente liquida su un corpo detritico (Gregoretti, appunti lezioni)

L'energia del fenomeno di colata dipende principalmente dalla velocità di trasporto dei sedimenti, alla quale è strettamente legata la pendenza del versante. La colata detritica, essendo improvvisa e difficile da prevedere, ha velocità elevata che varia tra i 0.5 m/s e i 20.0 m/s: la variabilità dipende dalla composizione del flusso (concentrazione e granulometria dei sedimenti) e dalla geometria del versante in cui avviene il fenomeno (pendenza). Inoltre, la velocità varia a seconda dell'area da cui si origina il materiale che viene trasportato e dalla tipologia di erosione che crea. In generale, all'analisi della velocità del fenomeno, si associano altri parametri fisici quali la pendenza, la densità, la viscosità, la percentuale di sedimento solido e argilloso, la profondità e il numero di Reynolds. Le colate detritiche hanno luogo in pendii con elevata pendenza; tuttavia, possono verificarsi anche con pendenze più basse nei casi di particolare fluidità. A partire dalla pendenza del terreno, è possibile identificare tre diverse zone all'interno del bacino idrografico in cui avviene la colata detritica. Procedendo da monte verso valle si individuano le seguenti zone:

- Il bacino di formazione
  Comprende la zona di innesco e di formazione della colata ed è posto nella testata del bacino idrografico. È caratterizzato da pendenze comprese tra il 15% e il 32% (8.5° - 18°);
- Il canale collettore
  È il canale principale dove si propaga la corrente solido – liquida. La pendenza è superiore all'angolo massimo di deposito, al contrario possono verificarsi delle zone localizzate di depositi lungo il tratto;
- Il conoide di deiezione
  Comprende l'area più estesa dell'arresto della colata, caratterizzato da pendenze di circa il 3%. A seconda della tipologia di bacino idrografico, può avere una forma a ventaglio.

In aree montane e alpine, le colate detritiche si verificano in bacini idrografici di ridotte dimensioni e generalmente la superficie è inferiore ai 10 km^2.

Durante il fenomeno di colata detritica, è possibile identificare tre diverse parti che compongono la tipica onda di corrente solido – liquida (Fig. 2):

- Il fronte
  Caratterizzato da un'elevata concentrazione di materiale solido, composto da materiale grossolano sia di tipo roccioso che legnoso. Data la caratteristica della componente solida, il fronte non è eterogeneo e a causa della grandezza dei sedimenti può bloccare il deflusso creando un "tappo" all'interno del canale;
- Il corpo
  Caratterizzato da una omogeneità maggiore rispetto al fronte e da una diminuzione sia della profondità che della concentrazione solida procedendo verso valle;
- La coda
  È composta da materiale più fine e di piccole dimensioni e il volume d'acqua è maggiore rispetto a quello solido.

In alcune colate detritiche non è rara la presenza di un'onda iniziale, prettamente liquida, che anticipa il fronte del fenomeno.

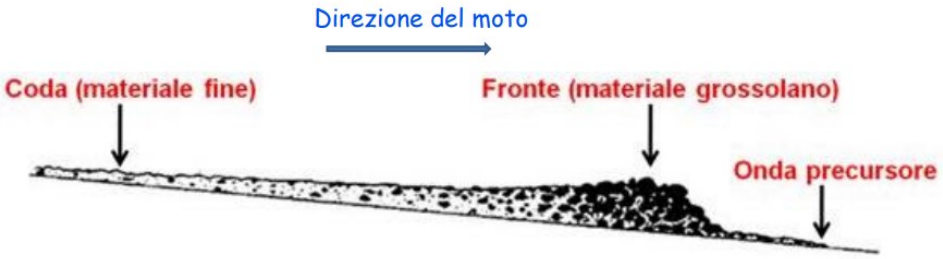

Figura 2 - Rappresentazione schematica di una colata detritica (Gregoretti, appunti lezioni)

1.2 Dinamica e fasi di una colata detritica

Le colate detritiche sono originate, sebbene siano dei fenomeni che si manifestano in modalità differenti, da condizioni specifiche quali: la notevole pendenza del terreno, la presenza di detrito sciolto e un abbondante apporto idrico. La vegetazione, inoltre, svolge un ruolo fondamentale per la stabilità del suolo tramite l'apparato radicale e intercetta e assorbe parte della precipitazione; per cui la sua mancanza è un ulteriore fattore che può favorire la formazione di fenomeni. L'elemento naturale che determina l'innesco di colata è l'acqua che può essere generata da diverse fonti, tra cui eventi temporaleschi intensi e di breve durata, i più comuni durante la stagione estiva,

disgelo della neve o cedimenti di invasi artificiali; essa va a formare il deflusso superficiale responsabile della generazione del fenomeno.

Il fenomeno di una colata detritica è quindi sintetizzabile attraverso tre principali processi sequenziali (Fig. 3):

1. L' elevato apporto meteorico con un conseguente deflusso superficiale che impatta sui sedimenti e innescano la colata;
2. Il deflusso che incorpora materiale detritico e forma la corrente solido – liquido, inizialmente formando una colata immatura senza selezione dei sedimenti. La colata, propagandosi verso valle, acquista velocità erodendo, il fondo del canale;
3. La propagazione verso valle della corrente solido – liquido è influenzata dai fenomeni di erosione e di deposito del materiale. La colata formatasi è matura e presenta un accumulo dei sedimenti nella parte dell'onda posta verso valle. Il deflusso si arresta quando la pendenza del terreno consente il deposito del sedimento.

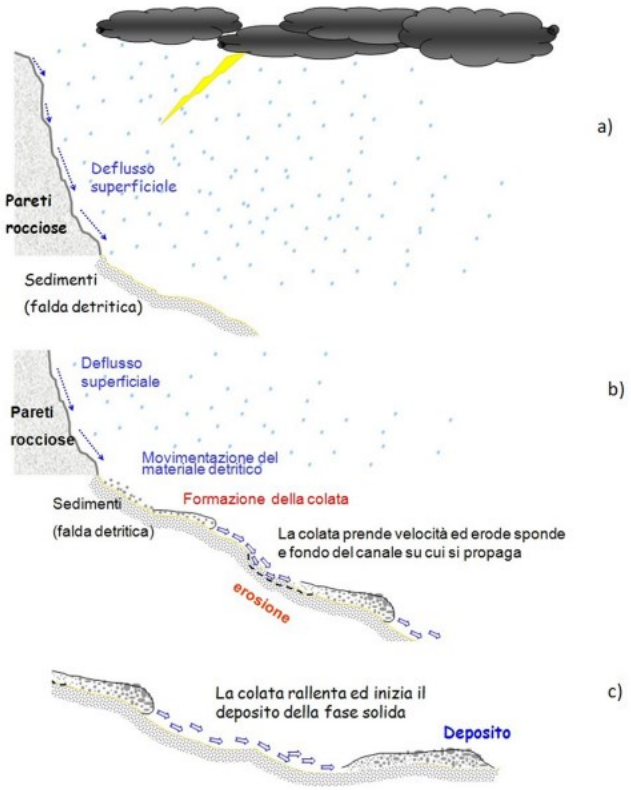

Figura 3 - Schematizzazione dei processi fisici che formano una colata detritica (Gregoretti, appunti lezioni)

A ciascuno dei processi fisici descritti è possibile associare una zona specifica del bacino idrografico. Si evidenziano tre principali parti: la zona di testata dove si innesca il fenomeno, la zona di trasporto, laddove il fenomeno procede verso valle, e la zona di deposito, in cui il fenomeno rallenta e si arresta, terminando la sua propagazione.

La zona di innesco, si trova nella parte più a monte del bacino dove è possibile riscontrare i depositi di materiale di diversa granulometria e il terreno presenta una scarsa copertura vegetativa. È il luogo in cui il deflusso superficiale ingloba i sedimenti andando a formare la corrente solido – liquida.

Successivamente si ha la propagazione del fenomeno verso valle, all'interno del canale di scorrimento nel quale il flusso risulta pressoché omogeneo e la profondità e concentrazione di materiale sono decrescenti da monte verso valle. Il corpo si muove ad elevata velocità lungo la zona di trasporto costituita da canali che si sviluppano in pendii ripidi. In questa fase è possibile che il deflusso incorpori ulteriore materiale solido derivante da frane e terreno instabile in prossimità del canale di scorrimento. A causa della velocità della corrente e a seconda della tipologia del terreno, la corrente solido – liquida erode il terreno con scavi anche superiori al metro.

La propagazione dell'onda di colata detritica termina nella zona di deposito che delinea il conoide alluvionale, caratterizzata da pendenze ridotte e quindi sviluppatesi attraverso un accumulo sempre maggiore di sedimenti di piccole dimensioni trasportato dal corso d'acqua. Il fenomeno di arresto del materiale è dovuto alla diminuzione dell'energia, conseguente a una riduzione della velocità del flusso solido – liquido, che comporta il deposito della componente solida. Caratteristica del conoide alluvionale è un grado di confinamento dell'alveo inferiore rispetto a quello di un canale, per cui il deflusso ha la possibilità di allargarsi ed esondare lateralmente dissipando ulteriormente energia e favorendo l'aumento della superficie di deposito. Nei bacini idrografici alpini, il conoide alluvionale spesso è caratterizzato da una forte antropizzazione con la cospicua presenza di abitazioni e infrastrutture.

Il fenomeno della colata detritica ha un frequenza variabile di difficile previsione poiché dipende da numerosi fattori quali: la piovosità locale, la forma e la morfologia del bacino come la pendenza e la densità del reticolo idrografico, la forma e la morfologia del luogo di innesco e in particolare più il canale è stretto e pendente, più la velocità del flusso e la capacità erosiva aumentano, la disponibilità e le dimensioni del materiale solido. Per quanto riguarda quest'ultimo fattore, è importante conoscere la quantità di sedimento che la colata può mobilitare e il tasso di ricarica del canale. È possibile distinguere due tipologie di bacini a seconda della disponibilità di sedimento (Bovis e Jakob, 1999):

- Disponibilità di detrito limitata
  È un fattore limitante per la verifica delle colate detritiche poiché sono necessari lunghi tempi di ricarica fra un evento e quello successivo. Per far sì che avvenga una colata detritica, il canale e il bacino devono aver raggiunto un valore di sedimento limite tale da far avvenire il suo innesco, detto "soglia intrinseca";

- Disponibilità di detrito illimitata
  L'innesco di una colata detritica è condizionata dalla possibilità di mobilizzare il materiale solido presente all'interno del canale. La colata si innesca quando il deflusso superficiale è tale da mobilitare il sedimento, sono quindi necessarie delle precipitazioni maggiori del valore soglia, detta "soglia estrinseca".

Nei capitoli successivi vengono presentati il caso studio del Bacino del Rio Toèl Lench (Canazei, TN) e l'evento atmosferico del 29 ottobre 2018 che ha portato alla formazione della colata detritica. Successivamente, a partire dalle precipitazioni massime annuali nel bacino oggetto di studio, si effettua un'analisi statistico – probabilistica delle piogge in modo tale da calcolare l'idrogramma solido – liquido necessario per la simulazione dell'evento. La modellazione avviene mediante D.F.R.M., un modello a celle bifase sviluppato dal Prof. Gregoretti et al. (2019) utilizzato per la propagazione delle colate detritiche in ambiente alpino.

2 L'AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento territoriale

Il bacino del Rio Toèl Lench si trova nella Provincia Autonoma di Trento all'interno del Comune di Canazei in Val di Fassa (TN), e in particolare la colata detritica avvenuta si è verificata nel Rio Toèl Lench in Località Palua nella frazione di Alba di Canazei (Fig. 4).

La Val di Fassa costituisce una delle principali valli nelle Dolomiti. Si trova nel Trentino nord-orientale e confina con la Provincia Autonoma di Bolzano e la Provincia di Belluno; è costituita da sette comuni, e procedendo da monte verso valle Canazei ne è il primo. La Valle è caratterizzata dalla presenza del torrente Avisio, originato dal ghiacciaio della Marmolada ed affluente di sinistra dell'Adige, che funge da confine naturale con la Val di Fiemme.

Il comune di Canazei, caratterizzato dal turismo estivo e invernale, si trova nella parte settentrionale della Val di Fassa; confina a Nord con i comuni di Corvara in Badia (BZ) e Selva di Val Gardena (BZ), a Est con Livinallongo di Col di Lana (BL), a Ovest con Campitello di Fassa (TN) e a Sud con San Giovanni di Fassa (TN). Il Comune è suddiviso in tre frazioni, procedendo da Nord verso Sud si ha: Penia, Alba e Gries. Il territorio comunale si estende per una superficie di 67,02 km^2 e l'abitato di Canazei si trova a 1465 m s.l.m., gli abitanti sono circa 2000.

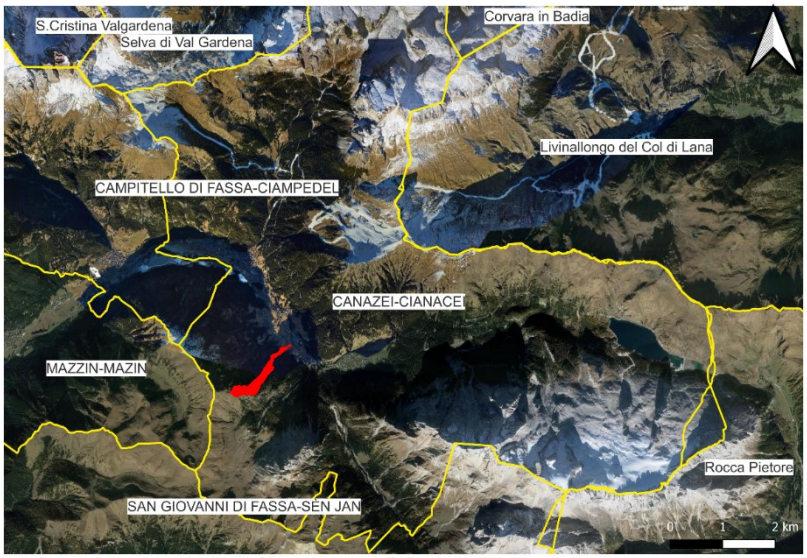

Figura 4 - Localizzazione del bacino di Toèl Lench all'interno del Comune di Canazei (TN)

2.2 Inquadramento bacino di studio

Il bacino del Rio Toèl Lench, luogo in cui è avvenuta la colata detritica durante la Tempesta Vaia (27 – 30 ottobre 2018), è localizzato sulla sinistra idrografica del torrente Avisio, tra il centro abitato di Alba di Canazei e gli impianti di risalita sciistici. Il bacino presenta una forma allungata e molto stretta, tipica dei piccoli bacini montani. Ha un'estensione di 0.161 km^2, e la quota massima e minima sono rispettivamente 2325 m s.l.m. e 1492 m s.l.m. Mediante il software Q-Gis, è stato possibile realizzare le mappe che rappresentano la pendenza, l'esposizione e l'altimetria del bacino.

In Figura 5 si osservano che le pendenze maggiormente riscontrabili nel bacino del Rio Toèl Lench sono comprese tra i 23° e i 43° (colore verde chiaro in mappa), con una pendenza media pari a 34°. Le zone colorate di arancione corrispondono alle massime pendenze, le quali si verificano tra la zona di testata e il canale di scorrimento. Si riscontra una pendenza di 43°-53° lungo il canale di scorrimento e nei pressi della zona di massima pendenza. Si fa notare che la zona posta più a monte del bacino non presenta pendenze elevate (colore verde scuro).

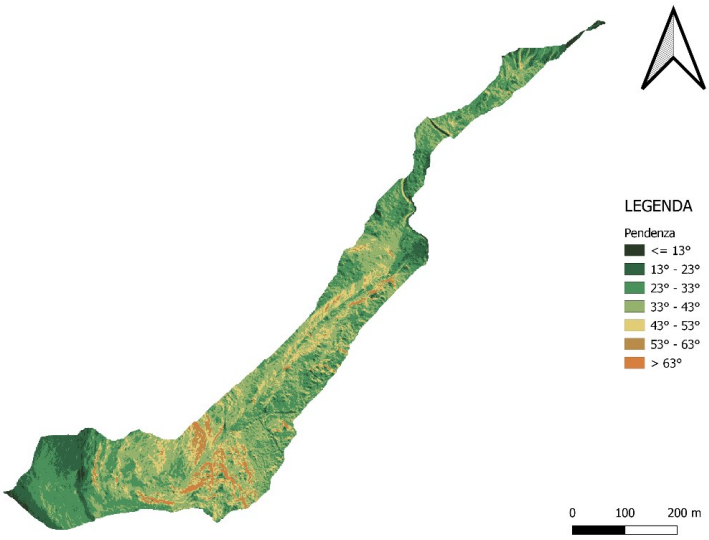

Figura 5 - Mappa delle pendenze del bacino Toèl Lench

L'esposizione di un bacino idrografico rappresenta l'orientamento della direzione massima della pendenza della superficie, ed è espressa attraverso l'angolo che la linea di massima pendenza forma con il Nord, calcolato in senso orario. Riguardo l'esposizione del bacino (Fig.6), si è proceduto con la classificazione rispetto agli assi cardinali ponendo il Nord pari a 0°. Si osserva che il bacino del Rio Toèl Lench è esposto ad Est e Sud Est nella zona di innesco della colata

(colore arancione), mentre a Nord e Nord – Est lungo il canale di scorrimento e la parte terminale del bacino (colori blu e rosso). Si osserva che in prossimità del canale principale la mappa è colorata di blu, a cui corrisponde un'esposizione a Nord.

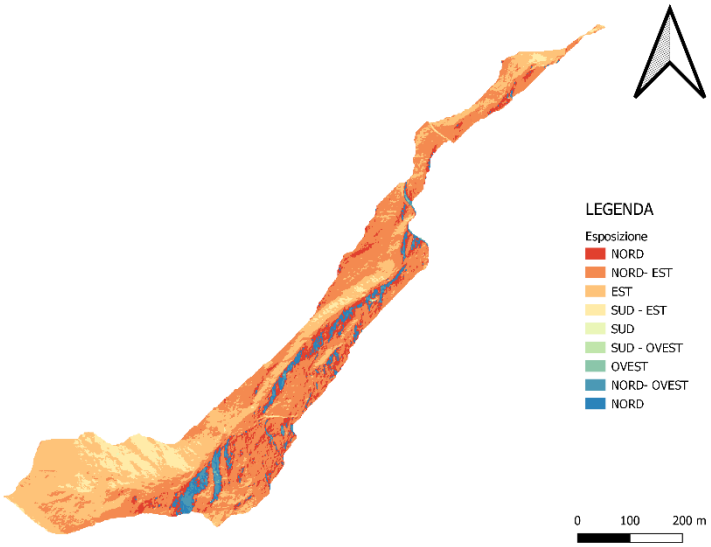

Figura 6 - Mappa dell'esposizione del bacino Toèl Lench

L'altezza massima del bacino è pari a 2325 m s.l.m. mentre la minima, in corrispondenza della sezione di chiusura, di 1492 m s.l.m. (Fig. 7).

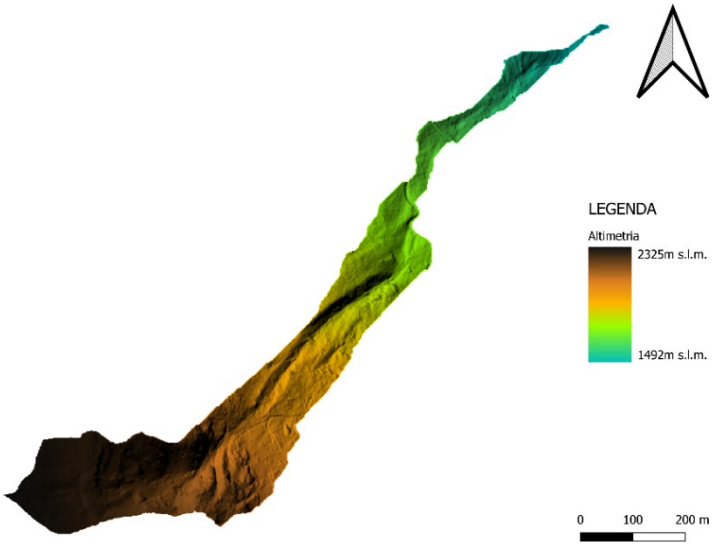

Figura 7 - Mappa dell'altimetria del bacino Toèl Lench

Si riportano i grafici che rappresentano la distribuzione delle aree e delle pendenze medie del bacino del Rio Toèl Lench rispetto alle fasce di quota (Grafico 1 e Grafico 2), elaborati attraverso Q-Gis ed Excel.

Grafico 1 - Istogramma della distribuzione delle aree rispetto alle fasce di quota, bacino di Toèl Lench

Si osservano aree poco estese in corrispondenza delle prime fasce di quota: questo aspetto lo si può dedurre anche attraverso Q-Gis ed è dovuto alla forma stretta e allungata del bacino nella parte più a valle, in particolare nei pressi della sezione di chiusura. A partire dai 1700 metri di quota, le aree iniziano ad estendersi in modo costante, mentre le maggiori estensioni si hanno intorno ai 2300 m s.l.m. dove vi è una piana. In corrispondenza delle quote massime, le aree diminuiscono in quanto il bacino si restringe concludendosi con un apice.

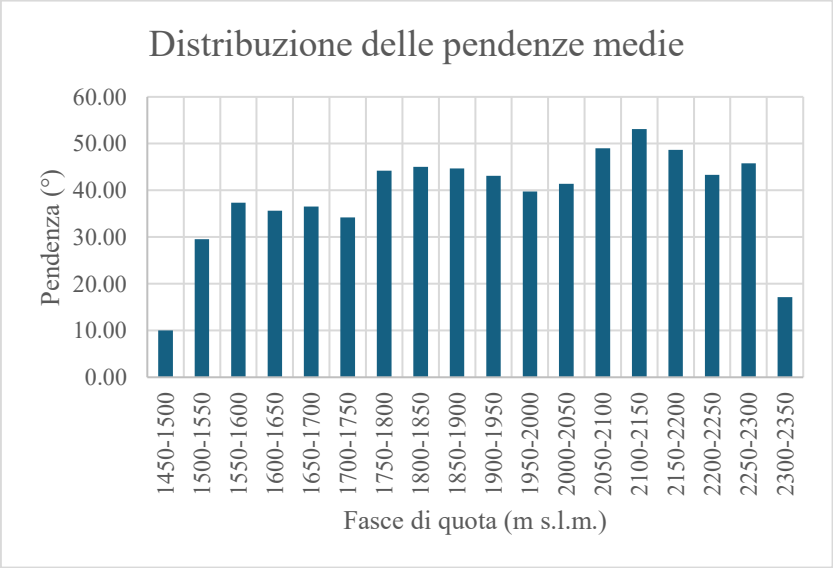

Grafico 2 - Istogramma della distribuzione delle pendenze medie rispetto alle fasce di quota, bacino di Toèl Lench

Rispetto alle aree, le pendenze media presentano una distribuzione costante ad eccezione delle quote minori e maggiori in corrispondenza rispettivamente della strada forestale e di una zona pianeggiante osservabile dal modello digitale del terreno.

Infine, viene presentata la curva ipsografica, o curva ipsometrica, del bacino elaborata a partire dal DTM mediante Q-Gis (Grafico 3). La curva descrive la distribuzione delle aree rispetto all'altitudine: una curva regolare descrive una distribuzione delle aree in equilibrio al variare della quota. Per il bacino oggetto di studio, si osserva un andamento costante tra le quote, e la quota media è pari a 1997 m s.l.m.

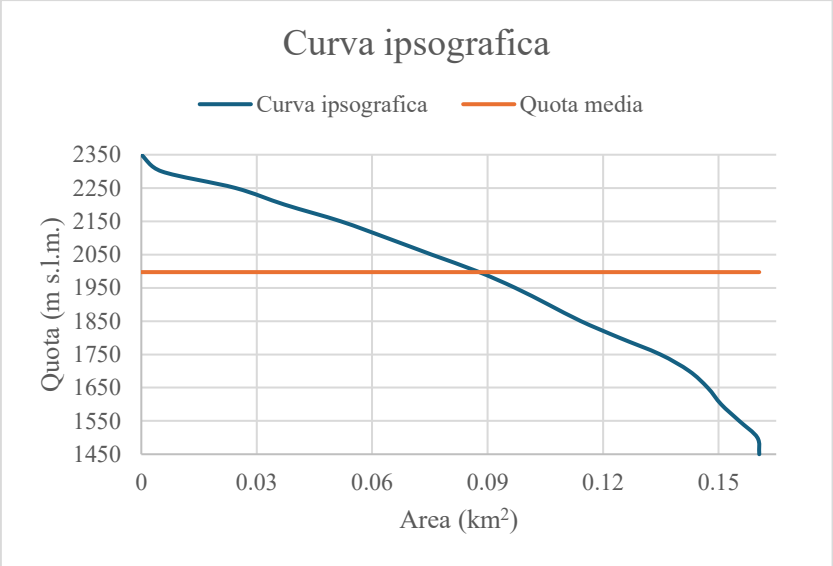

Grafico 3 - Curva ipsografica, bacino Toèl Lench

La curva ipsografica adimensionale è utile per confrontare il bacino oggetto di studio con altri bacini; il grafico presenta gli assi delle ascisse e delle ordinate compresi tra 0 e 1 e per questo motivo sono adimensionali. La curva fornisce informazioni relative allo stadio di evoluzione del bacino:

- Stadio giovanile: la curva è a monte dello stato di equilibrio a cui corrisponde un'elevata attività erosiva;
- Stadio senile: la curva è a valle dello stato di equilibrio a cui corrisponde una modesta attività erosiva;
- Stadio di maturità: la curva è allineata allo stato di equilibrio a cui corrisponde una media attività erosiva e il bacino si trova in equilibrio dinamico.

Si osserva una bacino non in equilibrio perché la curva ipsografica adimensionale non si avvicina alla bisettrice, alla quale corrisponde lo stato di equilibrio (Grafico 4). Il bacino del Rio Toèl Lench si trova complessivamente nello stadio giovanile.

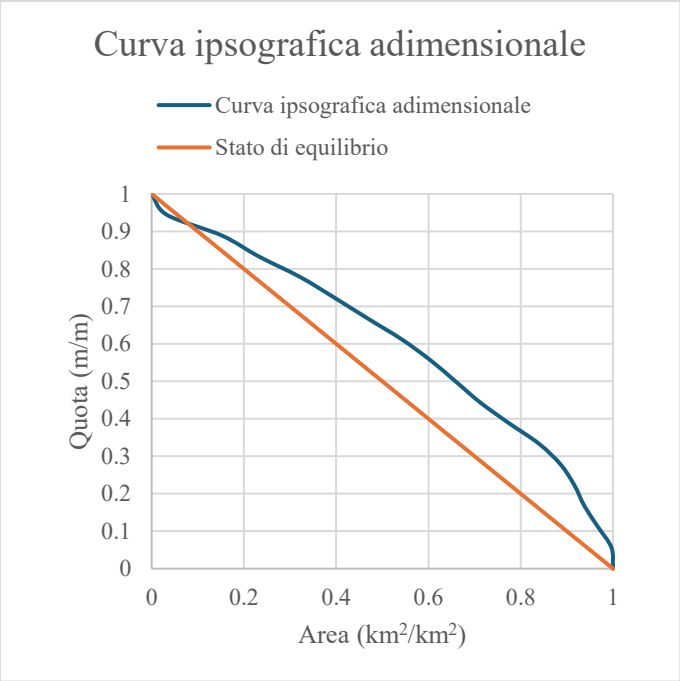

Grafico 4 - Curva ipsografica adimensionale, bacino Toèl Lench

2.3 Geologia di bacino

Dal punto di vista geologico, il bacino del Rio Toèl Lench risulta composto da due principali formazioni, e una terza limitata alla sezione di chiusura (Fig. 8).

La zona di innesco è formata sia da un substrato appartenente alla formazione del Monte Fernazza – Pillow breccias (IMFc, colore azzurro), sia da un substrato di formazione del Monte Fernazza – Caotico eterogeneo Auct (IMFa, colore giallo), di spessore variabile e associabile a grossi massi.

La parte centrale del bacino è formata da entrambi i substrati precedenti, con una maggioranza di IMFa, e in particolare è presente una limitata formazione di Werfen – Membro di Andraz (WER3, colore viola) caratterizzato da dolomie marnose giallastre e siltiti rosse con spessore tra i 0.0 e i 7.0 metri.

La parte più a valle, a cui corrisponde la sezione di chiusura del bacino, è formata da un substrato del sintema postglaciale alpino, composto da depositi glaciali, di frana a grandi blocchi, di versante, rock glacier, alluvionali, da debris flow, lacustri e palustri con presenta di copertura pedogenetica.

Infine, il tratto centrale del bacino è interessato da faglia diretta (linea blu con tratto) e nella parte più a monte anche da un limitato scorrimento principale (linea blu con triangolo).

Per ulteriori informazioni e approfondimenti si invita alla consultazione della "Carta geologica" messa a disposizione sul sito della Protezione Civile della Provincia Autonoma di Trento.

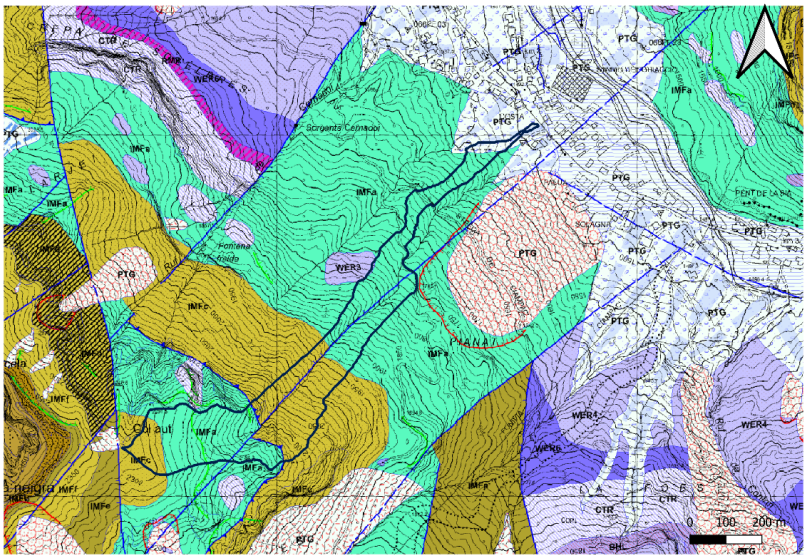

Figura 8 - Carta Geologica del bacino Toèl Lench (Protezione Civile Trentino – PAT)

2.4 Reticolo idrografico

Secondo il metodo di Horton – Strahler di gerarchizzazione del reticolo idrografico, il bacino del Rio Toèl Lench presenta un ordine pari a 3. In particolare, si nota l'affluenza di un'importante canale secondario posto sulla destra idrografica del collettore (Fig. 9). Il canale principale, chiamato collettore, presenta una lunghezza di 1422 metri.

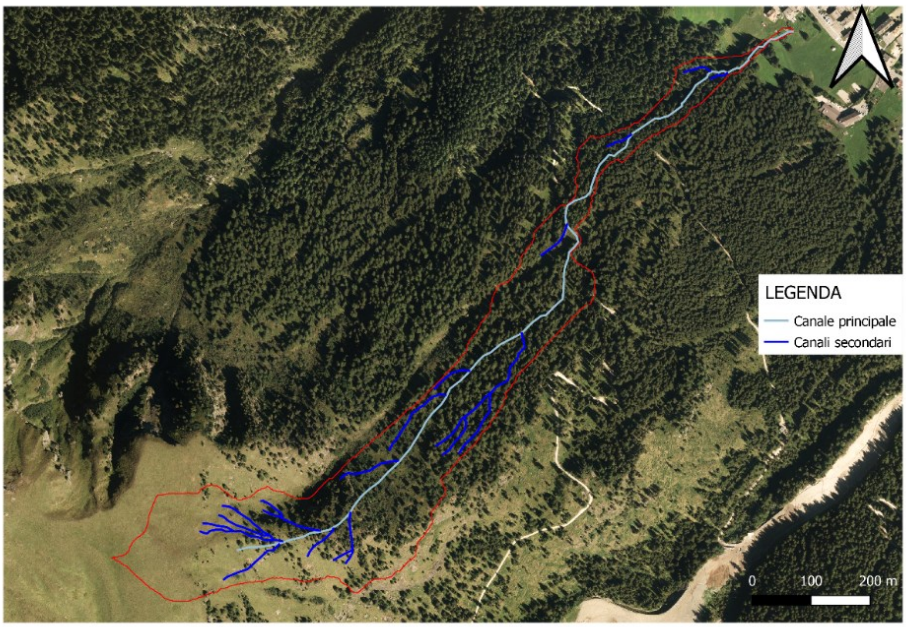

Figura 9 - Reticolo idrografico, bacino Toèl Lench

Di seguito è riportato il profilo altimetrico del collettore (Grafico 5), dal luogo in cui si origina alla sezione di chiusura. Il collettore ha una pendenza media di 30.4°.

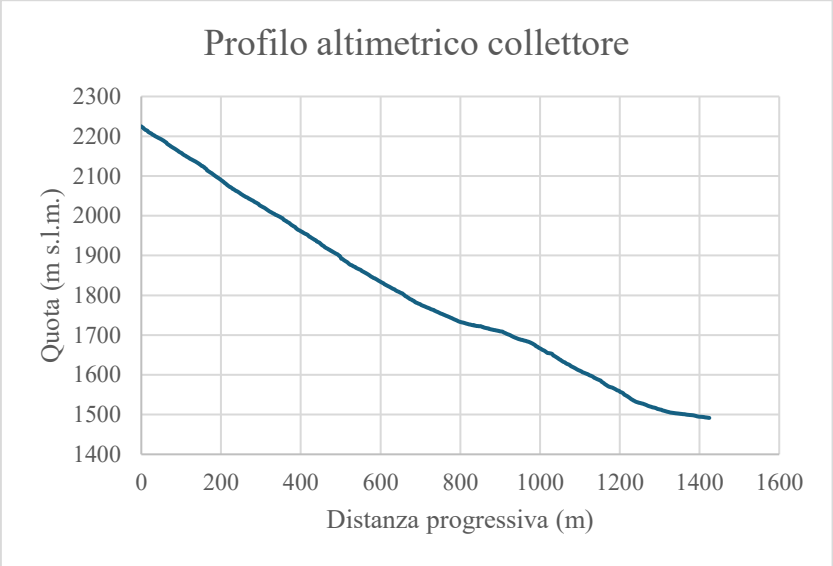

Grafico 5 - Profilo altimetrico del collettore, bacino Toèl Lench

Attraverso lo studio della mappa geologica (Web-Gis Geologia, PAT) non risultano essere presenti sorgenti all'interno del bacino del Rio Toèl Lench, per cui la rete idrografica si attiva in concomitanza di eventi di precipitazione o con lo scioglimento nivale. Attraverso la consultazione della mappa delle opere di sistemazione idraulico – forestali (Web-Gis Bacini Montani, PAT) non sono presenti opere all'interno del bacino precedenti all'evento oggetto di studio.

2.5 Parametri morfometrici del bacino

Si riporta una visione complessiva dei parametri morfometrici utili nella descrizione del bacino del Rio Toèl Lench e del suo reticolo idrografico. Tali parametri sono utili per comprendere la forma e la dimensione del bacino, in particolare:

Coefficiente di forma di Gravellius (F) è il rapporto tra il perimetro del bacino e il perimetro di un cerchio di area pari a quella del bacino oggetto di studio. Il valore del coefficiente tende a 1 nel caso in cui la forma del bacino sia compatta e quindi regolare. Il coefficiente di forma di Gravellius è un numero adimensionale;

Indice di compattezza (Fc) è il rapporto tra la lunghezza del canale principale e la radice dell'area del bacino. È un fattore di forma del bacino come il coefficiente di Gravellius. L'indice di compattezza è un numero adimensionale;

Numero di Melton (Me) è il rapporto il dislivello e la radice dell'area; il dislivello è dato dalla differenza della quota massima del bacino e la quota dell'apice del conoide. Il valore del numero di Melton è un indicatore della tendenza sviluppare colate detritiche all'interno di un bacino, ammesso che ci sia al suo interno una quantità sufficiente di materiale movimentabile. In generale, i bacini che potenzialmente possono generare una colata detritica hanno $Me > 0.5$. Il numero di Melton è un numero adimensionale;

Densità di drenaggio (Dr) è il rapporto tra la lunghezza totale del reticolo idrografico e l'area del bacino. Questo parametro è influenzato dall'entità di pioggia annua e in generale Dr è compreso tra 1 km/km^2 e 10 km/km^2; inoltre è influenzato dalla copertura vegetale e dall'impermeabilità, dalla litologia e dall'erodibilità del terreno. Rappresenta il numero di chilometri di reticolo drenante per ogni chilometro quadrato di superfice di bacino.

Per quanto riguarda il bacino del Rio Toèl Lench, il coefficiente di forma di Gravellius e l'indice di compattezza sono pari rispettivamente a 3.2 e 3.54. Questi valori indicano che il bacino ha una forma non circolare ma piuttosto stretta e allungata, tipica dei piccoli bacini montani; infatti, il coefficiente di Gravellius non è prossimo a 1. Il valore del numero di Melton è di 2.1, ed essendo superiore a 0.5 si denota quindi un bacino predisposto alla formazione di colate detritiche. La densità di drenaggio è pari a 22.9 km^{-1}, un valore elevato sinonimo di una superficie impermeabile in cui il reticolo è ben ramificato e indica una scarsa copertura vegetale.

Si riporta una tabella che sintetizza le caratteristiche e i parametri morfometrici principali del Bacino del Rio Toèl Lench (Tab. 1).

	Parametri morfometrici		**Formula o metodo**	**Valore**
Bacino idrografico del Rio Toèl Lench	Superficie	A (km^2)	Digitale	0.161
	Perimetro	P (m)	Digitale	4603
	Quota massima	h_{max} (m s.l.m.)	Digitale	2325
	Quota della sezione di chiusura	h_{min} (m s.l.m.)	Digitale	1492
	Quota media	h_m (m s.l.m.)	$\frac{\sum H_i * A_i}{A_{tot}}$	1997
	Rilievo del bacino	(m s.l.m.)	$h_{max} - h_{min}$	833
	Pendenza media bacino	i_m (m/m)	Digitale	0.93
	Pendenza media bacino	i_m (°)	Digitale	33.8
Reticolo idrografico	Lunghezza reticolo idrografico	L_r (m)	Digitale	3687
	Lunghezza collettore	L (m)	Digitale	1422
	Coefficiente di forma - Gravellius	F (-)	$\frac{0.28P}{A^{0.5}}$	3.2
	Indice di compattezza	F_C (-)	$\frac{L}{A^{0.5}}$	3.54
	Numero di Melton	Me (-)	$\frac{\Delta h}{A^{0.5}} = \frac{h_{max} - h_{min}}{A^{0.5}}$	2.1
	Densità di drenaggio	D_r (km^{-1})	$\frac{L_r}{A}$	22.9
	N° segmenti di ordine 1	N	---	20
	Ordine del bacino	K	---	3
	Pendenza media collettore principale	$i_{m\ collettore}$(m/m)	Elaborazione dati da digitale	0.59
	Pendenza media collettore principale	$i_{m\ collettore}$ (°)	Elaborazioni dati da digitale	30.4

Tabella 1 - Principali parametri morfometrici del bacino Toèl Lench

3 L'EVENTO VAIA DEL 29 OTTOBRE 2018

Tra il 27 e il 30 ottobre 2018, il Nord-Est dell'Italia, e in particolare il Triveneto e nell'area alpina, è stato colpito da una perturbazione nord atlantica di intensità eccezionale. Questo evento, denominato "Tempesta Vaia", è stato caratterizzato da precipitazioni abbondanti e raffiche di vento caldo di scirocco fino ai 200 km/h. Quest'ultimo ha comportato la caduta di diversi alberi con la conseguente distruzione di ampie superfici di foresta; questa combinazione di pioggia e vento forte, unita alla morfologia del territorio alpino, ha favorito l'innesco di diverse colate detritiche andando così a identificarsi come un disastro naturale. Tale evento atmosferico era stato segnalato dalla Protezione Civile del Veneto attraverso una allerta rossa con elevata criticità di rischio idraulico ed idrogeologico, successivamente diramata anche alle vicine località del Trentino. Tuttavia, eventi atmosferici come questo sono imprevedibili sia nel tempo che nello spazio a causa della loro estensione limitata.

3.1 L'evento nel bacino di studio

Nel tardo pomeriggio e nella serata del 29 ottobre 2018, all'interno della perturbazione Vaia, ad Alba di Canazei (TN) e in particolare a monte del Rio Toèl Lench, è avvenuta una colata detritica che ha mobilitato nella parte finale del corso d'acqua tra i 2500 e 3000 m^3 di materiale (*Estratto relazione in.ge.na., 2018*); fortunatamente senza creare danni a persone, ma danneggiando abitazioni e infrastrutture.

Successivamente, la colata ha transitato lungo la Strada Statale "SS 641" che collega il centro abitato al Passo Fedaia, e procedendo verso sud ha occupato le strade secondarie e causato ulteriori danni, tra cui l'inagibilità del palaghiaccio comunale (Fig. 10 e Fig. 11). Nelle ore immediatamente successive, a causa della quantità elevata di fango e materiale grossolano, anche vegetale, trasportati nel fondovalle, sono state fatte evacuare diverse abitazioni e attività commerciali, e la strada statale è stata chiusa per il tempo necessario alla rimozione del materiale. Inoltre, si sono verificate delle interruzioni temporanee dell'energia e alla rete idraulica.

I danni si sono registrati anche nella parte medio – alta del bacino idrografico, dove alcune zone del bosco sono state rase al suolo danneggiando la strada forestale, che funge da strada di servizio per i vicini impianti di risalita e i sentieri.

Figura 10 - Colata detritica a monte del Rio Toèl Lench, Alba di Canazei (TN)

(l'Adige.it – Canazei: le immagini del disastro in paese)

Figura 11 - Colata detritica a valle della Strada Statale n. 641, Alba di Canazei (TN)

(l'Adige.it – Canazei: le immagini del disastro in paese)

Attraverso la Carta di Sintesi della Pericolosità (Provincia Autonoma di Trento), il territorio viene suddiviso in aree omogenee riguardo la tipologia dell'uso del suolo in relazione ai pericoli idrogeologici, valanghivi, sismici e di incendio boschivo, e a ciascuno viene assegnato un livello di pericolosità ordinaria e secondaria, e se è sottoposto a tutele speciali. Si osserva che il torrente e il territorio interessati dall'evento presentano un'elevata suscettibilità allo sviluppo di colate detritiche lungo l'intero reticolo idrografico (IDR003), includendo l'area in ambito torrentizio.

3.1.1 Analisi geologica e geomorfologica del bacino

Il bacino del Rio Toèl Lench presenta una alta permeabilità del suolo, facilitando l'assorbimento e il movimento dell'acqua al suo interno in poco tempo. In corrispondenza dell'evento di colata detritica avvenuto il 29 ottobre 2018, nel presente territorio sono stati mobilizzati 6449 m^3 di materiale (applicazione della formula empirica di D'Agostino e Marchi, 2001).

Per una migliore analisi territoriale, il canale principale del bacino è stato suddiviso in quattro zone, visibili in Figura 12:

- Testata – Tr01
  Zona più a monte del Rio in cui è possibile un nuovo fenomeno di colata, e tale area è caratterizzata dalla presenza di materiale detritico ai margini della conca e un terreno vegetato al centro, il rapporto tra la lunghezza e larghezza media pari a 120/120 m.
  La dinamica geomorfologica dell'alveo è di tipo colata di versante, con una disponibilità di materiale media – bassa e un basso grado di attività; non sono presenti depositi torrentizi fuori dall'alveo.
- Canale alto – Tr02
  Canale di trasporto e di erosione, caratterizzato da materiale roccioso di grande dimensione. È formato da materiale colluviale a matrice fine e nella parte alta è presente detrito di versante, e il rapporto tra lunghezza e larghezza media è pari a 550/2 m.
  La dinamica geomorfologica dell'alveo è caratterizzata dall'erosione e dal trasporto, con una discreta disponibilità di materiale e un alto grado di attività; sono presenti depositi torrentizi fuori dall'alveo.
- Deposito 1 – Tr03
  Zona a monte della Strada forestale, caratterizzato da deposito misto. È formato da depositi misti e il rapporto tra lunghezza e larghezza media è pari a 110/1.5 m.
  La dinamica geomorfologica dell'alveo è caratterizzata dall'erosione e dal trasporto, con un'elevata disponibilità di materiale e un basso grado di attività; sono presenti depositi torrentizi fuori dall'alveo.

- Canale basso – Tr04

  Canale di trasporto e di erosione, caratterizzato da una disponibilità maggiore di materiale rispetto ai precedenti zone poste più a monte. Si distingue per essere incassato e il cui letto è formato da roccia e detrito grossolano.

Da una analisi complessiva del tratto interessato dalla colata, da monte verso valle, si osserva una difficoltà di trasferimento del sedimento. Il materiale mobilizzato è di tipo sabbioso – limoso e il rapporto tra lunghezza e larghezza media è pari a 386/1.5 m.

La dinamica geomorfologica dell'alveo è caratterizzata dall'erosione e dal trasporto, con un'elevata disponibilità di materiale e un alto grado di attività; non sono presenti depositi torrentizi fuori dall'alveo.

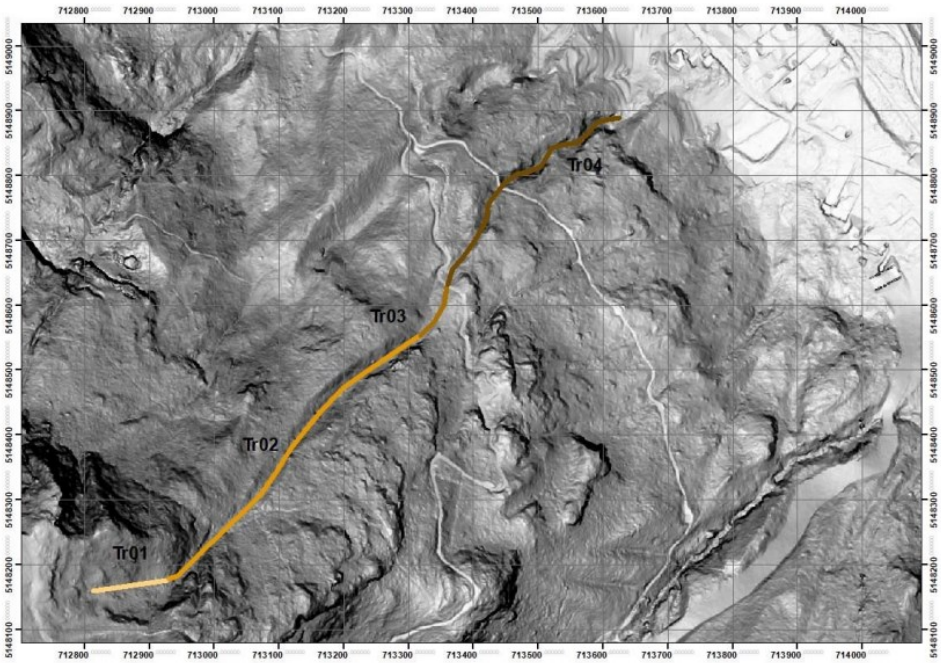

Figura 12 - Suddivisione in zone del bacino Toèl Lench (Relazione in.ge.na)

Di seguito si riporta una panoramica sui volumi mobilizzabili (*Report volumi solidi – in.ge.na, 2018*) rispetto ad ogni tratto, durante l'evento del 29 ottobre 2018 (Tab. 2). Viene considerata la possibilità di mobilizzazione di alcune porzioni distinte, in quanto risulta complessa l'analisi della mobilizzazione dell'intero bacino.

Volumi mobilizzabili (m^3)					
Tratto	**Volume alveo**	**Volume sponde**	**Apporti laterali**	**Volume totale tratto**	**m^3/m**
Testata (Tr01)	500	0	0	500	4.2
Canale alto (Tr02)	309	464	0	1753	3.2
Deposito1 (Tr03)	247	880	0	1128	10.3
Canale basso (Tr04)	173	2895	0	3069	8.0

Tabella 2 - Volumi mobilizzabili, bacino di Rio Toèl Lench 29/10/2018

Considerando l'attivazione sincrona di tutte le sorgenti di sedimento, il volume totale mobilizzabile è pari a:

$$\boldsymbol{Volume_{totale}} = 500 + 1753 + 1128 + 3069 = \mathbf{6449}\ \boldsymbol{m^3}$$

3.2 Consolidamento del tratto oggetto di studio

In seguito all'evento di colata detritica che ha coinvolto il bacino del Rio Toèl Lench (Canazei, TN), sono stati effettuati degli interventi di consolidamento di alcuni tratti del torrente. Le opere di mitigazione idraulica sono di diverso tipo a seconda della loro funzione. Per quanto riguarda i torrenti e i bacini montani, gli interventi hanno la funzione di regimazione, di correzione dell'alveo e di stabilizzazione dei versanti, costituendo così una sistemazione idraulica – forestale. Per quanto riguarda il bacino oggetti di studio, si sono effettuati i seguenti interventi:

- Rettifica del canale e consolidamento dell'attraversamento della strada forestale.
  Tale intervento è stato effettuato a circa metà della lunghezza del canale principale, con la funzione di diminuzione dell'erosione del fondo e delle sponde. Per il rivestimento è stato utilizzato del pietrame.
- Corazzatura dell'alveo e delle sponde, con realizzazione della piazza di deposito, visibili in Figura 13.
  Si tratta di un intervento passivo con lo scopo di intercettazione del materiale solido trasportato dal flusso solido – liquido, depositandolo senza creare danni alle infrastrutture poste a valle. Si è realizzata una piazza di deposito all'ingresso del conoide, in una zona a bassa pendenza e a monte della Strada Statale. Tale opera, al suo sbocco, presenta una

briglia filtrante il cui scopo è quello è di trattenere il materiale più grossolano, permettendo il deflusso della componente liquida. In questo modo il flusso solido – liquido che giungerebbe al centro abitato avrebbe un concentrazione molto bassa e, soprattutto, una minore entità. Sia la piazza di deposito che la briglia filtrante necessitano di una accurata manutenzione al fine di mantenere alta la loro funzionalità ed efficienza, in particolare devono essere svuotate dopo un evento di colata detritica.

Figura 13 - Opera di consolidamento dell'alveo, piazza di deposito e briglia filtrante nel bacino del Rio Toèl Lench

4 ANALISI STATISTICO – PROBABILISTICA DELLA PRECIPITAZIONE

4.1 Recupero dati di precipitazione

Al fine di una ricostruzione di un evento di colata detritica, è necessario reperire i dati disponibili riguardo la precipitazione caduta. Sono presenti due strumenti che forniscono informazioni sulla pluviometria: le stazioni pluviometriche e il radar. Per quanto riguarda l'analisi dei dati di questo lavoro, sono stati presi in considerazione i pluviometri delle stazioni meteo della zona.

I pluviometri, da cui si sono scaricati i dati, sono gestiti da *Meteo Trentino*, una struttura della Provincia Autonoma di Trento nata nel 1997 che si occupa si occupa di meteorologia, nivologia e glaciologia. Inoltre, fa parte dell'organizzazione della Protezione Civile e collabora con altre strutture di livello provinciale e nazionale che trattano temi analoghi. Dal sito di Meteo Trentino è possibile consultare i dati e le osservazioni, sia recenti che storici, per ciascuna stazione attraverso un elenco o la mappa; per ciascuna stazione è possibile scaricare le altezze di precipitazione storiche fino ad un intervallo di tempo pari a 5 minuti.

Il bacino oggetto di studio presenta una stazione pluviometrica denominata "Canazei (Ciampac) – T0229": è una stazione attiva, ma i dati sono disponibili a partire dal 10/09/2019. Per questo motivo è stata presa in considerazione una stazione prossima al bacino, per la quale fosse presente una serie storica e che abbia rilevato l'evento Vaia. Le stazioni attive più vicine al bacino oggetto di studio sono le seguenti: Campitello (Malga Do Col D'Aura), Canazei (Gries), Marmolada (Sas Del Mul) e Pian Fedaia (Diga). Sono inoltre presenti due stazioni dismesse: Canazei (Coi de Paussa), attiva dal 01/01/2009 al 09/05/2018, e Mazzin, attiva dal 01/09/1923 al 31/12/1966.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva delle stazioni pluviometriche più prossime al bacino, ed è evidenziata quella di riferimento per le analisi di precipitazione (Tab. 3). Si riporta la localizzazione delle stazioni più prossime al luogo dell'evento (Fig. 14).

Stazione	Codice	Quota (m s.l.m.)	Distanza da bacino di studio (km in linea d'aria)	Inizio rilievi	Stato stazione
Campitello (Malga Do Col D'Aura)	T0229	2050	9.5	02/09/2002	Attiva
Canazei (Ciampac)	T0403	2150	1	10/09/2019	Attiva
Canazei (Gries)	T0437	1465	2.8	28/03/2012	Attiva
Canazei (Coi de Paussa)	T0445	2376	6.5	01/01/2009	Dismessa (09/05/2018)
Marmolada (Sas Del Mul)	T0404	2606	8.5	19/09/2014	Attiva
Mazzin	T0265	1380	5.5	01/09/1923	Dismessa (31/12/1966)
Pian Fedaia (Diga)	**T0092**	**2063**	**7**	**01/01/1938**	**Attiva**

Tabella 3 - Stazioni meteo più prossime al bacino Toèl Lench

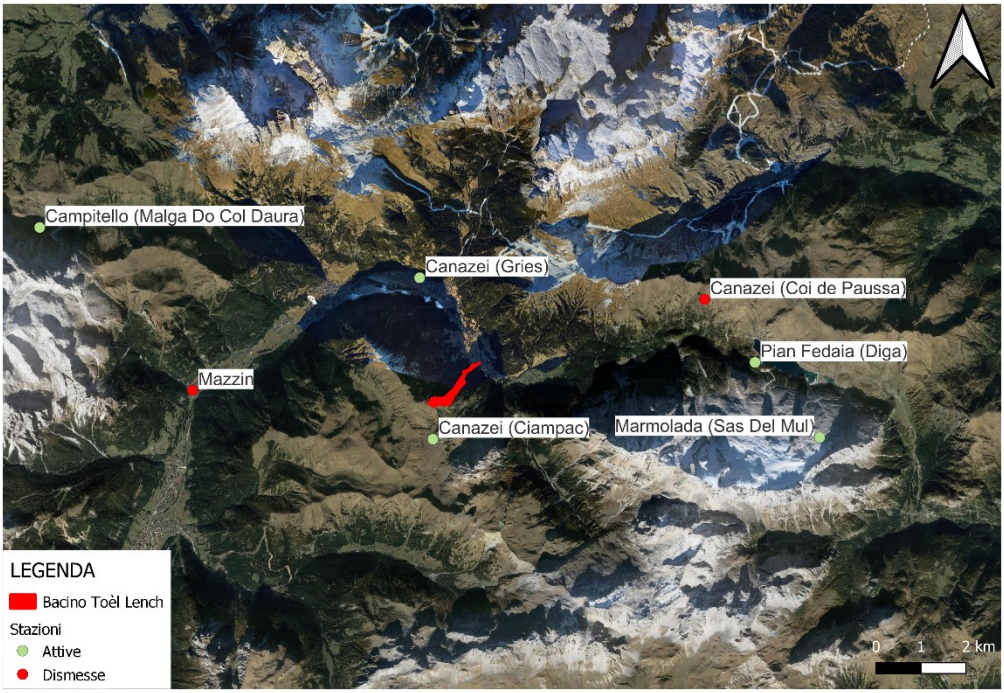

Figura 14 - Localizzazioni stazioni meteo rispetto al luogo dell'evento

La precipitazione nel bacino di studio

Con una prima analisi dei dati di pioggia inerenti al periodo dell'evento, dal 28 al 31 ottobre 2018 in concomitanza con la tempesta Vaia, si osserva come le precipitazioni siano state localizzate.

Facendo riferimento al 29 ottobre 2018, giorno di massima intensità registrata in tutte le stazioni, si nota una pioggia cumulata pari a 54.2 mm nella stazione di Campitello (Malga Do Col), 66 mm nella stazione di Canazei (Gries) e 170.2 mm nella stazione di Pian Fedaia (Diga).

In particolare, durante il periodo dell'evento, nella stazione di Pian Fedaia (Diga), stazione di riferimento per l'analisi delle precipitazioni massime annuali e per la costruzione delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP), si osservano le seguenti precipitazioni cumulate (Tab. 4):

Stazione: Pian Fedaia (Diga)	
Data	**Precipitazione cumulata (giornaliera)**
27/10/2018	67.4 mm
28/10/2018	102.0 mm
29/10/2018	170.2 mm
30/10/2018	14.8 mm

Tabella 4 - Stazione di Pian Fedaia (Diga): precipitazione cumulata dal 27/10/2018 al 30/10/2018

Dall'osservazione della precipitazione cumulata precedente, si osserva come l'evento sia stato concentrato in due giorni (28 e 29 ottobre 2018), e il picco delle 24 ore si ha il giorno 29.

Analizzando la precipitazione registrata il 29 ottobre 2018 alla stazione di Pian Fedaia (Diga), si osserva una maggiore intensità dalle 13:30 fino alla sera (Grafico 6), e in particolare i picchi di precipitazione si hanno per una durata complessiva di 3 ore, tra le 17:30 e le 20:30 (Grafico 7) dove si è registrata una altezza cumulata di 61.4mm.

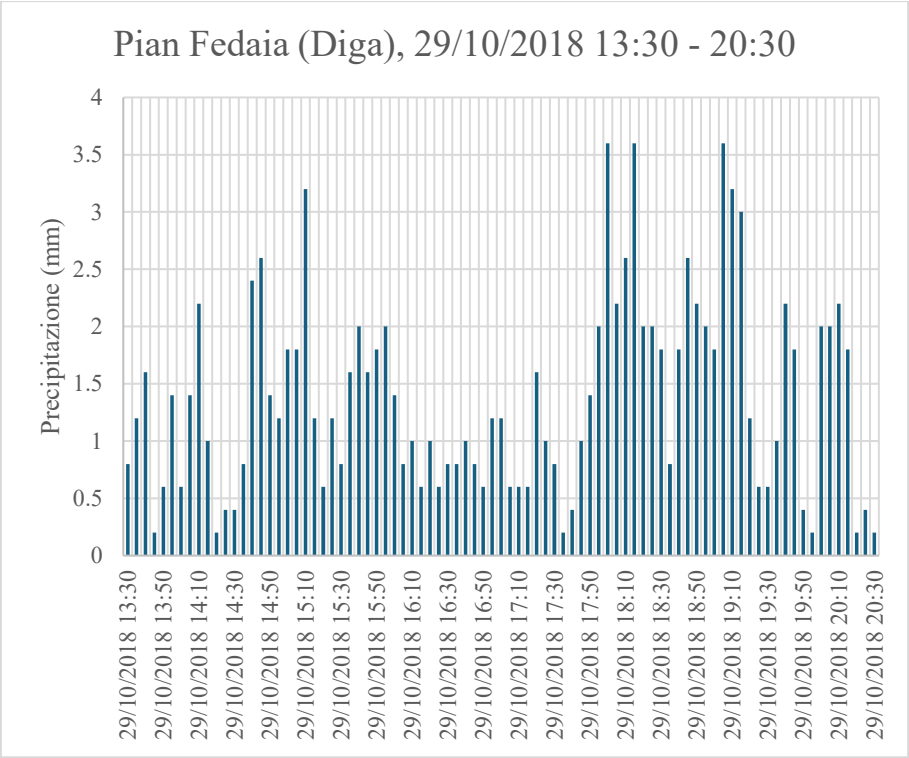

Grafico 6 - Istogramma precipitazione, Pian Fedaia (Diga) - 29/10/2018 dalle 13:30 alle 20:30

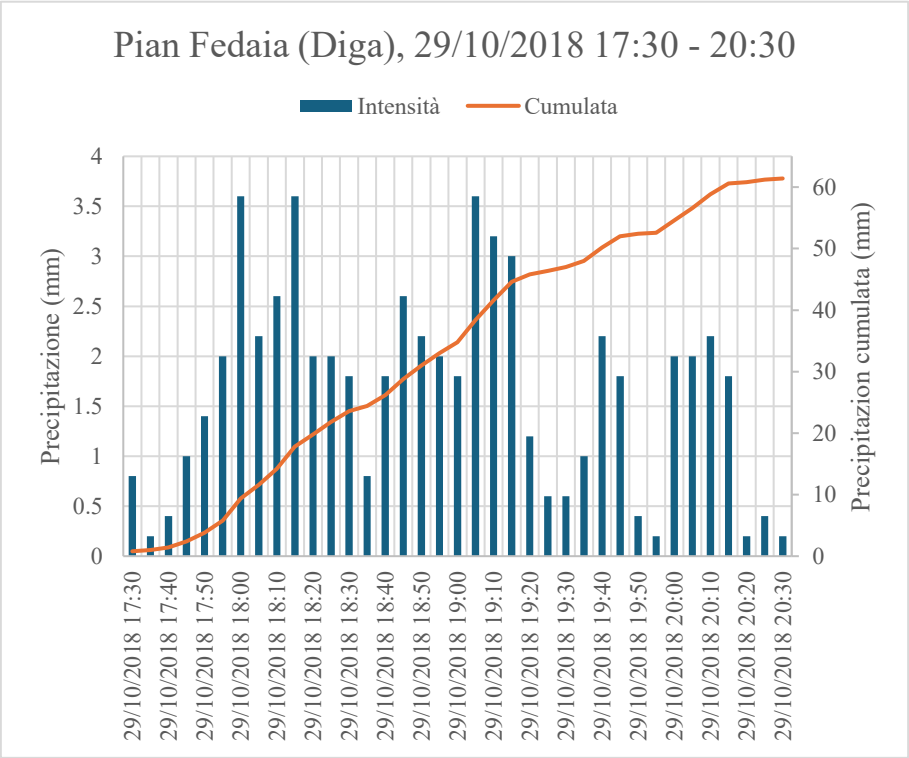

Grafico 7 - Istogramma precipitazione e curva di cumulata, Pian Fedaia (Diga) - 29/10/2018 dalle 17:30 alle 20:30

4.2 Analisi dati di precipitazione

Attraverso l'analisi statistica dei dati di precipitazione è possibile individuare la probabilità di accadimento degli eventi estremi di precipitazione, nonostante non si possano prevedere con certezza la data e la frequenza di avvenimento. Per effettuare una elaborazione statistico – probabilistica delle piogge intense del bacino oggetto di studio, va innanzitutto scelta la stazione attiva più vicina al sito oggetto di studio.

In questo caso la stazione scelta è quella di Pian Fedaia (Diga) – T0092 (la quale si trova a circa 6 km in linea d'aria dal luogo in cui è avvenuta la colata detritica): è situata nel Comune di Canazei (coordinate 46°27'32.5" N, 11°51'46.3" E) ad una quota di 2063 m s.l.m. (Meteo Trentino). Nonostante siano presenti stazioni attive più vicine al bacino oggetto di studio, si è scelta questa stazione poiché dispone di una serie storica di massime precipitazioni annuali più lunga fra quelle disponibili dei pluviometri presenti nell'area.

Di seguito sono riportati i dati di precipitazione dei massimi annuali dal 2009 al 2023 per ciascuna durata di tempo (Tab. 5) per durate di tempo di 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minuti, e 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 e 120 ore. I dati registrati ante 2009 presentano delle interruzioni e quindi non omogenei per l'analisi da effettuare.

Stazione di Pian Fedaia (Diga) Massimi di precipitazione annuali per intervallo di tempo (mm)														
Minuti	**5**	**10**	**15**	**30**	**45**	**60**	**180**	**360**	**720**	**1440**	**2880**	**4320**	**5760**	**7200**
Ore	**0.083**	**0.167**	**0.25**	**0.50**	**0.75**	**1**	**3**	**6**	**12**	**24**	**48**	**72**	**96**	**120**
2009	5.2	8.4	10.4	15.4	19.2	21.4	40.4	48.8	72.4	81.0	109.0	109.6	109.6	115.2
2010	2.6	4.2	5.8	9.8	12.8	14.2	24.8	36.4	67.4	77.8	96.2	123.2	137.2	148.8
2011	2.6	4.4	5.6	8.4	9.0	10.4	23.4	31.2	53.2	76.8	80.8	91.6	106.4	114.6
2012	5.8	7.4	8.4	11.2	16.8	21.6	45.4	71.2	100.2	126.6	134.8	135.2	135.2	135.2
2013	4.0	7.8	11.0	16.4	17.8	19.0	25.0	46.2	75.8	113.0	128.4	139.6	152.4	156.6
2014	6.8	12.0	16.2	25.4	32.6	40.8	49.4	62.8	109.8	145.2	206.8	230.8	240.4	248.8
2015	3.6	5.8	7.4	10.6	13.2	15.4	33.0	56.8	60.0	63.2	66.6	87.0	98.8	99.6
2016	4.2	7.0	9.0	12.8	14.0	17.4	34.2	52.0	65.6	67.6	74.4	92.4	105.8	111.4
2017	6.4	8.8	11.2	13.2	17.8	19.8	24.0	33.4	50.6	65.6	69.8	105.8	106.2	109.6
2018	7.8	15.4	17.2	18.8	21.4	27.4	63.2	105.8	148.8	170.2	296.0	339.6	361.6	367.6
2019	7.2	14.2	20.0	30.6	36.0	39.6	49.4	61.6	68.6	100.6	122.2	152.6	155.8	191.2
2020	10.6	15.0	19.0	23.8	30.4	34.8	49.6	51.0	80.8	143.6	172.0	204.4	218.0	233.4
2021	7.2	11.0	14.2	17.8	19.2	20.0	42.6	47.8	58.8	70.4	82.0	90.0	92.8	131.4
2022	6.2	8.0	9.6	12.8	14.6	15.6	20.2	23.2	29.0	31.8	50.0	58.2	74.6	78.2
2023	5.0	6.0	7.8	10.4	12.0	13.8	33.8	57.0	82.2	116.4	126.6	133.8	169.6	182.4

Tabella 5 - Precipitazione massima annuale per intervallo di tempo, stazione di Pian Fedaia (Diga) dal 2009 al 2023

4.2.1 Regolarizzazione statistica secondo Gumbel

La regolarizzazione statistica è effettuata attraverso il metodo di Gumbel, a partire dalla precipitazione massima annuale rilevata dalla stazione pluviometrica di Pian Fedaia (Diga) dal 2009 al 2023, ed è necessaria per la determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP).

Questo metodo si basa sull'analisi di campioni in cui:

a) Il campione rappresenta una serie storica di precipitazioni massime annuali;
b) La serie dei campioni in esame deve essere rilevata in modo continuato e senza interruzioni;
c) Il campione deve essere omogeneo, e quindi i dati devono essere rilevati dallo stesso pluviografo;
d) Il campione deve essere rappresentativo, e quindi contenere informazioni riguardo la popolazione oggetto di analisi.

Prima di effettuare la regolazione statistica delle precipitazioni, è necessario descrivere il campione attraverso il calcolo dei parametri statistici – probabilistici fondamentali, quali:

- Numerosità (N)
- Media (x_m)
- Valore massimo (x_{MAX}) e valore minimo (x_{MIN})
- Varianza $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N-1}$
- Deviazione standard $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N-1}}$
- Coefficiente di variazione $CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$
- Mediana
- Numero di classi $k = 1.5\ln(N+1)$ con la verifica di Iman e Canover ($2^k > N$) e il delta classe

La descrizione è completata con il calcolo della frequenza cumulata e frequenza relativa, entrambe sia in valori percentuali e millimetrici; inoltre viene realizzato il grafico della frequenza relativa in modo tale da dare un giudizio riguardo la distribuzione di numerosità rispetto alle classi di precipitazione.

La regolarizzazione delle precipitazioni si basa sul concetto di Tempo di Ritorno (TR). Il Tempo di Ritorno è il numero di anni entro il quale un evento assume una probabilità (F'(x)) di essere uguagliato o superato mediamente una sola volta. Il Tempo di Ritorno e la probabilità di uguagliamento o superamento sono legati dalla seguente relazione (4.1):

$$TR = \frac{1}{F'(x)} = \frac{1}{1-P(x)} \tag{4. 1}$$

Con: $F'(x)$ probabilità di uguagliamento o superamento

$1 - P(x)$ probabilità di non uguagliamento o superamento

È quindi possibile ottenere la probabilità di non uguagliamento o superamento in funzione del Tempo di Ritorno (4.2):

$$P(x) = \frac{TR-1}{TR} \tag{4. 2}$$

Infine, è possibile determinare l'altezza di precipitazione attesa per un qualsiasi valore del Tempo di Ritorno attraverso il calcolo della variabile ridotta y (4.7), necessaria per la regolarizzazione di Gumbel per il calcolo della probabilità di non uguagliamento o superamento $P(x)$ (4.3).

$$P(x) = e^{-e^{-y}} = e^{-e^{-\alpha(h-u)}} \tag{4. 3}$$

Con l'altezza di precipitazione h pari a (4.4):

$$h = \frac{y}{\alpha} + u \tag{4. 4}$$

I parametri α (4.5) e u (4.6) sono calcolati attraverso il metodo dei momenti, e dipendono dalla deviazione standard del campione e dal valore medio:

$$\alpha = \frac{1.283}{\sigma} \qquad \sigma \quad \text{Deviazione standard (mm)} \tag{4. 5}$$

$$u = x_m - \frac{0.5772}{\alpha} \qquad x_m \quad \text{Valore medio (mm)} \tag{4. 6}$$

$$y = -\ln\left(-\ln\left(P(x)\right)\right) \tag{4. 7}$$

Esistono due metodi differenti per la determinazione della $P(x)$ (Plotting Position): può essere ottenuta attraverso la probabilità empirica, nel caso in cui si tratti dell'altezza di precipitazione teorica, oppure attraverso il concetto di Tempo di Ritorno, nel caso in cui si tratti dell'altezza di precipitazione attesa applicando le equazioni (4.2).

Applicando il primo caso, e quindi ponendo $P(x) = P_{emp}(x)$, è possibile verificare il buon adattamento della serie storica oggetto di studio rispetto al campione di popolazione. Infatti, nel caso in cui la distribuzione dovesse assumere un andamento pressoché lineare, dimostrerebbe che la probabilità empirica utilizzata rappresenta il campione utilizzato, per cui esisterebbe una relazione lineare tra le altezze di precipitazione e la variabile ridotta. È possibile effettuare tale verifica attraverso due tipologie di probabilità empiriche: Weibull (4.8) e Hazen (4.9).

$$P_{emp(Weibull)} = \frac{i}{N+1} \tag{4. 8}$$

$$P_{emp(Hazen)} = \frac{i-0.5}{N} \tag{4. 9}$$

Con: i Posizione i-esima dell'ordine (-)

N Numerosità del campione (-)

Attraverso il calcolo della P_{emp}, è possibile calcolare la variabile ridotta y e infine l'altezza di precipitazione, secondo Weibull e secondo Hazen, applicando l'equazione (4.4). Infine, ogni serie storica è rappresentata attraverso il cartogramma di Gumbel che permette di effettuare il confronto tra i dati osservati e risultati teorici.

Una volta calcolate le altezze di precipitazione, è necessario scegliere uno dei due metodi: la scelta è effettuata in base alla miglior distribuzione probabilistica, su base grafica, della serie teorica rispetto a quella storica.

4.2.2 Test statistico di Matalas

La verifica della bontà dell'adattamento della serie teorica rispetto a quella storica può essere effettuata anche mediante analisi statistica. Il test statistico utilizzato è quello di Matalas et. al (1975), il quale, a partire dai cartogrammi di Gumbel, verifica che l'asimmetria (G) della serie storica non differisca in maniera statisticamente significativa dalla serie teorica. Il livello inferiore statistico è pari al 5%.

Il calcolo dell'asimmetria è effettuata attraverso il rapporto del momento 3 rispetto il momento 2 (4.10):

$$G = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} = N^{\frac{1}{2}} \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_m)^3}{\left[\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_m)^2\right]^{3/2}} \qquad (4.\ 10)$$

Con: x_i i-esimo valore di precipitazione (mm)

x_m valore medio di precipitazione (mm)

Il Test statistico di Matalas è verificato quando vale la seguente relazione (4.11):

$$|G - E(\gamma)| =< 2\sigma(\gamma) \qquad (4.\ 11)$$

Con: G asimmetria del campione

$E(\gamma)$ media delle asimmetrie per distribuzioni con numerosità N

$\sigma(\gamma)$ deviazione standard per distribuzioni con numerosità N

$E(\gamma)$ e $\sigma(\gamma)$ sono due parametri il cui valore è letto nell'apposita tabella (Tab. 6) ed è in funzione della numerosità del campione. Nel caso in cui la numerosità sia compresa tra due valori, va effettuata una interpolazione lineare per ottenere i due valori corretti.

N	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$E(\gamma)$	0.525	0.74	0.841	0.898	0.937	0.964	0.986	1.002	1.015
$\sigma(\gamma)$	0.626	0.586	0.555	0.526	0.504	0.485	0.468	0.452	0.437

Tabella 6 – Parametri $E(\gamma)$ e $\sigma(\gamma)$ in funzione della numerosità del campione (N) (Matalas et. al, 1975)

Si osserva un andamento crescente all'aumentare della numerosità per $E(\gamma)$, mentre $\sigma(\gamma)$ decresce con l'aumento di numerosità.

In questo caso, la numerosità N è pari a 15 per tutti gli intervalli di tempo, per cui si effettua una interpolazione lineare tra le numerosità 10 e 20; i valori calcolati sono i seguenti:

$$E(\gamma) = 0.525 + \left(\frac{5}{10}(0.740 - 0.525)\right) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.586 + \left(\frac{5}{10}(0.626 - 0.586)\right) = 0.606$$

4.3 Determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP)

Le Linee segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) esprimono la relazione tra l'altezza di pioggia (h), la durata dell'evento e la frequenza di accadimento. Esiste una linea per ciascun Tempo di Ritorno, e la relazione utilizzata per il calcolo è la seguente (4.12):

$$h = at^n \tag{4. 12}$$

Con a e n parametri che descrivono la relazione stessa, e in particolare a dipende dal TR. Tali parametri sono ottenuti attraverso l'interpolazione lineare dei valori ricavati dalle distribuzioni di probabilità espresse in una scala bi-logaritmica.

L'equazione precedente può essere espressa come segue (4.13, 4.14):

$$\log h = \log a + n \log t \tag{4. 13}$$

$$H = A + nT \tag{4. 14}$$

Con: h altezza di precipitazione attesa (-)

t tempo di precipitazione (ore)

n coefficiente angolare dell'equazione della retta

Attraverso questo procedimento è possibile ottenere i parametri a e n nell'equazione (4.12), utili per il calcolo dell'altezza di precipitazione corrispondente ai tempi di ritorno scelti.

Di seguito viene riportata la precipitazione attesa, nel bacino oggetto di studio, calcolata attraverso il metodo dei momenti di Gumbel, applicando la relazione lineare (logaritmica), i parametri dell'equazione di calcolo della LSPP e le Linee per ciascun Tempo di Ritorno.

5 RISULTATI DELLE PRECIPITAZIONI

5.1 Analisi statistico-probabilistica delle precipitazioni

In riferimento a quanto descritto nei capitoli 4.1 e 4.2, si riportano, per ciascun intervallo di tempo, i risultati delle analisi statistico-probabilistiche delle precipitazioni a partire dai valori massimi annuali di precipitazioni rilevati nella stazione di Pian Fedaia (Diga) – T0092 dal 2009 al 2023.

Di seguito si riportano i valori dei parametri α e u utilizzati per il calcolo della precipitazione secondo Weibull e Hazen e per la precipitazione attesa (Tab. 7).

Minuti	**Ore**	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{u}$
5	**0.08**	0.60	4.72
10	**0.17**	0.35	7.37
15	**0.25**	0.27	9.41
30	**0.50**	0.20	12.93
45	**0.75**	0.16	15.55
60	**1**	0.14	17.84
180	**3**	0.10	31.55
360	**6**	0.07	43.48
720	**12**	0.05	62.13
1440	**24**	0.03	79.50
2880	**48**	0.02	92.19
4560	**72**	0.018	107.45
5760	**96**	0.0173	117.52
7200	**120**	0.0171	127.87

Tabella 7 – Parametri α e u calcolati

Durata 5 minuti (0.08 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $2.60\ mm$ e un valore massimo di $10.60\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 8):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	2.60	mm
massimo (x_{max})	10.60	mm
media (x_m)	5.68	mm
varianza (σ^2)	4.60	mm
deviazione standard (σ)	2.14	mm
coeff. Variazione (CV)	2.65	-
mediana ($x_{mediana}$)	5.80	mm

Tabella 8 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 5 minuti

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 8) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 9), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

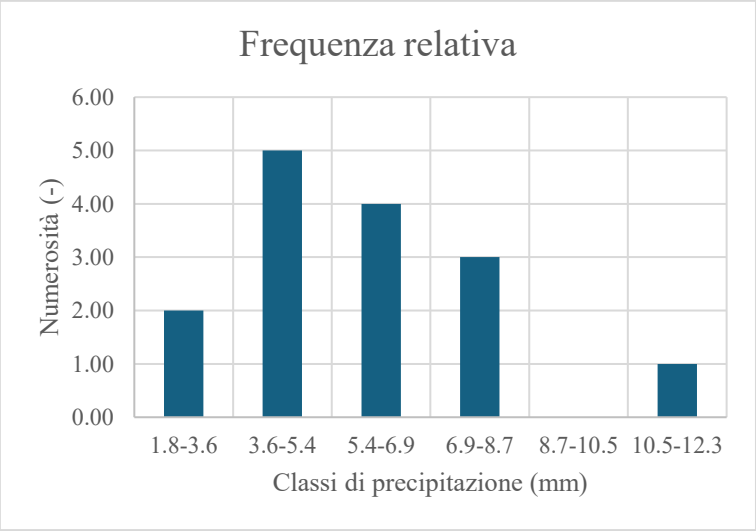

Grafico 8 - Frequenza relativa, durata 5 minuti

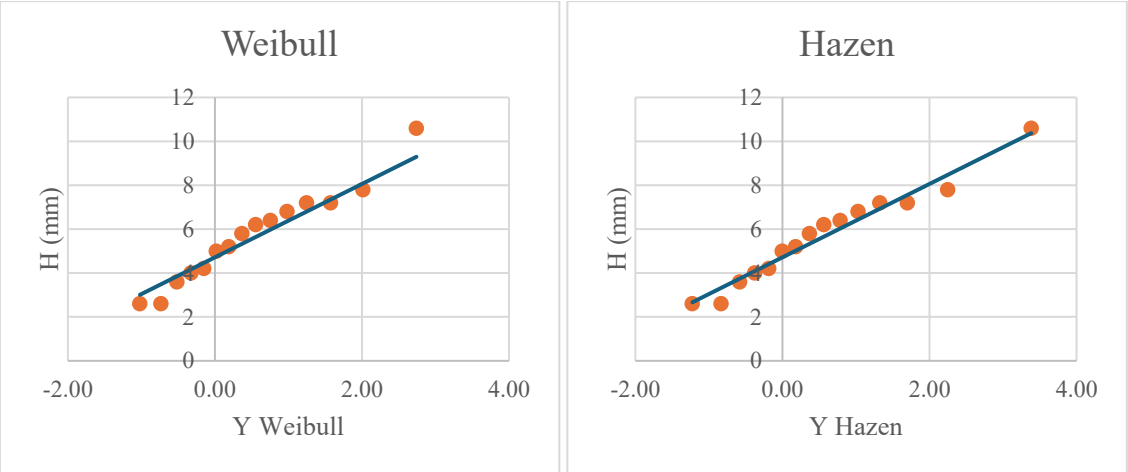

Grafico 9 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 5 minuti

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 9).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.46
G-E	-0.17
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 9 - Verifica Test di Matalas, durata 5 minuti

Durata 10 minuti (0.17 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $4.20\ mm$ e un valore massimo di $15.40\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 10):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	4.20	mm
massimo (x_{max})	15.40	mm
media (x_m)	9.03	mm
varianza (σ^2)	13.56	mm
deviazione standard (σ)	3.68	mm
coeff. Variazione (CV)	2.45	-
mediana ($x_{mediana}$)	8.00	mm

Tabella 10 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 10 minuti

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 10) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 11), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

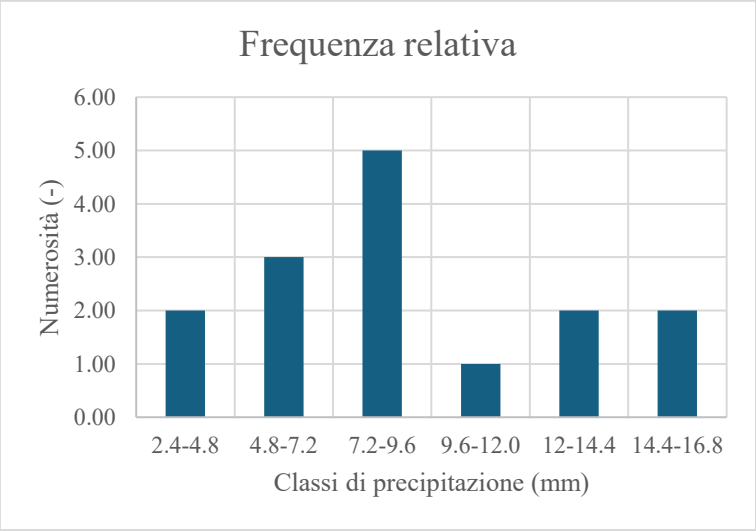

Grafico 10 - Frequenza relativa, durata 10 minuti

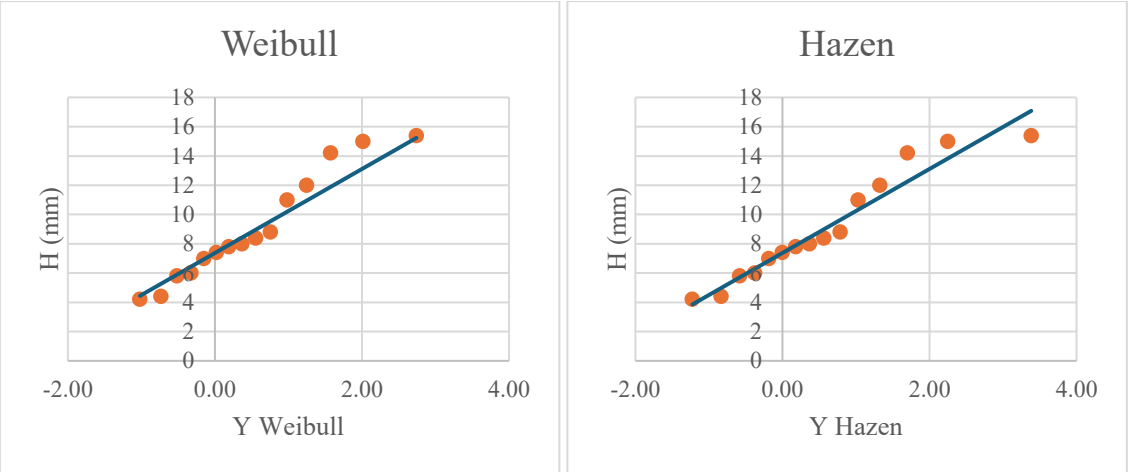

Grafico 11 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 10 minuti

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Weibull, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Weibull = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 11).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.53
G-E	-0.11
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 11 - Verifica Test di Matalas, durata 10 minuti

Durata 15 minuti (0.25 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $5.60\ mm$ e un valore massimo di $20.00\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 12):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	5.60	mm
massimo (x_{max})	20.00	mm
media (x_m)	11.52	mm
varianza (σ^2)	22.08	mm
deviazione standard (σ)	4.70	mm
coeff. Variazione (CV)	2.45	-
mediana ($x_{mediana}$)	10.40	mm

Tabella 12 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 15 minuti

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 12) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 13), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

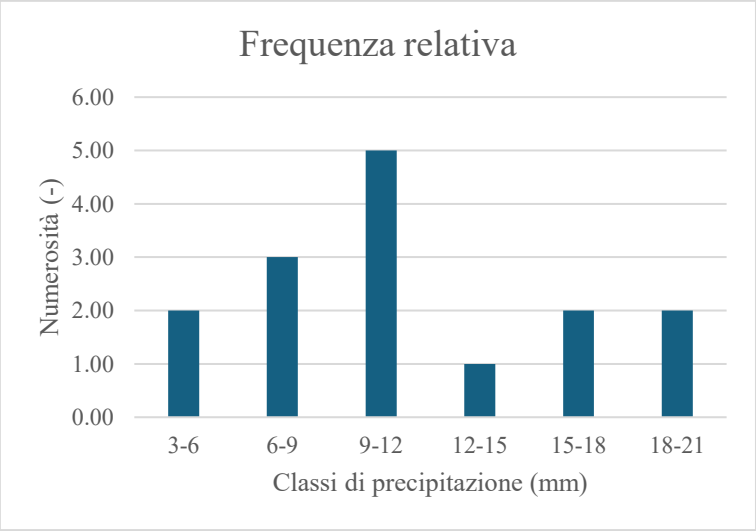

Grafico 12 - Frequenza relativa, durata 15 minuti

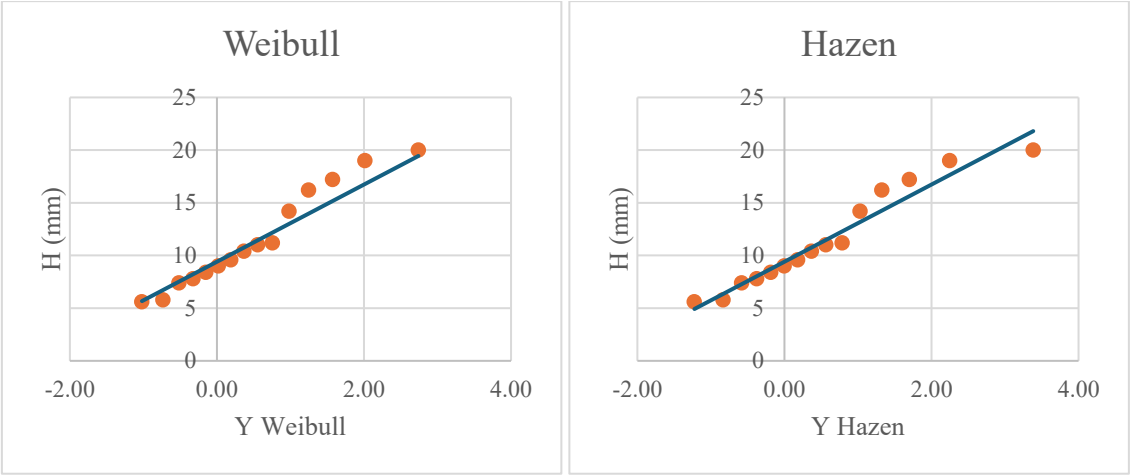

Grafico 13 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 15 minuti

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Weibull, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Weibull = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 13).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.54
G-E	-0.09
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 13 - Verifica Test di Matalas, durata 15 minuti

Durata 30 minuti (0.5 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $8.40\ mm$ e un valore massimo di $30.60\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 14):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	8.40	mm
massimo (x_{max})	30.60	mm
media (x_m)	15.83	mm
varianza (σ^2)	41.54	mm
deviazione standard (σ)	6.45	mm
coeff. Variazione (CV)	2.46	-
mediana ($x_{mediana}$)	13.20	mm

Tabella 14 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 30 minuti

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 14) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 15), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

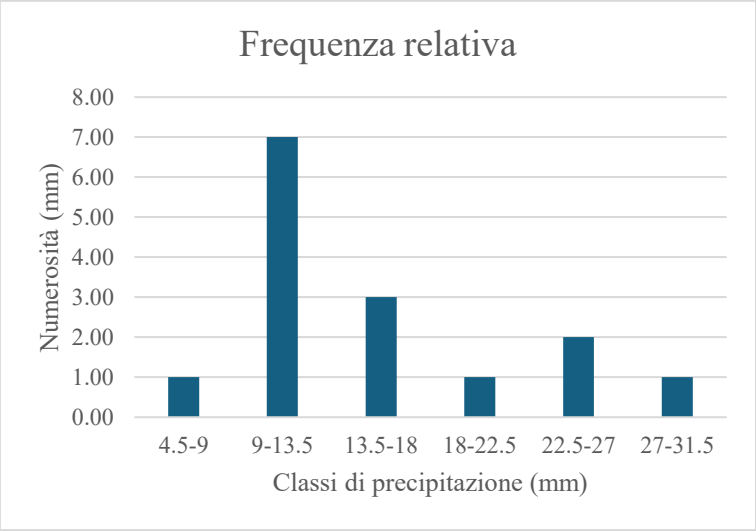

Grafico 14 - Frequenza relativa, durata 30 minuti

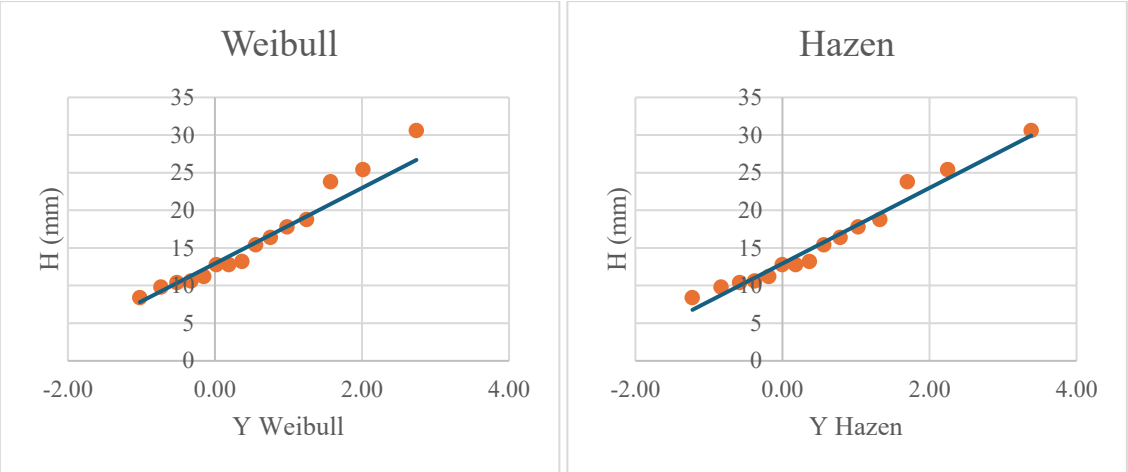

Grafico 15 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 30 minuti

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 15).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.98
G-E	0.34
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 15 - Verifica Test di Matalas, durata 30 minuti

Durata 45 minuti (0.75 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $9.00\ mm$ e un valore massimo di $36.00\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 16):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	9.00	mm
massimo (x_{max})	36.00	mm
media (x_m)	19.12	mm
varianza (σ^2)	63.05	mm
deviazione standard (σ)	7.94	mm
coeff. Variazione (CV)	2.41	-
mediana ($x_{mediana}$)	17.80	mm

Tabella 16 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 45 minuti

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 16) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (grafico 17), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

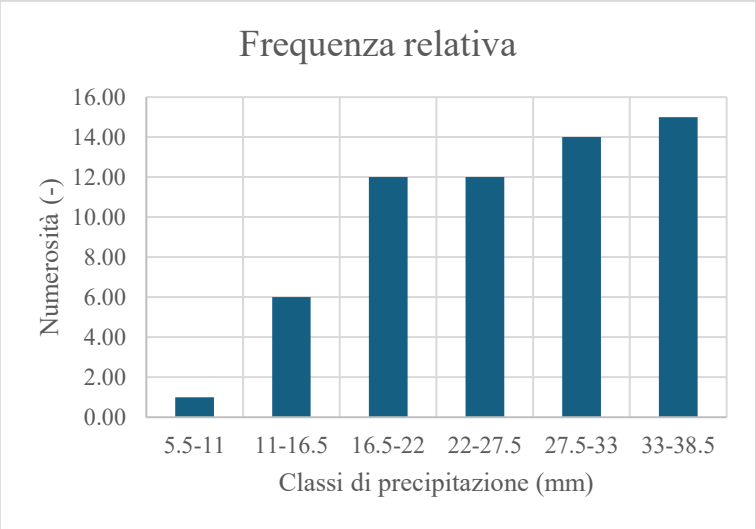

Grafico 16 - Frequenza relativa, durata 45 minuti

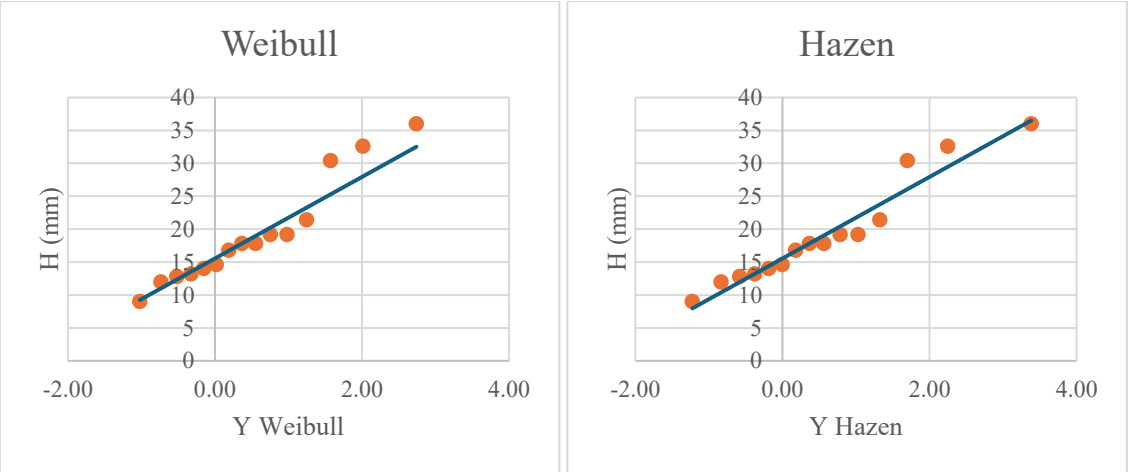

Grafico 17 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 45 minuti

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 17).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.98
G-E	0.34
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 17 - Verifica Test di Matalas, durata 45 minuti

Durata 60 minuti (1 ora)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $10.40\ mm$ e un valore massimo di $40.80\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 18):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	10.40	mm
massimo (x_{max})	40.80	mm
media (x_m)	22.08	mm
varianza (σ^2)	88.77	mm
deviazione standard (σ)	9.42	mm
coeff. Variazione (CV)	2.34	
mediana ($x_{mediana}$)	19.80	mm

Tabella 18 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 1 ora

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 18) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 19), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

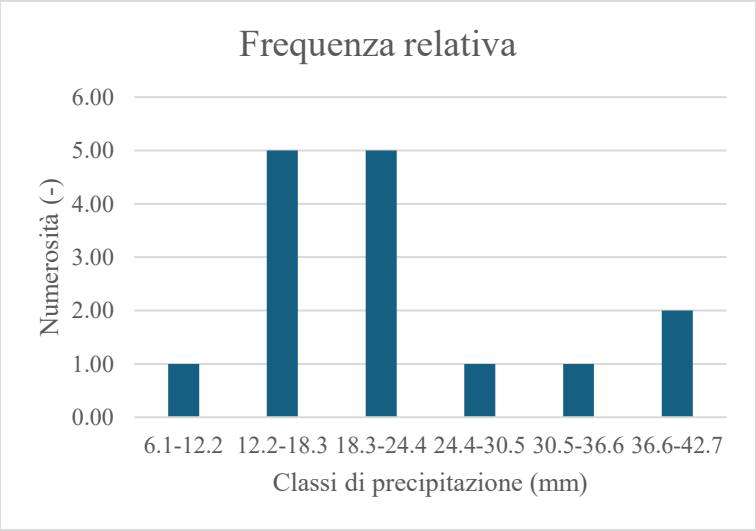

Grafico 18 - Frequenza relativa, durata 60 minuti

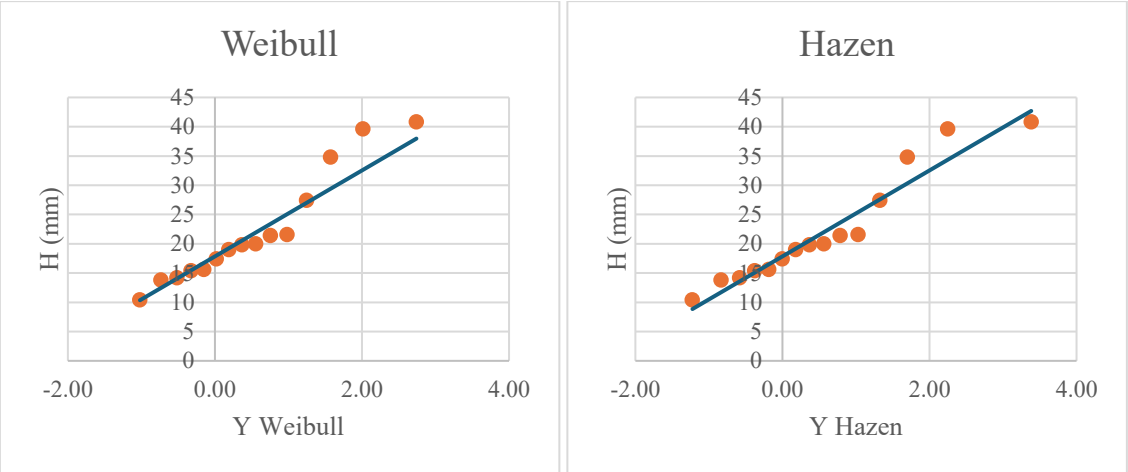

Grafico 19 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 1 ora

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 19).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.95
G-E	0.32
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 19 - Verifica Test di Matalas, durata 1 ora

Durata 180 minuti (3 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $20.20\ mm$ e un valore massimo di $63.20\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 20):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	20.20	mm
massimo (x_{max})	63.20	mm
media (x_m)	37.23	mm
varianza (σ^2)	159.18	mm
deviazione standard (σ)	12.62	mm
coeff. Variazione (CV)	2.95	-
mediana ($x_{mediana}$)	34.20	mm

Tabella 20 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 3 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 20) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 21), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

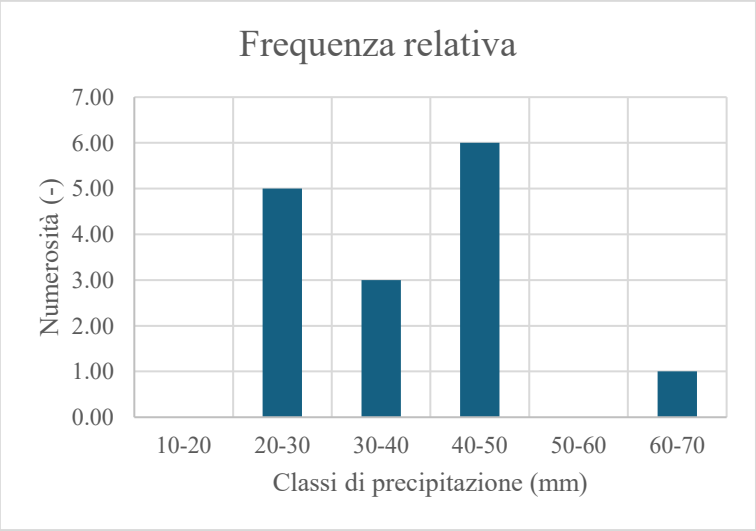

Grafico 20 - Frequenza relativa, durata 3 ore

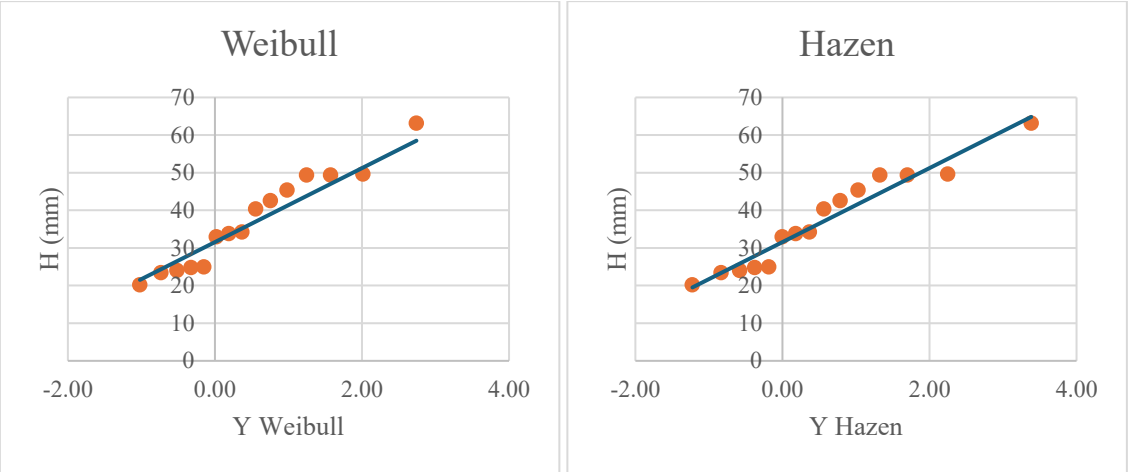

Grafico 21 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull, durata 3 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 21).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.37
G-E	-0.27
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 21 - Verifica Test di Matalas, durata 3 ore

Durata 360 minuti (6 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $23.20\ mm$ e un valore massimo di $105.80\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 22):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	23.20	mm
massimo (x_{max})	105.80	mm
media (x_m)	52.35	mm
varianza (σ^2)	388.00	mm
deviazione standard (σ)	19.70	mm
coeff. Variazione (CV)	2.66	-
mediana ($x_{mediana}$)	51.00	mm

Tabella 22 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 6 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 22) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 23), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

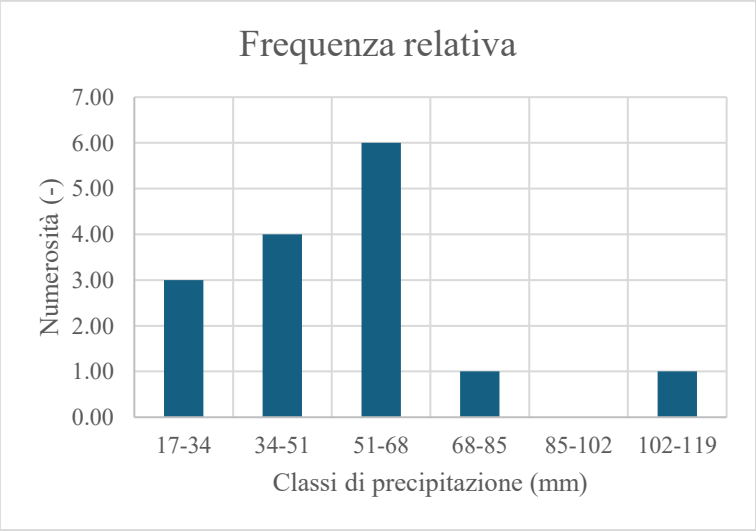

Grafico 22 - Frequenza relativa, durata 6 ore

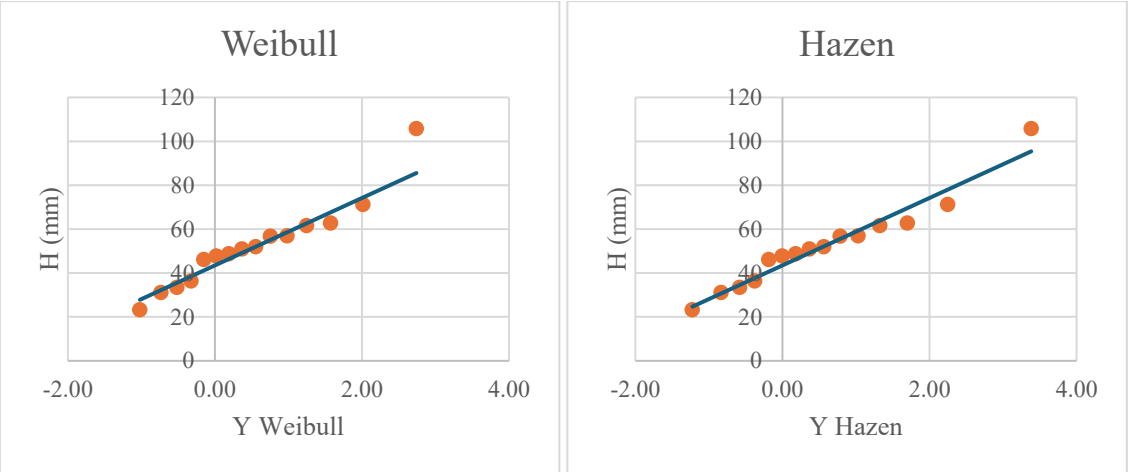

Grafico 23 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 6 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 23).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.12
G-E	0.49
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 23 - Verifica Test di Matalas, durata 6 ore

Durata 720 minuti (12 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $29.00\ mm$ e un valore massimo di $148.80\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 24):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	29.00	mm
massimo (x_{max})	148.80	mm
media (x_m)	74.88	mm
varianza (σ^2)	803.31	mm
deviazione standard (σ)	28.34	mm
coeff. Variazione (CV)	2.64	-
mediana ($x_{mediana}$)	68.60	mm

Tabella 24 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 12 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 24) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 25), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

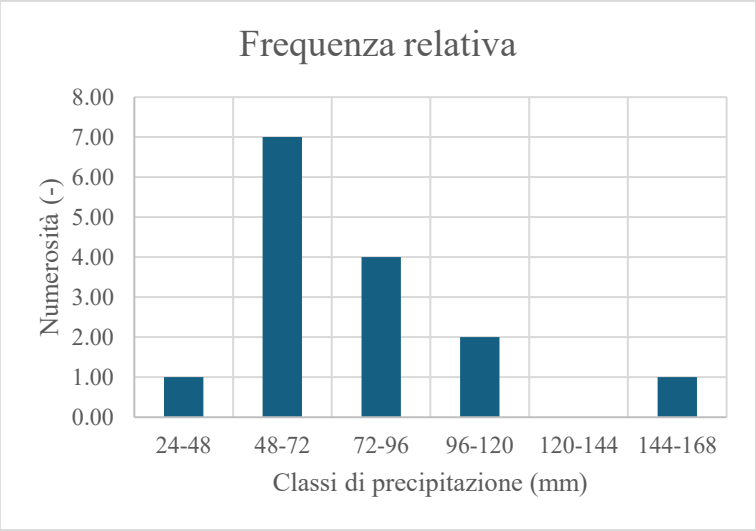

Grafico 24 - Frequenza relativa, durata 12 ore

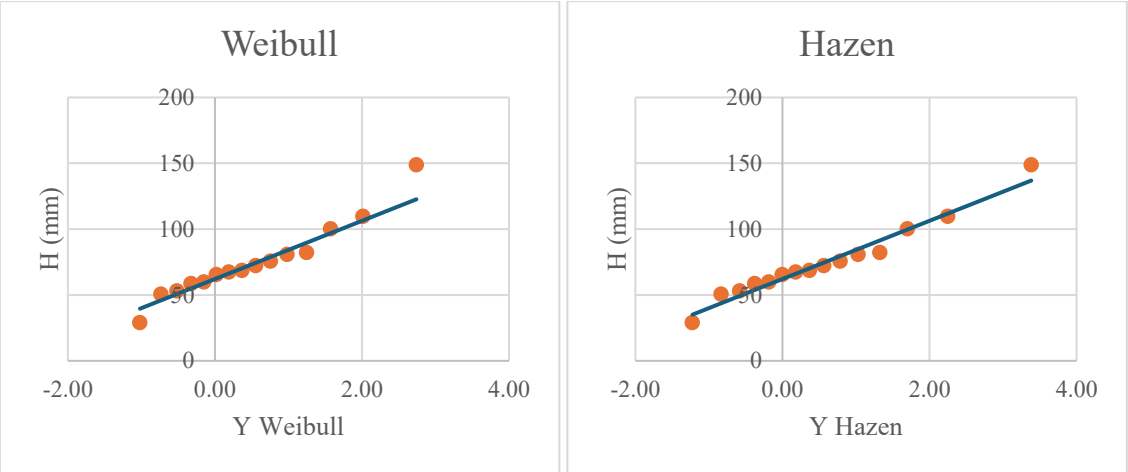

Grafico 25 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 12 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 25).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.08
G-E	0.45
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 25 - Verifica Test di Matalas, durata 12 ore

Durata 1440 minuti (24 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $31.80\ mm$ e un valore massimo di $170.20\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 26):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	31.80	mm
massimo (x_{max})	170.20	mm
media (x_m)	96.65	mm
varianza (σ^2)	1454.05	mm
deviazione standard (σ)	38.13	mm
coeff. Variazione (CV)	2.53	-
mediana ($x_{mediana}$)	81.00	mm

Tabella 26 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 24 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 26) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 27), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

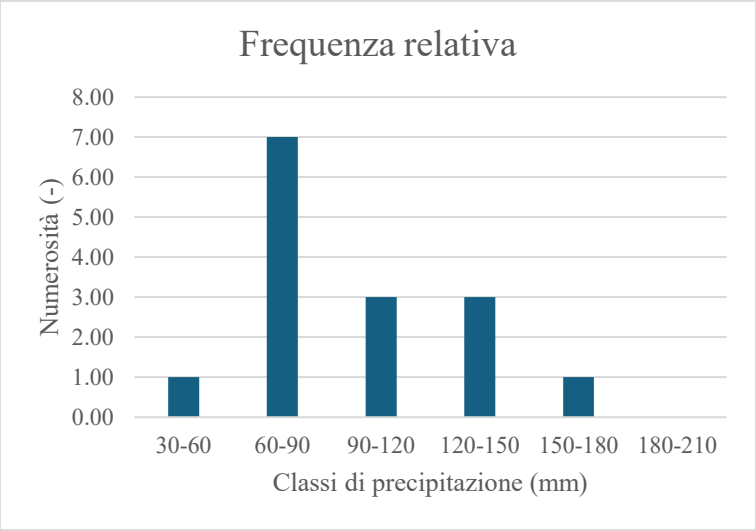

Grafico 26 - Frequenza relativa, durata 24 ore

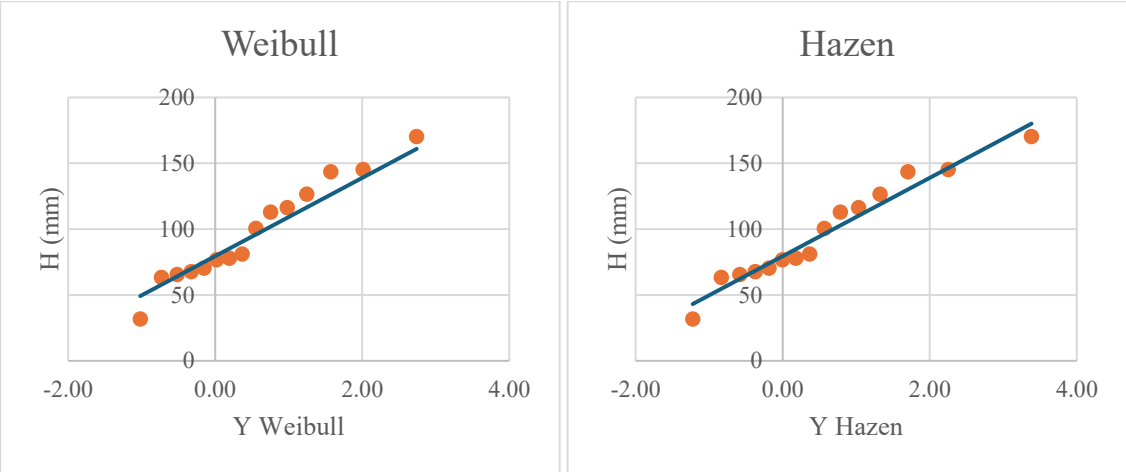

Grafico 27 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 24 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 27).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	0.34
G-E	-0.29
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 27 - Verifica Test di Matalas, durata 24 ore

Durata 2880 minuti (48 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $50.00\ mm$ e un valore massimo di $296.00\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 28):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	50.00	mm
massimo (x_{max})	296.00	mm
media (x_m)	121.04	mm
varianza (σ^2)	4111.08	mm
deviazione standard (σ)	64.12	mm
coeff. Variazione (CV)	1.89	-
mediana ($x_{mediana}$)	109.00	mm

Tabella 28 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 48 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 28) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (grafico 29), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

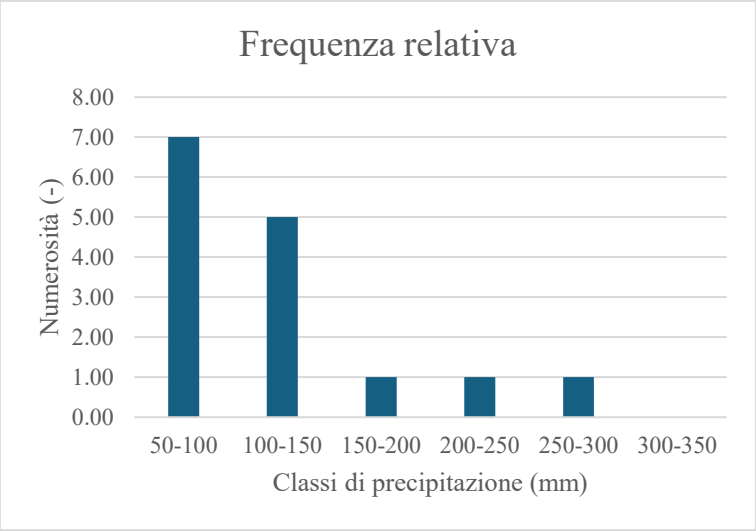

Grafico 28 - Frequenza relativa, durata 48 ore

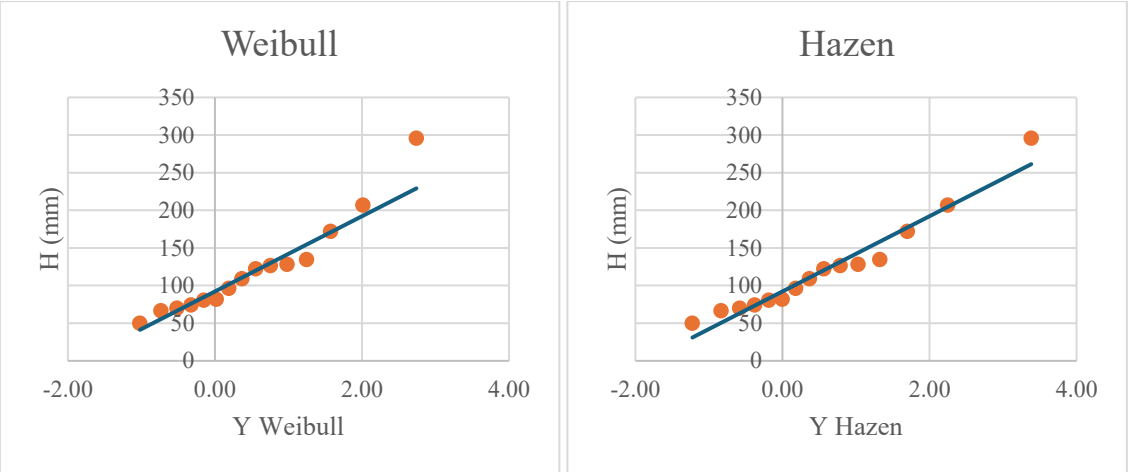

Grafico 29 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 48 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$. In ogni caso, si nota come in corrispondenza di durate elevate, la serie teorica sia di Weibull che quella di Hazen non si adattano bene alla serie storica, in particolare per valori nell'interno di $Y = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 29).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.47
G-E	0.83
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 29 - Verifica Test di Matalas, durata 48 ore

Durata 4560 minuti (72 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $58.20\ mm$ e un valore massimo di $339.60\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 30):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	58.20	mm
massimo (x_{max})	339.60	mm
media (x_m)	139.59	mm
varianza (σ^2)	5102.47	mm
deviazione standard (σ)	71.43	mm
coeff. Variazione (CV)	1.95	-
mediana ($x_{mediana}$)	123.20	mm

Tabella 30 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 72 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 30) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 31), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

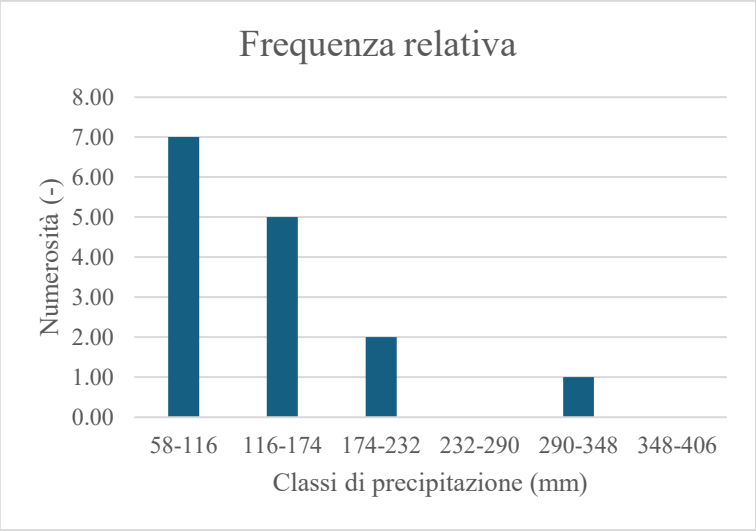

Grafico 30 - Frequenza relativa, durata 72 ore

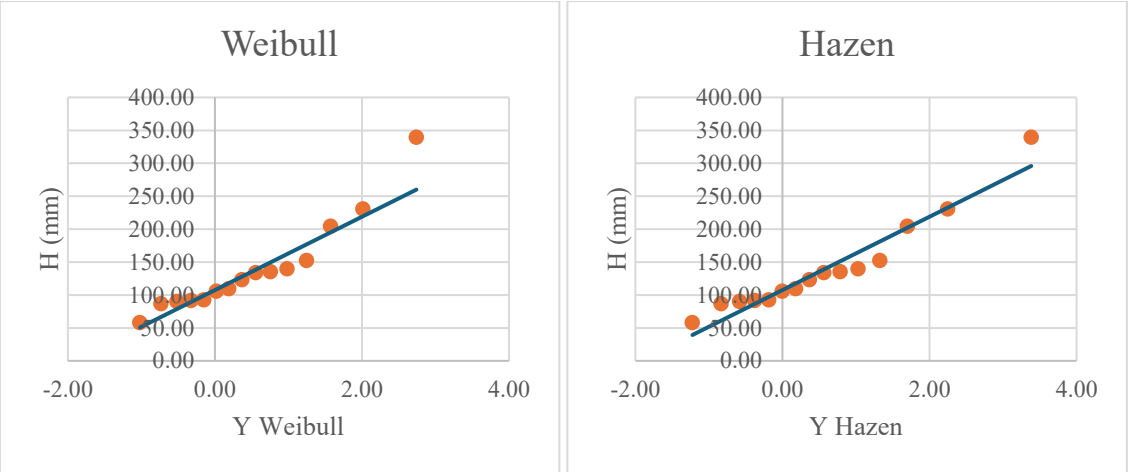

Grafico 31 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 72 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$. In ogni caso, si nota come in corrispondenza di durate elevate, la serie teorica sia di Weibull che quella di Hazen non si adattano bene alla serie storica, in particolare per valori nell'interno di $Y = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 31).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.61
G-E	0.98
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 31 - Verifica Test di Matalas, durata 72 ore

Durata 5760 minuti (96 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $74.60\ mm$ e un valore massimo di $361.60\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 32):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	74.60	mm
massimo (x_{max})	361.60	mm
media (x_m)	150.96	mm
varianza (σ^2)	5524.78	mm
deviazione standard (σ)	74.33	mm
coeff. Variazione (CV)	2.03	-
mediana ($x_{mediana}$)	135.2	mm

Tabella 32 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 96 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 32) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 33), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

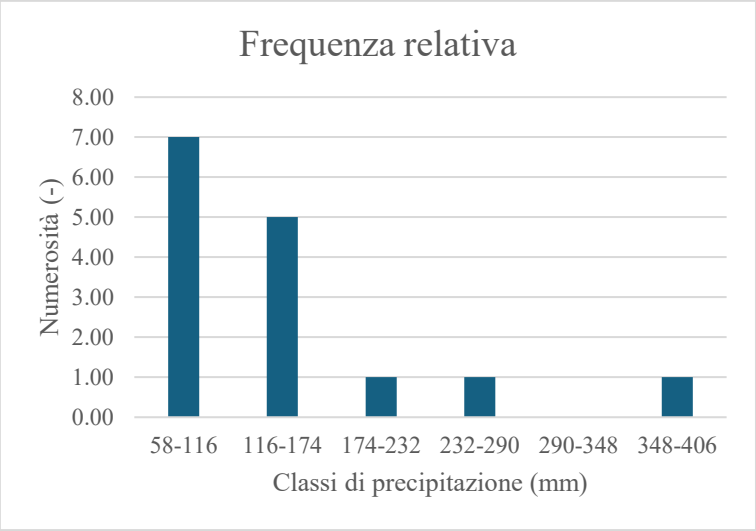

Grafico 32 - Frequenza relativa, durata 96 ore

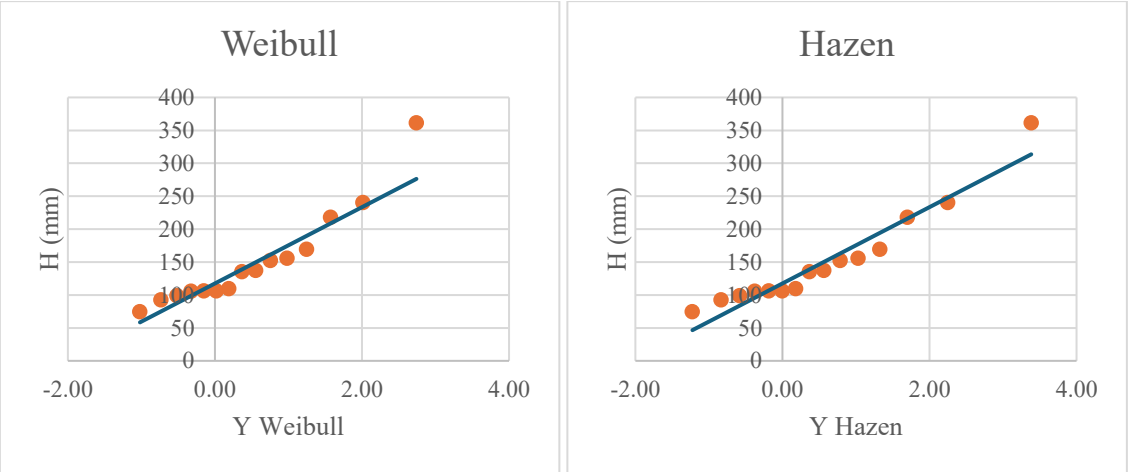

Grafico 33 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 96 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$. In ogni caso, si nota come in corrispondenza di durate elevate, la serie teorica sia di Weibull che quella di Hazen non si adattano bene alla serie storica, in particolare per valori nell'interno di $Y = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 33).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.66
G-E	1.03
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 33 - Verifica Test di Matalas, durata 96 ore

Durata 7200 minuti (120 ore)

La serie storica di campioni di precipitazione massima annuale fa riferimento a una serie ininterrotta di numerosità pari a 15, e in particolare i dati sono stati registrati dal 2009 al 2023. La serie è caratterizzata da un valore minimo di $78.20\ mm$ e un valore massimo di $367.60\ mm$.

Descrizione della popolazione di campioni (Tab. 34):

numerosità (N)	15.00	-
minimo (x_{min})	78.20	mm
massimo (x_{max})	367.60	mm
media (x_m)	161.60	mm
varianza (σ^2)	5620.52	mm
deviazione standard (σ)	74.97	mm
coeff. Variazione (CV)	2.156	-
mediana ($x_{mediana}$)	135.20	mm

Tabella 34 - Indicatori statistici del campione dei massimi annuali di precipitazione, durata 120 ore

Di seguito sono riportati i grafici della frequenza relativa (Grafico 34) e del confronto tra le probabilità empirica di Weibull e Hazen (Grafico 35), utili per determinare il miglior adattamento della serie teorica rispetto alla serie storica, ovvero tra i valori osservati (pallini arancioni) e i valori calcolati (linea blu).

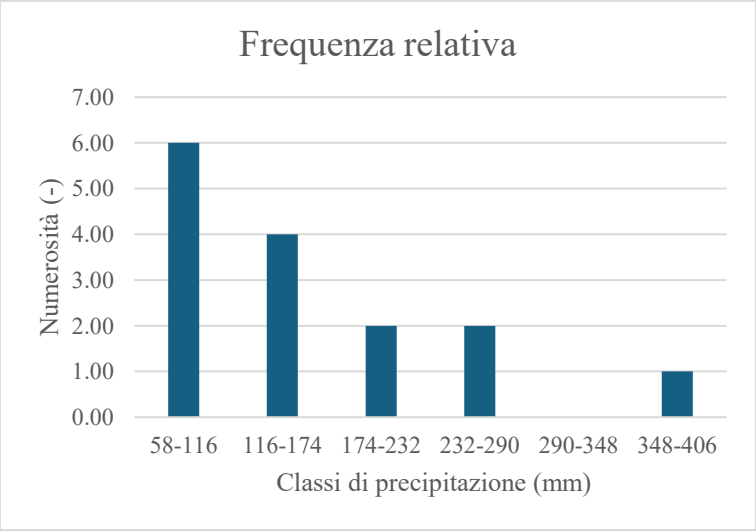

Grafico 34 - Frequenza relativa, durata 120 ore

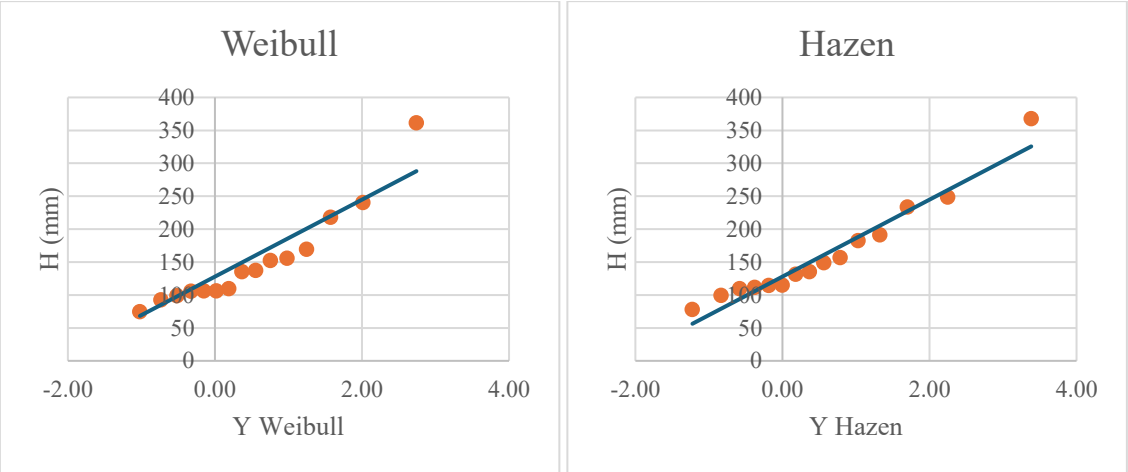

Grafico 35 - Cartogramma di Gumbel con la probabilità empirica di Weibull e Hazen, durata 120 ore

Confrontando i due metodi empirici relativi al Cartogramma di Gumbel, risulta che la serie teorica che meglio si adatta a quella storica è quella di Hazen, in particolare per valori nell'intorno di $Y\ Hazen = 3$. In ogni caso, si nota come in corrispondenza di durate elevate, la serie teorica sia di Weibull che quella di Hazen non si adattano bene alla serie storica, in particolare per valori nell'interno di $Y = 3$.

Dopo aver ottenuto i Cartogrammi di Gumbel, si è applicato il test statistico di Matalas al fine di valutare la bontà dell'adattamento della distribuzione di Gumbel ai dati del campione. Per un campione di numerosità 15, il valore della media $E(\gamma)$ e della deviazione standard $\sigma(\gamma)$ sono i seguenti. Si riportano infine i valori necessari per risolvere la relazione del test di Matalas, e si ottiene una verifica con esito positivo (Tab. 35).

$$E(\gamma) = 0.633$$

$$\sigma(\gamma) = 0.606$$

$N^{0.5}$	3.87
G	1.49
G-E	0.85
2σ	1.21
TEST	VERO

Tabella 35 - Verifica Test di Matalas, durata 120 ore

5.1.1 Cartogramma di Gumbel utilizzato

Si riporta il cartogramma di Gumbel secondo la probabilità di Hazen, in quanto rappresenta meglio le serie teoriche calcolate rispetto alla serie storica.

Per una migliore visualizzazione grafica, si propongono due cartogrammi: il primo riguarda durate pari o inferiori ai 60 minuti (Grafico 36), mentre la seconda durate maggiori di 60 minuti (Grafico 37).

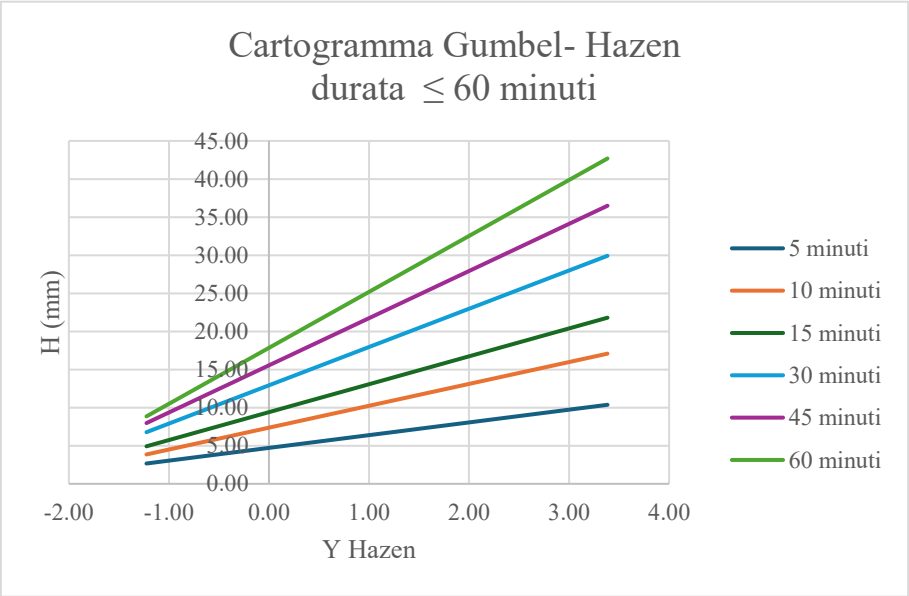

Grafico 36 – Cartogramma di Gumbel – Hazen per durate pari o inferiori a 60 minuti

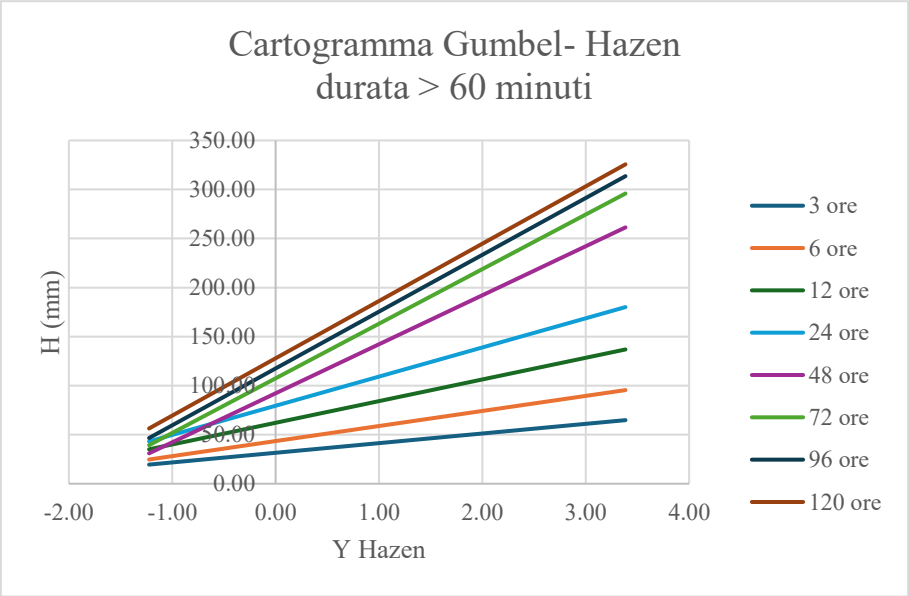

Grafico 37 – Cartogramma di Gumbel – Hazen per durate superiori a 60 minuti

5.1.2 Precipitazione attesa per ogni TR

Si è calcolata la precipitazione attesa per ciascun intervallo temporale (Tab. 37) utilizzando i parametri a e u (Tab. 7) e la variabile ridotta y relativa a ciascun tempo di ritorno (Tab. 36). La variabile è stata calcolata con l'equazione (4.7) ed è necessaria per il calcolo dell'altezza di precipitazione attesa.

TR (anni)	y (TR)
2	0.367
5	1.500
10	2.250
30	3.384
50	3.902
100	4.600
200	5.296

Tabella 36 - Variabile ridotta y per ciascun TR

PRECIPITAZIONE ATTESA (mm)								
Durata		Tempo di Ritorno (anni)						
Minuti	Ore	**2**	**5**	**10**	**30**	**50**	**100**	**200**
5	**0.08**	5.33	7.22	8.48	10.37	11.24	12.40	13.57
10	**0.17**	8.42	11.67	13.83	17.08	18.57	20.57	22.57
15	**0.25**	10.75	14.90	17.65	21.80	23.70	26.26	28.80
30	**0.50**	14.77	20.46	24.23	29.93	32.53	36.04	39.53
45	**0.75**	17.82	24.83	29.48	36.49	39.70	44.02	48.32
60	**1.00**	20.53	28.86	34.37	42.69	46.50	51.62	56.73
180	**3.00**	35.15	46.30	53.68	64.83	69.92	76.79	83.63
360	**6.00**	49.11	66.51	78.03	95.44	103.39	114.11	124.79
720	**12.00**	70.23	95.26	111.84	136.89	148.33	163.75	179.12
1440	**24.00**	90.39	124.08	146.38	180.08	195.47	216.22	236.90
2880	**48.00**	110.51	167.15	204.66	261.32	287.19	322.09	356.85
4560	**72.00**	127.86	190.96	232.74	295.87	324.69	363.57	402.30
5760	**96.00**	138.75	204.42	247.89	313.59	343.57	384.02	424.33
7200	**120.00**	149.29	215.52	259.37	325.63	355.88	396.67	437.32

Tabella 37 - Precipitazione attesa per ciascun TR e per ciascuna durata

5.2 Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP)

Attraverso i parametri a e n è possibile determinare la LSPP per ciascun Tempo di Ritorno. I parametri sono ottenuti mediante l'interpolazione lineare dei valori ricavati dalle distribuzioni di probabilità, in scala bi-logaritmica.

Di seguito sono riportati i parametri suddivisi per durate inferiori e superiori ai 60 minuti (Tab. 38, Tab. 39).

Parametri LSPP Durata ≤ 60 minuti		
TR (anni)	a	n
2	21.117	0.531
5	29.617	0.542
10	35.246	0.547
30	43.753	0.551
50	47.637	0.553
100	52.875	0.555
200	58.095	0.556

Tabella 38 - Parametri a e n per il calcolo della LSPP, durate pari o inferiori a 60 minuti

Parametri LSPP Durata > 60 minuti		
TR (anni)	a	n
2	24.908	0.383
5	31.547	0.417
10	36.029	0.430
30	42.861	0.444
50	45.994	0.448
100	50.228	0.454
200	54.455	0.458

Tabella 39 - Parametri a e n per il calcolo della LSPP, durate superiori a 60 minuti

Infine, si è calcolata in modo analitico l'altezza di precipitazione per ciascuna durata di tempo, applicando la seguente relazione:

$$h = at^n \tag{5. 1}$$

In tabella 40 si riporta la precipitazione calcolata con l'equazione (5.1) e il relativo grafico (Grafico 38).

PRECIPITAZIONE CALCOLATA (mm)								
Durata		Tempo di Ritorno (anni)						
Minuti	Ore	**2**	**5**	**10**	**30**	**50**	**100**	**200**
5	**0.08**	5.65	7.70	9.06	11.12	12.06	13.33	14.59
10	**0.17**	8.16	11.21	13.24	16.30	17.69	19.57	21.45
15	**0.25**	10.12	13.97	16.52	20.38	22.14	24.51	26.88
30	**0.50**	14.62	20.34	24.13	29.86	32.47	36.00	39.51
45	**0.75**	18.13	25.34	30.12	37.34	40.63	45.08	49.51
60	**1.00**	21.12	29.62	35.25	43.75	47.64	52.88	58.10
180	**3.00**	37.89	49.81	57.73	69.72	75.20	82.60	89.96
360	**6.00**	49.47	66.58	77.88	94.96	102.76	113.27	123.74
720	**12.00**	64.60	88.99	105.07	129.34	140.41	155.33	170.18
1440	**24.00**	84.34	118.94	141.76	176.16	191.85	213.00	234.07
2880	**48.00**	110.12	158.98	191.24	239.93	262.15	292.10	321.93
4560	**72.00**	128.71	188.38	227.85	287.46	314.67	351.36	387.92
5760	**96.00**	141.44	208.74	253.30	320.65	351.40	392.87	434.20
7200	**120.00**	156.67	233.30	284.11	360.97	396.07	443.43	490.63

Tabella 40 - Precipitazione calcolata per ciascun TR e per ciascuna durata

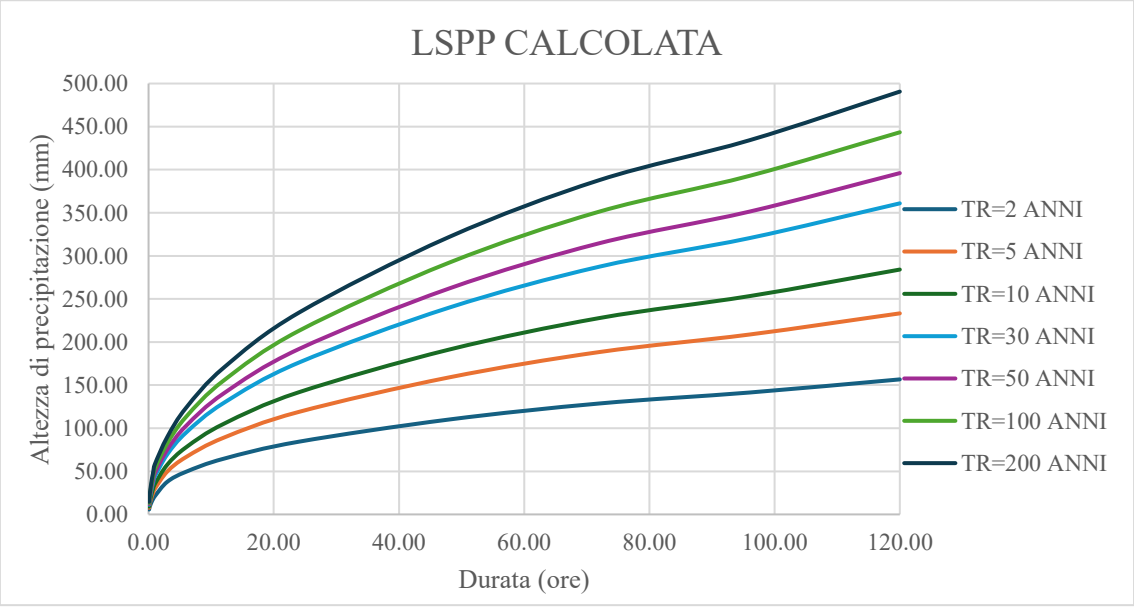

Grafico 38 - LSPP per ciascun TR

5.3 Determinazione del Tempo di Ritorno per i data di pioggia registrati

Una volta ottenuti i quantili di pioggia del bacino oggetto di studio, si determina il Tempo di Ritorno della pioggia cumulata (Tab. 41) misurata dal pluviometro della stazione di Pian Fedaia (Diga).

Durata (ore)	Cumulata (mm)
3	61.4
24	170.2
48	272.2
72	339.6

Tabella 41 - Precipitazione cumulata, bacino Toèl Lench

Si presenta il grafico di confronto tra le altezze massime di precipitazione per ogni Tempo di Ritorno e l'altezza cumulata dell'evento registrata nella stazione di riferimento, corrispondenti a una durata di 3 ore, 24 ore, 48 ore e 72 ore.

Per ciascuna serie di altezza massima di precipitazione si inserisce la linea di tendenza, di tipo logaritmico, e si visualizza l'equazione e il parametro R^2. Il parametro indica a livello statistico la bontà della linea di tendenza rispetto ai punti evidenziati nel grafico; più il valore di R^2 si avvicina a 1, più la rappresentazione dei valori risulta migliore.

Il calcolo del Tempo di Ritorno avviene attraverso l'applicazione della formula inversa dell'equazione della linea di tendenza, dove la variabile h corrisponde all'altezza di precipitazione cumulata di riferimento.

In questo caso l'equazione e il grafico con il Tempo di Ritorno (TR) sono i seguenti (Tab. 42, Grafico 39):

Durata	y	R^2	Tempo di Ritorno
3 ore	$y = 11.201\ln(x) + 31.283$	$R^2 = 0.9987$	$TR = e^{\frac{61.4-31.283}{11.201}} = 15\ anni$
24 ore	$y = 32.054\ln(x) + 65.338$	$R^2 = 0.9985$	$TR = e^{\frac{170.2-65.338}{35.054}} = 26\ anni$
48 ore	$y = 45.288\ln(x) + 83.093$	$R^2 = 0.9986$	$TR = e^{\frac{272.2-83.093}{45.288}} = 65\ anni$
72 ore	$y = 56.888\ln(x) + 97.286$	$R^2 = 0.9986$	$TR = e^{\frac{339.6-97.286}{56.888}} = 71\ anni$

Tabella 42 – Equazione, parametro R^2 e calcolo del TR per le durate considerate

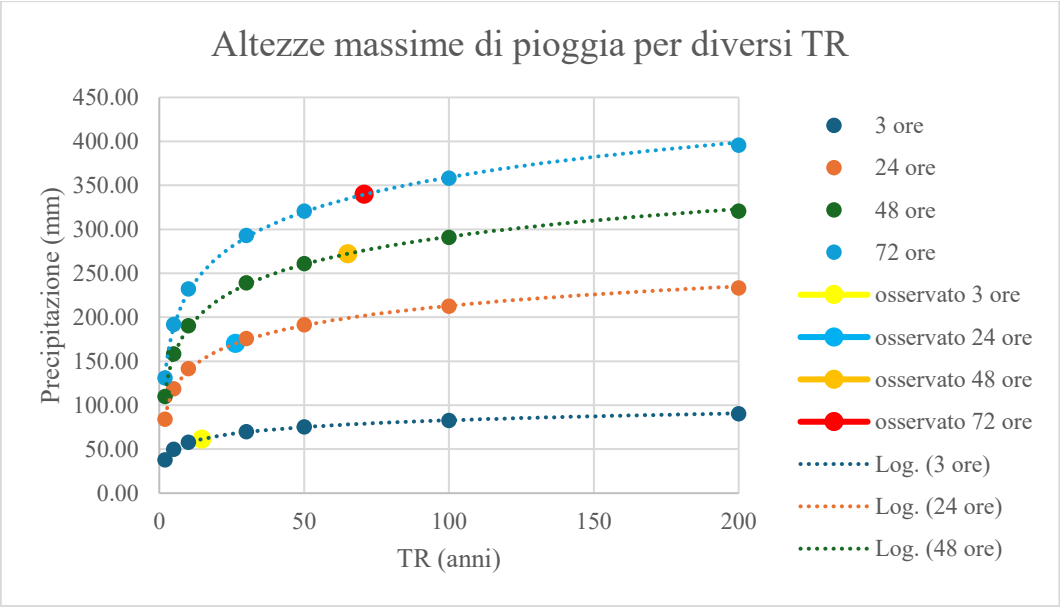

Grafico 39 - Altezza massima di precipitazione per ciascun intervallo di tempo e per ogni TR, bacino Toèl Lench

Si osserva come nella stazione di Pian Fedaia (Diga), in corrispondenza delle durate più brevi, il Tempo di Ritorno della precipitazione cumulata è contenuto. Infatti, alla durata di 3 ore si osserva un TR pari a 15 anni, mentre alla durata di 72 ore il TR è pari a 71 anni. Questo dimostra che, pur essendo stato un evento di breve durata, il tempo di ritorno complessivo è stato abbastanza elevato tale da comportare dissesti come le colate detritiche.

Lo studio e l'analisi della precipitazione corrispondente all'evento del 29 ottobre 2018 termina, e si procede nel prossimo capitolo con la descrizione del modello a celle per la propagazione di colate detritiche (D.F.R.M.) di Gregoretti et al. (2019). Tale modello viene utilizzato per la simulazione della colata di detrito avvenuta nel bacino oggetto di studio.

6 MODELLO A CELLE PER LA PROPAGAZIONE IDRAULICA DI COLATE DETRITICHE (D.F.R.M.)

Il modello D.F.R.M. (*Debris Flow Routing Model*), sviluppato da Gregoretti et al. (2019) all'interno del Dipartimento TESAF (Territorio e Sistemi Agro-Forestali) dell'Università degli Studi di Padova, permette di simulare la propagazione idraulica di una colata di detrito, ipotizzando quest'ultima come un miscuglio omogeneo tenendo conto dei fenomeni di deposito e di erosione.

In questo modello, il campo di moto viene suddiviso in aree omogenee, dette celle, connesse tra loro dal punto di vista idraulico attraverso le equazioni che descrivono la tipologia di moto che avviene tra di esse. Il modello a celle, risalente al 1970 per proposta di Zanobetti e successivamente aggiornato, è anche denominato a base raster in quanto le celle coincidono con la griglia di un raster in ambiente GIS (Bates e De Roo, 2000). L'interfaccia del modello è stata sviluppata in linguaggio Python, in modo tale da essere disponibile sottoforma di plugin in ambiente Q-Gis alle versioni 2.x.x.

Il punto di partenza, e unità elementare del modello, della simulazione idraulica è il file DEM (*Digital Elevation Model – Modello Digitale del Terreno*). L'ultima versione del modello è stata implementata (Gregoretti et al., 2019) con la colata schematizzata come un miscuglio bifase (fase solida e fase liquida), permettendo una migliore simulazione sia del deflusso che dei processi di deposito ed erosione; precedentemente il modello si presentava in versione monofase. L'ultimo aggiornamento effettuato è stato effettuato da Bernard et al. (2019) che tiene conto della presenza di superfici non erodibili.

Il D.F.R.M. è disponibile e scaricabile gratuitamente dal portale dell'Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, completo di Manuale utente e Reference Manual. Inoltre, essendo stato validato attraverso la riproduzione di eventi di colata detritica reali avvenuti nelle Alpi Orientali, come le colate del Rio Lazer (04/11/1966), di Rovina di Cancia (18/07/2009) e del Ru Secco (04/05/2015), il modello è applicabile esclusivamente all'interno del territorio delle Alpi Orientali in quanto le caratteristiche geo-morfologiche sono simili alle caratteristiche su cui è stato calibrato il modello.

Ipotesi e assunzioni

Le equazioni che governano il moto si basano sulle sei ipotesi e assunzioni di seguito elencate:

- La superficie libera in una cella è assunta orizzontale;
- Il volume solido-liquido in una cella risulta funzione della profondità corrente o altezza del deflusso nella cella;
- Le direzioni di deflusso possibili sono 8;
- Il deflusso avviene sempre per dislivello topografico della superficie libera, ovvero da una cella con quota della superficie più alta a una cella con quota della superficie libera più bassa;
- Le connessioni idrauliche sono il deflusso per gravità a modo uniforme per pendenze positive ed a stramazzo nel caso di contropendenza
- Gli scambi di flusso e quantità di moto tra le celle avvengono in contemporanea.

6.1 Le equazioni che governano il moto

Il D.F.R.M. è fondato su due principali equazioni che governano il moto:

1) Equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto della corrente solido-liquida, con l'ipotesi semplificativa di velocità uguali per le vasi solida e liquida (Rosatti e Begnudelli, 2013).

L'equazione di conservazione della massa (6.1, 6.2) è determinata uguagliando la variazione di volume (o massa) in una cella alla differenza tra il volume (o massa) entrante e uscente. Le equazioni di conservazione della massa del miscuglio e della fase solida alla scala di cella sono di seguito riportate.

$$A\,\frac{d(h+z)}{dt} = Q_E - Q_U \tag{6. 1}$$

$$A\,\frac{d(ch+c_*z)}{dt} = cQ_E - cQ_U \tag{6. 2}$$

Con: A area della cella (Δx^2)

t tempo

z quota del fondo

h profondità della corrente (altezza del flusso nella cella)

c concentrazione volumetrica della fase solida o di sedimento

Q_E portata entrante dalle celle contigue

Q_U portata uscente verso le celle contigue

Le equazioni di conservazione della quantità di moto, che regolano le connessioni idrauliche tra le celle, sono quella di moto uniforme (6.3), nel caso in cui il deflusso avvenga a gravità, e quella dello stramazzo in parete grossa (6.4), nel caso in cui il deflusso avvenga in contropendenza.

$$Q = \Delta x C h w \sqrt{g h sin\vartheta} \tag{6. 3}$$

$$Q = \Delta x C_q s \sqrt{2g}\,(h - p)^{1.5} \tag{6. 4}$$

Con: Δx lato della cella ($A^{0.5}$)

ϑ angolo di inclinazione del fondo

C coefficiente di conduttanza (parametro che controlla la resistenza al moto)

C_q coefficiente di portata pari a quello dell'acqua (0.385)

g accelerazione gravitazionale ($9.81\frac{m}{s^2}$)

w e s sono due funzioni di peso necessarie per ripartire il flusso uscente in più direzioni.

2) Equazioni che governano i processi di deposito ed erosione: equazione di Exner che regola l'andamento del fondo in funzione della quantità di sedimento scambiata tra il fondo e la corrente, e l'equazione che determina quest'ultima.

L'equazione di Exner (6.5) esprime la variazione della quota del fondo in funzione della differenza tra la velocità di innalzamento (o deposizione, D) e di abbassamento (o erosione, E):

$$\frac{dz}{dt} = D - E \tag{6. 5}$$

Il secondo membro, e quindi la differenza tra deposito ed erosione, viene modellata adattando la relazione empirica di Egashira e Ashida (1987); diviene quindi (6.6):

$$E - D = K[(sin\alpha_{max} - sin\alpha_{LIM})V_{max}] \tag{6. 6}$$

Con: K costante empirica compresa tra 0 e 1

$\alpha = \vartheta$ in caso di deflusso a gravità

$\alpha = \theta + \vartheta$ in caso di deflusso a stramazzo, con θ angolo di inclinazione della superficie libera rispetto all'orizzontale

V_{max} velocità di riferimento per il calcolo del deposito e dell'erosione

α_{max} angolo di inclinazione di massima pendenza

α_{LIM} valore limite di α_{max} sopra e sotto il quale avvengono deposito ed erosione

Il calcolo dell'erosione e del deposito è effettuato solo se V_{max} e α_{max} sono rispettivamente superiori o inferiori ai valori limite V_{LIM} e ϑ_{LIM}. In particolare, si verifica deposito quando $V_{max} < V_{LIM}$ e $\alpha_{max} < \vartheta_{LIM}$, ed erosione quando $V_{max} > V_{LIM}$ e $\alpha_{max} > \vartheta_{LIM}$. Inoltre, i valori limite V_{LIM} e ϑ_{LIM} assumono differenti valori in caso di deposito e in caso di erosione.

Sia deposito che erosione vengono calcolati nella direzione di massima velocità; in tal modo si evita che una cella sia soggetta contemporaneamente ad erosione e deposito e che abbiano fenomeni non reali di deposito nella direzione trasversale a quella di massima pendenza, in cui la velocità e l'inclinazione del fondo possono assumere valori molto bassi.

6.2 Schema numerico e condizioni interne ed al contorno

Per ogni cella "bagnata" del campo di moto, note la profondità e la quota del fondo al tempo t, è possibile calcolare le portate uscenti e la variazione del fondo. Successivamente, conoscendo le portate, risulta possibile, per ogni cella, calcolare la velocità. I valori di profondità, variazione del fondo e portata sono introdotti nell'equazione di continuità in modo tale da calcolare i valori di profondità di ogni cella per l'intervallo di tempo successivo.

Per ogni cella, le portate uscenti vengono calcolate discretizzando le equazioni (6.3) e (6.4) come di seguito (6.7, 6.8):

$$Q_{i,k} = \Delta x\, w_{i,k} C\, h_i \sqrt{g h_i sin\vartheta_{i,k}} \qquad z_i > z_k \tag{6. 7}$$

$$Q_{i,k} = \Delta x\, s_{i,k} C_q \sqrt{2g}\, (h_i + z_i - z_k)^{1.5} \qquad z_i < z_k \tag{6. 8}$$

Con $w_{i,k}$, $s_{i,k}$ e $sin\vartheta_{i,k}$ così espressi:

$$w_{i,k} = \frac{\sin\theta_{i,k}}{\sum_{k=1}^{n} \sin\theta_{i,k}} \tag{6. 9}$$

$$s_{i,k} = \frac{h_i + z_i - z_k}{\sum_{k=1}^{n} (h_i + z_i - z_k)} \tag{6. 10}$$

$$sin\vartheta_{i,k} = \frac{z_i - z_k}{L_{i,k}} \tag{6. 11}$$

Con: $Q_{i,k}$ portata uscente dalla cella i e diretta verso la cella k

h_i altezza del deflusso nella cella i, z_i, z_k (quote del fondo delle celle i e k)

$L_{i,k}$ distanza nello spazio tra i centri delle celle i e k

La velocità di innalzamento del fondo a causa del deposito, o la velocità di abbassamento del fondo a causa dell'erosione, ovvero il volume di sedimento scambiato con il fondo nell'unità di tempo e per unità di area, viene calcolato discretizzando l'equazione (6.6). Si assume che il deposito e l'erosione siano controllati dal solo deflusso secondo la direzione per cui si ha la velocità massima è per la cella k ($V_{max} = U_{i,k}$; $\alpha_{max} = \alpha_{i,k}$) (6.12, 6.13):

$$D_i = -K_D\, U_{i,k} (\sin\alpha_{i,k} - \sin\alpha_{LIM-D}), \quad U_{i,k} \leq U_{LIM-D}, \sin\alpha_{i,k} \leq \sin\alpha_{LIM-D} \tag{6. 12}$$

$$E_i = K_E\, U_{i,k} (\sin\alpha_{i,k} - \sin\alpha_{LIM-E}), \qquad U_{i,k} \geq U_{LIM-E}, \sin\alpha_{i,k} \geq \sin\alpha_{LIM-E} \tag{6. 13}$$

Con: $D_{i,k}, E_{i,k}$ velocità di deposito ed erosione in funzione della velocità massima uscente $U_{i,k}$ che si ha tra le celle i e k

U_{LIM-D}, U_{LIM-E} velocità limite sotto e sopra le quali possono avvenire il deposito e l'erosione

$\alpha_{LIM-D}, \alpha_{LIM-E}$ valori dell'angolo limite sotto e sopra le quali possono avvenire il deposito e l'erosione

$\alpha_{i,k}$ calcolato nel caso di deflusso a moto uniforme (6.14):

$$\alpha_{i,k} = tan^{-1} \frac{z_i - z_k}{cc\,\Delta x} \qquad z_i > z_k \qquad (6.\ 14)$$

e nel caso di deflusso a stramazzo (6.15):

$$\alpha_{i,k} = tan^{-1} \frac{z_i - z_k}{cc\,\Delta x} + tan^{-1} \frac{h_i + z_i - h_k - z_k}{cc\,\Delta x} \qquad z_i < z_k \qquad (6.\ 15)$$

Con: $cc\,\Delta x$ distanza nel piano orizzontale tra i centri delle celle i e k

$cc = 1$ se la direzione fra la cella i e la cella k è parallela all'orizzontale od alla verticale

$cc = \sqrt{2}$ se la direzione è a 45°

Le equazioni di conservazione della massa del miscuglio e della fase solida, integrate nel tempo, hanno le seguenti espressioni (6.16, 6.17):

$$h_i^{t+\Delta t} = h_i^t + [E_i - D_i - \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{k=1}^{8} Q_{i,k}]\,\Delta t \qquad (6.\ 16)$$

$$c_i^{t+\Delta t} = \frac{1}{h_i^{t+\Delta t}}\,[c_i^t h_i^t + c_*(E_i - D_i) - \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{k=1}^{8} c_{i,k} Q_{i,k}\,]\,\Delta t \qquad (6.\ 17)$$

Con: $Q_{i,k}$ portata scambiata tra la cella i e quella contigua k che è assunta positiva se uscente, negativa se entrante

c_* concentrazione volumetrica della fase solida al fondo

c_i concentrazione volumetrica della fase solida nella cella i

$c_{i,k}$ concentrazione volumetrica della fase solida relativa alla portata scambiata tra le due celle contigue i e k

Δt passo temporale di calcolo

Il fondo è assunto saturo e con concentrazione volumetrica della fase solida pari a c_*, sia in caso di erosione che in caso di deposito. Il passo temporale di calcolo viene calcolato imponendo la condizione di stabilità, utilizzando il numero di Courant pari a 0.95:

$$\left(U_{i,k} + \sqrt{gh_i}\ \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} = 0.95 \tag{6. 18}$$

$$\Delta t = 0.95\ \frac{\Delta x}{U_{i,k} + \sqrt{gh_i}} \tag{6. 19}$$

Tale condizione è necessaria per rispettare la fisica della propagazione, per cui la propagazione di un'onda in Δt non può oltrepassare Δx. Il calcolo di Δt viene eseguito ad ogni passo di calcolo per tutte le celle che propagano il deflusso e si sceglie il valore minimo.

Inoltre, esiste un controllo sull'erosione e sul deposito; infatti, la colata durante il deflusso non può sempre erodere o depositare. Quando la concentrazione volumetrica della fase solida in una cella raggiunge il valore massimo, pari a $c_* = 0.9$ (Takahashi, 2007), l'erosione viene impedita. Analogamente il deposito viene impedito quando $c_* < 0.05$; sotto tale valore, infatti, la concentrazione volumetrica della fase solida potrebbe diventare negativa nel caso in cui il deposito D sia elevato. L'erosione viene ulteriormente controllata attraverso le osservazioni di campo di Berger et al. (2011): l'erosione avviene prevalentemente durante il passaggio del fronte, e questo risulta utile perché il fronte è caratterizzato dalla profondità massima perché vi si accumulano gli elementi solidi di maggior dimensione. Per cui, durante il passaggio del fronte, viene esercitato sul fondo lo sforzo maggiore e si sviluppa localmente il maggior attrito tra corrente e fondo a causa del contatto degli elementi di maggior dimensione sul fondo. Per abilitare l'erosione si introduce la condizione $\frac{dh}{dt} > 0$. L'oscillazione numerica viene controllata imponendo che la superficie libera della cella che riceve deflusso non possa superare, o al limite uguagliare, quella della cella di partenza da cui il deflusso si propaga.

Studiando le condizioni al contorno, queste sono differenti per l'entrata e l'uscita. Si possono individuare tre tipologie di celle:

- Celle di entrata
- Celle di propagazione
- Celle di uscita

Le prime vengono riempite ad ogni passo temporale secondo l'idrogramma solido-liquido in ingresso corrispondente: il volume viene suddiviso tra tutte le celle d'entrata che fanno parte della sezione di ingresso. La propagazione avviene secondo lo schema seguente (Tab. 43):

i+2	i+1	i	i+1	i+2
i+2	i+1	i+1	i+1	i+2
i+2	i+2	i+2	i+2	i+2

Tabella 43 - Schema della propagazione: cella di ingresso (blu) attivata al passo temporale i e celle di propagazione (rosso) attivate ai passi temporali successivi

Al primo passo temporale fissato, le celle d'entrata vengono riempite secondo l'idrogramma solido-liquido corrispondente. Al secondo passo la cella, oltre ad essere riempita, la cella d'entrata inizia la propagazione verso le celle circostanti (i+1), e il passo temporale di calcolo viene calcolato secondo l'equazione (6.19). Al terzo passo temporale, le celle d'entrata continuano ad essere riempite e vi è propagazione tra le celle d'entrata (i) verso le celle di propagazione del passo temporale precedente (i+1), si ha inoltre propagazione tra queste ultime e le celle a loro contigue non ancora interessate dal deflusso (i+2).

Il deflusso dalle celle di uscita verso l'esterno avviene con moto uniforme oppure a stramazzo lungo un'unica direzione pari alla massima pendenza o al massimo dislivello topografico della superficie. La direzione di massima pendenza viene determinata come la massima pendenza tra le celle di propagazione contigue alla cella contorno e quest'ultima, in quanto il deflusso avviene verso l'esterno. Inoltre, le celle d'entrata e di uscita non sono soggette a deposito ed erosione.

6.3 I processi con relativi parametri che controllano la propagazione: resistenza al moto e fenomeni di deposito ed erosione

La propagazione di una colata detritica dipende sostanzialmente dalla resistenza al moto e dai processi di deposito ed erosione. La prima controlla direttamente la velocità di propagazione, e di conseguenza i fenomeni di deposito e di erosione; i secondi controllano direttamente il volume di sedimento trasportato, e di conseguenza la concentrazione volumetrica di sedimento, ovvero la resistenza al moto.

6.3.1 Resistenza al moto

La resistenza al moto dipende dal coefficiente di conduttanza C, pari il rapporto tra la velocità media e la velocità di attrito $\left(C = {}^{U}/_{u_*}, u_* = \sqrt{g\, h \sin\theta}\right)$; e il suo valore dipende dai profili di velocità e dalla concentrazione della corrente solido – liquida. In particolare, in regime di colata granulo – inerziale (Takahashi, 2007), in cui la reologia dipende dagli sforzi collisionali nello strato vicino alla superficie libera e da quelli frizionali nello strato a contatto con il fondo (Lanzoni et al., 2017), il coefficiente C dipende dalla concentrazione della fase solida, dal rapporto tra la profondità del deflusso e il diametro caratteristico dei sedimenti $\left({}^{h}/_{d}\right)$ e dalla portata di deflusso superficiale che ha innescato il fenomeno di colata. Attraverso gli esperimenti di laboratorio (Tognacca, 1999 e Lanzoni et al., 2017), si è dimostrato come, a parità di altre condizioni, sia la velocità che l'erosione dipendono dalla portata liquida che genera la colata; ed è per questo motivo che i profili di velocità misurati da Lanzoni et al. (2017) scalano con la velocità del deflusso superficiale rispetto che con la velocità d'attrito come invece avviene per le correnti liquide. Per cui la velocità della corrente solido – liquida, e di conseguenza la velocità di erosione, è condizionata dalla portata liquida. Nel caso di una stessa inclinazione del fondo, l'aumento della portata liquida di innesco comporta un aumento della velocità della colata e quindi un aumento meno evidente della profondità; la concentrazione volumetrica della fase solida rimane costante.

Attraverso gli esperimenti di laboratorio (Lanzoni et al, 2017) e le osservazioni in campo, si dimostra che il coefficiente di conduttanza dipende dalla concentrazione volumetrica di sedimento, e diminuisce con essa (Fig. 15).

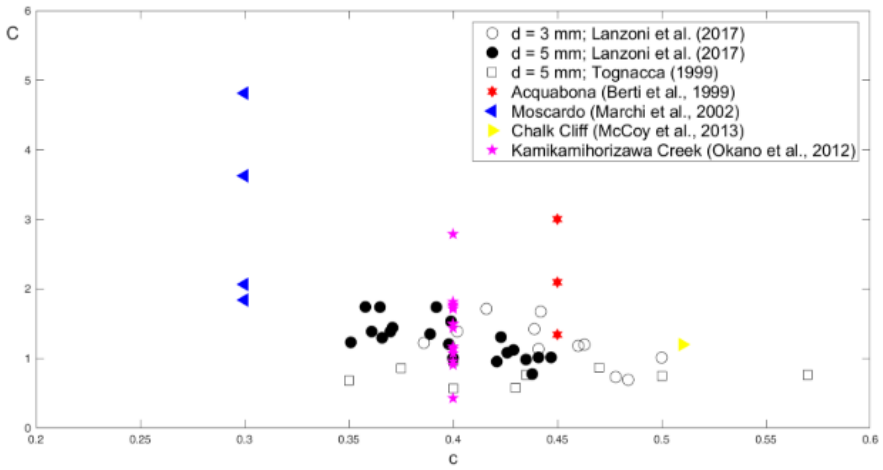

Figura 15 - Valori del coefficiente di conduttanza (C) di colate detritiche di laboratorio e reali in funzione della concentrazione volumetrica di sedimento (c)

I valori del coefficiente C in Figura 15 fanno riferimento a colate di detrito di media entità, sia di laboratorio che di campo. I valori di C sono differenti a seconda della tipologia di colata: le colate detritiche mature, ovvero con una concentrazione consistente della fase solida, il valore è compreso tra 1 e 3; le colate in regime granulo – inerziale di media entità si distinguono in canalizzate in cui il valore è pari a 5 (Gregoretti et al., 2018, 2019; Bernard et al., 2019), e non canalizzate in cui il valore è pari a 3 (Gregoretti et al., 2016). Il valore di quest'ultimo caso è giustificato dalla dispersione della colata in molteplici direzioni; quindi, sia la profondità che il rapporto $h/_d$ diminuiscono.

6.3.2 Processi di erosione e deposito

I processi di deposito e di erosione sono modellati attraverso tre diversi approcci: meccanico, basato sulla capacità di trasporto o di adattamento all'equilibrio, ed empirico.

L'approccio meccanico si basa sul bilancio delle forze e della massa al fondo, e presenta una velocità di deposizione e di erosione, $dz/_{dt}$, funzione della differenza tra lo sforzo tangenziale esercitato dalla corrente solido – liquida sul fondo e lo sforzo resistente del fondo (Medina et al., 2008). È presente una versione semplificata, la quale non tiene conto della quantità di moto che la corrente trasferisce al materiale del fondo che mette in movimento, o che guadagna, quando si ha deposito di materiale. Il problema di questo approccio è l'introduzione di valori empirici per la determinazione di alcuni parametri dei bilanci delle forze e della conservazione della massa.

L'idraulica fluviale utilizza l'approccio basato sulla capacità di trasporto, in cui si impone l'adattamento della concentrazione al valore di equilibrio corrispondente alla capacità di trasporto in condizioni di moto uniforme (Armanini et al., 2009). In questo modo la velocità di deposito e di erosione risulta proporzionale alla differenza tra la concentrazione di sedimento della corrente e quella di equilibrio. Questo approccio può dare risultati poco realistici in corrispondenza della coda di colata o quando l'equazione della capacità di trasporto è utilizzata fuori dall'intervallo di validità.

Il terzo e ultimo approccio è di tipo empirico, e lega la velocità di deposito e di erosione, $dz/_{dt}$, ai fattori di controllo come la velocità e la concentrazione della fase solida della corrente (Brufau et al., 2000; Egashira et al., 2001; Frank et al., 2015). L'approccio utilizza dei coefficienti empirici basati su misure di laboratorio e/o di campo. Nel modello si esegue un approccio empirico basato sui fattori di controllo che più condizionano i processi di deposito e di erosione, ad esempio la velocità della corrente e l'inclinazione del fondo. I valori limite di tali coefficienti dipendono dalla reologia, dal tipo di deflusso e dalla tipologia di fondo su cui la colata propaga. Nel caso di colate

canalizzate in regime granulo – inerziale, i valori limite di inclinazione del fondo, dagli esperimenti di laboratorio di Lanzoni et al. (2017) e le osservazioni di campo di Jordan (1994), sono di 14° per il deposito e 16° per l'erosione. In particolare, i rilievi pre e post – evento delle colate detritiche avvenute a Rovina di Cancia (BL), mostrano che i depositi e le erosioni sono legate all'inclinazione del fondo, confermando i valori proposti da Lanzoni et al. (2017). Infatti, tali fenomeni aumentano nei loro valori medi nel caso di angoli di inclinazione del fondo inferiori (per il deposito) e superiori (per l'erosione) a 15°. Infine, si è osservato come i volumi di depositi e di erosioni presenti per valori rispettivamente superiori e inferiori a 15° non sia significativa in quanto dipendono dalla pendenza locale che causa l'irregolarità del fondo.

Per quanto riguarda la bontà del modello nella simulazione delle colate detritiche, il confronto tra il dato osservato e il dato simulato risulta buono. Il risultato è ulteriormente confermato osservando che le aree soggette a valori elevati di deposito e di erosione sono quelle meglio simulate. La bontà del risultato ottenuto viene confermato attraverso due parametri che valutano la corrispondenza tra l'osservato e il simulato: indice F (Bates e De Roo, 2000) (6.20) e indice Ω (Scheidl e Richenman, 2010; generalizzato da Gregoretti et al., 2019 per tenere conto delle erosioni) (6.21).

$$F = \frac{A_{OS_D} + A_{OS_E}}{A_{OS_D} + A_{O_D} + A_{S_D} + A_{OS_E} + A_{O_E} + A_{S_E}} \tag{6. 20}$$

$$\Omega_\Psi = \frac{[(\Psi_{OS})_D + (\Psi_{OS})_E] - [(\Psi_S)_D + (\Psi_S)_E] - [(\Psi_O)_D + (\Psi_O)_E]}{(\Psi_{OS} + \Psi_O)_D + (\Psi_{OS} + \Psi_O)_D} \tag{6. 21}$$

Con: Ψ area A o volume V

OS, S, O area osservata e simulata, area osservata e non simulata, area simulata e non osservata

D, E deposito ed erosione

Il primo indice, F, è un indice di sovrapposizione in quanto misura la sovrapposizione tra simulato ed osservato rispetto al totale simulato – osservato; è compreso tra 0 e 1, e il valore pari a 0.5 corrisponde al valore medio tra simulato e osservato.

Il secondo indice, Ω, è un indice di valutazione riguardo l'accuratezza della simulazione; è compreso tra 1 (massima corrispondenza tra simulato e osservato) e -1 (non corrispondenza), e il valore 0 è pari alla corrispondenza intermedia. Il limite inferiore di non corrispondenza tra i due eventi ha valore negativo, anche se non viene calcolato in quanto non esiste un rapporto stabilito tra Ψ_O e Ψ_S.

Infine, il coefficiente C assume valore pari a 5 in caso di flussi canalizzati, e pari a 3 in caso di deflussi disperdenti; angoli e velocità limite per depositi ed erosioni rimangono gli stessi. Il modello rispetta (Gregoretti et al., 2019) i tempi di propagazione dei dati registrati dell'evento di Cancia il 18/07/2009. I valori di C per i quali si ha la miglior riproduzione di deposito ed erosione sono quelli che permettono la riproduzione del tempo speso dalla propagazione della colata.

6.4 Influenza della dimensione della griglia sulla simulazione

L'influenza della dimensione delle celle, che compongono la griglia, sulla simulazione della propagazione di una colata detritica è stata poco studiata. Attraverso le simulazioni eseguite con differenti dimensioni della griglia, è apparso che si ottengono risultati differente tra loro, in particolare, si è osservato che le simulazioni effettuate con celle di dimensione superiore ai 4x4 metri sono da scartare. Gregoretti et al. (2016) hanno effettuato tre diverse simulazioni idrauliche della colata avvenuta sul Rio Lazer, con dimensioni delle celle 1x1, 2x2 e 4x4 metri tenendo costanti i valori di tutti gli altri parametri. È emerso che la simulazione con dimensione 1x1 metri ha dato il risultato migliore riguardo l'area di inondazione simulata e spessori di deposito, e che utilizzando dimensioni maggiori si ha una sottostima dell'altezza di deposito osservata.

7 APPLICAZIONE DEL MODELLO D.F.R.M. AL BACINO CASO STUDIO

Al fine di poter effettuare le simulazioni applicando il modello D.F.R.M., è necessario creare i file di input e in particolare riguardo il bacino del Rio Toèl Lench. I file necessari sono visibili dall'interfaccia del modello avviandolo tramite Q-Gis: file di tipo *floating raster* (.flt e .hdr) e file di testo (.txt). Di seguito si riporta la descrizione di ciascun file creato, e in particolare si sottolinea che, per un corretta simulazione, i file di tipo raster devono essere perfettamente sovrapponibili e avere celle della stessa dimensione, in quanto il modello si basa sul confronto dell'estensione delle celle raster. Infine, vengono riportati i parametri caratteristici utilizzati al fine della simulazione.

7.1 Dominio di calcolo

Il primo file da inserire nel modello D.F.R.M. è il Modello Digitale del Terreno (DTM) relativo alla porzione di territorio oggetto di studio e disponibile in rete nel *Portale Geocartografico Trentino*. Il DTM scaricabile interessa un'area più vasta del bacino del Rio Toèl Lench, è necessario quindi ritagliarlo in modo tale da ridurre la pesantezza della simulazione relativa alla velocità di esecuzione e alla memoria occupata; il ritaglio avviene attraverso la creazione di una geometria relativa al campo di moto (Fig. 16). La dimensione delle celle raster è di 1x1 metri.

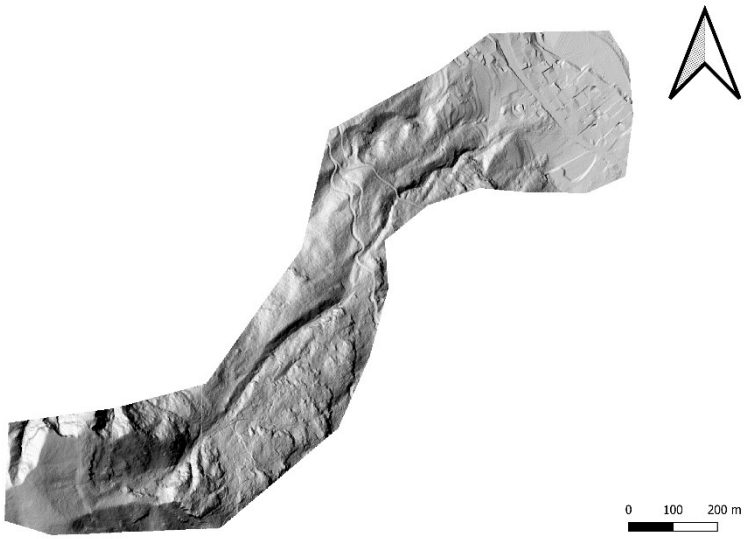

Figura 16 - DTM del bacino Toèl Lench

7.2 Digitalizzazione e caratteristiche uso del suolo

Il secondo file da inserire nel modello D.F.R.M. è l'uso del suolo, necessario per categorizzare i diversi terreni che compongono l'area di studio. Da un'immagine area, un ortofoto o da un *layer* scaricabile dai portali cartografici, è possibile realizzare uno *shapefile* composto da poligoni che contengono le informazioni della tipologia di suolo e del relativo codice associato. Più i poligoni sono precisi, più la simulazione sarà ottimale perché otterrà un risultato quanto più simile alla situazione reale. Dopo aver realizzato lo *shapefile – poligono*, lo si esporta in formato raster (*.TIF o *.flt) mantenendo la stessa risoluzione, quindi le dimensioni delle celle, e lo stesso dominio di calcolo del DTM: i due file devono essere perfettamente sovrapponibili.

Per quanto riguarda il bacino del Rio Toèl Lench, sono state individuate le seguenti tipologie di uso del suolo (ante opera Fig. 17, con opera* Fig. 18) con i relativi codici:

1)	Edificio	111
2)	Superficie asfaltata	122
3)	Palaghiaccio	142
4)	Vegetazione perifluviale	311
5)	Foresta	312
6)	Area verde	321
7)	Deposito legna	324
8)	Area scarsamente vegetata	333
9)	Alveo Toèl Lench	511
10)	Cunettone	801*
11)	Argini	802*
12)	Piazza deposito	803*

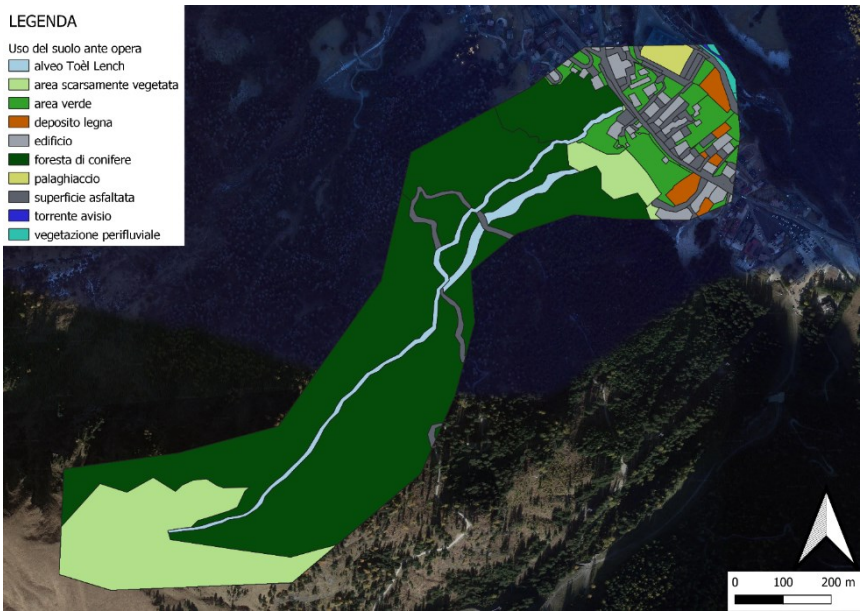

Figura 17 - Uso del suolo ante opera, bacino Toèl Lench

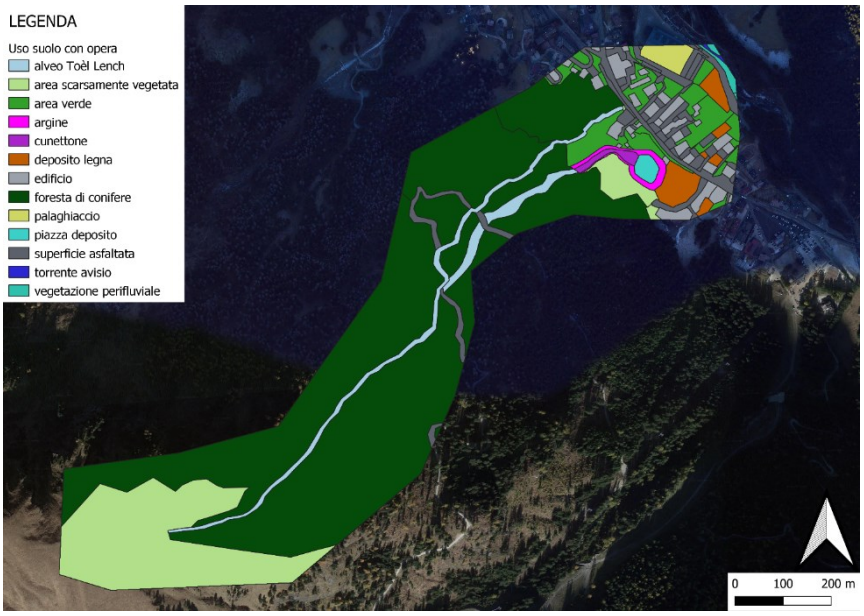

Figura 18 - Uso del suolo con opera, bacino Toèl Lench

Dopo aver ottenuto il file raster dell'uso del suolo, è possibile creare un file di testo in cui sono riportati i parametri caratteristici di ciascuna tipologia. Nel file di testo (*.txt) è necessario inserire le seguenti voci, riportate in Figura 19 per il bacino del Rio Toèl Lench:

- Codice identificativo del suolo: relaziona i parametri del file di testo con il suolo del file raster;
- Coefficiente di conduttanza: controlla la resistenza al moto (maggiore è il coefficiente, minore sarà la resistenza al moto);

- Identificativo per il fondo mobile (valore 1.0) o fondo fisso (valore 0.0);
- Angolo inferiore limite per l'erosione, sopra la quale avviene il fenomeno dell'erosione, espresso in gradi;
- Velocità limite per l'erosione: velocità minima necessaria per avere erosione, espressa in metri al secondo;
- Angolo superiore limite per il deposito: angolo sotto il quale avviene il fenomeno del deposito, espresso in gradi;
- Velocità limite per il deposito: velocità minima per avere il deposito, espressa in metri al secondo;
- Valore della concentrazione solida del fondo;
- Identificativo per stabilire l'erodibilità (valore 0.0) o meno (valore 1.0) del suolo.

In particolare, se il parametro "fondo fisso/mobile" è di tipo fisso indica un'area in cui non avviene né erosione né deposito per cui in tali celle si avrà esclusivamente propagazione idraulica del flusso senza la modifica delle quota del terreno di partenza. Il parametro "erodibilità" indica che una superficie non erodibile si ha nel caso non sia possibile l'erosione.

ID	CONDUTTANZA	MOBILE/FISSO	ANG INF EROS (°)	VEL INF EROS (m/s)	ANG SUP DEPOS (°)	VEL SUP DEPOS (m/s)	C RIPOSO	ERODIBILITA'	DESCRIZIONE
111.0	1.0	1.0	89.0	9.0	14.0	1.0	0.75	0.0	Edificio
122.0	1.0	1.0	20.0	3.0	14.0	1.0	0.75	0.0	Strada forestale
142.0	2.0	1.0	20.0	2.0	14.0	1.0	0.75	1.0	Palaghiaccio
311.0	4.0	1.0	16.0	2.0	14.0	1.0	0.75	0.0	Veg perifluviale
312.0	5.0	1.0	20.0	2.0	14.0	1.0	0.75	0.0	Foresta
321.0	3.0	1.0	10.0	1.0	8.0	0.5	0.75	0.0	Area verde
324.0	3.0	1.0	10.0	1.0	8.0	0.5	0.75	0.0	Deposito legna
333.0	4.0	1.0	20.0	2.0	14.0	1.0	0.62	0.0	Area scars veg
511.0	4.0	1.0	20.0	2.0	14.0	1.0	0.62	0.0	Alveo Toèl Lench
801.0	5.0	1.0	16.0	1.8	14.0	1.0	0.75	1.0	Cunettone
802.0	2.0	1.0	10.0	1.0	8.0	0.5	0.75	1.0	Argini
803.0	3.0	1.0	10.0	1.0	8.0	0.5	0.75	0.0	Piazza deposito

Figura 19 - Parametri dell'uso del suolo, bacino Toèl Lench

7.3 Condizioni al contorno e sezioni interne

Le condizioni al contorno sono il luogo in cui il flusso viene inserito all'interno oppure esce dal bacino oggetto di studio, rispettivamente sezione di ingresso e sezione di uscita. Le sezioni interne, invece, rappresentano le zone di controllo del bacino più critiche, ad esempio dove la morfologia del bacino o il flusso cambiano notevolmente. Tali sezioni sono realizzate in ambiente Q-Gis attraverso la creazione di uno *shapefile – polilinea*, successivamente il file di tipo *vector* viene convertito in *raster* (*.TIF o *.flt) mantenendo le celle contigue fra loro e svilupparsi lungo le direzioni cardinali e non in senso obliquo.

A ciascuna sezione si assegna il seguente codice:

- 5000 sezione di ingresso (e progressivo in caso di più sezioni);
- 9000 sezione di uscita;
- 1000 sezioni intermedie di controllo (e progressivo da monte verso valle in caso di più sezioni).

Nel caso di celle vuote del raster, si assegna il valore *NoData*. A ciascuna sezione di ingresso corrisponde un idrogramma, e il numero massimo di sezioni è 999.

Di seguito si riportano le condizioni al contorno e le sezioni interne relative al bacino del Rio Toèl Lench (Fig. 20).

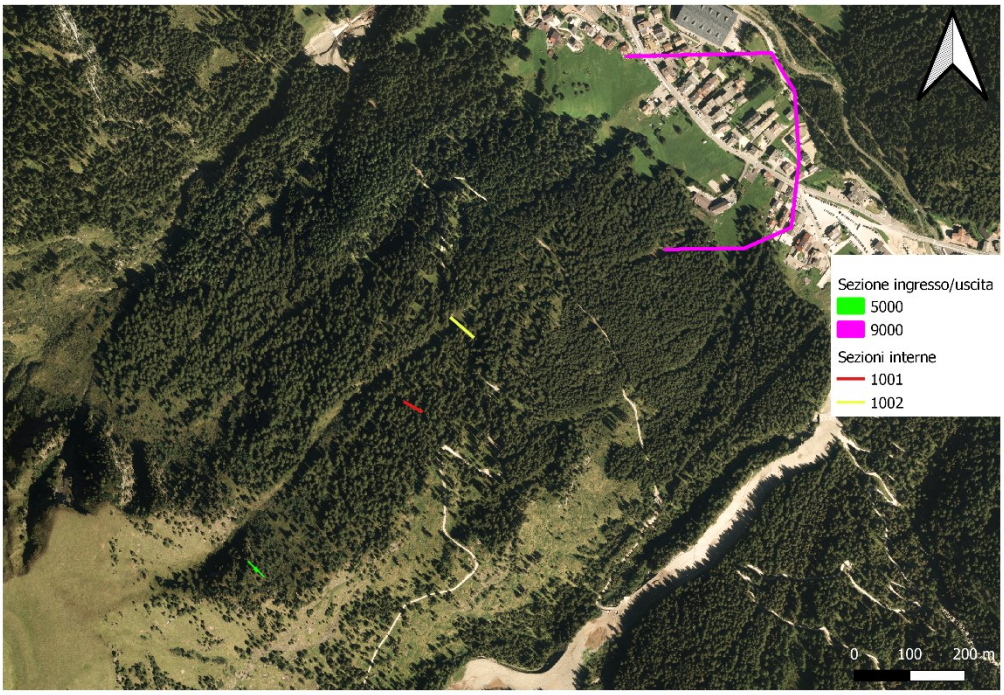

Figura 20 - Condizioni al contorno e sezioni interne, bacino Toèl Lench

7.4 Idrogramma solido – liquido

Esistono diversi metodi di calcolo dell'idrogramma solido – liquido ed influenzano in modo diverso i risultati della simulazione, infatti a ciascuno di essi corrisponde un proprio risultato della portata. A partire dai valori di precipitazione registrati dalla stazione pluviometrica, si calcola l'idrogramma, al fine di determinare il valore di portata che simula la colata avvenuta più correttamente. In particolare, nel calcolo della portata che ha innescato la colata detritica durante

Vaia, si tiene conto della precipitazione di maggior intensità caduta nella stazione di Pian Fedaia (Diga).

7.4.1 Determinazione idrogramma solido – liquido con il modello di Gregoretti et al. (2016) e Bernard (2018) e metodologia di determinazione con metodo proposto da Gregoretti et al. (2019)

La modellazione idrologica è necessaria al fine di poter realizzare il file di testo dell'idrogramma di piena, uno dei file di input del modello D.F.R.M. La modellazione utilizzata è quella che descrive il deflusso superficiale in due fasi: la prima consiste nel calcolo della precipitazione efficace, la seconda nella propagazione della precipitazione efficace alla sezione di chiusura.

La prima fase, per il calcolo della precipitazione efficace, viene svolta applicando i metodi dell'SCS – CN (Botter e Rinaldo, 2003; Borga et al., 2007; Grimaldi et al., 2012) e di Green – Ampt (Grimaldi et al., 2013; Rengers et al., 2016). Questi metodi non riescono però a simulare l'andamento impulsivo di un idrogramma riferito a una colata detritica, per questo motivo Gregoretti et al. (2016) e Bernard (2018), relativamente all'approccio di Grimaldi et al. (2013), hanno sviluppato un metodo che tenga conto dell'impulsività del fenomeno. Tale metodo è dato dall'unione del metodo SCS – CN con l'equazione di infiltrazione di Horton, semplificandola con un solo termine asintotico. Questa equazione semplificata va a simulare il contributo del deflusso superficiale della precipitazione, ovvero quella parte di precipitazione che non si infiltra. Questo modello è denominato SCS – CNH e genera precipitazione efficace quando l'intensità della precipitazione è maggiore della velocità di infiltrazione.

La seconda fase del modello, relativa alla propagazione della precipitazione efficace alla sezione di chiusura, fa riferimento a quanto proposto da Gregoretti et al. (2019). L'idrogramma utilizzato presenta una forma triangolare con i valori fissati del picco (Q_P) (7.1), stimato attraverso la relazione di Lanzoni et al. (2017) da valori sperimentali, e del volume solido – liquido.

$$Q_P = \frac{c_*}{c_* - c_F} Q_{PL} \tag{7. 1}$$

Con: Q_P valore di picco dell'idrogramma liquido

c_* concentrazione volumetrica dei sedimenti sul fondo, a riposo

c_F concentrazione volumetrica dei sedimenti al fronte (Takahashi, 2007; aggiornata da Lanzoni et al., 2017)

$$c_F = \frac{\rho \tan \vartheta}{(\rho_s - \rho)(\tan \varphi_{qs} - \tan \vartheta)} Q_{PL} \tag{7. 2}$$

Con: ϑ angolo di inclinazione del fondo

φ_{qs} angolo di attrito quasi statico

Il volume solido – liquido della colata (V_{SL}) (7.3) viene calcolato sommando il volume di deflusso superficiale che contribuisce alla colata (V_L), il volume solido dei sedimenti inglobati nella corrente (V_S) e il volume liquido di saturazione ($\frac{V_S}{C^*} - V_S$, con $\frac{V_S}{C^*}$ pari al volume di sedimento solido e liquido di saturazione):

$$V_{SL} = V_L + \frac{V_S}{c_*} \tag{7. 3}$$

La durata dell'idrogramma viene calcolata con la seguente relazione (7.4):

$$t_1 = \frac{2Q_P}{V_{SL}} \tag{7. 4}$$

La concentrazione volumetrica del sedimento (c) è assunta costante e pari al valore massimo (c_F) fino al tempo di picco ($t \leq t_p$, con t_p = tempo di picco) e poi decresce linearmente La concentrazione media a valle del picco ($t_p \leq t \leq t_1$) è pari a:

$$c_m = \frac{V_S - 0.5\, C_F Q_P t_P}{V_{SL} - 0.5\, Q_P t_p} Q_{PL} \tag{7. 5}$$

Il valore della concentrazione volumetrica per $t = t_1$, dall'assunzione lineare, è quindi pari a (7.6):

$$c_1 = c_m - (c_F - c_m) = 2c_m - c_F \tag{7. 6}$$

Quest'ultima concentrazione può assumere valore negativo. È il caso in cui il volume di sedimento risulta insufficiente per una decrescita lineare della concentrazione per l'intera durata dell'idrogramma, e si annulla per (7.7):

$$t_c = 2\ \frac{V_S - 0.5\ c_F Q_P t_P}{c_F (V_{SL} - 0.5\ Q_P t_P)} \qquad (7.\ 7)$$

Il nuovo Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (Autorità di Bacino distrettuale delle Alpi Orientali) dispone le linee guida per il calcolo degli idrogrammi solido – liquidi. Esistono molteplici relazioni per il calcolo del volume di sedimento (V_{SED}), e per quanto riguarda l'idrogramma che massimizza il picco di portata (idrogramma a forma triangolare), viene calcolato attraverso la relazione di Marchi et al. (2019) (7.8):

$$V_{SED} = 52000\ A^{0.94} \qquad (7.\ 8)$$

Con: V_{SED} volume del sedimento depositato $[m^3]$

A area del bacino, chiusa all'apice del conoide $[km^2]$

Nel caso in cui l'evento da simulare abbia un Tempo di Ritorno elevato, il volume di sedimento viene calcolato attraverso la relazione di Marchi et al. (2019) (7.9):

$$V_{SED} = 77000\ A^{1.01} \qquad (7.\ 9)$$

Di seguito si riporta il file di testo e il grafico dell'idrogramma solido – liquido del bacino del Rio Toèl Lench (Fig. 21, Grafico 40), calcolato con il modello di Gregoretti et al. (2019) e utilizzato come file di input per il modello D.F.R.M. Il file di testo è composto da tre colonne, precedute dalla parola "Sezione 1" e terminano con uno spazio vuoto ed "END". Le colonne esprimono i seguenti parametri:

- Tempo (s)
- Portata totale (m^3/s)
- Concentrazione volumetrica della fase solida

L'idrogramma solido – liquido viene calcolato attraverso la precipitazione di maggiore intensità misurata nella stazione Pian Fedaia (Diga) (cfr. Capitolo 4.1.1).

Sezione 1

5388.031	0.000	0.400
5448.031	0.709	0.400
5508.031	0.697	0.393
5568.031	0.685	0.387
5628.031	0.673	0.380
5688.031	0.661	0.374
5748.031	0.649	0.367
5808.031	0.637	0.361
5868.031	0.626	0.354
5928.031	0.614	0.348
5988.031	0.602	0.341
6048.031	0.590	0.334
6108.031	0.578	0.328
6168.031	0.566	0.321
6228.031	0.554	0.315
6288.031	0.542	0.308
6348.031	0.530	0.302
6408.031	0.518	0.295
6468.031	0.506	0.288
6528.031	0.494	0.282
6588.031	0.483	0.275
6648.031	0.471	0.269
6708.031	0.459	0.262
6768.031	0.447	0.256
6828.031	0.435	0.249
6888.031	0.423	0.243
6948.031	0.411	0.236
7008.031	0.399	0.229
7068.031	0.387	0.223
7128.031	0.375	0.216
7188.031	0.363	0.210
7248.031	0.351	0.203
7308.031	0.340	0.197
7368.031	0.328	0.190
7428.031	0.316	0.183
7488.031	0.304	0.177
7548.031	0.292	0.170
7608.031	0.280	0.164
7668.031	0.268	0.157
7728.031	0.256	0.151
7788.031	0.244	0.144
7848.031	0.232	0.138
7908.031	0.220	0.131
7968.031	0.209	0.124
8028.031	0.197	0.118
8088.031	0.185	0.111
8148.031	0.173	0.105
8208.031	0.161	0.098
8268.031	0.149	0.092
8328.031	0.137	0.085
8388.031	0.125	0.078
8448.031	0.113	0.072
8508.031	0.101	0.065
8568.031	0.089	0.059
8628.031	0.077	0.052
8688.031	0.066	0.046
8748.031	0.054	0.039
8808.031	0.042	0.033
8868.031	0.030	0.026
8928.031	0.018	0.019
8988.031	0.006	0.013
9018.236	0.000	0.010

END

Figura 21 - Idrogramma solido - liquido, metodo di Gregoretti et al. (2019)

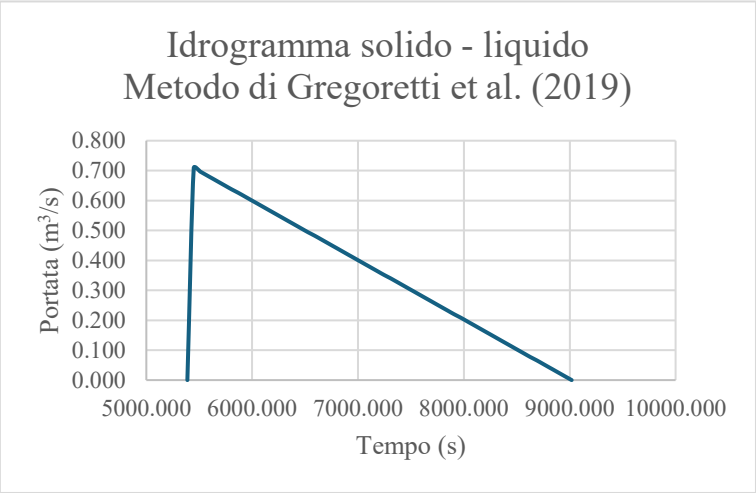

Grafico 40 - Idrogramma solido - liquido calcolato con il metodo di Gregoretti et al. (2019)

Durante le simulazioni viene utilizzato un ulteriore idrogramma solido – liquido di forma triangolare, relativo all'evento con Tempo di Ritorno di 200 anni (Fig. 22, Grafico 41). Il file di testo di input nel modello D.F.R.M. ha la stessa struttura di quello precedentemente descritto. In particolare, si effettua la simulazione con questo tempo di ritorno in quanto l'opera realizzata è stata dimensionata su un tempo di ritorno di 200 anni.

```
Sezione 1
1634.384        0.000        0.400
1694.384        1.456        0.400
1754.384        1.420        0.399
1814.384        1.385        0.397
1874.384        1.350        0.396
1934.384        1.314        0.394
1994.384        1.279        0.393
2054.384        1.244        0.391
2114.384        1.208        0.390
2174.384        1.173        0.388
2234.384        1.137        0.387
2294.384        1.102        0.385
2354.384        1.067        0.384
2414.384        1.031        0.382
2474.384        0.996        0.381
2534.384        0.961        0.379
2594.384        0.925        0.378
2654.384        0.890        0.376
2714.384        0.855        0.375
2774.384        0.819        0.373
2834.384        0.784        0.372
2894.384        0.748        0.370
2954.384        0.713        0.369
3014.384        0.678        0.367
3074.384        0.642        0.366
3134.384        0.607        0.364
3194.384        0.572        0.363
3254.384        0.536        0.361
3314.384        0.501        0.360
3374.384        0.466        0.358
3434.384        0.430        0.357
3494.384        0.395        0.356
3554.384        0.359        0.354
3614.384        0.324        0.353
3674.384        0.289        0.351
3734.384        0.253        0.350
3794.384        0.218        0.348
3854.384        0.183        0.347
3914.384        0.147        0.345
3974.384        0.112        0.344
4034.384        0.077        0.342
4094.384        0.041        0.341
4154.384        0.006        0.339
4164.170        0.000        0.339

END
```

Figura 22 - Idrogramma solido - liquido TR=200 anni, bacino Toèl Lench

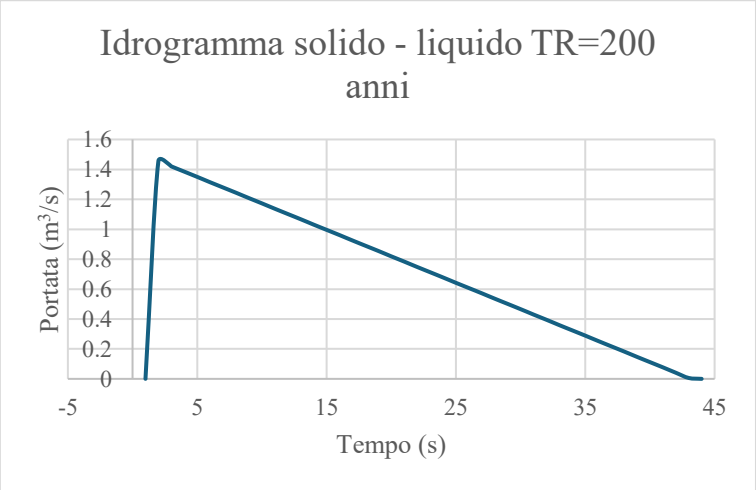

Grafico 41 - Idrogramma solido - liquido, TR = 200 anni

7.5 Parametri della simulazione

I file di input indispensabili per il funzionamento del modello D.F.R.M. sono il DEM, le sezioni di ingresso e di uscita e l'idrogramma solido – liquido. Attraverso dei *radio button* è possibile abilitare l'inserimento di specifici file opzionali: con i parametri distribuiti si inserisce il file dell'uso del suolo e delle sue caratteristiche; mentre con i parametri concentrati è possibile inserire il coefficiente di conduttanza costante per tutto il campo di moto. Con le sezioni interne si abilita l'inserimento dell'omonimo file e del relativo parametro *Time step interno di output*, in secondi, che esprime l'intervallo temporale di output dei risultati relativi alle sezioni interne; il passo temporale minimo è di 15 secondi.

In modo tale da far defluire l'intero idrogramma alla sezione di chiusura, la durata della simulazione deve essere maggiore della durata dell'idrogramma. In questo caso, la durata dell'idrogramma solido – liquido calcolato con il metodo di Gregoretti et al. (2019) è pari a 9018.236 secondi, per cui le simulazioni in cui viene utilizzato questo idrogramma hanno una durata pari a 10000 secondi; mentre la simulazione che utilizza l'idrogramma con TR = 200 anni ha durata 4164.170 secondi, per cui la simulazione ha una durata di 4500 secondi. Di seguito si riportano tutti i parametri utilizzati per tutte le simulazioni (Tab. 44) e, a titolo di esempio, la schermata dell'interfaccia del D.F.R.M. di una delle simulazioni (Fig. 23).

Parametro	Valore	Unità di misura
Time step interno di output	50.0	s
Durata simulazione	10000.0	s
	4500.0	s
Profondità minima necessaria alla propagazione	0.03	m
Profondità minima per erosione/deposito	0.1	m
Concentrazione solida media	0.0	-
Concentrazione solida di riposo	0.0	-
Coefficiente di Egashira per l'erosione (KE)	0.5	-
Coefficiente di Egashira per il deposito (KD)	1.0	-
Angolo limite per il deposito agevolato	5.0	°
Coefficiente di velocità per il deposito agevolato	1.0	-

Tabella 44 - Parametri simulazione D.F.R.M.

In particolare, i valori della concentrazione solida media e della concentrazione solida di riposo sono posti pari a 0.0. In questo modo il modello rileva per ciascuna simulazione le concentrazioni della colata dal file dell'idrogramma, e la concentrazione solida di riposo dal file di testo relativo all'uso del suolo, entrambi inseriti dall'utente prima di avviare la simulazione.

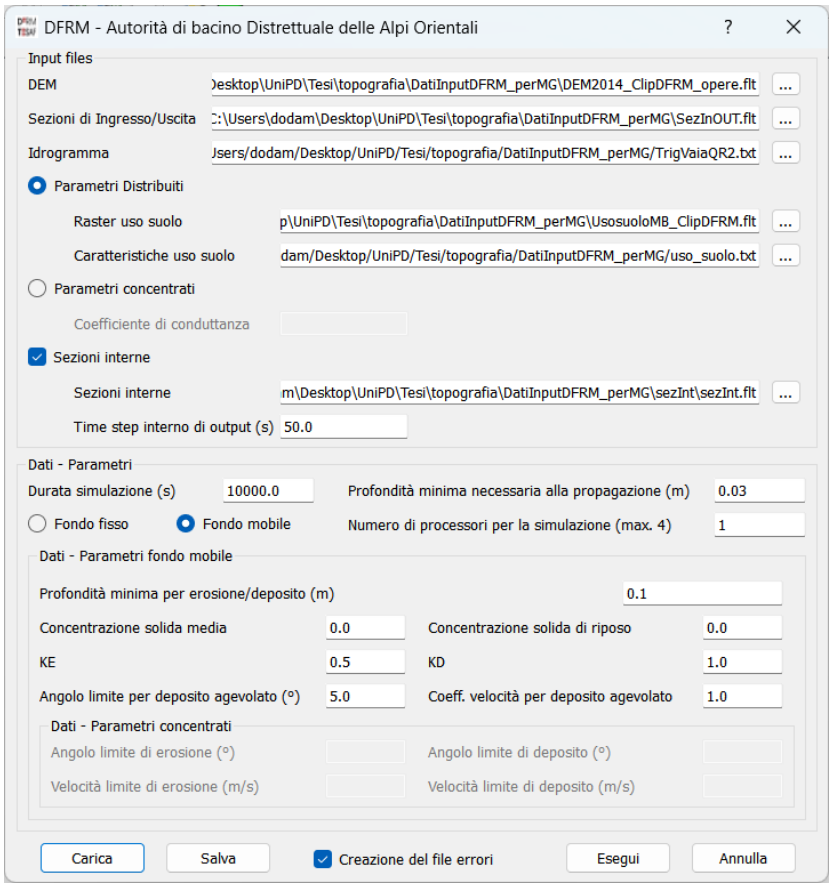

Figura 23 - Interfaccia e parametri utilizzati per una simulazione D.F.R.M.

8 RISULTATI DEL MODELLO D.F.R.M.

Una volta eseguita e completata la simulazione mediante modello D.F.R.M. di Gregoretti et al. (2019), si ottengono una serie di file che descrivono i risultati dell'evento simulato. I file di maggior importanza sono il "*.log*", un file di testo che contiene le informazioni relative alle volumetrie solido – liquide e agli eventuali errori (WARNING), e i "*.flt*", file di tipo raster leggibili in Q-Gis. Inoltre, nel caso siano presenti errori durante la simulazione, è presente il file "*.err*" che riporta gli errori e le anomalie riscontrate.

La maggior parte dei risultati di una simulazione con il modello D.F.RM. sono di tipo "*.flt*", quindi mappe che descrivono i vari parametri; ciascun file viene rielaborato in Q-Gis in modo tale da risultare al meglio le caratteristiche. Per ciascuna simulazione effettuata, i parametri per cui è disponibile il file raster sono i seguenti:

- Coefficiente di conduttanza;
- Identificativo fondo mobile o fondo fisso;
- Angolo minimo per avere erosione;
- Velocità minima per avere erosione;
- Angolo minimo per avere deposito;
- Velocità minima per avere deposito;
- Concentrazione solida del fondo;
- Codice di controllo dell'erodibilità.

Dalle simulazioni effettuate, le mappe di maggior importanza al fine di una analisi e di un confronto sono:

- DTM finale;
- Mappa delle profondità di erosione e depositi finali, espressi in metri:
  Esprime la situazione finale riguardo le erosioni e i depositi nel dominio di calcolo; corrisponde al DoD (DEM of Difference) finale.
- Mappa delle profondità massime raggiunte, espresse in metri:
  Esprime le massime altezze di corrente solido – liquida transitate per ciascuna cella del dominio di calcolo.
- Mappa dello spessore massimo raggiunto, espresso in metri:
  Lo spessore massimo comprende la profondità della corrente e l'altezza di deposito.
- Mappa della concentrazione solido – liquida massima:

La concentrazione massima del flusso di colata esprime la variazione della componente solida del flusso solido – liquido durante la simulazione dell'evento.

- Mappa della velocità di flusso massima raggiunta, espressa in metri al secondo:
  La mappa rappresenta la velocità massima registrata durante la simulazione in ciascuna cella del dominio di calcolo; è espressa in metri al secondo.
- Tempo di allagamento, espresso in secondi:
  Rappresenta il tempo di allagamento di ciascuna cella del dominio di calcolo; quindi, il tempo in cui il fenomeno di colata è transitato per ciascuna cella.

Tutti i file raster elencati precedentemente sono disponibili anche nella situazione "pre-finale", nella quale vengono considerate solo le celle con profondità di flusso superiore alla profondità minima necessaria per la propagazione (> 0.03 m); al contrario nella versione "finale" vengono considerate tutte le celle.

Per quanto riguarda le sezioni interne di ogni simulazione, inserite dall'utente e non necessarie al fine di una corretta simulazione effettuata con il modello D.F.R.M., il modello stampa un file di testo per ciascuna sezione. Attraverso ciascun file, è avere le informazioni ed analizzare l'andamento spazio – temporale nel campo di moto di ciascuna delle seguenti grandezze:

- Tempo, espresso in secondi;
- Quota della superficie libera, espressa in metri;
- Quota terreno, data dalla somma della quota iniziale del terreno e del deposito/erosione, espressa in metri;
- Quota terreno iniziale, espressa in metri;
- Profondità, data dall'altezza di flusso, espressa in metri;
- Spessore, dato dall'altezza del flusso e del deposito, espresso in metri;
- Concentrazione solida;
- Portata totale transitata dalle sezioni, espressa in metri cubi al secondo;
- Portata solida, data dalla frazione solida della portata totale transitante la sezione, espressa in metri cubi al secondo.

Riguardo il bacino del Rio Toèl Lench (Canazei, TN), si sono effettuate quattro diverse simulazioni: evento Vaia del 29 ottobre 2018, evento Vaia del 29 ottobre 2018 in presenza dell'opera idraulica ed evento con TR200 sia in presenza che in assenza dell'opera idraulica. Nei capitoli successivi si riportano i risultati delle simulazioni, sottoforma di analisi per ciascuna simulazione e in seguito il confronto tra le stesse. Per ciascuna simulazione, si riportano le mappe precedentemente elencate e i valori registrati alle sezioni intermedie; per i confronti si riportano le mappe di maggior importanza.

8.1 Simulazione evento Vaia

Mappa erosione/deposito finale

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino del Rio Toèl Lench, prevale il fenomeno del deposito rispetto all'erosione (Fig. 24). In particolare, lungo tutto il canale principale si ha deposito: dall'apice del bacino fino alla strada forestale si verifica un deposito di materiale inferiore a 0.5 metri di altezza, inoltre si ha una piazza di deposito dovuta alla diminuzione della pendenza del terreno; mentre all'uscita del bosco e per tutta la piana il sedimento aumenta fino a delle piazze di altezza compresa tra 1.0 e 2.0 metri. Il materiale di deposito raggiunge e supera la strada statale, arrivando al palaghiaccio con un altezza inferiore a 0.5 metri. Per quanto riguarda l'erosione, è presente all'interno del collettore sia all'apice del bacino sia a monte e a valle della strada forestale, causata dalle pendenza più elevate. Si ipotizza che il deflusso arrivato nei pressi del centro abitato, abbia depositato sedimento di granulometria fine dal momento che l'altezza di deposito è inferiore a 0.5 metri, e per questo motivo la corrente giunta è di tipo prevalentemente liquida e a bassa concentrazione. Al contrario, si ipotizza che le piazze di deposito, formate all'uscita del bosco, derivino da una corrente ricca di materiale solido di media granulometria, con conseguente concentrazione più elevata rispetto a quella registrata nel centro abitato. Al fine di una migliore rappresentazione grafica, non si è tenuto conto dell'erosione compresa tra 0.5 e 0 metri.

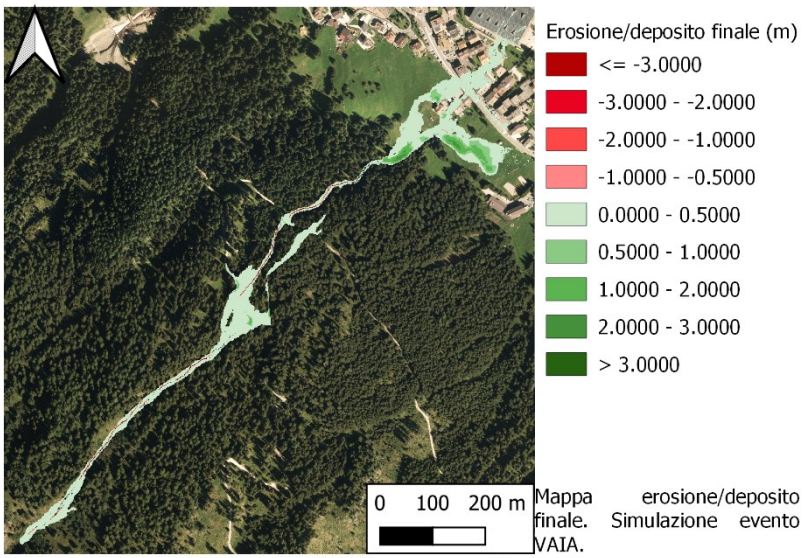

Figura 24 - Mappa erosione/deposito finale. Simulazione evento Vaia.

Mappa concentrazione massima

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench, si osserva una concentrazione decrescente da monte verso valle, con valori compresi tra 0.5 e 0.6 in corrispondenza del collettore e di 0.2 – 0.4 nella parte terminale del bacino (Fig. 25). Si osserva una concentrazione inferiore a 0.2 all'apice del bacino. Riguardo la morfologia dell'area di studio, la concentrazione decrescente da monte verso valle può corrispondere alla tipologia di materiale trasportato dalla corrente: si ipotizza un deposito di materiale nella piana in prossimità delle prime abitazioni, causato da una corrente con concentrazione nell'intorno di 0.4. Quindi, il materiale depositato potrebbe essere di media granulometria. Al fine di una migliore analisi dei risultati, la concentrazione inferiore a 0.1 non è stata presa in considerazione.

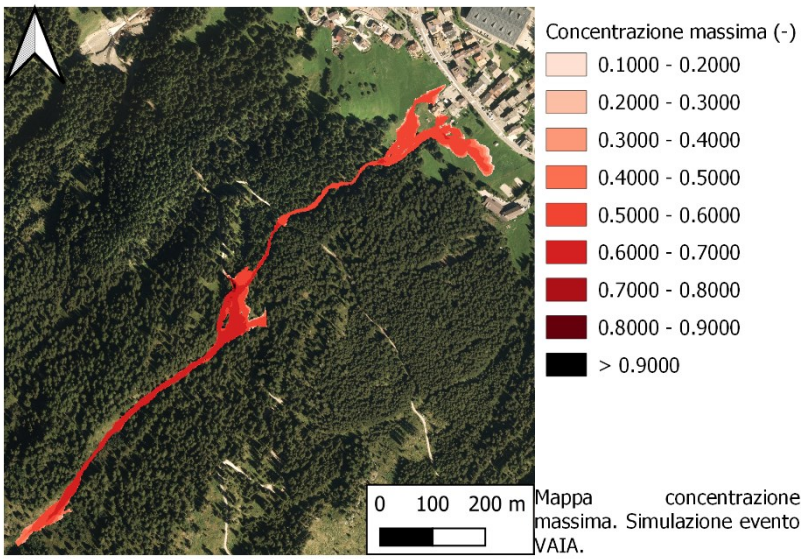

Figura 25 - Mappa concentrazione massima. Simulazione evento Vaia.

Mappa spessore massimo

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench, si osserva uno spessore di circa 0.50 metri lungo il canale principale; lo spessore aumenta in corrispondenza della diramazione del canale, nella parte terminale del collettore, con valori compresi tra 1.0 e 3.0 metri (Fig. 26). Si riscontra uno spessore della corrente solido - liquida a valle della strada Statale, nei pressi del palaghiaccio e di altezza inferiore a 0.50 metri, a testimonianza che la colata detritica ha superato la piana e invaso il centro abitato. Al fine di una migliore analisi dei risultati, lo spessore inferiore a 0.0 non è stato preso in considerazione.

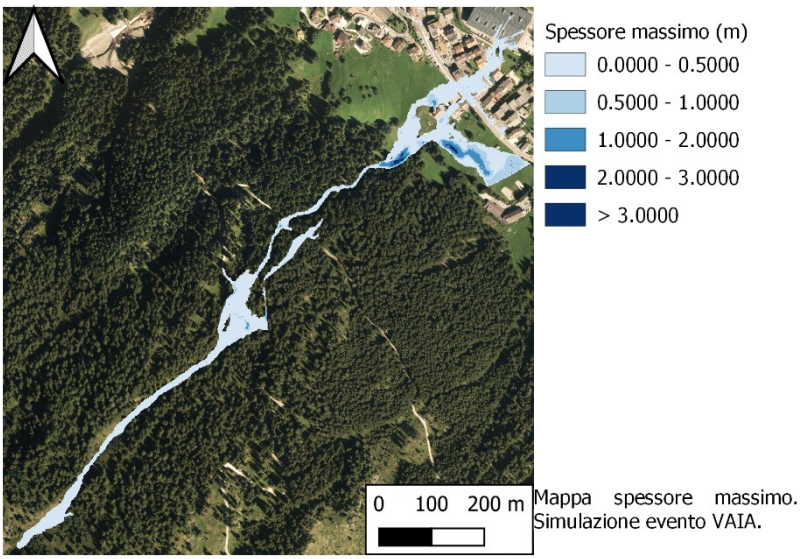

Figura 26 - Mappa spessore massimo. Simulazione evento Vaia

Profondità massima della corrente solido – liquida

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench, si osserva che la profondità massima non è elevata. In particolare, il valore più alto della profondità si raggiunge nell'area soggetta ad esondazione, in corrispondenza della diramazione in destra idrografica, con valore massimo di 1.0 metro (Fig. 27). Nel canale si registra una profondità massima inferiore a 0.5 metri. Al fine di una migliore analisi dei risultati, la profondità massima inferiore a 0.0m non è stata presa in considerazione.

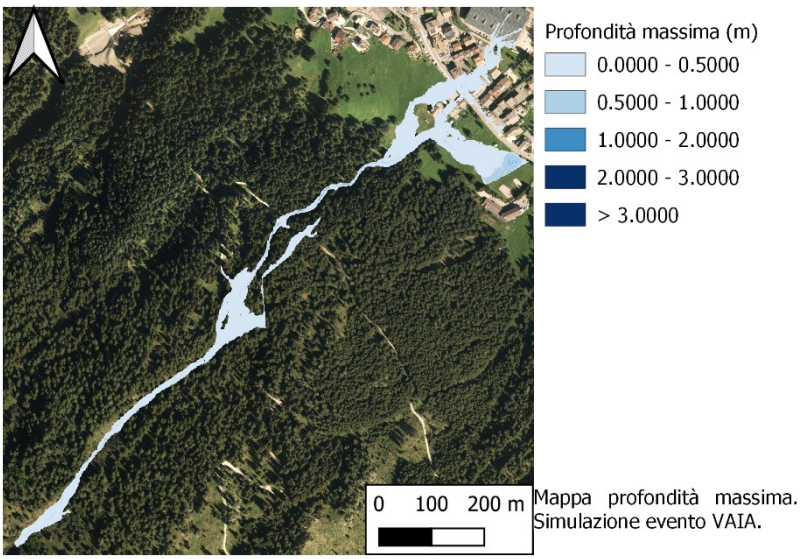

Figura 27 - Profondità massima corrente solido-liquida. Simulazione evento Vaia con opera

Velocità massima

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench, la velocità massima si osserva lungo il canale principale, con valori compresi tra 1.0 e 2.0 m/s, e compresi tra 0.5 e 1.0 m/s in prossimità dello stesso (Fig. 28). In particolare, a monte della strada forestale, si ha un rallentamento della velocità in quanto è presente una diminuzione di pendenza. Nella piana si registrano valori di velocità fino a 2 m/s: questo è possibile ipotizzando una depressione del terreno, in cui la corrente ha potuto acquistare velocità rispetto alla zona immediatamente a monte. Al fine di una migliore analisi dei risultati, la velocità massima inferiore a 0.5 m/s non è stata presa in considerazione.

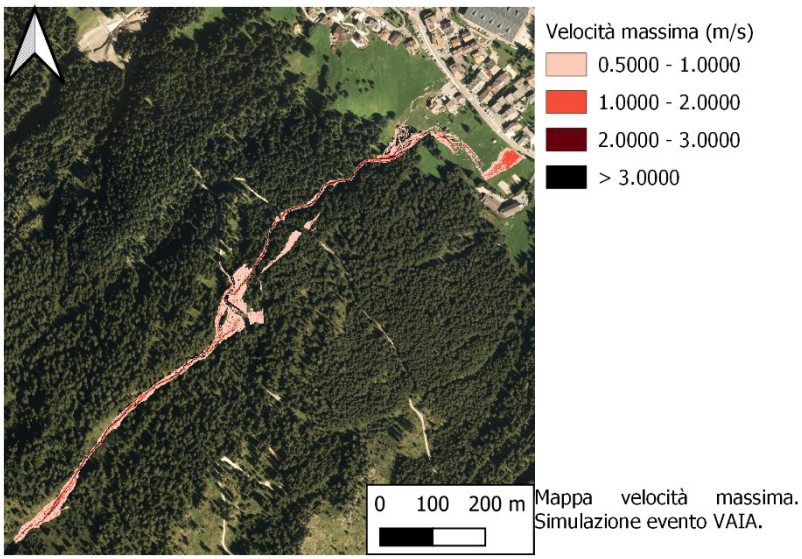

Figura 28 - Mappa velocità massima. Simulazione evento Vaia

Sezioni interne

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench, si riporta il grafico (Grafico 42) che esprime la portata totale nel tempo per ciascuna delle sezioni interne. In particolare, l'intervallo di tempo per il calcolo della volumetria transitata in ciascuna sezione è stato impostato pari a 50.0 secondi.

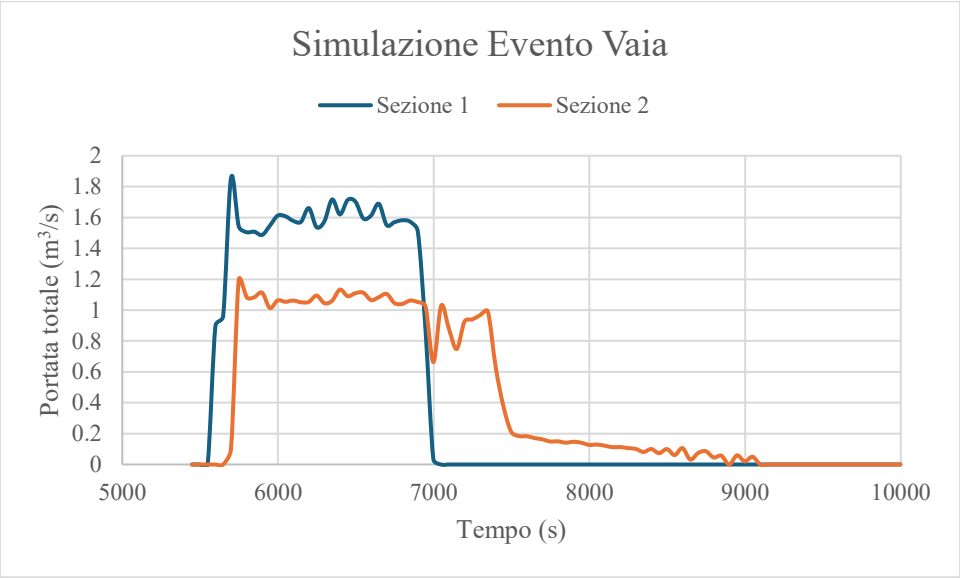

Grafico 42 - Relazione portata totale nel tempo. Simulazione evento Vaia, sezione n.1, 2.

8.2 Simulazione evento Vaia in presenza dell'opera

Mappa erosione/deposito finale

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, prevale il fenomeno del deposito rispetto all'erosione (Fig. 29). In particolare, lungo tutto il canale principale si ha deposito fino a 0.5 metri mentre l'erosione è maggiormente localizzata nei tratti a monte e a valle della strada forestale, con scavi compresi tra 0.5 e 2.0 metri. Non si verificano depositi ai margini del canale principale, infatti il materiale si arresta all'interno della piazza di deposito con altezze fino a 3.0 metri. Grazie all'azione del consolidamento del tratto terminale del collettore, non si verificano deviazioni del canale e il materiale rimane confinato all'interno di esso. L'erosione compresa tra 0.0 e 0.5 metri non è stata presa in considerazione.

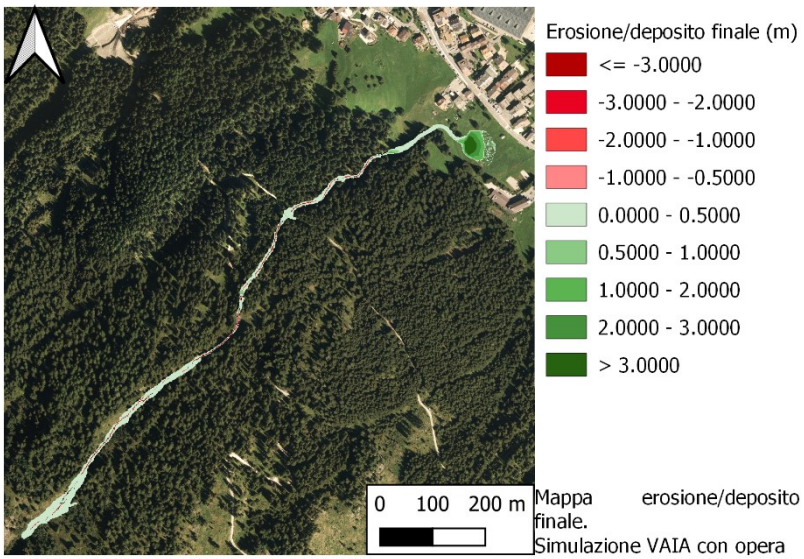

Figura 29 - Mappa erosione/deposito finale. Simulazione evento Vaia con opera

Mappa concentrazione massima

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, si osserva una concentrazione massima compresa tra 0.5 e 0.7 in corrispondenza del canale principale. La concentrazione diminuisce da monte verso valle, con concentrazione massima inferiore a 0.3 nella parte terminale della piazza di deposito. Si osserva una concentrazione inferiore a 0.4 nella parte iniziale del collettore (Fig. 30). La concentrazione inferiore a 0.1 non è stata presa in considerazione.

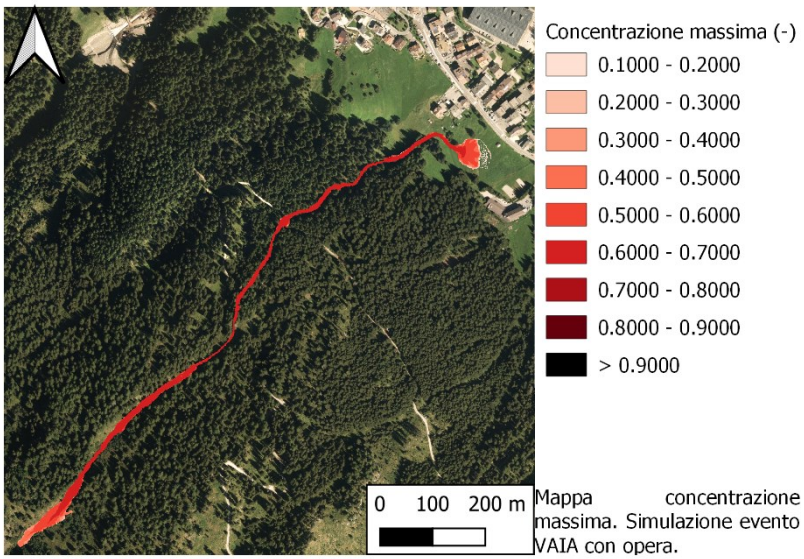

Figura 30 - Mappa concentrazione massima. Simulazione evento Vaia con opera

Mappa spessore massimo

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, si osserva uno spessore compreso tra 0.0 e 1.0 metri lungo tutto il canale principale. Lo spessore massimo si verifica all'interno della piazza di deposito, con valori fino a 3.0 metri, senza toccare le abitazioni e la strada (Fig. 31). Si può quindi osservare il corretto funzionamento dell'opera realizzata, nel caso in cui il fenomeno abbia intensità pari a quello avvenuto durante l'evento Vaia. Lo spessore massimo inferiore a 0.0 metri non è stato preso in considerazione.

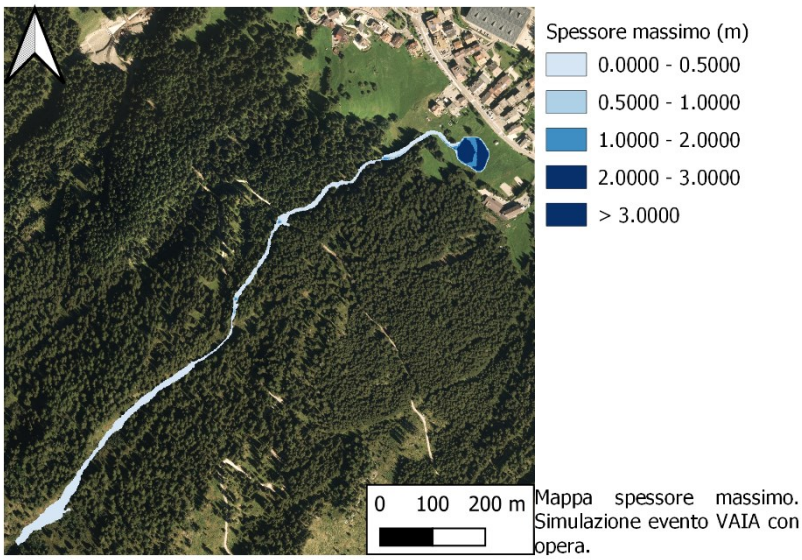

Figura 31 - Mappa spessore massimo. Simulazione evento Vaia con opera

Mappa profondità massima della corrente solido – liquida

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, si osserva che all'interno della piazza di deposito la profondità massima della corrente solido – liquida è compresa tra 0.0 e 1.0 metri. Si verifica il picco massimo di profondità nella parte terminale della piazza, con valori fino a 3.0 metri (Fig. 32). La profondità massima della corrente solido – liquida inferiore a 0.0 metri non è stata presa in considerazione.

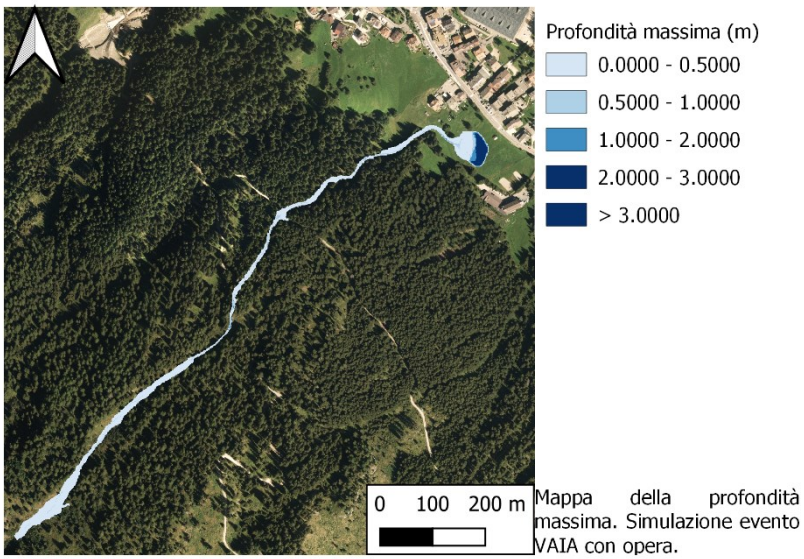

Figura 32 - Mappa profondità massima corrente solido-liquida. Simulazione evento Vaia con opera

Mappa velocità massima

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, si osserva una velocità massima variabile lungo il canale collettore: a monte si registra una velocità inferiore a 1.0 m/s, mentre nella parte centrale raggiunge i 2.0 m/s. Il picco della velocità massima si registra all'interno della piazza di deposito, con valori compresi tra 2.0 e 3.0 m/s (Fig. 33). La velocità massima inferiore a 0.5 m/s non è stata presa in considerazione.

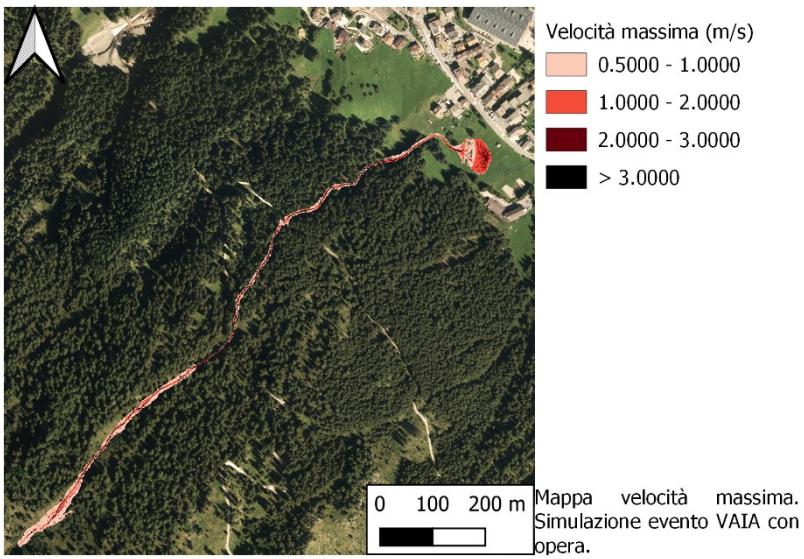

Figura 33 - Mappa velocità massima. Simulazione evento Vaia con opera

Sezioni interne

Per quanto riguarda la simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 nel bacino Toèl Lench in presenza dell'opera, si riporta il grafico (Grafico 43) che esprime la portata totale nel tempo per ciascuna delle sezioni interne. In particolare, l'intervallo di tempo per il calcolo della volumetria transitata in ciascuna sezione è stato impostato pari a 50.0 secondi.

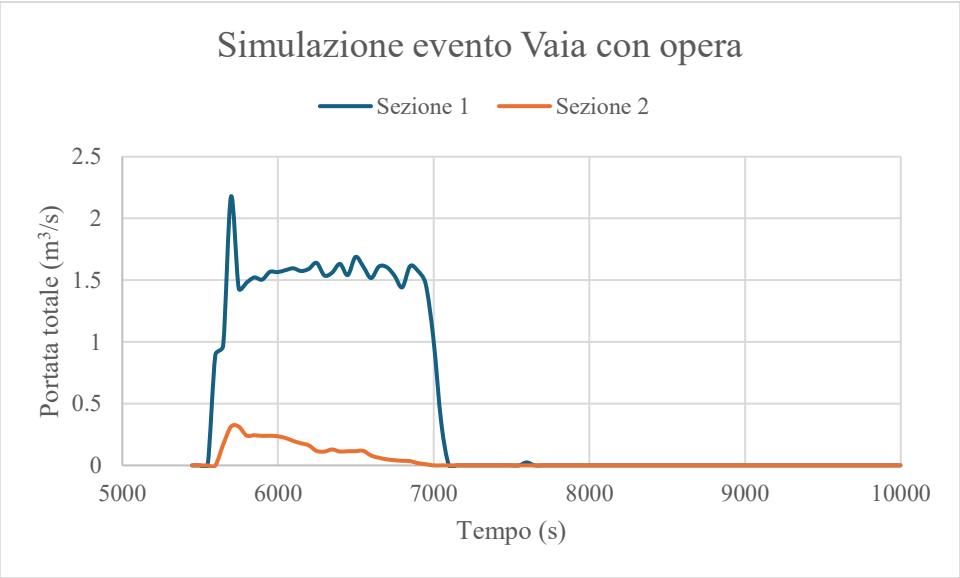

Grafico 43 - Relazione portata totale nel tempo. Simulazione evento Vaia con opera, sezione n. 1, 2.

8.3 Simulazione TR200 in assenza dell'opera

Mappa erosione/deposito finale

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, si verifica il fenomeno di deposito all'interno di tutto il bacino Toèl Lench, con valori compresi tra 0.0 e 0.5 metri lungo il canale principale e le sue diramazioni (Fig. 34). Il deposito aumenta nella parte terminale del bosco, in prossimità della strada statale, con valori massimi di 3.0 metri. L'erosione, invece, è localizzata nella parte più a monte del collettore, con valori fino a 2 metri. Si osserva una diramazione del canale principale, con conseguente deposito di sedimento, a partire dal tratto immediatamente a monte della strada forestale. L'erosione compresa tra 0.0 e 0.5 metri non è stata considerata.

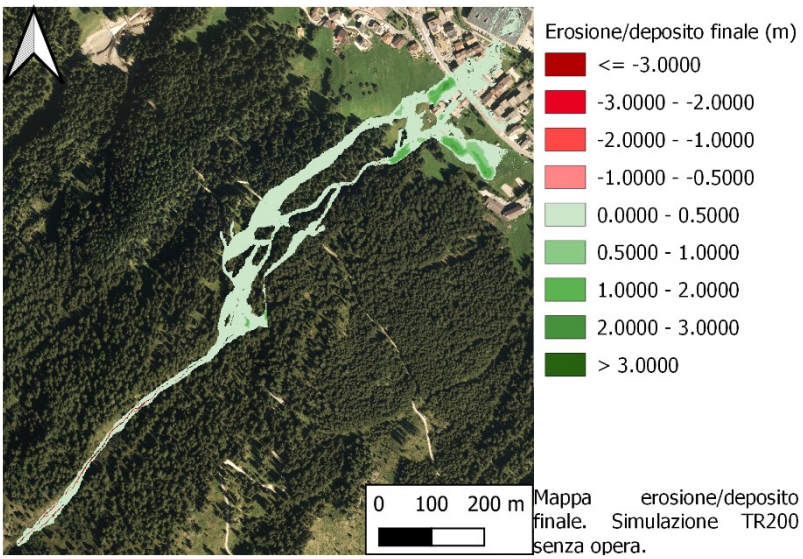

Figura 34 - Mappa erosione/deposito finale. Simulazione TR200 senza opera

Mappa concentrazione massima

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, la concentrazione massima è medio – elevata in quanto non si riscontrano valori minimi. Lungo tutto il canale principale la concentrazione è compresa tra 0.4 e 0.7 metri, mentre nella sua parte terminale e nella piana aumenta con valori massimi compresi tra 0.7 – 0.9 metri (Fig. 35). I valori di concentrazione massima inferiori a 0.1 metri non sono stati presi in considerazione.

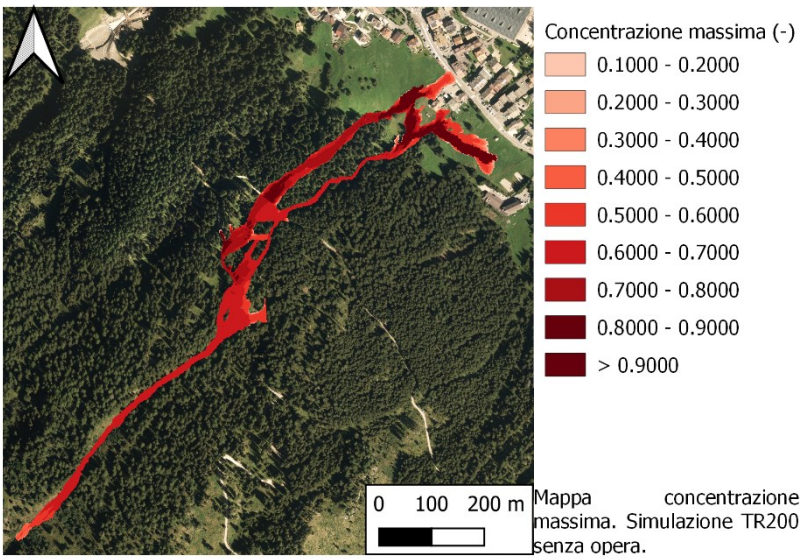

Figura 35 - Mappa concentrazione massima. Simulazione TR200 senza opera

Mappa spessore massimo

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, si osserva un andamento crescente dello spessore massimo da monte verso valle. Il valore più alto dello spessore massimo si verifica nella parte terminale del canale collettore, all'uscita del bosco, e nella piana con valori fino a 3.0 metri. Lungo il canale principale e le sue diramazioni, lo spessore massimo è di circa 0.5 metri (Fig. 36). Lo spessore massimo inferiore a 0.0 metri non è stato preso in considerazione.

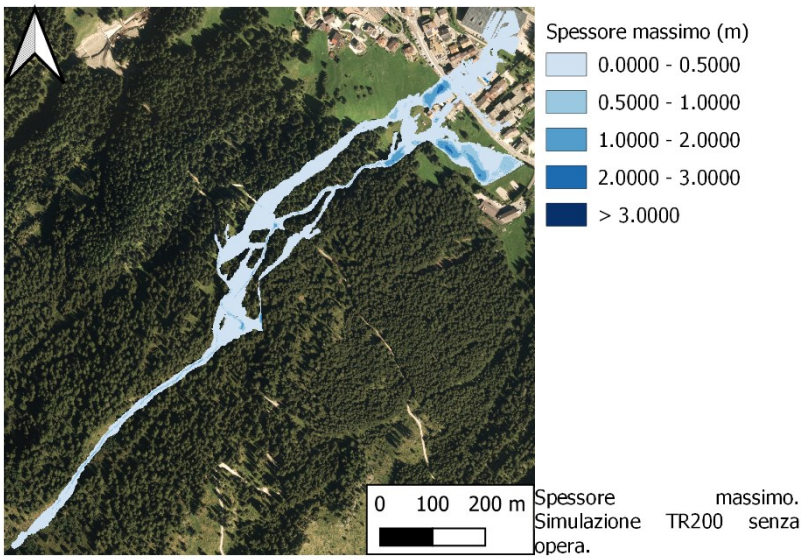

Figura 36 - Mappa spessore massimo. Simulazione TR200 senza opera

Mappa profondità massima della corrente solido – liquida

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, si registra una profondità massima della corrente solido – liquida costante di valore compreso tra 0.0 e 0.5 metri; un aumento si verifica nella parte terminale del canale, tra la strada e il bosco, con valore inferiore a 1.0 metri (Fig. 37). Le profondità inferiori a 0.0 metri non sono state prese in considerazione.

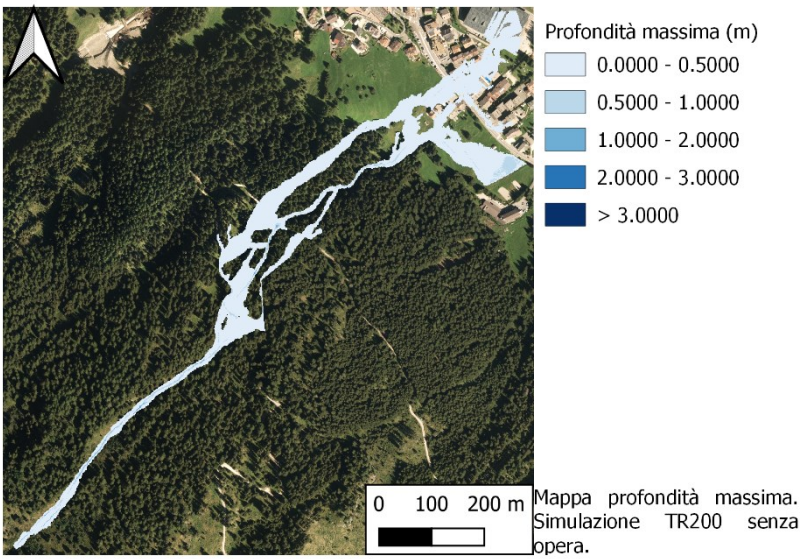

Figura 37 - Mappa profondità massima corrente solido-liquida. Simulazione TR200 senza opera

Mappa velocità massima

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, si osserva una velocità massima compresa tra 0.5 e 1.0 m/s, con i picchi fino a 3 m/s registrati lungo il canale principale (Fig. 38). Nella parte terminale del collettore si verifica un aumento di velocità, fino a 2 m/s, ipotizzando una depressione della piana in cui la corrente può acquistare velocità. La velocità massima inferiore a 0.5 m/s non è stata presa in considerazione.

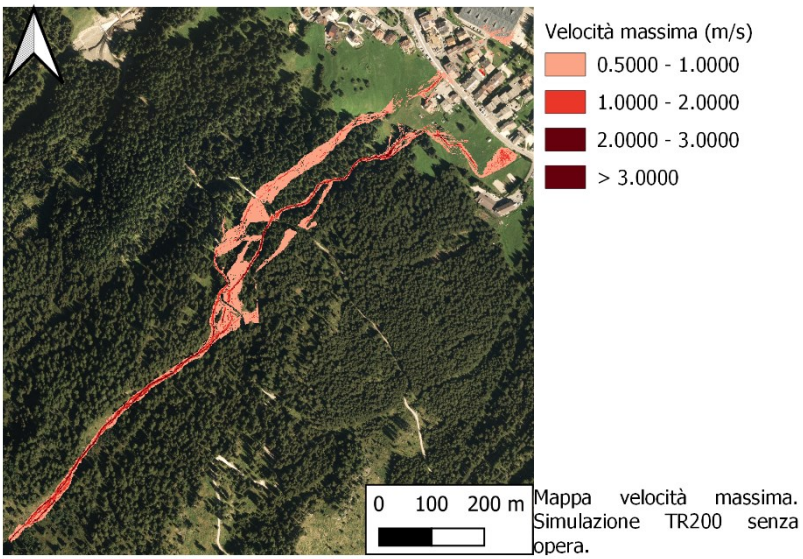

Figura 38 - Mappa velocità massima. Simulazione TR200 senza opera

Sezioni interne

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in assenza dell'opera, si riporta il grafico (Grafico 44) che esprime la portata totale nel tempo per ciascuna delle sezioni interne. In particolare, l'intervallo di tempo per il calcolo della volumetria transitata in ciascuna sezione è stato impostato pari a 50.0 secondi.

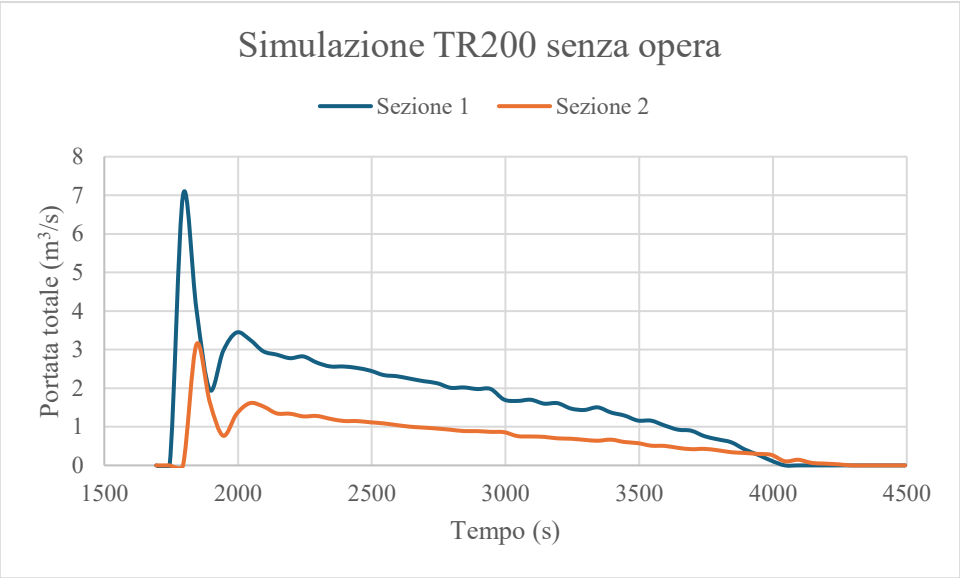

Grafico 44 - Relazione portata totale nel tempo. Simulazione TR200, sezione n. 1, 2.

8.4 Simulazione evento TR200 in presenza dell'opera

Mappa erosione/deposito finale

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, si verifica il fenomeno di erosione in corrispondenza del canale principale, in particolare all'apice del bacino e a monte della strada forestale, con valori compresi tra -0.5 e 3.0 metri (Fig. 39). Il fenomeno di deposito si osserva a valle rispetto la strada forestale e lungo la parte terminale del collettore, con valori compresi tra 0.5 e 1.0 metri. L'altezza di deposito maggiore si registra all'ingresso della piazza di deposito, con valori di circa 2.0 – 3.0 metri; si osserva inoltre una erosione di bassa entità nella parte terminale della stessa. Non si verificano fenomeni di erosione e/o di deposito all'esterno del bacino e del canale principale; in questo modo il centro abitato è protetto dalla colata. Non sono state considerate le erosioni comprese tra 0.0 e 0.5 metri.

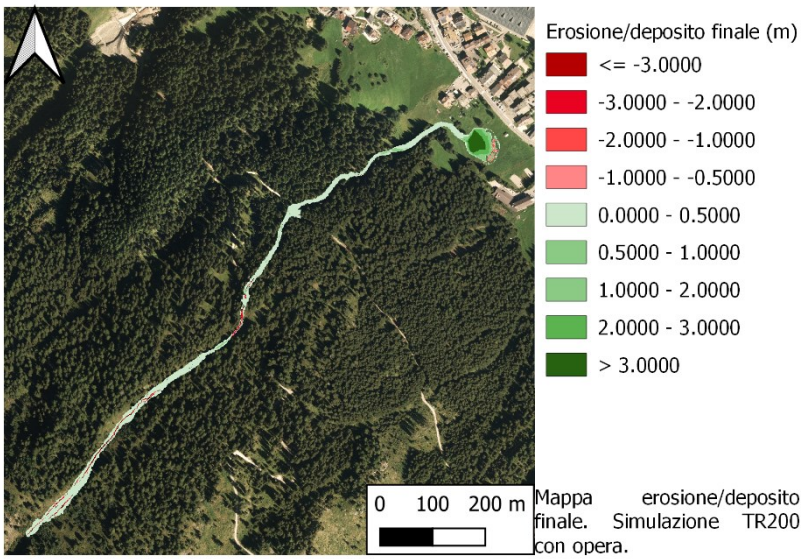

Figura 39 - Mappa erosione/deposito finale. Simulazione TR200 con opera

Mappa concentrazione massima

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, si osserva una concentrazione massima di media entità all'interno del bacino Toèl Lench (Fig. 40). In particolare, all'apice del collettore e nella parte terminale della piazza di deposito la concentrazione raggiunge i 0.3 metri, mentre aumenta lungo il collettore fino all'ingresso della piazza con valori massimi di 0.7 metri. Si ipotizza quindi che la corrente depositi il materiale più grossolano in questo tratto, creando un blocco, e continui a depositare il materiale più fine a valle di esso. Non sono state considerate le concentrazioni massime inferiori a 0.1.

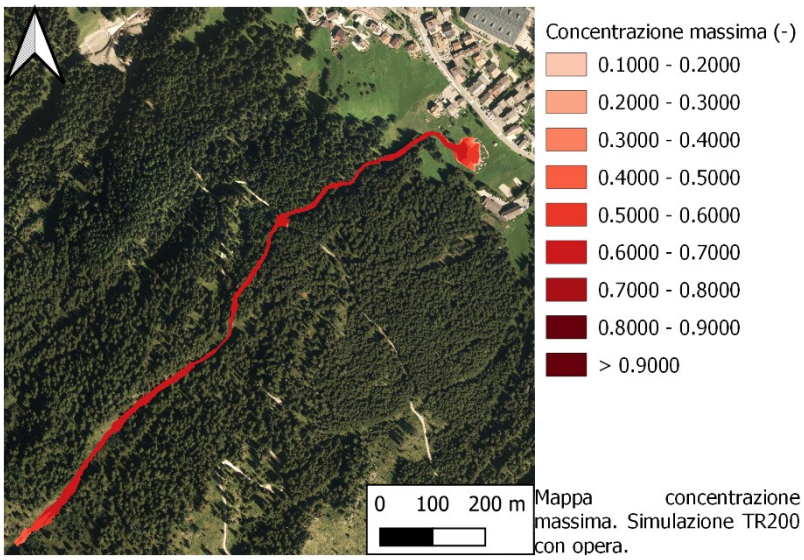

Figura 40 - Mappa concentrazione massima. Simulazione TR200 con opera

Mappa spessore massimo

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, lo spessore massimo è costante e inferiore a 1.0 metri lungo il canale principale (Fig. 41). Si osservano delle zone con spessore maggiore nel tratto a monte della strada forestale, con valori fino a 2.0 metri. Il valore di spessore massimo più alta si registra all'interno della piazza di deposito, pari o superiore a 3.0 metri. Lo spessore massimo inferiore a 0.0 metri non è stato considerato.

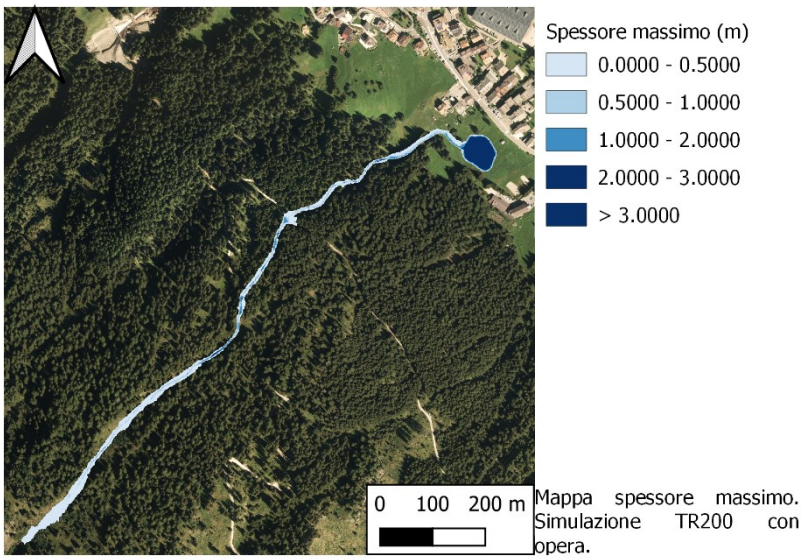

Figura 41 - Mappa spessore massimo. Simulazione TR200 con opera

Mappa profondità massima della corrente solido – liquida

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, lungo il canale principale la profondità massima della corrente ha valori compre tra 0.0 e 0.5 metri, in cui si osservano alcune zone in prossimità della strada forestale con valori fino a 2.0 metri (Fig. 42). In corrispondenza della piazza di deposito, si registra una profondità massima che aumenta dalla zona di ingresso alla parte terminale, rispettivamente con valori inferiori a 0.5 metri e di circa 2.0 – 3.0 metri. I valori di profondità massima inferiori a 0.0 metri non sono stati considerati.

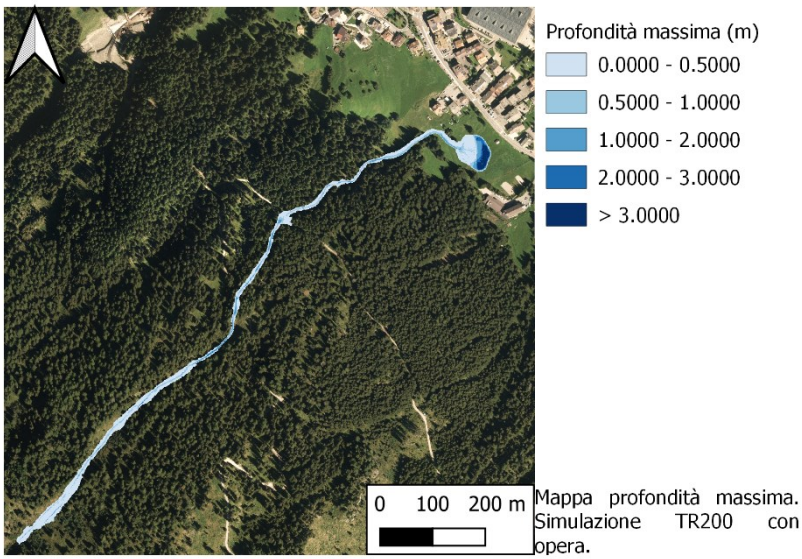

Figura 42 - Mappa profondità massima corrente solido-liquida. Simulazione TR200 con opera

Mappa velocità massima

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, la velocità massima lungo il canale principale è compresa tra 1.0 e 2.0 m/s, con valori inferiori nelle sue vicinanze (Fig. 43). Riguardo la piazza di deposito realizzata, si osserva una velocità di ingresso sostenuta, la quale cala al suo interno e infine aumenta nella parte terminale, con valori fino a 3.0 m/s. Non si è considerata la velocità massima inferiore a 0.5 m/s.

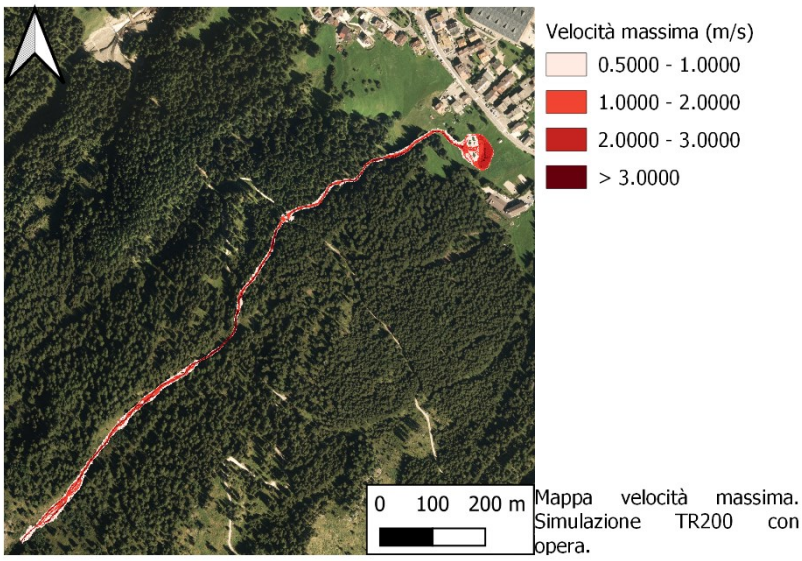

Figura 43 - Mappa velocità massima. Simulazione TR 200 con opera

Sezioni interne

Per quanto riguarda la simulazione di TR200 in presenza dell'opera, si riporta il grafico (Grafico 45) che esprime la portata totale nel tempo per ciascuna delle sezioni interne. In particolare, l'intervallo di tempo per il calcolo della volumetria transitata in ciascuna sezione è stato impostato pari a 50.0 secondi.

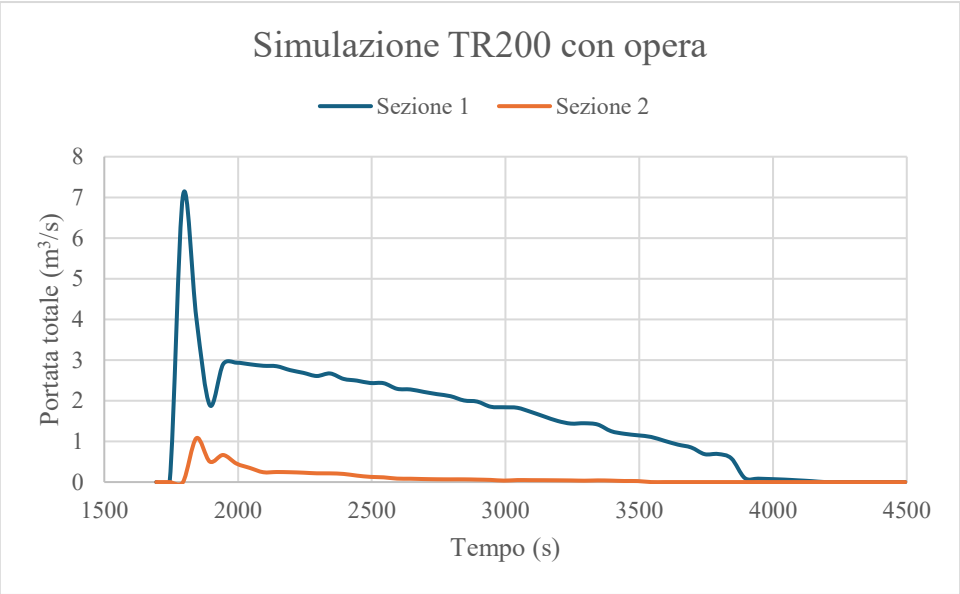

Grafico 45 - Relazione portata totale nel tempo. Simulazione TR200 con opera, sezione n. 1, 2.

8.5 Confronto dei risultati

Di seguito vengono riportati i risultati sottoforma di confronto a coppie di simulazioni. Le simulazioni sono state ottenute con il modello D.F.R.M applicando il metodo di Gregoretti et al. (2019). Si presentano tre confronti mediante i risultati raster: il primo relativo all'evento misurato e alla simulazione dell'evento avvenuto il 29 ottobre 2018, il secondo relativo alla simulazione dell'evento e la simulazione dell'evento con l'opera, e il terzo relativo alla simulazione dell'evento con opera e la simulazione di TR200 con opera. In particolare, il primo e il terzo confronto viene effettuato analizzando la mappa delle erosioni e dei depositi finali; il secondo confronto viene presentato attraverso tutte le mappe descritte al sottocapitolo precedente.

8.5.1 Confronto tra l'evento misurato e la simulazione dell'evento Vaia

Un'importante analisi che viene fatta ogni volta che si utilizza un qualsiasi modello consiste nel confronto tra i dati misurati durante il post evento e i risultati ottenuti dalla simulazione dell'evento. Per quanto riguarda il modello D.F.R.M., ogni simulazione può essere avviata quando l'utente inserisce sia dei file sia dei parametri variabili che devono essere calibrati in base al luogo oggetto di studio. In questo caso, la simulazione riguarda l'evento avvenuto il 29 ottobre 2018 nel bacino del Rio Toèl Lench (Canazei, TN) e la calibrazione è stata effettuata utilizzando i parametri di precedenti lavori.

Attraverso questo confronto, si osserva ed analizza quanto la simulazione dell'evento si discosti dal DoD (*DEM of Difference)*, ossia la differenza tra il rilievo del DEM post-evento e il DEM pre – evento. Si fa notare che il DoD è relativo a una superficie ridotta rispetto al campo di simulazione, e per questo motivo il confronto dei depositi e dell'erosione attraverso le mappe sarà relativo alla sola parte misurata e coperta dal DoD. Inoltre, a supporto della limitata estensione del DoD, i depositi e le erosioni vengono analizzati a livello qualitativo attraverso le immagini del post – evento inserite nella relazione (*Relazione in.ge.na., 2018*); in tal modo è possibile valutare la bontà del modello mediante un confronto tra le fonti fotografiche e i risultati della simulazione.

Mappa erosione/deposito finale

Tale mappa evidenzia il DoD finale, riguarda quindi la situazione finale delle erosioni e dei depositi nel dominio di calcolo. L'erosione è rappresentata con una gradazione di colore rosso, mentre il deposito con il colore verde; al fine di una migliore rappresentazione grafica, non si è tenuto conto dell'erosione compresa tra 0.0 e 0.5 metri.

La prima mappa di erosione e deposito finale è relativa all'intero bacino Toèl Lench, e comprende tutti i tratti in cui è stato suddiviso il canale principale (Fig. 44). Si osserva un elevato deposito, con valori di 0.5 – 2.0 metri e a tratti superiori ai 2 metri, nella parte terminale del collettore in corrispondenza della piana. Le erosioni avvengono nei primi tre tratti del collettore, e in particolare si evidenziano i tratti TR02 – 03, posti a valle della strada forestale, in cui l'erosione è compresa tra 2.0 e 3.0 metri. A supporto dei risultati ottenuti, si è effettuata un'analisi qualitativa delle erosioni e dei depositi attraverso le immagini inserite nella relazione (*Relazione in.ge.na., 2018*): si evidenzia che i risultati delle erosioni ottenuti dalla simulazione si discostano, in termini di valori massimi, da quanto osservato durante il post evento, in quanto non si sono raggiunti i valori estremi di erosione (3 metri o inferiore), in particolare nel terzo tratto. Non è da escludere però, che in termini di volumetrie totali di erosione, le due situazioni si equivalgono, in quanto l'algoritmo di erosione implementato nel modello tende a canalizzare l'erosione lungo una

direzione preferenziale, a differenza di quanto avviene nella realtà. Il deposito invece è stato simulato meglio in quanto i valori sono paragonabili riscontrabili dalle immagini del post evento.

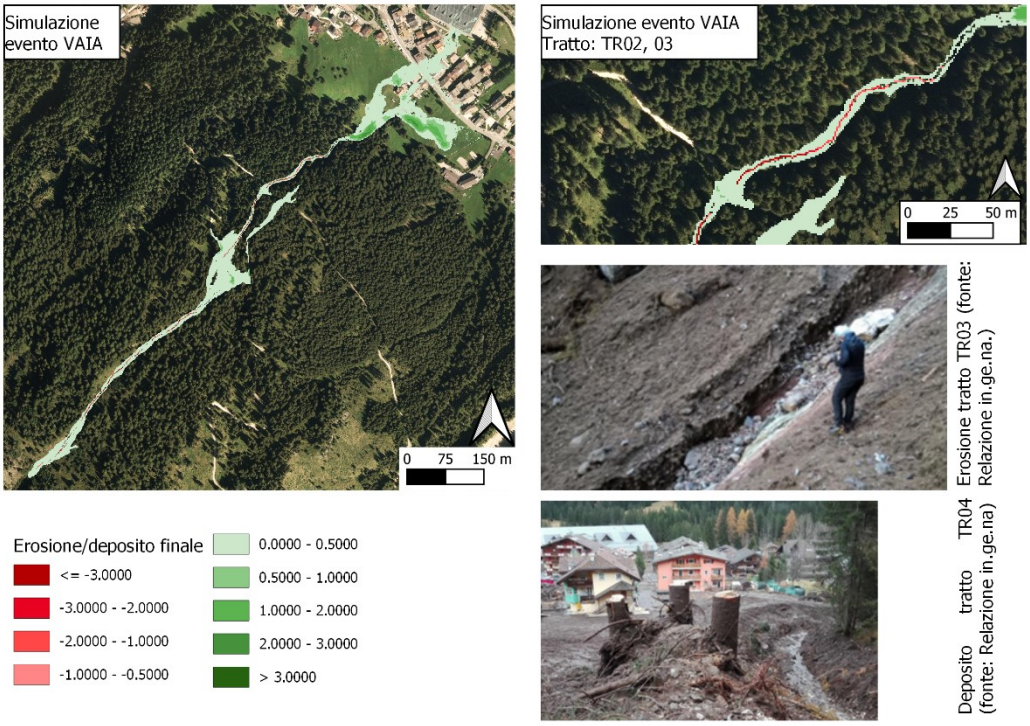

Figura 44 - Mappa erosione/deposito finale, simulazione evento 29/10/2018. Confronto erosione con immagine post evento

La seconda mappa di erosione e deposito finale riguarda il confronto tra il DoD post evento e la simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 (Fig. 45). Dal momento che il campo di confronto è ridotto, in quanto il DoD è relativo alla parte più prossima della sezione di chiusura del bacino, si presenta un focus su quest'ultima che corrisponde al tratto TR04. Si osservano due situazioni differenti riguardo l'erosione: nel DoD è presente un'erosione marcata lungo il canale principale, con valori compresi tra -1.0 e -3.0 metri; mentre la simulazione non evidenzia quest'erosione. L'erosione rappresentata dal DoD è osservabile dall'immagini del post evento relativa al tratto TR04 (*Relazione in.ge.na., 2018*). Il deposito è ben discretizzato dalla simulazione rispetto al DoD, entrambi con valori massimi superiori a 2 metri; la simulazione presenta un'area di deposito più vasta perché il campo del DoD è ridotto.

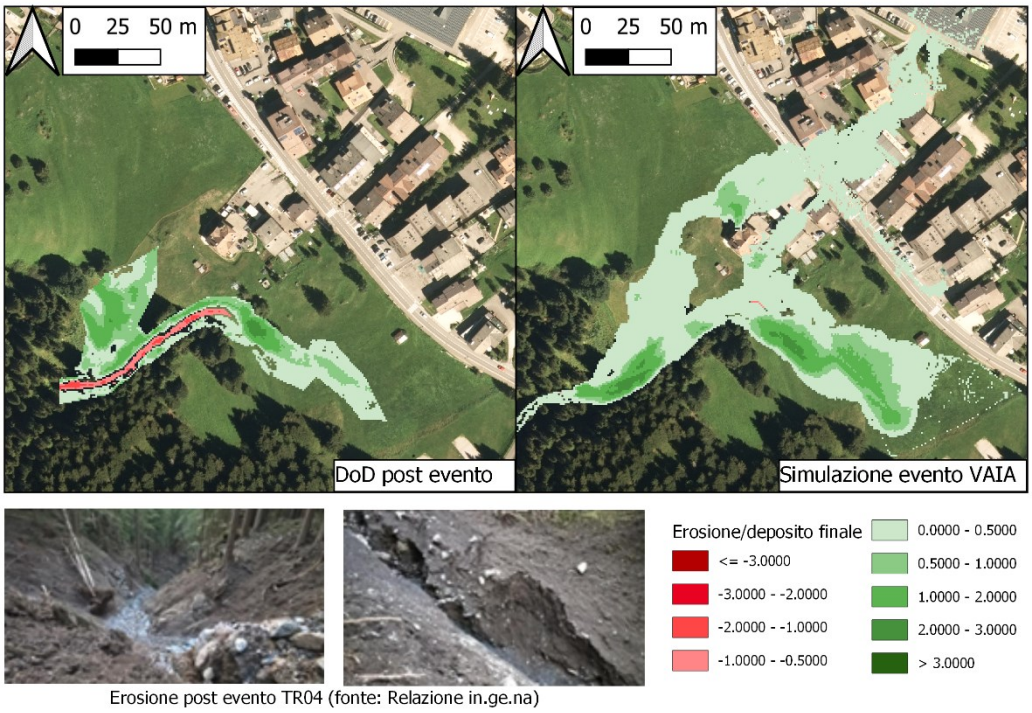

Figura 45 - Mappa erosione/deposito finale. Confronto DoD con simulazione post evento; confronto erosione con immagini

Nonostante la differenza di superficie tra il DoD e la simulazione, il volume simulato depositato nella superficie in comune è accettabile, con l'86% di volume simulato rispetto a quello misurato. Diversamente accade per la superficie erosa: essa non viene simulata correttamente, comprendo solamente l'1% della superficie misurata, comportando così un volume eroso simulato non confrontabile con quello misurato. Complessivamente i risultati della simulazione si possono ritenere accettabili, grazie all'utilizzo di un set di parametri già utilizzati in precedenti simulazioni riferite ad altre località dolomitiche.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei risultati percentuali dell'evento simulato e quello misurato, riguardante le aree e i volumi misurati e simulati (Tab. 45).

Confronto risultati simulazione senza opera rispetto ai dati misurati	**%**	**%**
Superficie con depositi misurati e depositi simulati	64.36	
Volumi misurati e simulati rispetto al volume misurato depositato nell'area misurata	66.94	86.39
Area di deposito misurato correttamente simulato	36.24	
Volume di deposito misurato correttamente simulato	37.23	
Superficie con erosione misurata ed erosione simulata	1.38	
Volumi misurati e simulati rispetto al volume misurato dell'erosione nell'area misurata	3.34	0.53
Area di erosione misurata correttamente simulata	1.38	

Tabella 45 - Confronto evento misurato ed evento simulato.

8.5.2 Confronto tra la simulazione dell'evento Vaia ed evento Vaia in presenza dell'opera

Questo confronto è relativo alla simulazione dell'evento Vaia del 29 ottobre 2018 e la simulazione dello stesso evento in presenza dell'opera idraulica; per cui il solo parametro variabile in input tra le due simulazioni riguarda l'uso del suolo, variando il file raster e il suo file di testo. Nella simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 si è tenuto conto dell'uso del suolo pre-evento (file raster Fig. 16, file *.txt* Fig. 18 – Capitolo 7.2); diversamente per la simulazione dell'evento con opera idraulica (file raster Fig. 17, file *.txt* Fig. 18 – Capitolo 7.2).

Il primo file che si legge dopo aver completato la simulazione è il "*.log*" che riporta il riepilogo dei valori di input inseriti e i risultati complessivi delle volumetrie solido – liquide mobilitate durante l'evento. Per entrambe le simulazioni, il volume solido – liquido in ingresso è pari a 1286.7 m^3, di cui 350.0 m^3 solidi. I volumi totali rimasti sul campo di moto sono di 1567.6517 m^3 e 1315.2004 m^3, rispettivamente per la simulazione dell'evento e dell'evento con opera.

Per quanto riguarda il volume di deflusso totale, questo è maggiore nella simulazione dell'evento con l'opera, ma contiene percentualmente meno sedimento solido: è presente il 10% di componente solida nel caso in cui è presente l'opera, mentre il 31% nel caso dell'evento simulato. Significa che alla sezione di chiusura arriva meno sedimento, grazie all'installazione dell'opera; in questo modo c'è un impatto minore nella valle e aumenta la sicurezza delle abitazioni. La prima simulazione ha una durata pari a 3982.94 secondi, invece la seconda pari a 4672.23 secondi.

Di seguito si riporta la tabella di confronto tra i risultati finali delle due simulazioni, visualizzabili nei relativi file di testo (Tab. 46).

	Simulazione evento Vaia	Simulazione evento Vaia, con opera
Tempo finale della simulazione (s)	10000.1	10000.1
Numero totale di time step (-)	36288	47721
Volume solido-liquido in ingresso (m^3)	1286.7	1286.7
Volume solido ingresso (m^3)	350.0	350.0
Volume totale sul campo di moto (m^3)	1567.6517	1729.3267
Volume di deflusso (m^3)	760.527	1425.8651
Volume solido di deflusso (m^3)	235.50305	144.49158
Volume fuoriuscito (m^3)	0	0
Volume solio fuoriuscito (m^3)	0	0
Senza il deposito delle profondità minori del valore minimo per la propagazione:		
Volume sedimento tot eroso/depositato (m^3)	-280.904	-442.603
Volume solido tot eroso/depositato (m^3)	+114.542	+205.540
Dopo il deposito delle profondità minori di quella minima per la propagazione:		
Volume sedimento tot eroso/depositato (m^3)	+526.209	-139.145
Volume solido tot eroso/depositato (m^3)	+318.355	+288.890
Durata totale simulazione (s)	3982.94	7135.62

Tabella 46 – Confronto volumetrie simulazione evento 29/10/2018 e simulazione evento con opera

Mappa erosione/deposito finale

Tale mappa evidenzia il DoD finale, riguarda quindi la situazione finale delle erosioni e dei depositi nel dominio di calcolo. L'erosione è rappresentata con una gradazione di colore rosso, mentre il deposito con il colore verde. Si osserva come il deposito sia esteso maggiormente nell'simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 rispetto alla simulazione dello stesso in presenza dell'opera, testimoniando in questo modo l'importanza degli interventi idraulici in favore della sicurezza (Fig. 46). In particolare, si osserva che il deposito simulato nell'evento con opera è confinato all'interno della piazza di deposito e del collettore, mentre nella simulazione dell'evento i depositi si estendo in un'area più vasta, diramandosi nella parte terminale del collettore ed espandendosi nel tratto a monte della strada forestale, ipotizzando così una diminuzione localizzata della pendenza dovuta in parte all'intervento di rettifica del canale. Inoltre, si riscontra una altezza massima di deposito maggiore nella simulazione dell'evento con opera, con il sedimento che raggiunge i 3.0 metri. Per quanto riguarda l'erosione, in entrambe le simulazioni si riscontra questo fenomeno nella parte più alta del canale principale, con valori compresi tra 1.0 e 2.0 metri. Al fine di una migliore rappresentazione grafica, non si è tenuto conto dell'erosione compresa tra 0.0 e 0.5 metri

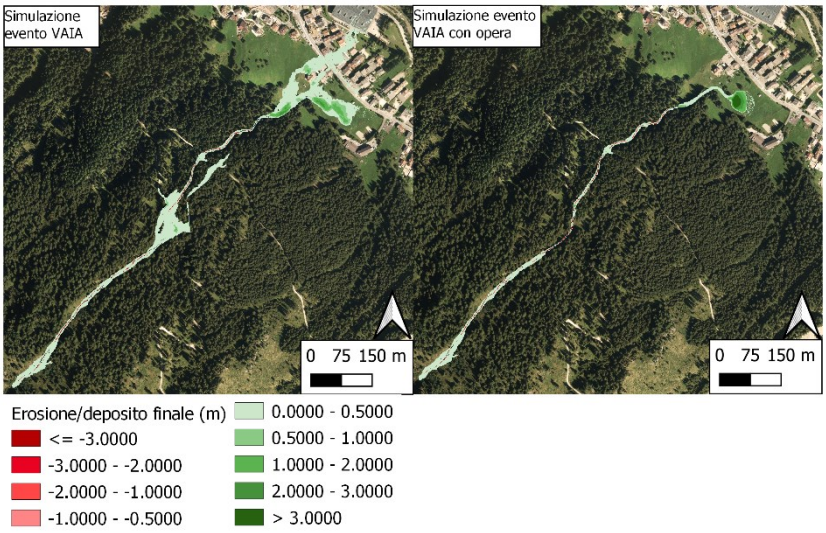

Figura 46 - Mappa erosione/deposito finale. Confronto simulazione evento con e senza opera

Mappa delle profondità massima della corrente solido – liquida

Tale mappa mette in evidenza le massime altezze di corrente solido – liquida in metri, transitate per ciascuna cella del dominio di calcolo. All'aumentare dell'intensità del colore blu, aumenta l'altezza (Fig. 47). Riguardo la simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 non si riscontrano profondità massime elevate della corrente solido – liquida, con valori compresi tra 0.5 e 1.0 metri, ma la sua estensione è maggiore rispetto alla simulazione dell'evento in presenza dell'opera, in particolare si dirama in due direzioni dalla parte terminale del bosco fino al palaghiaccio e alle abitazioni. Riguardo la simulazione dell'evento con opera, si verificano valori massimi di profondità superiori a 2.0 m, ma confinati sia a monte, in prossimità della strada forestale, sia a valle in corrispondenza della piazza di deposito. In entrambe le simulazioni, lungo il canale principale si verifica mediamente la stessa altezza. Non si tengono conto delle profondità di corrente pari o inferiore a 0.0 metri.

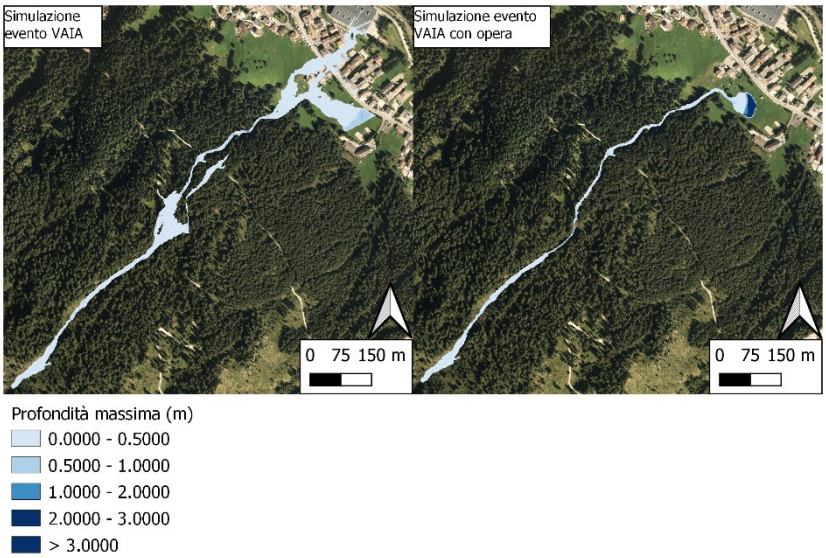

Figura 47 - Mappa profondità massima corrente solido-liquida. Confronto simulazione evento con e senza opera

Mappa spessore massimo

Come con la profondità massima della corrente solido – liquida, si osservano due situazioni distinte (Fig. 48). Nella simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 lo spessore massimo è compreso tra 2.0 e 3.0 metri e si verifica nella parte terminale del canale principale, estendendosi in sinistra e in destra idrografica, rispettivamente fino al palaghiaccio e alla strada statale. La simulazione dell'evento in presenza dell'opera, presenta uno spessore massimo fino a 3.0 localizzato all'interno della piazza di deposito. In entrambe le simulazioni, lo spessore lungo il canale principale è di circa 1.0 metri; in particolare, risulta canalizzato grazie all'intervento idraulico mentre più esteso nel caso dell'evento simulato. I valori di spessore pari o inferiori a 0 metri non sono stati considerati.

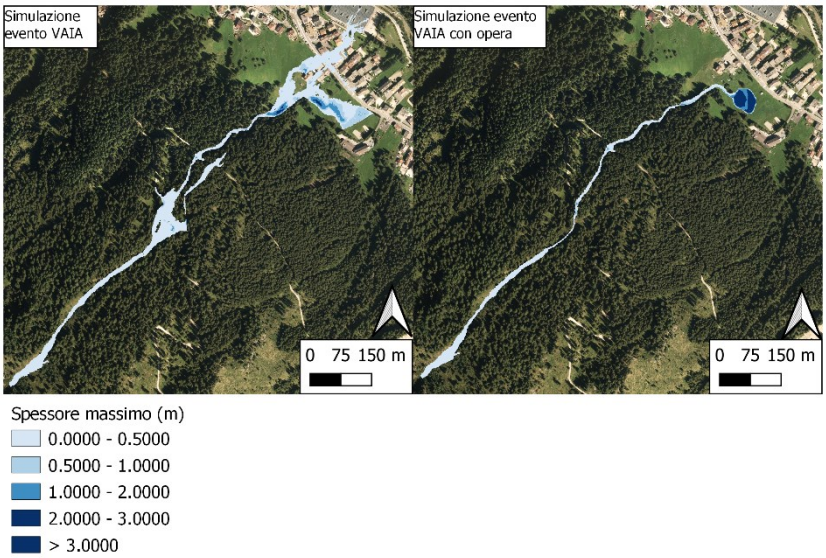

Figura 48 - Mappa spessore massimo. Confronto simulazione evento con e senza opera

Mappa velocità massima

In entrambe le simulazioni, la velocità massima si verifica in corrispondenza del canale principale di colata, con valori superiori intorno ai 2.0-3.0 m/s (Fig. 49). Nella simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 si osserva un rallentamento della velocità in corrispondenza della strada forestale, dove è presente una minor inclinazione del terreno; si osservano inoltre due diramazioni della colata con velocità comprese tra 0.5 m/s e 2.0 m/s: la prima nei pressi della strada forestale, la seconda di maggiore entità nella parte terminale del collettore con una diminuzione progressiva della velocità massima. Nella simulazione dell'evento in presenza dell'opera, la colata detritica si arresta all'interno della piazza di deposito, quindi il deflusso è confinate e non prosegue nel centro abitato; presenta valori della velocità massima pari o maggiori di 3 m/s. Non sono state tenute in considerazione le velocità pari o inferiori a 0.5 m/s.

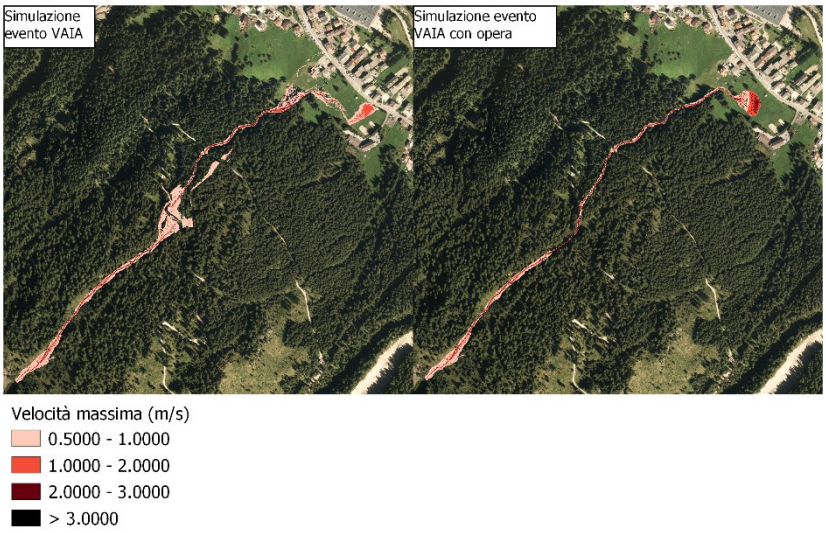

Figura 49 - Mappa velocità massima corrente solido-liquida. Confronto simulazione evento con e senza opera

Mappa concentrazione massima

Nella simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 si osserva una concentrazione medio – alta della parte solida lungo tutto il canale e nella parte più vicina al centro abitato (Fig. 50). In particolare, presenta una concentrazione di circa 0.6 – 08 nella parte a monte della strada forestale, mentre a valle di essa la concentrazione diminuisce fino a valori di 0.4 – 06. Si nota come la concentrazione più alta non si abbia all'apice del canale, ma è spostato più a valle di qualche metro, perché corrisponde alla parte terminale dell'area scarsamente vegetata. La simulazione dell'evento con l'opera presenta una concentrazione massima più alta rispetto alla precedente: il collettore ha valori superiori a 0.8 e il picco si verifica in corrispondenza della piazza di deposito con valori maggiori di 0.9. Come con la simulazione dell'evento, all'apice del canale principale si ha una concentrazione inferiore a causa della diversa tipologia di suolo. La concentrazione inferiore a 0.1 non è stata considerata.

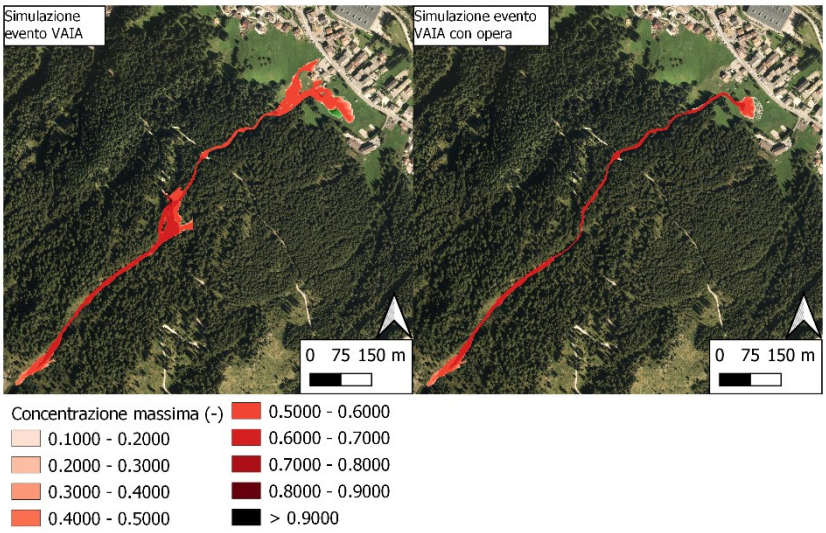

Figura 50 - Mappa concentrazione massima del flusso. Confronto simulazione evento con e senza opera

8.5.3 Confronto tra la simulazione dell'evento TR200 in assenza e simulazione dell'evento TR200 in presenza dell'opera

Questo confronto è relativo alla simulazione dell'evento di TR200 in assenza e in presenza dell'opera. A parità di volume totale e volume solido in ingresso, il volume totale sul campo di moto nella simulazione di TR200 in assenza dell'opera è di poco inferiore in quanto si verificano delle fuoriuscite.

Per quanto riguarda il volume di deflusso, la simulazione di TR200 in presenza dell'opera ha 876 m^3 in più rispetto alla simulazione senza opera. In particolare, il volume solido di deflusso è pari a 483.1 m^3 per la simulazione di TR200 senza opera e 209.6 m^3 per la simulazione di TR200 con opera; si osserva che percentualmente la seconda simulazione contiene meno sedimento rispetto alla prima, rispettivamente il 61% in assenza dell'opera e 12.5% in presenza dell'opera.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei risultati tra le due simulazioni (Tab. 47) e il confronto tra erosione e deposito mediante la mappa.

	Simulazione TR200 Senza opera	Simulazione TR200 Con opera
Tempo finale della simulazione (s)	4500.0	4500.0
Numero totale di time step (-)	28320	43029
Volume ingresso (m^3)	1841.4	1841.4
Volume solido ingresso (m^3)	700.1	700.1
Volume totale sul campo di moto (m^3)	1949.3123	1995.0072
Volume di deflusso (m^3)	787.3908	1663.7445
Volume solido di deflusso (m^3)	483.10678	209.66006
Volume fuoriuscito (m^3)	39.32	0
Volume solido fuoriuscito (m^3)	1.74	0
Senza il deposito delle profondità minori del valore minimo per la propagazione:		
Volume sedimento tot eroso/depositato (m^3)	-147.139	-153.589
Volume solido tot eroso/depositato (m^3)	215.272	490.465
Dopo il deposito delle profondità minori di quella minima per la propagazione:		
Volume sedimento tot eroso/depositato (m^3)	1014.652	177.636
Volume solido tot eroso/depositato (m^3)	663.539	630.49
Durata totale simulazione (m^3)	6091.25	3850.88

Tabella 47 - Confronto volumetrie simulazione TR200 senza opera e simulazione TR200 con opera

Mappa erosione/deposito finale

Si osserva una notevole differenza relativa ai depositi e alle erosioni tra la simulazione dell'evento di TR200 in assenza e in presenza dell'opera (Fig. 51). Nella seconda simulazione, le erosioni e soprattutto i depositi appaiono fortemente confinati sia rispetto al canale principale sia alla piazza di deposito. Nella simulazione dell'evento in assenza dell'opera, invece, si osserva una maggiore estensione dei depositi a causa delle diramazioni dal canale collettore, sia nella parte terminale del canale sia a monte della strada forestale dove si ha una piazza di deposito. In entrambe le simulazioni, lungo il canale si osservano le stesse altezze di deposito, comprese tra 0.0 e 1.0 metri; nella parte terminale del bacino si registra una altezza di deposito pari circa a 3.0 metri nella simulazione di TR200 con l'opera, mentre nella simulazione in assenza dell'opera i depositi raggiungono i 2.0 metri nella zona di deposito in prossimità delle abitazioni ma sono più estesi. Per quanto riguarda l'erosione, in entrambe le simulazioni si registrano gli scavi nella parte iniziale del canale principale, con valori compresi tra -0.5 e 1.0 metri. L'erosione compresa tra 0.5 e 0.0 metri non è stata presa in considerazione.

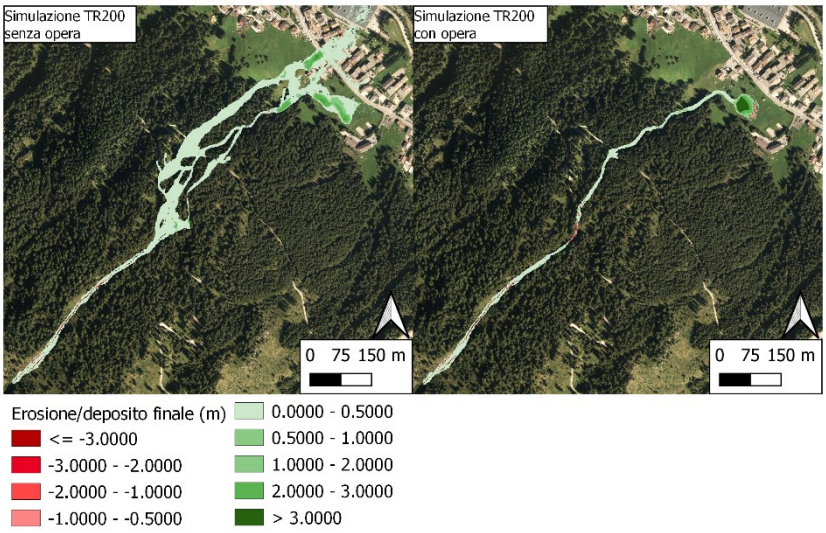

Figura 51 - Mappa erosione/deposito. Confronto simulazione TR200 con e senza opera

8.5.4 Confronto dei depositi contenuti all'interno del bacino

Si riporta una tabella che fa riferimento esclusivamente al volume di materiale depositato all'interno della piazza di deposito realizzata nel bacino del Rio Toèl Lench, per la simulazione dell'evento Vaia con opera e la simulazione dell'evento TR200 con opera (Tab. 48). Tali volumetrie sono state estratte mediante analisi Q-Gis.

Simulazione	Deposito nel bacino del Rio Toèl Lench
Evento Vaia con opera	2053 m^3
TR200 con opera	2309 m^3

Tabella 48 - Volumi di deposito contenuti nel bacino Toèl Lench

Si osserva che nella simulazione dell'evento di TR200 il materiale depositato all'interno della piazza è rispetto alla simulazione dell'evento, con una differenza di circa 350 m^3. Attraverso questa differenza volumetrica è possibile confermare che l'evento accaduto il 29 ottobre 2018 nel bacino del Rio Toèl Lench abbia avuto un tempo di ritorno inferiore ai 200 anni; e ipotizzando un nuovo evento di intensità pari a quella accaduta, il materiale solido verrà depositato all'interno della piazza evitando di creare danni alle infrastrutture poste a valle.

9 CONCLUSIONI

Il bacino idrografico del Rio Toèl Lench (Canazei, TN) è stato interessato da un evento di colata detritica avvenuta il 29 ottobre 2018, durante l'evento atmosferico che ha coinvolto tutto l'ambiente dolomitico e denominato "Tempesta Vaia". Attraverso questo lavoro di tesi, si è effettuata la simulazione della propagazione della colata mediante il software "D.F.R.M." sviluppato da Gregoretti et al. (2019).

A partire dalla precipitazione caduta nel bacino durante l'evento, rilevata dalla stazione pluviometrica (Meteo Trentino) attiva più prossima e denominata "Pian Fedaia (Diga)", è stato possibile determinare l'idrogramma necessario al fine della ricreazione dell'evento avvenuto. Inoltre, attraverso le precipitazioni massime annuali della medesima stazione, si è proceduto con una analisi statistico – probabilistica delle piogge al fine di determinare le Linee segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP) e il tempo di ritorno dell'evento. Il tempo di ritorno di un evento viene determinato mediante una analisi statistica che si basa su diversi fattori e assunzioni, quali la distribuzione utilizzata, e per questo motivo non è possibile considerare reale il tempo di ritorno. Inoltre, l'analisi dipende dalla disponibilità temporale dei dati relativi alle precipitazioni massime annuali, e in questo caso si è fatto riferimento a una serie storica breve (2009 – 2023). Si è utilizzata la distribuzione di Gumbel – Hazen la quale non è indicata nella descrizione di eventi estremi di breve durata. Il giorno 29 ottobre 2018 è stata registrata una altezza di pioggia pari a 170.2 mm, con un picco di 61.4 mm nelle tre ore di massima intensità. In riferimento al bacino oggetto di studio, le tre ore di pioggia di massima intensità hanno determinato un tempo di ritorno di 15 anni, mentre l'interno evento è di 71 anni. Nonostante questi valori derivino da una distribuzione statistica, è possibile indicare che l'evento avvenuto sia stato un fenomeno temporalesco intenso, localizzato e poco frequente.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di ricostruire l'evento accaduto nel bacino mediante il modello "D.F.R.M.", il quale è stato confrontato con diversi scenari quali l'evento in presenza dell'opera di mitigazione idraulica realizzata a seguito dell'evento Vaia, e l'evento con un tempo di ritorno di 200 anni per il quale l'opera è stata dimensionata.

Riguardo la simulazione dell'evento del 29 ottobre 2018 avvenuto nel bacino del Rio Toèl Lench, si osserva una sovrastima dal punto di vista delle volumetrie di scavo. Infatti, confrontando i risultati tramite il raster della simulazione con il DoD post-evento si osserva come il modello non riesca a simulare al meglio le erosioni osservate. Bisogna considerare che il DoD post-evento a disposizione ha una estensione minore del campo di simulazione; per questo motivo all'analisi dei risultati è stata affiancata un'analisi qualitativa tramite le immagini post-evento. Al contrario, si osserva una buona corrispondenza della volumetria di deposito nella superficie confrontata, con

l'86% di volume simulato rispetto a quella misurato. Complessivamente, il modello utilizzato ha simulato in maniera soddisfacente la colata avvenuta, quanto più perché stati utilizzati i parametri utilizzati per la riproduzione di eventi avvenuti in altre località dolomitiche.

Dalla simulazione dell'evento in presenza dell'opera confrontata con la simulazione dell'evento, si osserva una riduzione della superficie interessata dal deposito di materiale, il quale si concentra all'interno della piazza di deposito realizzata a monte delle prime abitazioni; inoltre, grazie alla canalizzazione del Rio non si verificano deviazioni del deflusso. Le erosioni sono state discretizzate in modo simile sia in presenza che in assenza dell'opera. A partire da questo confronto, è possibile visualizzare da un punto di vista grafico l'efficacia della presenza di un'opera idraulica a monte delle infrastrutture: se ci fosse stata l'opera il giorno in cui è avvenuta la colata detritica, le abitazioni e gli abitanti avrebbero subito meno danni e disagi.

Infine, dal momento che l'opera è stata dimensionata con un tempo di ritorno di 200 anni, si sono effettuate le simulazioni ipotizzando l'evento con tale tempo di ritorno, sia in presenza che in assenza dell'opera. Si osserva nuovamente l'utilità della piazza di deposito a difesa del centro abitato. Le piazze di deposito vengono realizzate in aree a bassa pendenza e a monte delle abitazioni, con lo scopo di contenere i sedimenti di una colata detritica. Queste opere sono dotate di una struttura trasversale a valle che permette il passaggio della componente liquida e del materiale più fine, trattenendo il materiale più grossolano degli eventi estremi. Per un corretto funzionamento della stessa è importante che vengano svuotate periodicamente per mantenere l'efficienza di invaso.

BIBLIOGRAFIA

AGEZIA PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI (APAT) (27/2003). *Atlante delle opere di sistemazione fluviale. Manuali e linee guida*. Dipartimento Difesa del Suolo. Servizio istruttorie, Piani di Bacino, Raccolta dati e Tecnologie del Sito.

ARMANINI, M. FRACCAROLLO, L. ROSATTI, G. (2009) *Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels, Computers and Geosciences.* 35(5), 993-1006.

BATES, P.D. DE ROO, A.P.J. (2000). *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. Journal of Hydrology. 236, 54-77.

BERGER, C. MCARDELL, B.W. SCHLUNEGGER, F. (2011). *Direct measurement of channel erosion by debris flow, Illgraben, Switzerland*. Journal of Geophysical Research. 116, F01002, doi:10.1029/2010JF001722

BERNARD, M. (2018). *Analysis and modelling of surface runoff triggering debris flow*. Università degli studi di Padova, Tesi di dottorato.

BERNARD, M. BOREGGIO, M. DEGETTO, M. GREGORETTI, C. (2019) *Model-based approach for design and performance evaluation of works controlling stony debris flow with an application to a case study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy).* Science of the Total Environment, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.468

BORGA, M. BOSCOLO, P. SANGATI, M. (2007). *Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash floods in the Eastern Italian Alps*. Journal of Hydrometeorology., 8(5), 1049-1067.

BOTTER, G. RINALDO, A. (2003). *Scale effect on geomorphological and kinematic dispersion*. Water Resour. Res., 39(10), 1286, doi:10.1029/2003WR002154

BOVIS, M. J. JAKOB, M. (1999). *The role of debris supply supply conditions in predicting debris flow activity*. Earth Surf. Process, Landforms, 24: 1039 – 1054.

BRESSAN, L. (2023). *Studio ex-post sulla pendenza di correzione di un tratto d'alveo sistemato del torrente Pramper (Val di Zoldo, BL)*. Relatore: D'Agostino, V. Correlatorei Bettella, F. Martini, M. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova. Pagine 31-35.

BRUFAU, P. GARCIA-NAVARRO, P. GHILARDI, P. NATALE, L. SAVI, F. (2000) *1-D mathematical modelling of debris flow.* Journal of Hydraulic Research, 38(6), 435-446.

D'AGOSTINO, V. (2023). *Appunti lezioni del corso Design of Sustainable and Resilient Measures Against Floods.* Corso di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio, Università degli Studi di Padova.

D'AGOSTINO, V. MARCHI, L. (2001). *Debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps: data collection and analysis*. Phisics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestial and Planetary Science, 26(9), 657-663.

EGASHIRA, S. ASHIDA, K. (1987). *Sediment transport in steep slope flumes*. Proc. of Roc Japan Joint seminar on Water Resources.

EGASHIRA, S. HONDA, N. ITOH, T. (2001) *Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow.* Physics and Chemistry on Earth, 26(9), 646-650.

FRANK, F. McARDELL, B.W. HUGGEL, C. VIELI, A. (2015) *The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps.* Natural Hazards and Earth System Sciences. 15, 2569-2583, doi:10.5194/nhess-15-2569-2015

GREGORETTI, C. BARBINI, M. BERNARD, M. BOREGGIO, M. *Modello a celle bifase per la propagazione idraulica di colate di detrito. Manuale per l'utente* (2022).

GREGORETTI, C. DEGETTO, M. BERNARD, M. BOREGGIO, M. (2018) *The debris flow occurred at Ru Secco Creek, Venetian Dolomites, on 4 August 2015: Analysis of the Phenomenon, Its Characteristics and Reproduction by Models*. Frontiers in Earth sciences, 6:80.

GREGORETTI, C. DEGETTO, M. BERNARD, M. CRUCIL, G. PIMAZZONI, A. DE VIDO, G. BERTI, M. SIMONI, A. LANZONI, S. (2016) *GIS-based cell model for simulating debris flow runout on a fan.* Journal of Hydrology, 534, 326-340, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.054

GREGORETTI, C. DEGETTO, M. BOREGGIO, M. (2016). *GIS-based cell model for simulating debris flow runout on a fan*. Journal of Hydrology, 534, 326-340, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.054

GREGORETTI, C. STANCANELLI, M.L. BERNARD, M. BOREGGIO, M. DEGETTO, M. LANZONI, S. (2019) *Relevance of erosion processes when modelling in-channel gravel debris flows for efficient hazard assessment.* Journal of Hydrology, 569, 575-591; doi10.1016/j.jhydrol.2018.10.001

GREGORETTI, G. (2024). *Appunti lezioni del corso Opere e Protezione dei Versanti.* Corso di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio, Università degli Studi di Padova.

GRIMALDI, S. PETROSELLI, A. NARDI, F. (2012). *A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall – runoff modelling in small ungauged basins.* Hydrological Sciences Journal, 73-83, doi:10.1080/02626667.2011.636045

GRIMALDI, S. PETROSELLI, A. ROMANO, R. (2013). *Curve – Number/Green – Ampt mixed procedure for stramflow predictions in unguaged basins: Parameter sensitivity analysis*. Hydrological Processes, 27, 1265-1275.

GRIMALDI, S. PETROSELLI, A. ROMANO, R. (2013*). Green – Ampt Curve – Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall – runoff modelling in small and ungauged basins*. Hydrological Processes, 27, 1253-1264, doi:10.1002/hyp.9303

IN.GE.NA, ingegneria, geologia, natura e pianificazione. *Estratto relazione e Report volumi solidi* (2018).

JAKOB, M. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, 2005.

JAKOB, M. MCDOUGALL, S. SANTI, P. *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Springer, 2024.

JORDAN, M. (1994) *Debris Flows in the Sourthern Coast Mountains, British Columbia: Dynamic Behaviour and Physical Properties.* PhD. Thesis, Univeristy of British Columbia, Vancouver, BC.

LANZONI, S. GREGORETTI, C. STANCANELLI, L.M. (2017). *Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds.* J. Geophys. Res. Earth Surf., 122, doi:10.1002/2016JF004046

LORENZINI, G. MAZZA, N. *Debris Flow: Phenomenology and Rheological Modelling*. Wit Press, Southampton Boston, 2004.

MARCHI, L. BRUNETTI, M.T. CAVALLI, M. CREMA, S. (2019). *Debris flow volumes in Northeastern Italy: relationship with drainage and sie probability*. Earth Surface and Landformrs (449, 933-943.

MATALAS, N. C. SLACK, J. R. WALLIS, J. R. (1975). *Regional skew in search of a parent.* Water Resources Research, 11(6), 815 – 826.

MEDINA, V. HURLIMANN, M. BATEMAN, A. (2008*). Application of FLATModel, a 2D a finite volume code to debris flow in the northeastern part of the Iberian Penisula. Landslide*, 5, 127-142.

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO (2024). *Carta Geologica*.

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO. *Carta di Sintesi della Pericolosità (CSP).*

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO. *WebGIS Geologia, PAT* e *WebGIS Bacini Montani, PAT*.

RENGERS, F. K. McGURIE, L. A. KEAN, J. W. STALEY, D. M. HOBLEY, D. E. J. (2016). *Model simulations of flood and debris flow timing in steep catchments after wildfire*. Water Resources Research, 52, 6041-6061.

ROSATTI, G. BEGNUDELLI, L. (2013). *Two dimensional simulations of debris flows over mobile beds: Enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced generalized Roe-type solver*. Computers and Fluids. 71, 179-185, doi10.1016/j.compfluid2012.10.006

SCHEIDL, C. RICKENMAN, D. (2010). *Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition fans.* Earth Surface Processes and Landforms. 35, 157-173.

TAKAHASHI, T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis, 2007.

TALDO, L. (2023) *Simulazione dell'evento di colata detritica avvenuta il 5 agosto 2022 nel bacino Toal de Marisana (Val di Fassa) mediante il modello "D.F.R.M."*. Relatore: Gregoretti, C. Correlatore: Barbini, M. Bernard, M. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova.

TOGNACCA, C (1999). *Beitrag zur Doctoral Thesis*, ETH Zurich.

ZANOBETTI, D. LORGERE, H. PREISSMAN, A. CUNGE, J.A. (1970). *Mekong delta mathematical program construction*. Journal of Waterways and Harbour Division ASCE. 96(2), 181-199.