

GLABAL SERVICE S.R.L.

Via Dala Gesa, 282 - Livigno (SO)

STUDIO IDRAULICO

STUDIO DI DETTAGLIO TORRENTE FEDERIA
COMUNE DI LIVIGNO (SO)

APRILE 2022

	NOME	FIRMA	DATA
REDAZIONE	M. Peduzzi		
VERIFICA	S. Croci		
APPROVAZIONE	S. Croci		



ETATEC STUDIO PAOLETTI S.r.l. – SOCIETA' DI INGEGNERIA

Via Bassini, 23 – 20133 MILANO (IT) – Tel.+39 02 26681264
etatec@etatec.it – etatec@pec.etatec.it – www.etatec.it

UN DIRETTORE TECNICO :

Dott. Ing. STEFANO CROCI

IL PROGETTISTA INCARICATO :

Dott. Ing. STEFANO CROCI

TITOLO

Studio di dettaglio dell'elemento del Reticolo Idrico Principale – Torrente Federia in Comune di Livigno
ai sensi dell'allegato 4 e dell'allegato 2 della DGR 30 novembre 2011 – n. IX/2616

Revisioni	N°	Descrizione	Data
	1		
	2		
	3		

Numero elaborato	TIPOLOGIA ST	COMMESSA 691-01	DOCUMENTO ATTI	NUMERO A.01.00
------------------	-----------------	--------------------	-------------------	-------------------

INDICE

1.	PREMESSA.....	1
2.	ANALISI IDROLOGICA	2
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	2
2.2	ANALISI GEOMORFOLOGICA DEL BACINO	4
2.3	ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE	7
2.3.1	Curve di possibilità pluviometrica	7
2.3.2	Ietogrammi di progetto	9
2.4	DEFINIZIONE DEGLI IDROGRAMMI	10
2.4.1	Modello afflussi deflussi.....	10
2.4.2	Idrogrammi di progetto	16
2.4.3	Altri studi di riferimento	19
2.4.4	Confronto con dati del portale SIBCA	19
3.	ANALISI IDRAULICA	22
3.1	GENERALITÀ	22
3.2	STIMA DELLA PRODUZIONE POTENZIALE DI SEDIMENTO PER EROSIONE NEL BACINO	22
3.3	CENNI SUL FENOMENO DEL DEBRIS FLOW.....	26
3.4	MODELLO IDRAULICO A FONDO MOBILE.....	28
3.4.1	Dati a base della modellazione	28
3.4.2	Il modello bidimensionale a fondo mobile	30
3.4.3	Analisi dei risultati.....	36
4.	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA E OPERE DI MITIGAZIONE NECESSARIE	48
	ALLEGATO 1 ANALISI GRANULOMETRICHE.....	53

RELAZIONE TECNICA

1. PREMESSA

Il presente lavoro, eseguito su commissione della società GLOBAL SERVICE SRL , con sede in Via Dala Gesa 282, 23030, Livigno (SO), costituisce lo studio idraulico relativo all'intero bacino del torrente Federia, resosi necessario al fine di valutare la pericolosità idraulica dell'area sita in loc. Rasia, identificata catastalmente al Fg.n° 20 Mapp.n° 1258-481-216-211-214 . Il presente studio si rende necessario in quanto, l'area in esame, posta nel settore basale del conoide alluvionale messo in posto dal torrente Federia, a seguito delle risultanze dello studio idraulico¹ a supporto del PGT del comune di Livigno risulta essere censito come area a pericolosità da molto elevata (H5) a moderata (H2). All'interno dello studio di cui alla nota 1 viene segnalato che il rilievo aerofotogrammetrico utilizzato per la redazione delle simulazioni idrauliche, all'interno delle aree poste nelle adiacenze a Nord dell'area in esame, risulta non aggiornato alla reale situazione di terreno in quanto precedente alla realizzazione del distributore di carburante esistente.

Nel corso degli anni 2020-2021 fu realizzato ed ultimato² un intervento di bonifica agraria che ha comportato la messa in posto di un terrapieno di riporto addossato ai muri di sostegno Sud e Ovest del piazzale di manovra del sopra menzionato distributore di carburante, esteso all'interno dei mappali in esame per una superficie di circa 2'000 mq, sopraelevando il piano di campagna originario di circa 1,2 – 1,8 m.

Scopo del presente studio è pertanto la definizione della pericolosità idraulica della zona aggiornata alle reali condizioni idrauliche derivanti dalla realizzazione delle opere sopra menzionate.

-
- 1 **Comune di Livigno:** Attuazione del Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino del Fiume Po (P.A.I.) in campo urbanistico Art. 17, comma 5 della L. 18.05.1989 n. 183 PERIMETRAZIONE DELLE AREE IN DISSESTO PER FENOMENI DI TRASPORTO IN MASSA SU CONOIDI Aree nere ai sensi dell'art. 18 comma 3 del P.A.I. - BACINO IDROGRAFICO TORRENTE FEDERIA - TORRENTE SALIENTE, dott. geol. Giovanna Sacchi Studio Viale Vittorio Emanuele II, 71 b • Bergamo Ord. dei Geologi della Lombardia al n. 756, dott. ing. Domenico Luciani, Via Roma 69N-24030 - Vaibrembo (Bg) Iscr. Ord. Provinciale di Bergamo n. 1.812, dott. ing. Massimiliano Barbolini Studio FLOW ING Piazza Kennedy, 27 19124, La Spezia – Novembre 2009
 - 2 Global Sservice s.r.l. - PRATICA EDILIZIA N°006/2020-PDC (Prat. di Rif. N°006/2020) - Permesso di Costruire riempimento e Sistemazione ambientale, utilizzando materiale derivante da scavi di interventi edilizia, dell'area sita in loc. Rasia identificata catastalmente al Fg.n° 20 Mapp.n° 1258-481-216-211- 214, Arch. Massimo Riccardo Silvestri, febbraio 2020
-

2. ANALISI IDROLOGICA

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il bacino idrografico della valle di Federia rappresenta il secondo bacino per estensione areale (33.56 km²) del territorio comunale di Livigno. È definito da due sottobacini idrografici: il bacino del Torrente Federia, con estensione di 24.69 km² e il bacino del Torrente Saliente, con estensione di 6.90 km². I due bacini confluiscono in un unico conoide, all'altezza del Ponte Calchera, a quota 1.850 m s.m. circa.

Figura 1 – Bacino della val Federia



Il bacino è un tributario del Fiume Spöl, (denominato tradizionalmente Aqua Granda), che è l'elemento fisiografico principale, il quale attraversando in direzione NE- SO l'omonima valle di Livigno, confluisce nel bacino dell'Inn.

La valle di Federia è ubicata nella parte centro-occidentale del territorio di Livigno e identifica con l'allineamento nord-sud, il confine di Stato con la Confederazione Elvetica. Il sentiero che conduce al Passo di Cassana (2694 m s.m.) ha rappresentato in passato il percorso più agevole per raggiungere l'Engadina attraverso la località elvetica di S-Chanf.

La valle presenta caratteristiche climatiche spiccatamente alpine ed è, in considerazione

dell'ubicazione inframontana e dell'altitudine media (1800 m s.m.), contraddistinta da temperature rigide in inverno e da una stagionalità assai marcata con precipitazioni non molto cospicue, ma sovente nevose. Risulta caratteristico, consistente e prolungato, talvolta fino all'estate, l'innevamento del terreno.

La valle si identifica ad ovest con il crinale che collega il Monte Cotschen (3060 m s.m.) con il Pizzo del Leverone (3056 m s.m.), attraverso il Passo di Cassana (2694 m s.m.) fino al Pizzo di Cassana (3.010 m s.m.) e si chiude a nord con il Monte Saliente (3043 m s.m.).

Ad est il crinale è definito, da sud a nord, dalla Corna dei Gessi (3040 m s.m.), attraverso la Vetta Blesaccia (2796 m s.m.), lungo il crinale della Costaccia (3090 m s.m.); il crinale termina con il Bosco di Valandrea che si chiude nella zona di apice del conoide della Valle di Federia. A sud il bacino è limitato dal crinale che collega il Passo di Federia (2902 m s.m.) con il Monte Campaccio (3004 m s.m.). Il bacino si chiude a nord con la confluenza dei due reticoli idrografici (Bacino del Torrente Federia e Bacino del Torrente Saliente) in Località Ponte Calchera (1850 m s.m.); il collettore del conoide confluisce dopo circa 1,84 km nel Fiume Spöl.

Dal punto di vista vegetazionale, la parte sommitale del bacino è caratterizzata da prato-pascolo in uso, mentre la parte medio-bassa è ricoperta da bosco prevalentemente di resinose, con piante adulte e di buon portamento. La zona di conoide, in parte urbanizzata, presenta superfici prevalentemente a prato-pascolo ben tenute.

2.2 ANALISI GEOMORFOLOGICA DEL BACINO

I dati idrologici alla base della successiva fase di modellazione idraulica sono state individuati mediante un processo di analisi geomorfologica del bacino idrografico in oggetto.

In particolare, mediante elaborazioni compiute sul modello digitale del terreno (DTM) con maglia 5x5 m dell'area in studio, è stato possibile caratterizzare i bacini afferenti agli elementi del reticolo oggetto di intervento, individuandone la pendenza, le direzioni e i percorsi della rete di drenaggio. Questo processo ha un'importanza cruciale in quanto la rete così individuata determina la risposta idrologica del bacino, influenzando direttamente i meccanismi di corrivazione e di concentrazione dei deflussi.

Di seguito si riportano le immagini caratterizzanti l'analisi geomorfologica effettuata. In particolare, in Figura 2 sono riportati i bacini individuati alle sezioni di chiusura delle aree di intervento, in Figura 3 il DTM del territorio

Figura 2 – Bacini idrografici individuati

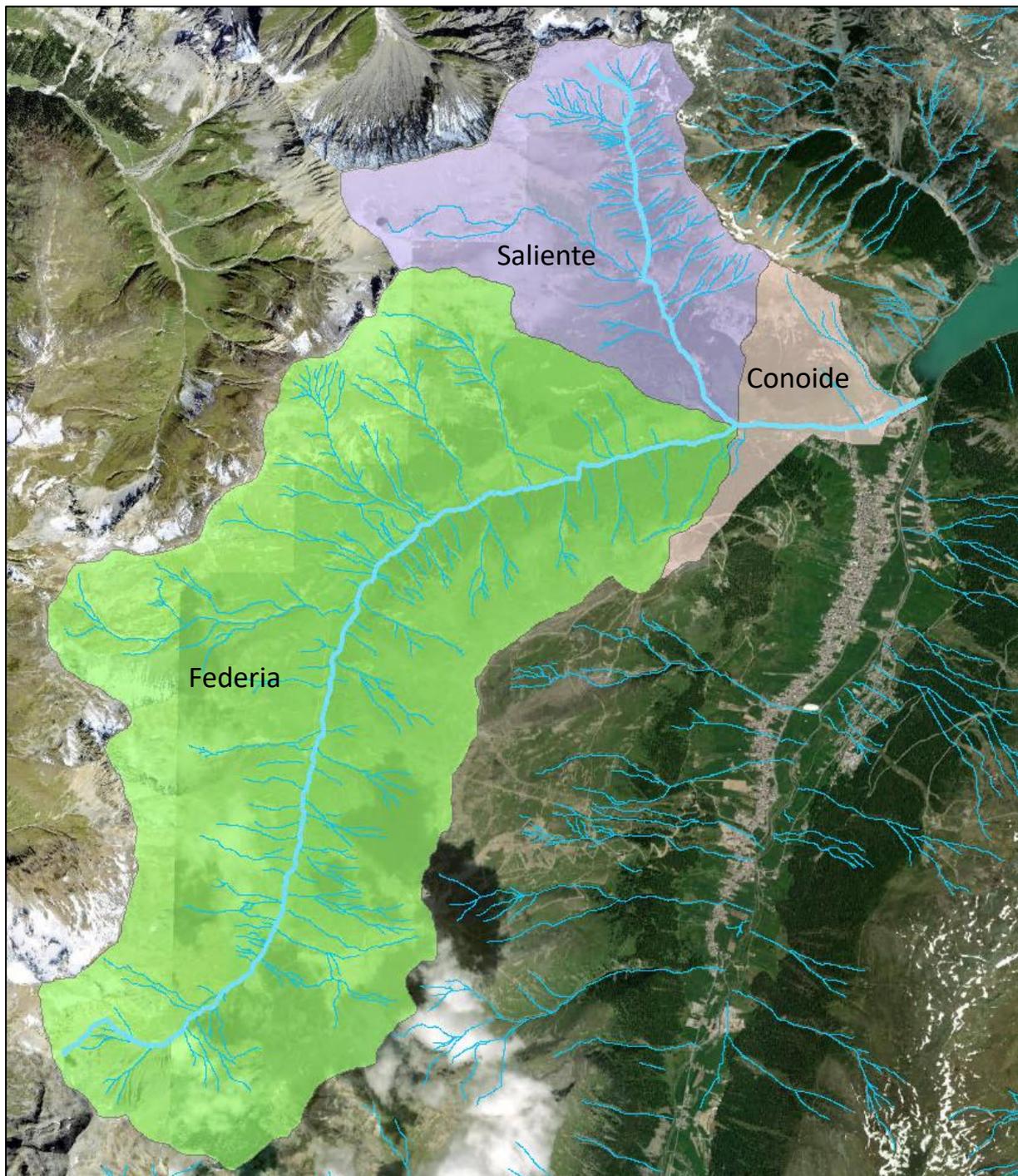
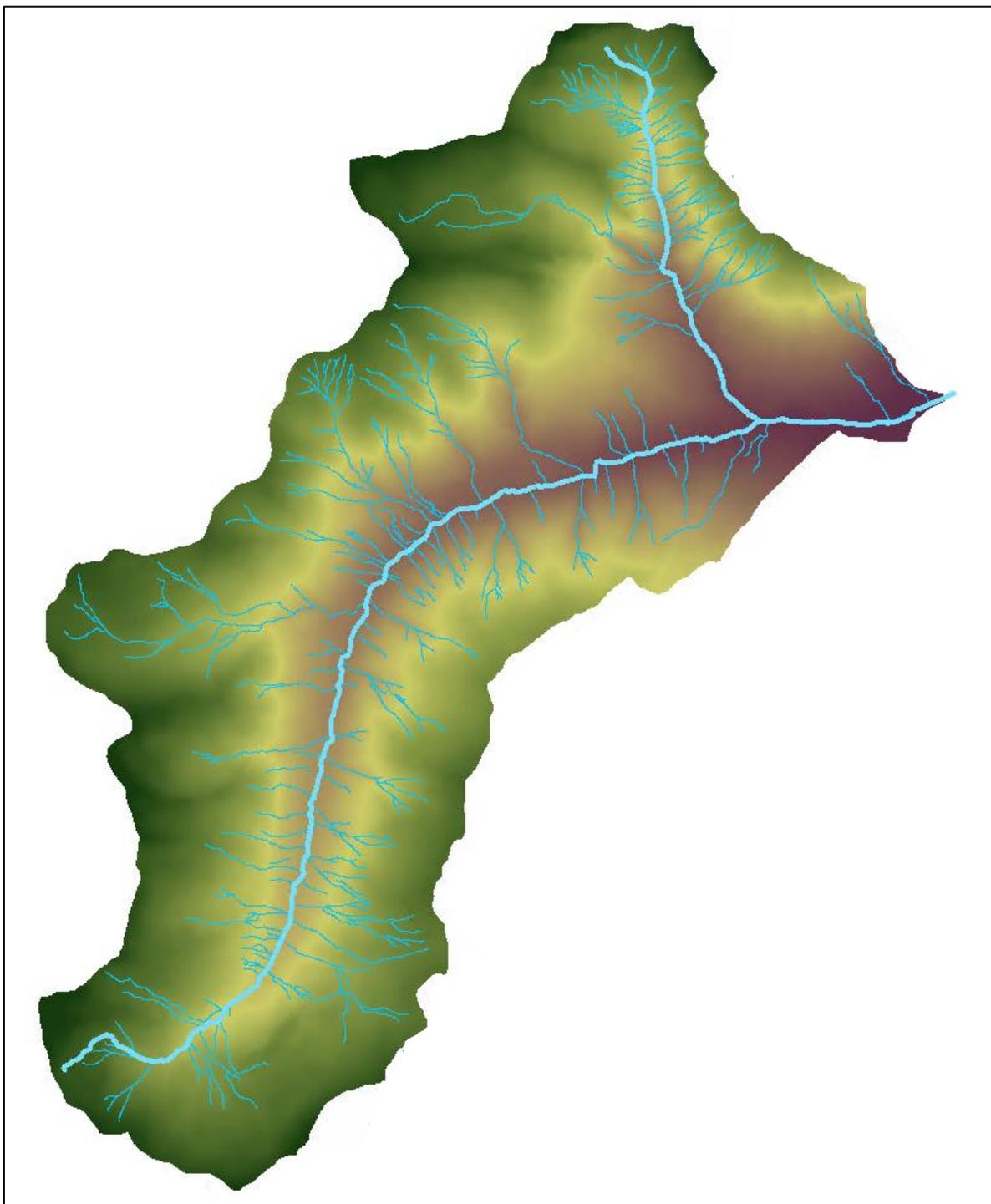


Figura 3 – Modello digitale del terreno del bacino idrografico



Di seguito si riportano i principali risultati ottenuti dall'analisi geomorfologica sui singoli bacini individuati.

Tabella 1 –Caratteristiche bacini

Bacino	u.d.m.	Federia	Saliente	Conoide
Superficie	ha	2468	690	198
Quota minima	m s.m	1858.0	1856.4	1805.3
Quota massima	m s.m	3091.8	3060.5	2701.2
Quota media	m s.m	2493.7	2509.7	2063.5
Pendenza media alveo	%	0.10	0.22	0.03
Lunghezza asta principale	km	10.0	3.90	1.777
Lunghezza media versante	km	1.38	0.73	1.47

A partire dall'analisi condotta sono stati calcolati i tempi di corrivazione per ogni bacino. Si sono ipotizzate velocità medie di run-off superficiale lungo i versanti (1.5 m/s) e lungo le aste torrentizie (3 m/s). I tempi di corrivazione così ottenuti tramite lo studio cartografico con il software Arc-Gis, riportati in Tabella 2, risultano inferiori a quelli calcolati con la formula di Giandotti.

Tabella 2 – Tempi di corrivazione bacini

Bacino	Tc	Giandotti
Federia	70.9	103.7
Saliente	29.8	48.0
Conoide	26.2	38.7

La scelta di utilizzare un approccio morfologico per il calcolo del tempo di corrivazione al posto del classico metodo di Giandotti è stata effettuata in quanto quest'ultima formulazione risulta più indicata per bacini di estensione superficiale superiore a 100 km².

2.3 ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE

2.3.1 Curve di possibilità pluviometrica

L'analisi della precipitazione intensa permette la definizione della CPP (Curva di Possibilità pluviometrica), strumento che come ben noto caratterizza la frequenza delle portate calcolate con metodologia indiretta.

La curva di possibilità pluviometrica è espressa nella forma $h_T(D) = a_1 w_T D^n$, in cui D

rappresenta la durata dell'evento meteorico, T il tempo di ritorno, mentre a_1 (coefficiente pluviometrico orario), w_T (quantili normalizzati per i diversi tempi di ritorno espressi in anni) e n (esponente di scala) sono i parametri delle curve che variano spazialmente.

I valori dei diversi parametri sono estrapolabili dal sito internet dell'ARPA (http://idro.arpalombardia.it/pmapper-3.2/wg_serv_idro.phtml) dove sono presenti delle mappe in formato raster di tutta la regione.

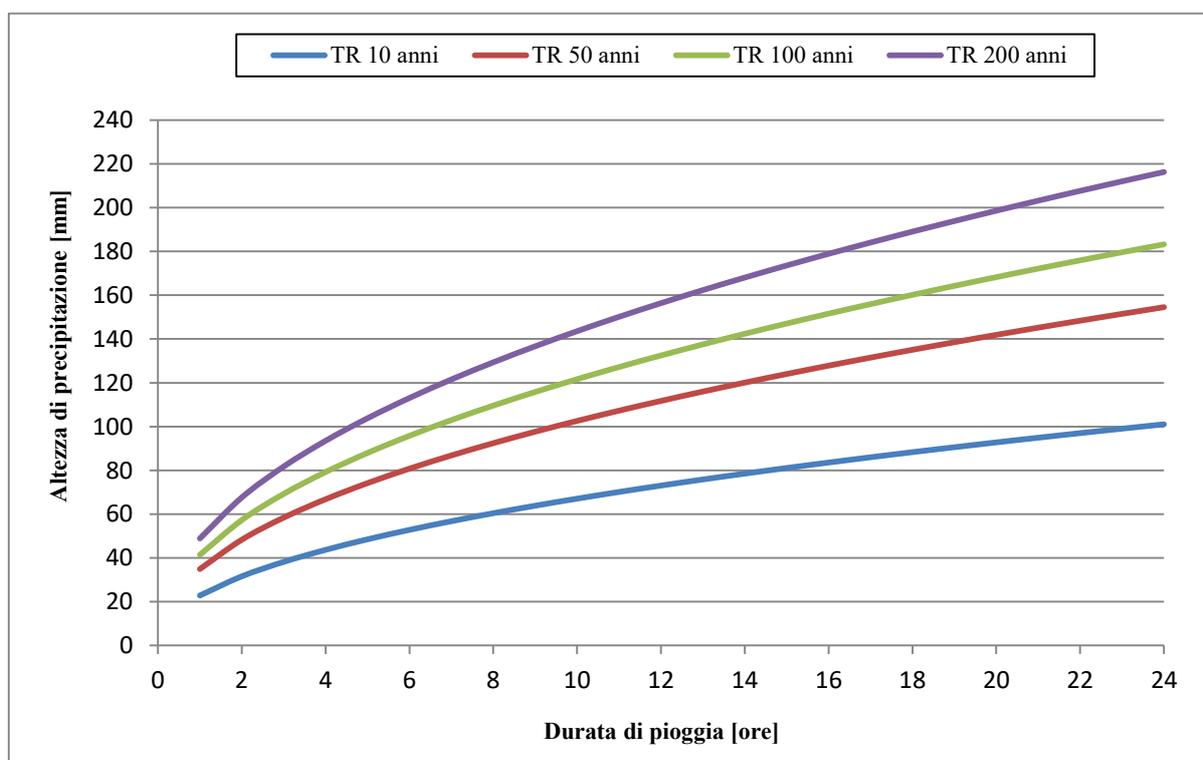
Di seguito si riportano i parametri medi delle CPP del bacino idrografico in oggetto ricavati dai dati riportati da ARPA Lombardia.

Tabella 3 – Parametri delle CPP del bacino

Durata	d>=1 ora	
Tempo di ritorno	a	n
10 anni	22.84	0.468
50 anni	34.93	0.468
100 anni	41.42	0.468
200 anni	48.89	0.468

Di seguito si riportano le CPP relative al bacino in oggetto per tempi di ritorno sopracitati.

Figura 4 – Curve di possibilità pluviometrica del bacino



2.3.2 Ietogrammi di progetto

Tra i diversi tipi di piogge sintetiche più o meno utilizzate nella verifica e progettazione di opere idrauliche, si è deciso di adoperare lo ietogramma cosiddetto Chicago, che presentando andamenti temporali non costanti, consente una migliore rappresentazione del fenomeno meteorico intenso, che è normalmente caratterizzato dalla presenza di picchi di intensità di pioggia. Tale diversa distribuzione di pioggia conduce a valutare differentemente la portata al colmo, se vengono considerati operatori non lineari per il calcolo delle perdite idrologiche e per la trasformazione afflussi netti-deflussi.

La principale caratteristica di questo ietogramma consiste nel fatto che per ogni durata, anche parziale, l'intensità media della precipitazione dedotta dallo ietogramma stesso è congruente con quella definita dalla curva di possibilità pluviometrica. Esso presenta il vantaggio di essere poco sensibile alla variazione delle durata di base, in quanto, per durate progressivamente maggiori, la parte centrale dello ietogramma rimane la stessa mentre si aggiungono delle code all'inizio e alla fine dell'evento. Inoltre imponendo che la durata della pioggia sia maggiore del tempo di corrivazione del bacino, si ottiene, proprio per la caratteristica prima detta, che lo "scroscio" critico è certamente contenuto nella pioggia di progetto. La costruzione dello ietogramma Chicago di durata θ a partire dalle cpp, è la seguente:

$$i(t) = n a [\theta_a/r]^{n-1} \quad \text{prima del picco} \quad (3)$$

$$i(t) = n a [\theta_b/(1-r)]^{n-1} \quad \text{dopo il picco} \quad (4)$$

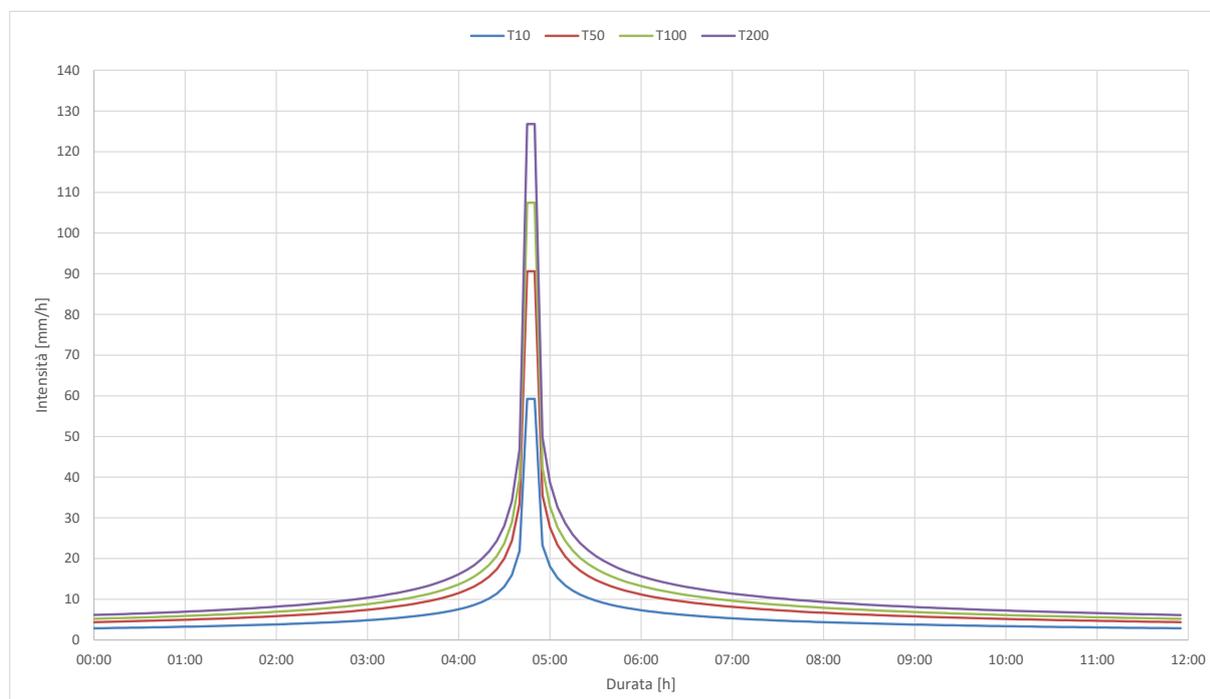
dove:

- i intensità della precipitazione (mm/ora);
- a e n sono i parametri della curva di possibilità pluviometrica;
- $\theta_b = \theta/r$ è il tempo dall'inizio della pioggia fino al picco;
- θ_a è il tempo dal picco fino alla fine della pioggia;
- r posizione del picco lungo l'asse dei tempi, rapporto tra il tempo di picco e la durata totale, assunto pari a 0,4.

In Figura 5 è riportata la rappresentazione grafica degli ietogrammi Chicago di progetto riferiti ai tempi di ritorno di 10, 50, 100 e 200 anni calcolati con il codice di calcolo di simulazione idrologica URBIS. È stata considerata una durata complessiva dell'evento pari a 12 ore, quindi convenientemente maggiore del tempo di corrivazione del bacino più esteso tra

quelli in oggetto (bacino t. Federia pari a 1.18 ore).

Figura 5 – Ietogrammi Chicago lordi di progetto



2.4 DEFINIZIONE DEGLI IDROGRAMMI

2.4.1 Modello afflussi deflussi

Nell'ambito del presente studio per l'applicazione del modello afflussi-deflussi e la definizione degli idrogrammi di piena è stato utilizzato il modello di simulazione idrologica URBIS.

Il modello adottato per la trasformazione afflussi-deflussi si basa sulla teoria lineare dell'idrogramma unitario istantaneo, in cui la trasformazione degli afflussi meteorici depurati delle perdite idrologiche in deflussi viene eseguita numericamente attraverso la convoluzione di un idrogramma unitario istantaneo (IUH) scelto opportunamente tra i diversi tipi esistenti.

Le perdite idrologiche (infiltrazione sotterranea, evapotraspirazione, ecc.), sono state definite con il metodo non lineare proposto dal Soil Conservation Service (SCS-CN). Il metodo si basa sulla definizione del numero di curva adimensionale CN (runoff curve number) che rappresenta un indice di ritenzione potenziale del suolo, dipendente dalla pedologia, dal tipo e grado di copertura del suolo e dal grado di umidità iniziale del terreno. Tale indice ha un valore compreso tra 0 e 100 (CN=0 per bacini assolutamente permeabili, CN=100 per bacini

assolutamente impermeabili). Il valore di CN varia in funzione di quattro diverse classificazioni:

- classificazione della permeabilità del suolo (gruppi idrologici);
- classificazione dell'uso del suolo e sistemazione della superficie;
- condizione di drenaggio;
- condizioni iniziali di saturazione dei suoli.

Per quanto riguarda la classificazione della permeabilità del suolo, si distinguono quattro diversi gruppi idrologici, le cui caratteristiche si riportano in Tabella 4.

Tabella 4 – Classificazione dei gruppi idrologici in base al grado di permeabilità del suolo

A	Bassa capacità di deflusso – suoli con elevata infiltrabilità anche se completamente saturi – sabbie o ghiaie profonde ben drenate – notevole conducibilità idrica
B	Suoli con moderata infiltrabilità se saturi – discretamente drenati e profondi – tessitura medio-grossolana – conducibilità idrica media
C	Suoli con bassa infiltrabilità se saturi – uno strato impedisce la percolazione verticale – suoli con tessitura medio-fine e bassa infiltrabilità – conducibilità idrica bassa
D	Capacità di deflusso elevata – suoli con infiltrabilità ridottissima in condizioni di saturazione – suoli ricchi di argilla rigonfianti – suoli con strato argilloso superficiale – suoli poco profondi su substrato impermeabile – conducibilità idrica estremamente bassa

Per quanto riguarda la classificazione in base all'uso del suolo e sul tipo di copertura, la definizione del CN corrispondente è stata effettuata utilizzando i valori di Tabella 5, variabili in funzione della permeabilità del suolo.

Tabella 5 – Coefficienti CN al variare della classificazione di uso del suolo

COD5	Descrizione	A	B	C	D
131	Cave	72	82	87	90
133	Cantieri	72	82	87	89
134	Aree degradate non utilizzate e non vegetate	72	82	87	90
221	Vigneti	66	74	80	82
222	Frutteti e frutti minori	62	71	78	81
331	Spiagge, dune ed alvei ghiaiosi	49	68	79	84
332	Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di	72	82	87	90
333	vegetazione rada	63	77	85	88
511	Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	100	100	100	100
1112	tessuto residenziale continuo mediamente denso	89	92	94	95
1121	Tessuto residenziale discontinuo	77	85	90	92

1122	Tessuto residenziale rado e nucleiforme	60	75	84	89
1123	Tessuto residenziale sparso	55	71	80	85
1221	Reti stradali e spazi accessori	98	98	98	98
1411	Parchi e giardini	68	79	86	89
1412	Aree verdi incolte	68	79	86	89
1421	Impianti sportivi	49	69	79	84
1422	Campeggi e strutture turistiche e ricettive	49	69	79	84
2112	seminativi arborati	69	79	85	89
2311	prati permanenti in assenza di specie arboree ed a	49	71	86	89
2312	prati permanenti con presenza di specie arboree ed	47	6	849	87
3113	formazioni ripariali	35	56	70	77
3121	Boschi conifere a densità media e alta	42	65	76	80
3122	Boschi di conifere a densità bassa	43	66	77	81
3211	praterie naturali d'alta quota assenza di specie	49	71	86	89
3212	praterie naturali d'alta quota con presenza di s	45	69	82	85
3221	cespuglieti	46	67	77	84
3222	vegetazione dei greti	98	98	98	98
3241	cespuglieti con presenza significativa di specie a	46	67	77	84
3242	cespuglieti in aree di agricole abbandonate	46	67	77	84
5121	Bacini idrici naturali	100	100	100	100
12111	Insedamenti industriali, artigianali, commerciali	81	88	91	93
12112	Insedamenti produttivi agricoli	62	76	83	87
12122	Impianti di servizi pubblici e privati	81	88	91	93
12123	Impianti	81	88	91	93
12124	Cimiteri	68	79	86	89
21141	Colture floro-vivaistiche a pieno campo	68	79	86	89
21142	Colture floro-vivaistiche protette	68	79	86	89
31111	boschi di latifoglie a densità media e alta governati a ceduo	42	65	76	80
31121	boschi di latifoglie a densità bassa governati a ceduo	42	65	76	80
31311	boschi misti a densità media e alta governati a c	42	65	76	80
31312	boschi misti a densità media e alta governati ad alto fusto	42	65	76	80

Viene inoltre fornita una tabella atta a valutare la categoria della condizione di umidità iniziale in funzione della precipitazione antecedente di 5 giorni (Tabella 6).

Tabella 6 – Individuazione della condizione di umidità antecedente (AMC) in funzione della precipitazione antecedente di 5 giorni (Fonte: SCS, 1985)

Classe AMC	Pioggia totale nei 5 giorni antecedenti l'evento	
	Stagione di riposo vegetativo	Stagione di crescita
I	< 13 mm	< 36 mm
II	13 ÷ 28 mm	36 ÷ 53 mm
III	> 28 mm	> 53 mm

Per la situazione in oggetto è stata formulata l'ipotesi di terreno asciutto (ACM I). Considerando le caratteristiche dell'area e analizzando la cartografia relativa all'uso del suolo (Figura 6) disponibile sul Geoportale di Regione Lombardia, incrociata con i dati di permeabilità del terreno ricavati dalla carta litologica del bacino, si sono stimati i valori medi del parametro CN I per ciascun bacino (Tabella 7).

Figura 6 – Carta dell'uso del suolo

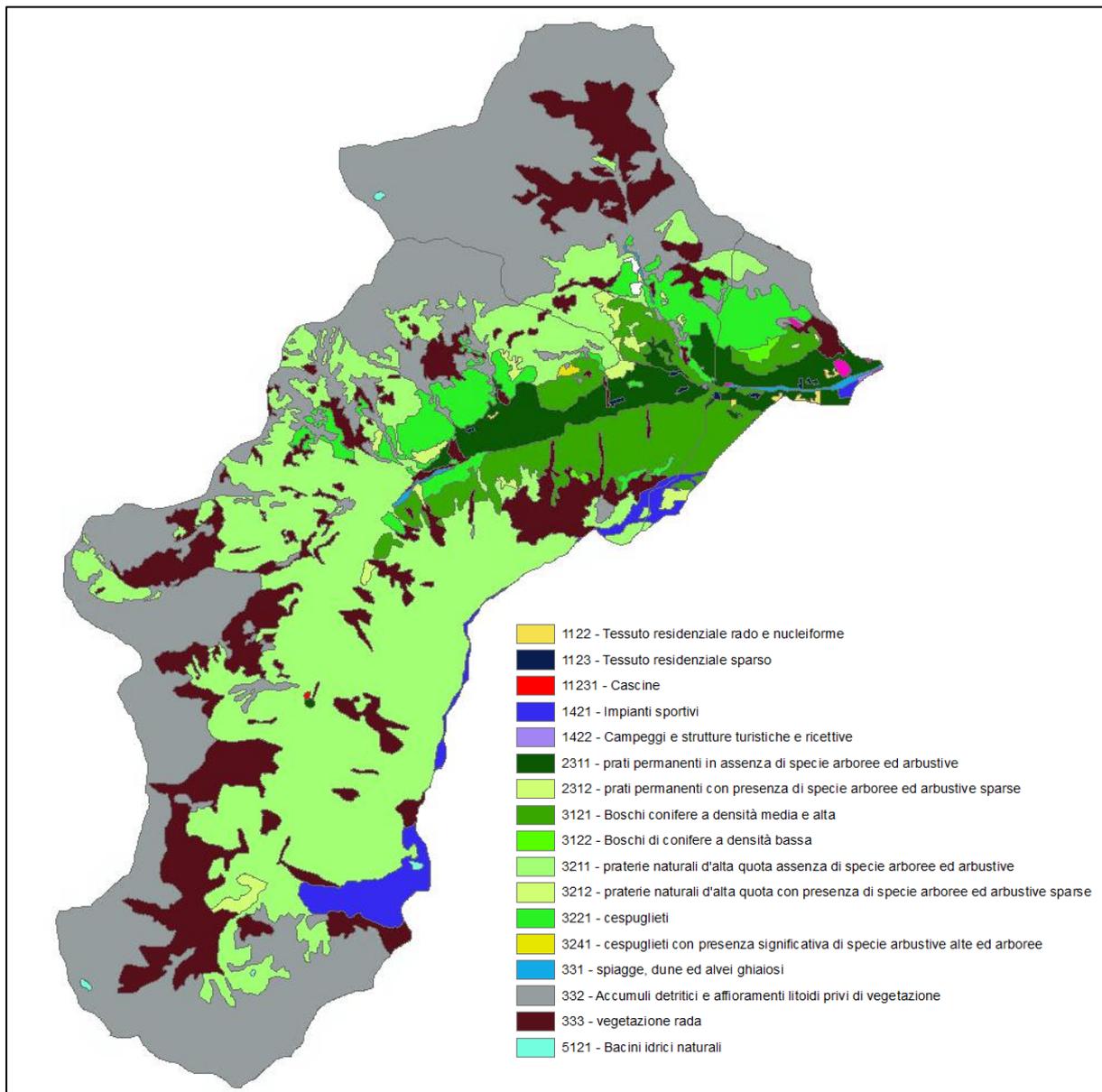


Figura 7 – Carta della permeabilità

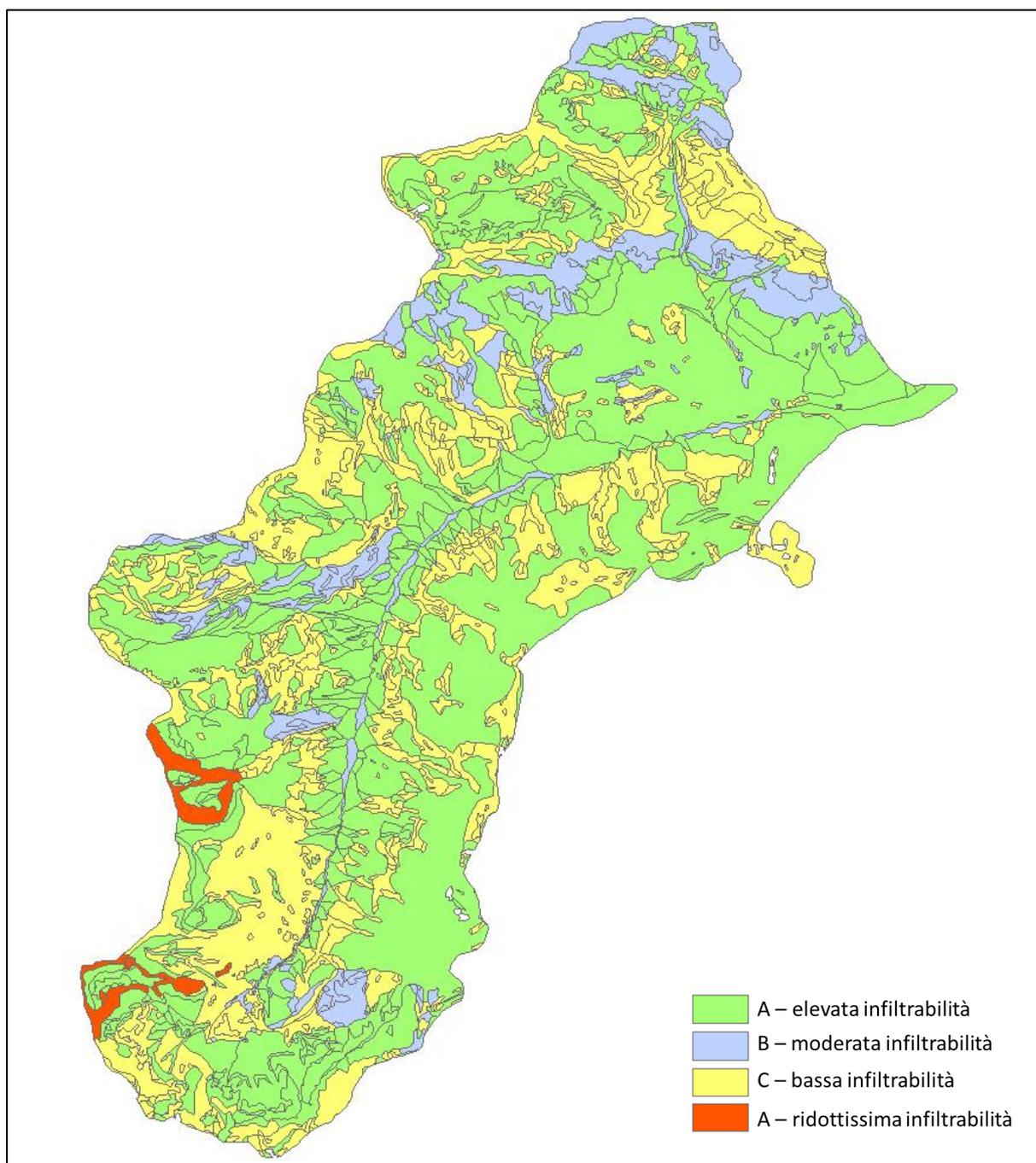


Tabella 7 – Valori del parametro CN dei sottobacini individuati

Bacino	CN I
Bacino Federia	41.9
Bacino Saliente	48.9
Bacino Conoide	27.1

Il passaggio dalla pioggia lorda a quella netta, ossia la porzione di precipitazione meteorica che concorre alla formazione dell'idrogramma, viene effettuato attraverso la seguente espressione:

$$h_{netta} = \frac{(h_{lorda} - I_a)^2}{h_{lorda} - I_a + S}$$

Analisi empiriche hanno mostrato un legame tra S (parametro funzione del tipo di suolo e del suo utilizzo) e I_a (rappresentante l'immagazzinamento in depressioni superficiali) secondo l'espressione:

$$I_a = 0.2 * S$$

Si ottiene quindi:

$$h_{netta} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Il parametro S , che rappresenta la quantità di acqua immagazzinabile nel bacino, dipende dal parametro CN precedentemente calcolato attraverso la relazione:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

2.4.2 Idrogrammi di progetto

La determinazione dell'onda di piena ritenuta critica è stata condotta impiegando le metodologie classiche per la trasformazione afflussi-deflussi partendo da piogge sintetiche dedotte dalle curve di possibilità pluviometrica e assumendo che la piena così ottenuta abbia lo stesso tempo di ritorno della pioggia che l'ha prodotta.

Il modello adottato si basa sulla teoria lineare dell'idrogramma unitario istantaneo, in cui la trasformazione degli afflussi meteorici netti in deflussi viene eseguita numericamente attraverso la convoluzione di un idrogramma unitario istantaneo (IUH) scelto opportunamente tra i diversi tipi esistenti. Esso inoltre rappresenta l'idrogramma di piena che si origina nel bacino in occasione di un singolo impulso di precipitazione di durata infinitesima, intensità infinita e volume unitario.

L'IUH racchiude al suo interno le caratteristiche fisiche del bacino che interessano la formazione delle piene, come per esempio la capacità di invaso ed il tempo di risposta del bacino stesso. In particolare si è utilizzato il seguente modello di Nash che schematizza il bacino come una cascata di serbatoi lineari secondo l'espressione:

$$h(t) = \frac{1}{K(n-1)!} \cdot (t/K)^{n-1} \cdot e^{-t/K}$$

dove K è la costante caratteristica dei serbatoi ed n il numero degli stessi.

Si è assunto $n = 3$ e K correlato al tempo di corrivazione dei singoli sottobacini e al numero n secondo l'espressione:

$$K = 0,5 T_c / (n-1)$$

Ciò premesso mediante il programma automatico URBIS è stata eseguita la trasformazione degli ietogrammi sintetici netti Chicago in onde di piena relativamente a ciascuno bacini individuati.

Si riportano nelle successive figure gli idrogrammi riferiti agli eventi con tempo di ritorno 10, 50, 100 e 200 anni calcolati in corrispondenza delle sezioni di chiusura individuate, mentre in Tabella 8 si riportano i risultati sintetici in termini di portata al colmo e volume dell'onda

Figura 8 – Idrogrammi alle sezioni di chiusura, bacino Federia

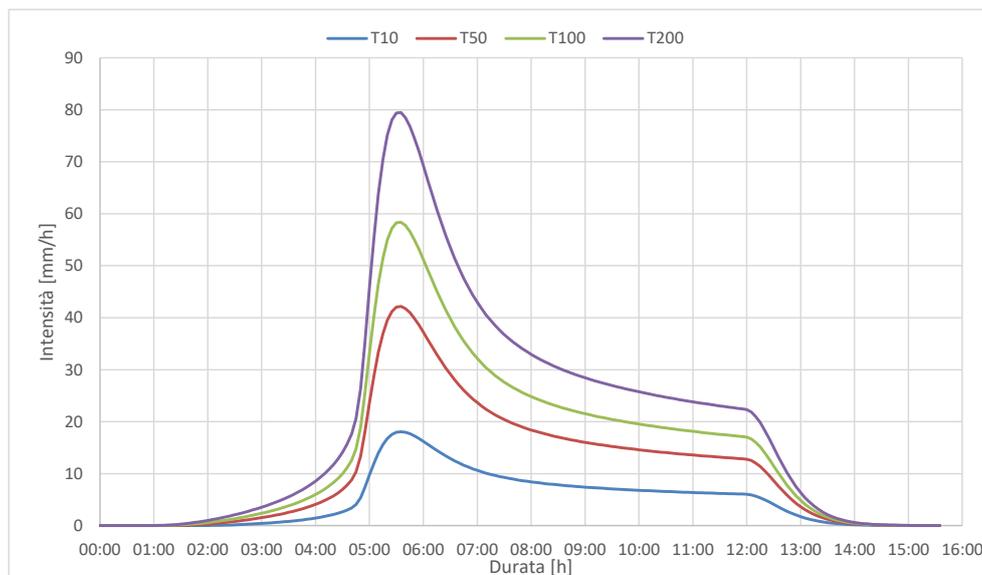


Figura 9 – Idrogrammi alle sezioni di chiusura, bacino Saliente

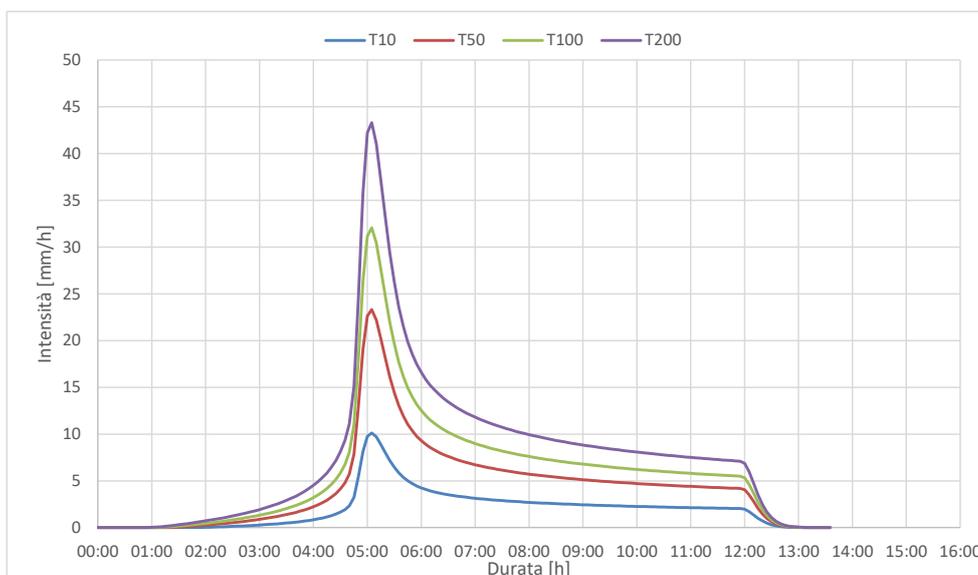


Figura 10 – Idrogrammi alle sezioni di chiusura, bacino conoide

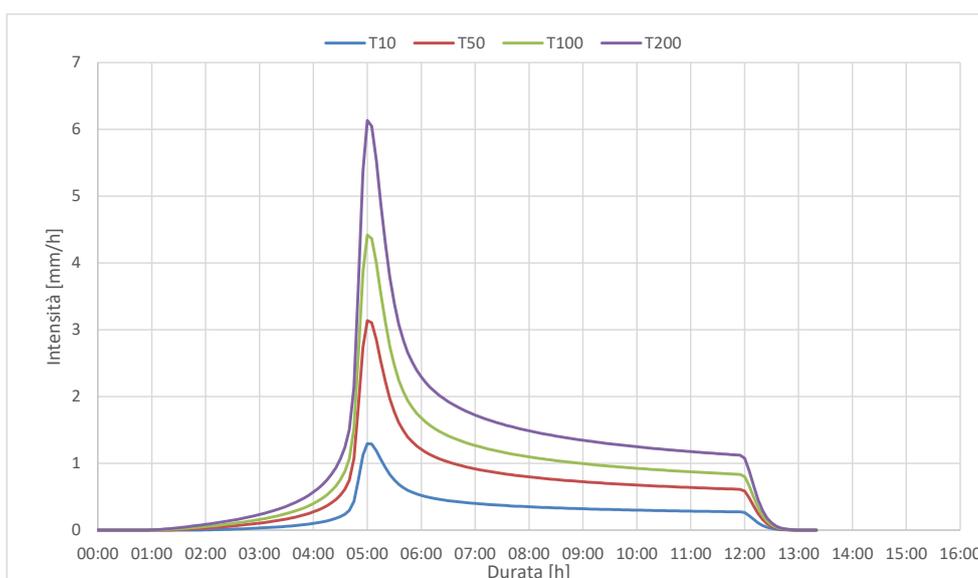


Tabella 8 – Risultati sintetici idrogrammi di progetto

Bacino	param.	T10	T50	T100	T200
Bacino Federia	Q max [mc/s]	18.1	42.2	58.4	79.5
	Volume [mc]	272'114	612'809	836'785	1'123'510
Bacino Saliente	Q max [mc/s]	10.1	23.3	32.0	43.3
	Volume [mc]	95'873	211'275	285'526	379'501
Bacino conoide	Q max [mc/s]	1.3	3.1	4.4	6.1
	Volume [mc]	12'211	28'561	39'709	54'385

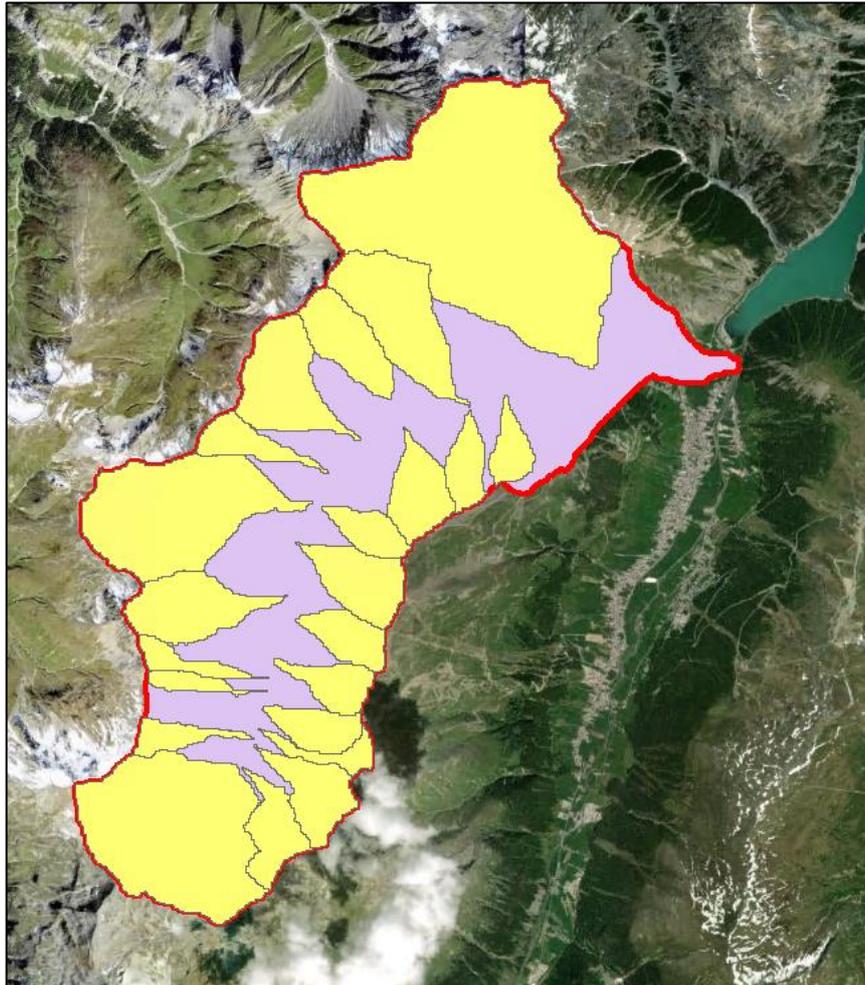
2.4.3 Altri studi di riferimento

I risultati ottenuti dall'analisi idrologica effettuata sono stati confrontati con i valori di portata al colmo relativi allo studio denominato “Attuazione del Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino del Fiume Po (P.A.I.) in campo urbanistico art. 17, comma 5 della L. 18.05.1989 n. 183 – Perimetrazione delle aree in dissesto per fenomeni di trasporto in massa su conoidi – Aree nere ai sensi dell'art. 18 comma 3 del P.A.I. – Bacino idrografico del Torrente Federia” (2009). Nel suddetto studio l'analisi idrologica per la stima della portata di piena centennale utilizzata per le verifiche idrauliche è stata condotta partendo dai valori delle curve di possibilità pluviometrica di Arpa Lombardia. Il valore della portata al colmo è stato quindi calcolato con l'utilizzo del metodo razionale, che fornisce un valore pari a 20.78 m³/s per il Saliente e 66.80 m³/s per il Federia, risultando quindi in linea con quelli calcolati nella presente trattazione (32.0 m³/s per il Saliente e 58.4 m³/s per il Federia).

2.4.4 Confronto con dati del portale SIBCA

Il Sistema Informativo Bacini e Corsi d'Acqua (SIBCA), disponibile sul portale di Regione Lombardia, si prefigge di creare un approccio per la definizione di scenari di pericolosità idrogeologica all'interno di bacini idrografici alpini e allo sbocco dei corsi d'acqua sui conoidi. Risulta particolarmente indicato per l'analisi idrogeologica dei piccoli bacini montani, a carattere torrentizio, mentre non è adatto per la caratterizzazione idraulica dei grandi corsi d'acqua di fondovalle o dei fiumi di pianura. Il sistema è stato creato utilizzando alcune banche dati regionali quale base per le proprie elaborazioni. I dati ricavabili dal sistema informativo garantiscono un supporto alle attività di programmazione. In particolare è possibile confrontare i diversi bacini ed individuare quelli a maggior pericolosità idrogeologica, nonché definire scenari di rischio soprattutto per le aree di conoide. Con i dati ricavati è inoltre possibile localizzare con maggior cura le zone in cui sono da predisporre opere di difesa del suolo e fornire anche indirizzi tecnici per la loro progettazione. I dati ricavabili dal sistema informativo sono inoltre utili per verifiche e controlli sul reticolo minore, per l'esercizio della polizia idraulica, e per controlli su studi e progetti di opere di difesa in aree montane. Lo scopo finale del Sistema Informativo è quello di calcolare in modo semi-automatico la massima portata liquida e la magnitudo di un bacino idrografico costruito partendo da un punto qualunque del reticolo idrografico.

Figura 11 – Portale SIBCA, bacini valle Federia



Il calcolo della portata liquida di picco presuppone la scelta delle formule adatte per questa operazione: sono state inserite nel sistema due formule che conciliano l'affidabilità del risultato con l'esiguità di variabili che avrebbero potuto creare un incremento esponenziale dell'errore: il metodo razionale (Durazza D., 1880) e la formula di Iskowski (1885).

Il *metodo razionale*, calcola la portata al colmo mediante la relazione:

$$Q_c = \varepsilon \cdot I \cdot C \cdot A$$

in cui A (km^2) è l'area del bacino, C è il coefficiente di deflusso (ottenuto dal grid dei coefficienti), I è l'intensità di pioggia che provoca la piena, cioè l'altezza critica di pioggia caduta nel il tempo di corrivazione del bacino (h_c/t_c) ed ε è un fattore di riduzione areale ($\varepsilon = 1 - 0.17 A^{1/4}$) (Fruhling, 1894). Il tempo di corrivazione, ossia il tempo necessario affinché la precipitazione che cade nella sezione di ingresso del bacino raggiunga la parte terminale (intervallo di tempo dall'inizio della precipitazione oltre il quale tutto il bacino contribuisce al

deflusso) viene calcolato tramite la formula di Giandotti.

La seconda formula utilizzata per il calcolo della portata liquida massima è quella di *Iskowski* la cui espressione è:

$$Q_{max} = k \cdot m \cdot h \cdot A$$

dove h è la precipitazione media annua sul bacino in metri (ottenuta dal db meteo), A è l'area del bacino (km²), m è un coefficiente che tiene conto della velocità del deflusso dell'acqua e decresce, quindi, con A, k è un coefficiente dipendente dall'altitudine del bacino e dalle sue caratteristiche di permeabilità.

Si riportano in Tabella 9 i valori dei parametri disponibili nella scheda del portale SIBCA relativi al Bacino del t. Federia e al sottobacino del t. Saliente, da cui si evince che i valori di portata al colmo centennale risultano in linea con quelli calcolati nel presente studio. Le differenze sono riconducibili alla diversa metodologia di calcolo utilizzata. Di fatto l'utilizzo della formula razionale fornisce il solo valore della portata al colmo dell'onda di piena. Data la finalità del presente studio si è adottata la più raffinata formulazione di Nash che consente di ottenere un idrogramma di calcolo completo.

Tabella 9 – Parametri da portale SIBCA

MACROBACINO	Spol	Spol
Nome bacino	t. Federia	SP57
codice CT10	712	729
portata TR50 (mc/s)	35.08	21.86
portata TR100 (mc/s)	50.09	24.05
portata Iskowski (mc/s)	38.60	0.00
magnitudo Bottino (mc)	56'761	36'582
magnitudo D'Agostino (mc)	52'737	33'922
magnitudo Ceriani (mc)	159'290	193'113
magnitudo Bianco (mc)	145'837	67'430
coefficiente deflusso	0.40	0.45
indice franosità	4.39	4.57
tempo corrivazione (h%)	1.96	0.84
pendenza media asta princ. (m/m)	0.09	0.22
lunghezza totale idrografia (Km)	94.32	18.41
Area planimetrica (km2)	33.46	6.97
pendenza media bacino (m/m)lse	0.53	0.63
Quota max bacino (m slm)	3'089.30	3'059.45
Quota minima (m slm)	1'799.63	1'861.84
Quota media (m slm)	2'475.49	2'515.56

3. ANALISI IDRAULICA

3.1 GENERALITÀ

Nel presente capitolo viene dapprima effettuata una stima della producibilità media annua di sedimenti nel bacino oggetto di indagine. È quindi stato sviluppato un modello bidimensionale a fondo mobile costruito partendo dal DTM ricavato a seguito della campagna di rilievo e dai dati granulometrici ottenuti dalle indagini effettuate. Il modello risulta necessario per l'interpretazione delle dinamiche evolutive del corso d'acqua e dei fenomeni di trasporto solido durante gli eventi di piena. Pur con tutte le approssimazioni e incertezze insite in tale tipologia di modellazione, dovute alla difficoltà di effettuare un'accurata taratura dei vari parametri richiesti e in generale all'impossibilità per un modello, per quanto dettagliato, di rappresentare con sistemi di equazioni gli effetti generati localmente dalle macroturbolenze e vorticità, ha consentito tuttavia di valutare con maggiore dettaglio i fenomeni di trasporto e di erosione sulla base delle caratteristiche geomorfologiche locali all'interno dell'alveo e ha permesso di ottenere una stima, per quanto approssimata, dei volumi di deposito generati a seguito di un evento con tempo di ritorno centennale.

3.2 STIMA DELLA PRODUZIONE POTENZIALE DI SEDIMENTO PER EROSIONE NEL BACINO

Il bacino del torrente Federia si presenta, al pari di alcune delle valli attigue, come una marcata incisione sviluppata, nei suoi settori sommitale e mediano, con orientamento sub parallelo alla valle del torrente Spöl, piegando bruscamente verso Est nei suoi settori inferiore e basale. La conformazione dei versanti riconduce a una genesi legata all'azione delle acque incanalate lungo linee di debolezza del substrato roccioso combinata con lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso il quale è periodicamente interessato da fenomeni erosivi lungo le sponde torrentizie. Quest'ultimo raggiunge poi il fondovalle principale della val Federia sotto forma di lave torrentizie o colate detritico fangose, dando origine alla fascia di conoidi pedemontani sviluppati nel settore mediano e superiore del bacino. Questi ultimi si presentano frequentemente interessati da fenomeni di colate detritiche che si depongono in prevalenza lungo gli alvei medesimi o andando a sovralluvionare gli edifici di conoide. Solo una parte di tali depositi raggiunge impulsivamente l'alveo del torrente Federia. Lungo quest'ultimo infatti sono presenti depositi alluvionali torrentizi sufficientemente selezionati granulometricamente e caratterizzati dalle tipiche forme erosivo - deposizionali che

testimoniano che l'origine degli stessi è riconducibile a fenomeni di trasporto solido.

Scendendo nel tratto inferiore del bacino montano, sino a raggiungere il ponte della Calcheira a quota 1857 m s. m. circa, si osservano i tipici elementi della forra fluvio torrentizia con sponde marcatamente acclivi impostate nel substrato roccioso, principalmente in sponda destra e in misura meno evidente in sponda sinistra.

Poco a valle del suddetto ponte l'alveo è caratterizzato dalla confluenza, in sponda sinistra, dell'alveo del torrente Saliente il quale ha sezione maggiore rispetto al torrente Federia ed è caratterizzato significative testimonianze di fenomeni di trasporto solido con erosioni spondali e presenza, all'interno dei depositi alluvionali attuali, di grossi massi anche di dimensione metrica. Immediatamente a valle della confluenza la grande quantità di materiale grossolano, con presenza di massi di dimensioni metriche, trasportati dai fenomeni di trasporto solido e colata detritica, conferiscono all'alveo comune dei due torrenti, caratteristiche morfologiche completamente differenti rispetto alle morfologie osservate nei settori inferiore mediano e superiore dell'alveo del torrente Federia: si osserva infatti una significativa "corazzatura" dello stesso dovuta al fatto che le acque, anche durante i fenomeni di piena, non sono in grado di rimuovere i massi di proporzioni maggiori, i quali restano in posto. Tale situazione è bene osservabile sino a quota 1846 m s.m. dove è presente un attraversamento carraio privato. Osservando l'alveo a valle del suddetto attraversamento carraio si osserva la mancanza di massi di proporzioni metriche e una progressiva diminuzione delle dimensioni dei ciottoli decimetrici sino ad arrivare al ponte comunale di via Molin, a valle del quale, i ciottoli decimetrici sono decisamente subordinati rispetto alle granulometrie ghiaioso sabbiose.

Tali osservazioni permettono di affermare che i flussi detritici che, anche con cadenza annuale si verificano all'interno del bacino del torrente Saliente possono solo in parte raggiungere il torrente Federia, il quale asporta annualmente il materiale a granulometria ghiaioso sabbiosa trasportandolo sino alla base del conoide e all'interno del lago di Livigno e lasciando in posto i grossi massi presenti all'interno dei flussi detritici.

L'esame morfologico del bacino del torrente Saliente indica chiaramente come all'interno dello stesso siano prevalenti i fenomeni di colata detritica nel settore sommitale a monte di quota 1910 m s. m. mentre nell'ampio alveo, a pendenza variabile nell'intervallo 10 – 20%, che raccorda il settore sommitale del bacino con l'apice dell'edificio di conoide siano attivi fenomeni di trasporto solido durante gli eventi di piena ordinaria. La grande superficie del suddetto settore di alveo, pari a circa 20000 mq, permette di avere una ampia zona di

accumulo delle colate detritiche che vengono successivamente rielaborati e trasportati verso valle dalle acque incanalate.

Considerata la situazione sopra descritta si ritiene plausibile un approccio in cui il materiale solido a disposizione lungo l'alveo nel settore apicale del conoide a valle della confluenza corrisponda al massimo volume trasportabile dallo ietogramma di piena. La caratterizzazione granulometrica nel settore distale della zona di influenza dei fenomeni di trasporto solido del torrente Saliente ha permesso di definire il fuso granulometrico caratteristico durante un'onda di piena che tragga l'alimentazione solida dal materiale presente nella fascia altimetrica compresa tra la confluenza dei due torrenti Federia e Saliente posta a quota 1857 e 1830 m s.m. circa.

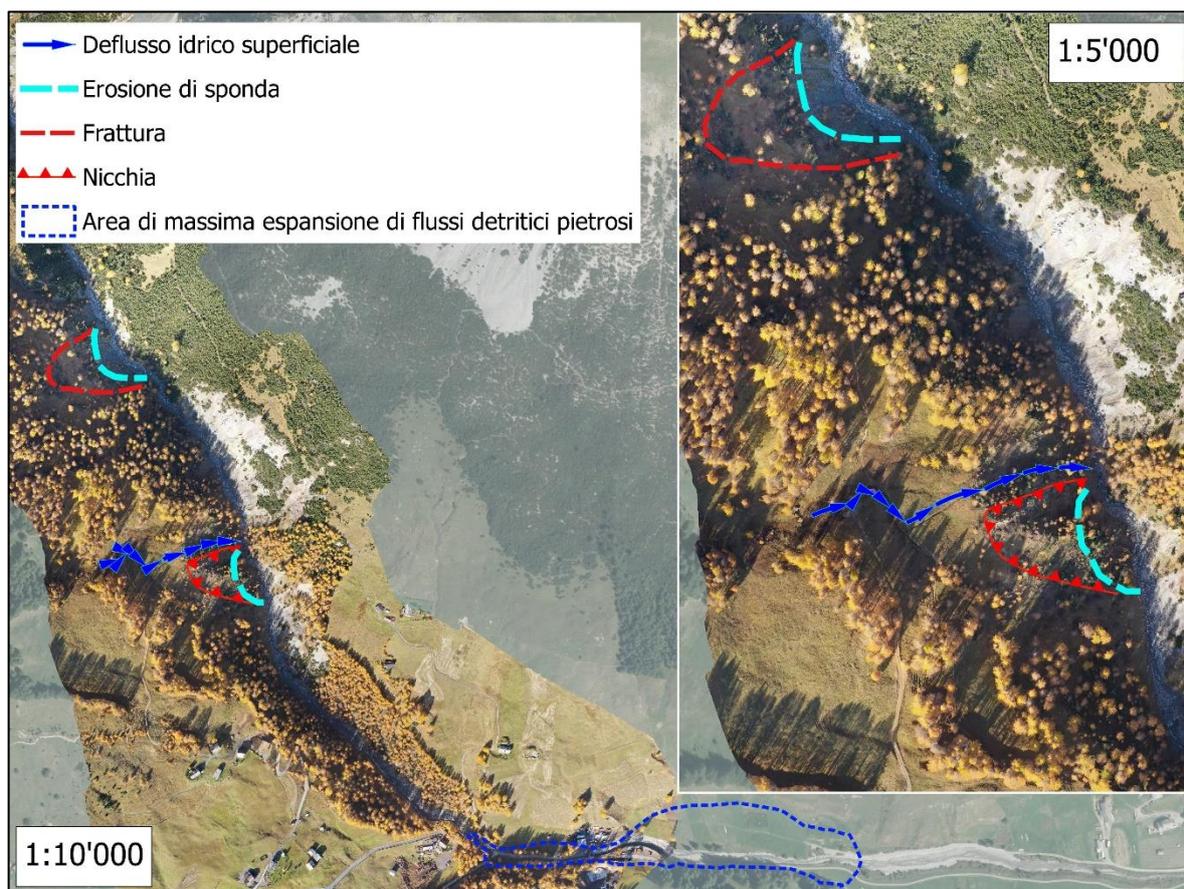
Il suddetto limite inferiore della fascia altimetrica in esame, che corrisponde al settore di conoide soggetto alla massima espansione di eventuali fenomeni di flusso detritico catastrofico proveniente dal bacino del torrente Saliente, in base all'analisi clivometrica dell'area è estesa verso valle sino alla quota in alveo di 1840 m s.m. Il tratto di alveo posto a valle di tale zona ha infatti una pendenza inferiore al limite minimo di pendenza caratteristico della propagazione dei flussi detritici iperconcentrati o pietrosi.

Con tali presupposti si ritiene che l'area sorgente dei fenomeni di trasporto solido determinanti per la dinamica deposizionale all'interno dell'area di interesse del presente studio, posta nel settore distale dell'edificio di conoide, corrisponda all'intervallo altimetrico tra 1857 e 1830 m s. m.. Per tale motivo le analisi granulometriche in alveo sono state eseguite all'interno di tale fascia altimetrica evidenziando una sostanziale omogeneità del Dm caratteristico del materiale in alveo.

In base a recenti rilievi eseguiti nel settore di alveo del torrente Saliente tra la confluenza nel torrente Federia e la quota 1970 m s.l.m. si evidenzia la presenza in sponda destra di almeno due distinti fenomeni franosi.

I suddetti fenomeni franosi, a partire dall'alveo del torrente risalgono sul versante, sino a quota 1970 m s.m. per quanto riguarda il fenomeno più meridionale e fino a quota 2020 m s.m. per quello settentrionale. Nell'estratto cartografico seguente sono riportati i fenomeni in esame.

Figura 12 – Fenomeni franosi t. Saliente



Il fenomeno posto a meridione, è caratterizzato da una vera e propria nicchia di distacco la quale è osservabile sul terreno con rigetti massimi di altezza massima di 3-4 m e apertura della fessura di dimensione metrica, impostata all'interno dei terreni di copertura di origine glaciale. Al contrario il fenomeno settentrionale è rilevabile sul terreno come una frattura di tensione discontinua con rigetto sempre inferiore al metro.

Entrambi i fenomeni sono caratterizzati dalla presenza, nel settore basale, di una erosione spondale attiva formatasi, con ogni probabilità, a causa degli intensi fenomeni erosivi da parte delle acque del torrente Saliente, lungo la quale sono visibili significativi fenomeni di riemersione idrica con conseguente peggioramento delle caratteristiche di resistenza dei terreni. In entrambi i casi i fenomeni erosivi hanno comportato il denudamento e messa a giorno del sottostante substrato roccioso rappresentato da litotipi micascistosi intensamente fratturati e/o completamente cataclastati.

In base alle esperienze maturate in contesti morfologici assimilabili, fenomeni di questo tipo, sono caratterizzati da fenomeni di quiescenza prolungati che si interrompono in concomitanza

di periodi di intense e prolungate precipitazioni o, considerando il contesto climatico della zona, in concomitanza con il periodo del disgelo primaverile.

Tale evoluzione comporta che le masse coinvolte dal fenomeno, subiscano reiterati fenomeni di cedimento e successivo scoscendimento in alveo, con coinvolgimento di volumi parziali.

Considerando la superficie interessata ed una profondità del piano di scivolamento ad una profondità minima di 5 m i due fenomeni sono caratterizzati da volumetrie dell'ordine di 15'000 e 20'000 mc circa, rispettivamente per il fenomeno meridionale e settentrionale. In base alle sopra esposte considerazioni si ritiene che i fenomeni franosi suddetti costituiscano un significativo aggravio delle condizioni di alimentazione della dinamica di trasporto solido all'interno del torrente. Ciononostante, considerata la posizione degli stessi e l'area di possibile espansione di colate detritiche alimentate da fenomeni di sbarramento connessi a cedimenti di porzione di versante, si ritiene che anche nel caso peggiore del verificarsi di fenomeni di "dam break" o di "dam breach" l'area di massima espansione dei fenomeni di lava torrentizia pietrosa potranno interessare solo il settore apicale del conoide con spessori anche superiori a 2 – 3 m all'interno della sola fascia altimetrica individuata in precedenza. Anche in tale eventualità, è comunque possibile ipotizzare che le condizioni di pericolosità idraulica della zona in esame non subirebbero significative variazioni.

3.3 CENNI SUL FENOMENO DEL DEBRIS FLOW

Ad integrazioni delle considerazioni effettuate al precedente paragrafo, si riporta di seguito una breve analisi sul fenomeno del debris flow.

I debris flow o colate detritiche possono essere definiti come movimenti di massa di origine gravitativa con caratteristiche intermedie tra scivolamenti superficiali e processi di piena idraulica veri e propri, con caratteristiche meccaniche differenti da entrambi i processi citati.

Una colata detritica è costituita da una miscela di acqua e componente solida avente granulometria eterogenea che spazia dalle argille ai blocchi di diametro fino a un metro. La percentuale della frazione solida deve essere sufficientemente grande (> 10% per i flussi immaturi e del 30% per i flussi veri e propri) in modo da fornire a questo moto caratteristiche diverse da quello puramente idraulico, ma inferiore a un valore limite (= 70%) per disperdere la frazione solida su tutta l'altezza d'acqua in modo da preservare le caratteristiche fluide del moto (che gli consentono di muoversi anche su pendenze intorno ai 5°) e non ricadere negli scivolamenti superficiali. Il moto, caratterizzato da velocità di qualche metro al secondo, ha

una natura di tipo pulsante legata all'eterogeneità della miscela, ma nei modelli di calcolo, per ragioni di semplicità, viene solitamente simulato solo il comportamento medio (Chen, 1987).

Una volta innescato il volume coinvolto in questi flussi può risultare nettamente superiore (fino a 10 volte) a quello prevedibile per una piena ordinaria e la composizione della miscela, che può includere blocchi di elevate dimensioni, fa sì che il loro potere distruttivo sia molto elevato e difficile da prevenire attraverso le opere di premunizione approntate per le piene ordinarie. Risulta pertanto utile caratterizzare la dinamica dei flussi di detrito in modo da dimensionare correttamente le strutture e stabilire le zone soggette a tale rischio.

La descrizione quantitativa del fenomeno è in continua evoluzione ed è soggetta ad un notevole grado di incertezza, essenzialmente per due ragioni:

- i processi fisici coinvolti nel fenomeno sono assai complessi;
- è rarissima la possibilità di osservare su campo un evento reale.

Le colate di detrito si originano dalla mobilitazione di materiale sciolto (roccioso e suolo) su versanti ripidi o sul letto di un corso d'acqua dovuta essenzialmente alla presenza di acqua. Condizione preliminare per la gran parte delle colate di detrito descritte in letteratura è la presenza di un'abbondante quantità di materiale, accanto a pendenze dei versanti significative, condizioni di umidità elevate ed intermittenti e la scarsità o assenza completa di vegetazione.

La sorgente più comune di umidità è ovviamente rappresentata da precipitazioni intense e da repentini scioglimenti nivali. Precipitazioni sufficientemente intense saturano i depositi superficiali solitamente assai permeabili. Questo fenomeno accresce la pressione d'acqua nei pori e, parallelamente, la possibilità di collasso del versante o di parte di esso.

In Tabella 10 viene riportata una sintetica correlazione tra la pendenza di un alveo e il possibile comportamento delle colate dalla formazione alla deposizione.

Tabella 10 – Formazione e comportamento delle colate detritiche

PENDENZA DEL FONDO (%)	COMPORAMENTO DELLA COLATA
36 %	Formazione
27% - 36%	Formazione e movimento
18% - 27%	Rallentamento (movimento)
5% - 18%	Arresto o decelerazione del fronte
5%	Deposizione

La pendenza del torrente Federia (inferiore a 8%) e del torrente Saliente (circa 11%) non risultano sufficienti a dare luogo a colate detritiche comparabili a effetti di debris flow. Come

precedentemente detto, gli eventuali effetti di una colata detritica, con particolare riferimento al tratto terminale del t. Saliente, ove i due fenomeni franosi sopra descritti, non andrebbero a interessare la parte distale del conoide esaurendo il loro effetto per mancanza di pendenze motrici sufficientemente elevate. Le analisi idrauliche di seguito presentate sono pertanto state effettuate considerando il solo modello di trasporto al fondo al passaggio dell'onda di piena.

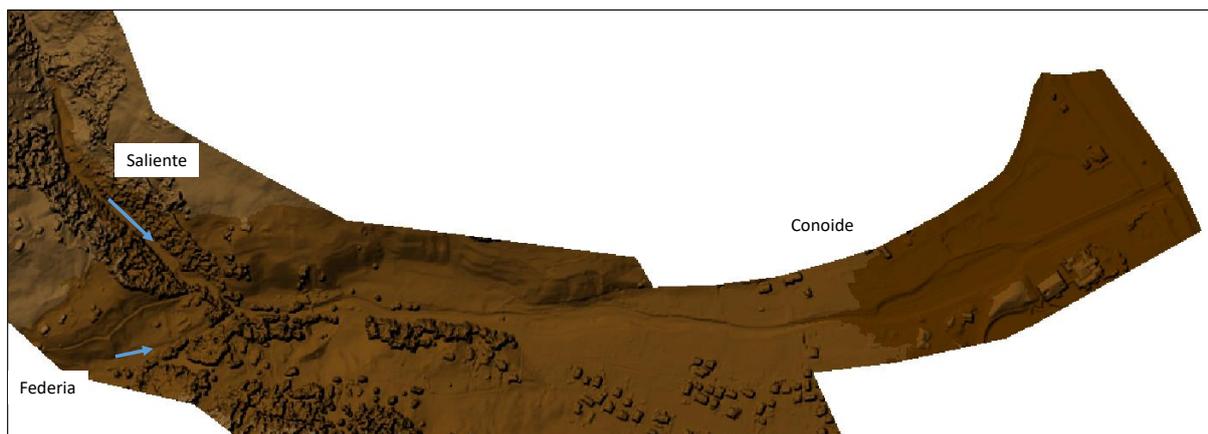
3.4 MODELLO IDRAULICO A FONDO MOBILE

3.4.1 Dati a base della modellazione

Sulla base dei dati topografici e delle informazioni idrologico-idrauliche disponibili per il tratto fluviale di indagine, si è proceduto all'implementazione di un modello di simulazione idraulica bidimensionale a fondo mobile del tratto terminale del torrente Federia che, opportunamente calibrato con le informazioni disponibili, ha permesso di analizzare, ad un'opportuna scala di riferimento, l'evoluzione delle dinamiche fluviali e di trasporto solido relative all'assetto attuale del corso d'acqua.

La base topografica utilizzata per la presente modellazione è il rilievo effettuato con drone che ha permesso la restituzione di un modello digitale del terreno (D.T.M.) con grado di dettaglio dell'ordine del metro.

Figura 13 – DTM restituito dal volo del drone alla base del modello idraulico



Nel corso degli anni 2020-2021 è stato realizzato ed ultimato un intervento di bonifica agraria nel settore basale del conoide che ha comportato la messa in posto di un terrapieno di riporto addossato ai muri di sostegno Sud e Ovest del piazzale di manovra del distributore di carburante, per un'estensione superficiale di circa 2'000 m², sopraelevando il piano campagna

originario di circa 1,2 – 1,8 m. Le simulazioni idrauliche di seguito esposte si propongono quindi di aggiornare le risultanze dello studio idraulico a supporto del PGT del comune di Livigno, ove veniva segnalato che il rilievo aerofotogrammetrico utilizzato per la redazione del suddetto studio non risultasse non aggiornato alla reale situazione di terreno in quanto precedente alla realizzazione del distributore di carburante esistente.

Figura 14 – Terrapieno distributore prima e dopo la bonifica



Per la caratterizzazione granulometrica dei sedimenti alla base delle simulazioni di trasporto solido sono state effettuate delle indagini in campo attraverso l'applicazione del metodo numerale. A differenza della classica procedura per pesata, che si applica generalmente a corsi d'acqua caratterizzati da letti sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi, tale metodo risulta più adatto nel caso invece si desideri pervenire alla curva granulometria di un letto con sedimenti grossolani quale quello di cui trattasi (torrente montano ad elevata pendenza), avente taglie granulometriche che vanno dalle sabbie a massi dell'ordine di 0.5-1.0 m.

3.4.2 Il modello bidimensionale a fondo mobile

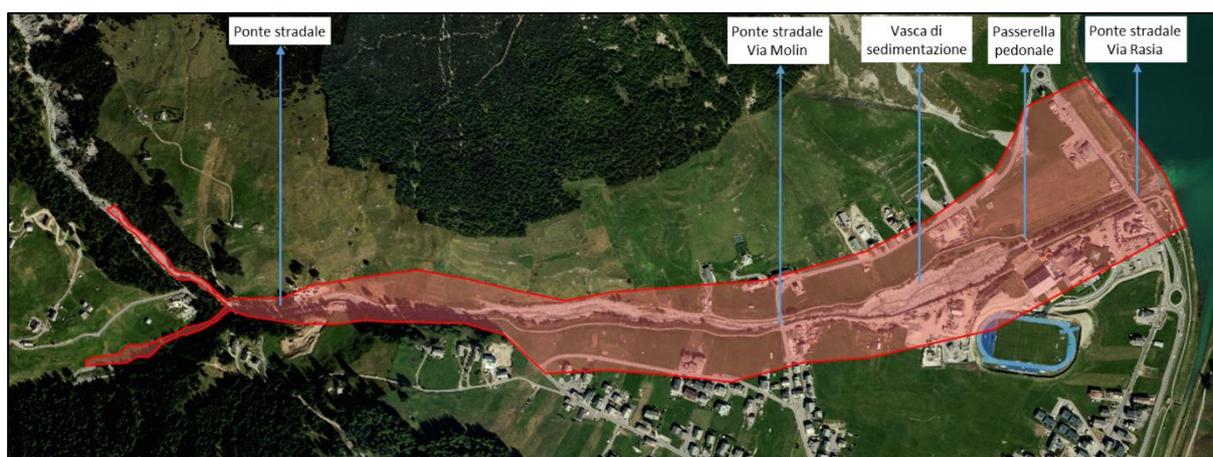
Il modello idraulico bidimensionale a fondo mobile è stato implementato nel tratto che va dalla confluenza tra il T. Federia e il T. Saliente, fino allo sbocco a lago.

Lungo il tratto oggetto di studio sono presenti 4 ponti:

- il ponte stradale a valle della confluenza con il torrente Saliente;
- il ponte stradale di via Molin, a monte della vasca di sedimentazione;
- la passerella pedonale immediatamente a valle della vasca di calma;
- il ponte stradale di via Rasia, poco a monte della sbocco nel lago.

Nella zona distale del conoide, oltrepassata Via Molin, e quindi il ponte stradale, il collettore è stato regolarizzato in seguito alla costruzione della vasca di deposito e del tratto finale impermeabilizzato (fondo in cls) che confluisce nel Lago di Livigno.

Figura 15 – Dominio di calcolo e principali manufatti



Il modello è stato implementato tramite il programma di calcolo InfoWorks ICM di Innovyze, di cui si riportano le specifiche tecniche in allegato. Il codice di calcolo permette di analizzare

il campo di moto a partire dal D.T.M. (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x, y).

Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

Il modello viene rappresentato attraverso una griglia di elementi triangolari. Le tre equazioni vengono risolte in ciascun nodo della maglia di calcolo; il metodo di calcolo delle suddette equazioni è sviluppato attraverso una procedura di risoluzione iterativa per la minimizzazione dello scarto della soluzione stessa. In questo modo il modello calcola la velocità in ogni nodo mediandola sul tirante idrico, ovvero senza tenere conto della variazione della velocità nella direzione z.

Le equazioni di base, impiegate per simulare il moto bidimensionale indotto dalla piena di riferimento nell'area in studio (T=100 anni), sono affette da alcune approssimazioni. Innanzitutto, le due equazioni del moto lungo le direzioni x e y si basano sull'ipotesi che la corrente sia lineare e che quindi la pressione abbia una distribuzione verticale idrostatica.

A livello geometrico la dimensione della maglia, se non sufficientemente piccola, può generare effetti di instabilità al momento in cui un elemento passa dalla condizione di completa immersione ad un parziale asciugamento. Il modello considera appartenente al campo di moto solo gli elementi in cui tutti i nodi presentano un tirante maggiore di zero.

Tuttavia, un eccessivo infittimento della dimensione delle celle, specialmente in zone in cui si prevede che il deflusso delle acque possa avere caratteristiche mediamente regolari e non particolarmente complesse, è tale da generare un appesantimento del calcolo con incremento della durata della simulazione stessa senza che vengano forniti ulteriori utili dettagli.

Un'altra importante approssimazione del modello di calcolo risiede nella formula adottata per la resistenza idraulica del fondo, che viene fatta dipendere dal quadrato del modulo della velocità e dal coefficiente di scabrezza di Manning supposto localmente noto. Se sulla prima dipendenza non ci sono particolari dubbi, dato il carattere turbolento della corrente, sulla dipendenza da un valore costante del coefficiente di Manning esistono non poche incertezze, specialmente per le profondità minori e in presenza di trasporto di materiale solido. In questo caso il problema risulta molto attenuato dalla presenza in alveo di tiranti idrici mediamente

elevati.

Il modello bidimensionale del torrente Federia è stato implementato per un'estensione longitudinale lungo l'asse pari a circa 1.6 km, dalla confluenza con il torrente Saliente fino allo sbocco nel lago di Livigno. La superficie del dominio di calcolo, comprendente l'intera larghezza dell'alveo di piena e le aree laterali prossime alle sponde, è pari a circa 35 ha, il numero delle celle di calcolo è pari a circa 73'000 e superficie media degli elementi di calcolo è pari a circa 5 m². La magliatura interna al dominio di modellazione bidimensionale è stata definita a partire dal DTM maglia 1x1 m raggruppando le informazioni del DTM in una mesh di calcolo di differente dimensione in funzione del grado di dettaglio desiderato. In particolare la dimensione media adottata per la magliatura è di:

- 1 – 2 m², per l'alveo inciso del Federia;
- 10 – 30 m², per le aree laterali dell'alveo.

In Figura 16 è riportata l'estensione del dominio di calcolo del modello bidimensionale, mentre in Figura 17 è riportato un dettaglio della magliatura del modello.

Figura 16 – Estensione del dominio di calcolo

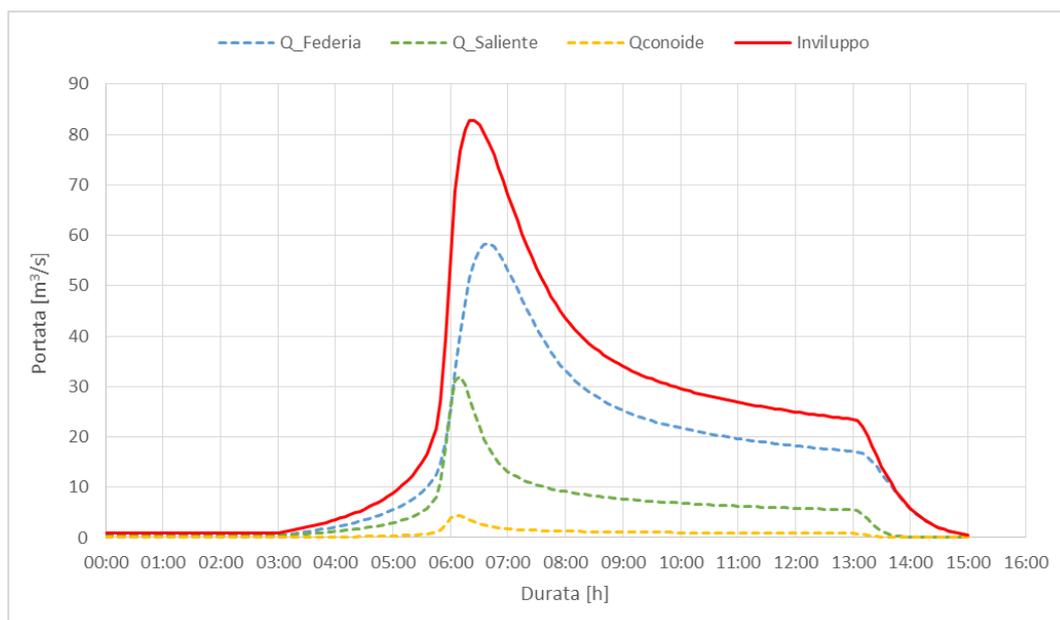


Figura 17 – Dettaglio della magliatura



La ricostruzione 2D del deflusso superficiale lungo le singole maglie di calcolo è effettuato in InfoWorks ICM utilizzando le equazioni del moto e di continuità su falda inclinata. Come valore del coefficiente di scabrezza è stato adottato il valore di Strickler $k_s = 20 \text{ mm}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Le simulazioni sono state condotte in moto vario, inserendo puntualmente gli idrogrammi di piena centennale relativi al bacino del Federia e del Saliente e in modo distribuito l'idrogramma generato nel bacino residuo del conoide.

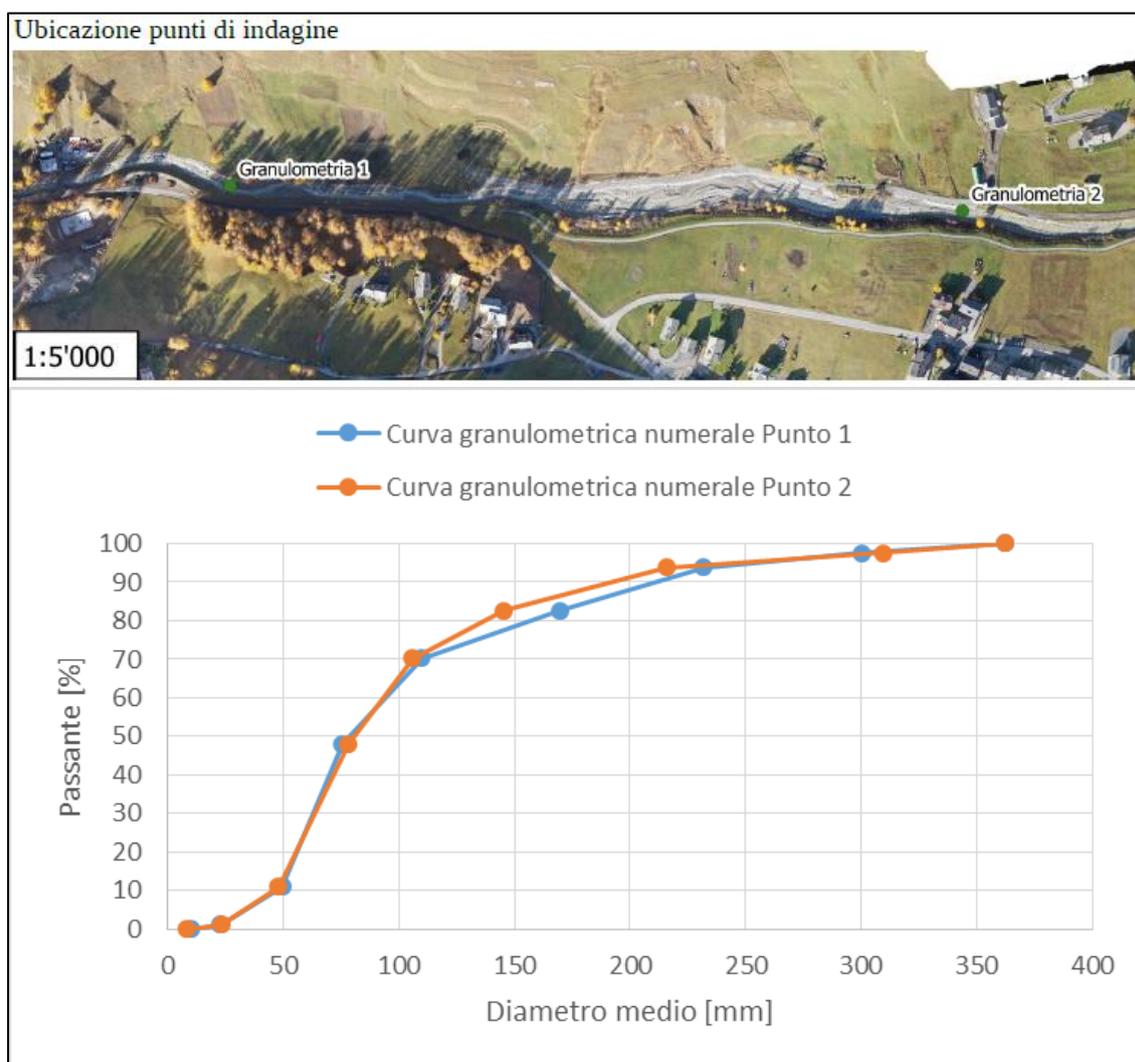
Figura 18 – Idrogrammi di piena centennale in ingresso al modello idraulico



Come condizione al contorno di valle, da porre in corrispondenza della sezione terminale del modello, è stata considerata la quota di massimo invaso del lago di Livigno, pari a 1801.00 m s.m..

Le simulazioni a fondo mobile sono state effettuate considerando solo il trasporto al fondo e non quello in sospensione, in quanto, per eventi di piena su alvei quali quello in oggetto, il trasporto in sospensione rappresenta una parte ridotta del trasporto totale e non influisce sull'assetto morfologico dell'alveo nel corso dell'evento. Dalle analisi granulometriche e sedimentologiche effettuate³, riportate in allegato, si è potuto verificare che il D50 risulta essere compreso tra 70 e 80 mm;

Figura 19 – Ubicazioni punti di indagine e corrispondenti curve granulometriche



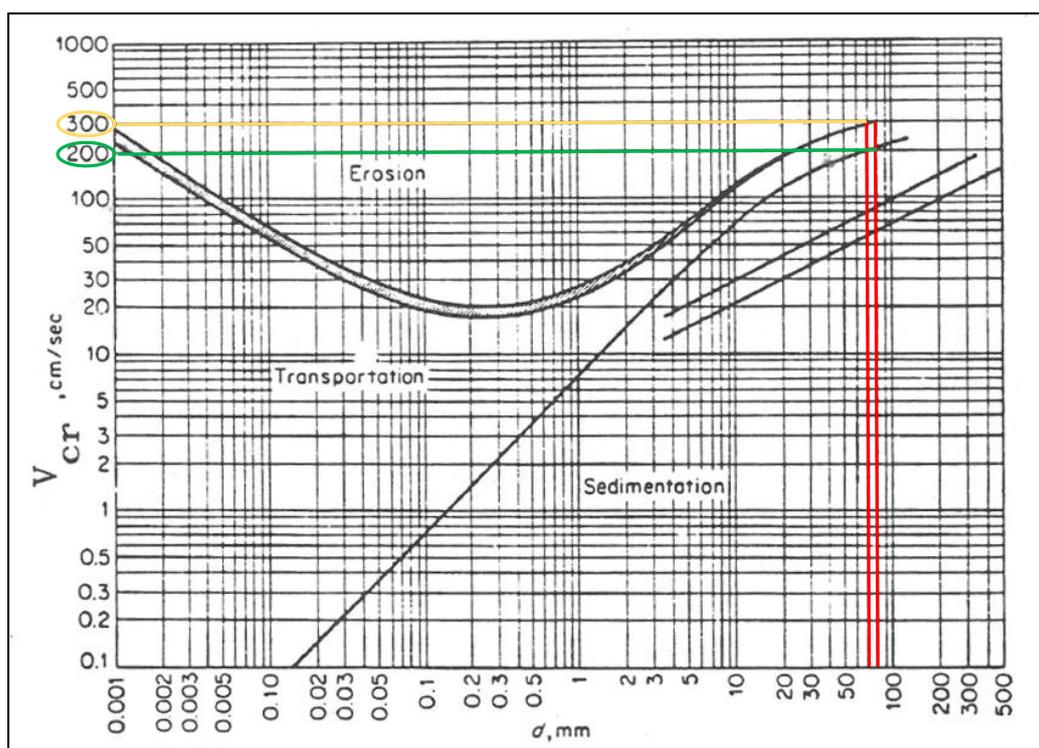
³ Analisi granulometrica numerale, definizione della componente geologica e stima della produzione potenziale di sedimento per erosione nel bacino effettuate a cura del dott. geol. Gaetano Conforto.

Per i calcoli di trasporto al fondo è stata utilizzata la legge di Meyer-Peter-Muller, considerando come parametro della curva di Shields il valore di 0,06.

Il modello è stato calibrato in modo tale da avere condizioni di trasporto solido al fondo quando la velocità della corrente è prossima o superiore a 2 m/s. Ciò deriva, oltre che da osservazioni in loco (quando la portata è ridotta non si osserva nessun movimento dei sedimenti in alveo), anche da dati di letteratura.

A tale proposito nella Figura 20 è riportato il grafico di Hjulstrom che fornisce, in funzione del diametro medio delle particelle, i valori della velocità media critica della corrente per i quali si ha erosione, trasporto o sedimentazione. Dall'analisi del grafico si osserva che per diametri delle particelle di riferimento, si ha che il trasporto comincia per velocità della corrente prossime a 2 m/s, mentre si ha erosione per velocità superiori a 3 m/s.

Figura 20 - Grafico di Hjulstrom

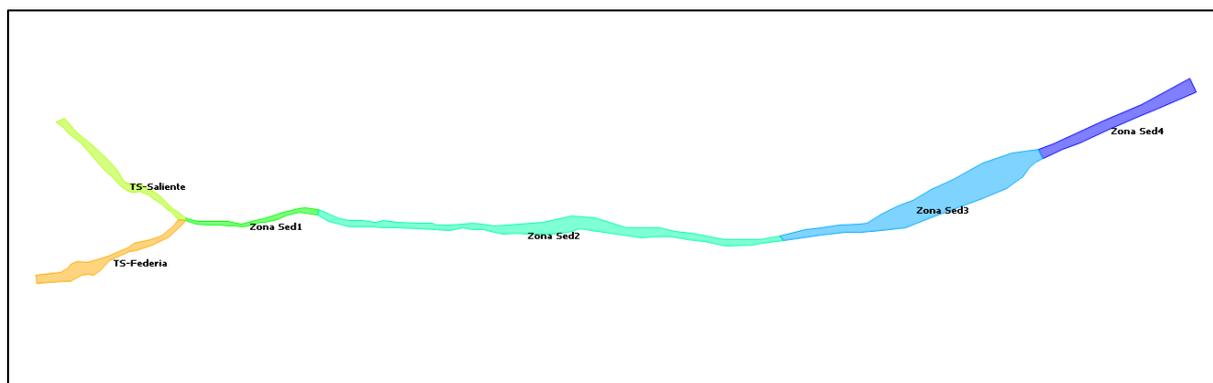


Nel modello sono state definite le zone con diverso spessore di sedimento mobilizzabile dalla corrente fluviale, costituito essenzialmente da alluvioni ghiaiose, e di conseguenza è stata definita la profondità dello strato inerodibile. In particolare sono state definite le seguenti zone:

- i tratti di asta a monte della confluenza (TS-Federia e TS-Saliente) sono stati utilizzati

- come bacino di accumulo del trasporto solido, con l'obiettivo di calcolare l'onda solida in ingresso al modello sulla base dell'effettiva capacità di trasporto dell'alveo;
- immediatamente a valle della confluenza (Zona Sed 1) lo spessore dello strato mobile è stato assunto pari a 0.1 m, in relazione all'elevata dimensione dei ciottoli costituenti il fondo;
 - nel tratto a valle fino alla zona di deposito (Zona Sed 2) l'alveo presenta una larghezza ridotta, è stato assunto uno spessore dello strato mobile pari a 0.5 m;
 - nella vasca di deposito (Zona Sed 3) lo spessore dello strato mobile è stata assunto pari a 0.5 m.
 - nel tratto a valle della zona di calma fino all'immissione nel lago (Zona Sed 4) il fondo alveo è corazzato, motivo per cui è stato assunto uno spessore di strato erodibile pari a 0.1 m.

Figura 21 – Zone a differente altezza di strato di sedimento mobile del modello idraulico

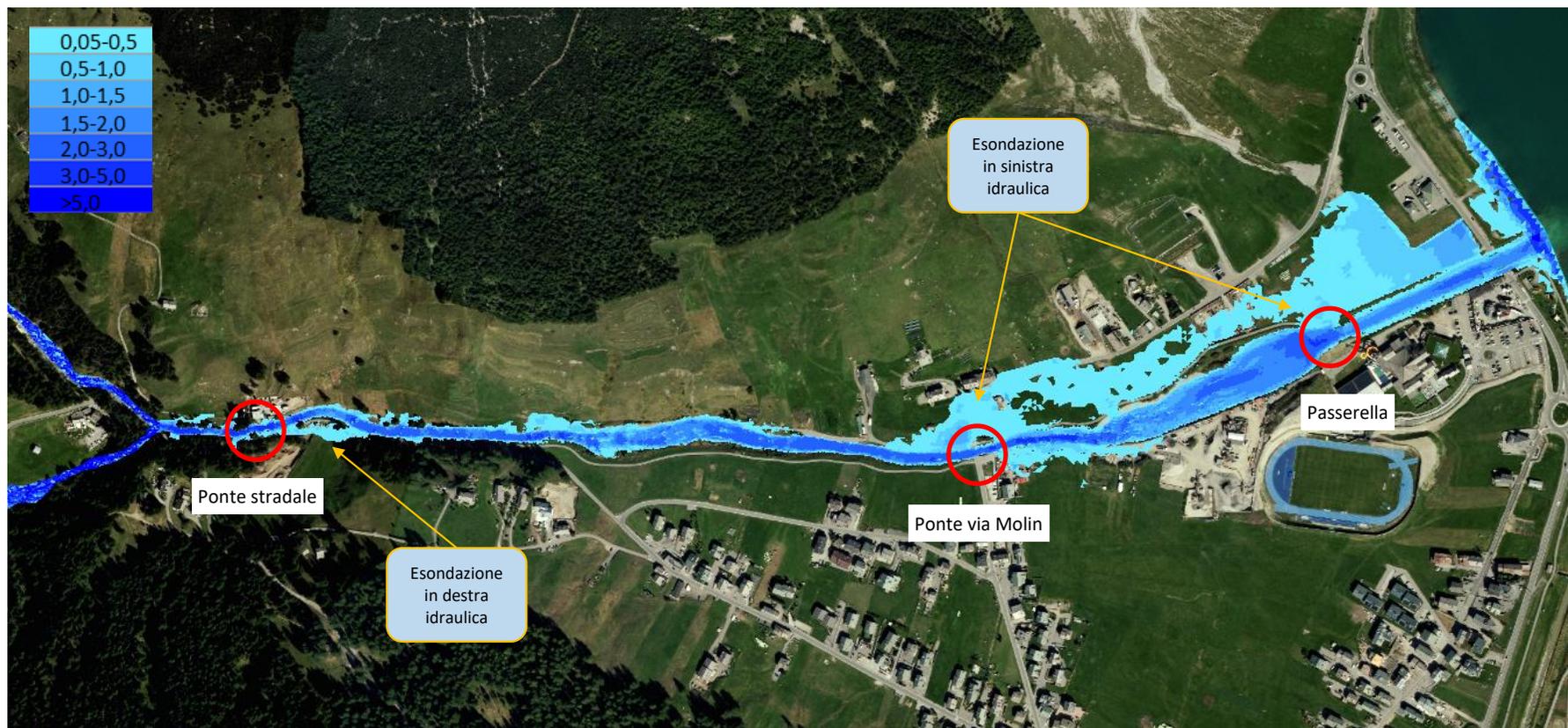


3.4.3 Analisi dei risultati

Si riportano di seguito i risultati della simulazione condotta con riferimento all'evento di piena centennale, caratterizzato da una portata al colmo a valle della confluenza con il t. Saliente pari a circa 83 m³/s.

In Figura 22 si la planimetria dei risultati in termini di inviluppo dei massimi tiranti di piena (espressi in m), con indicazione dei manufatti interferenti.

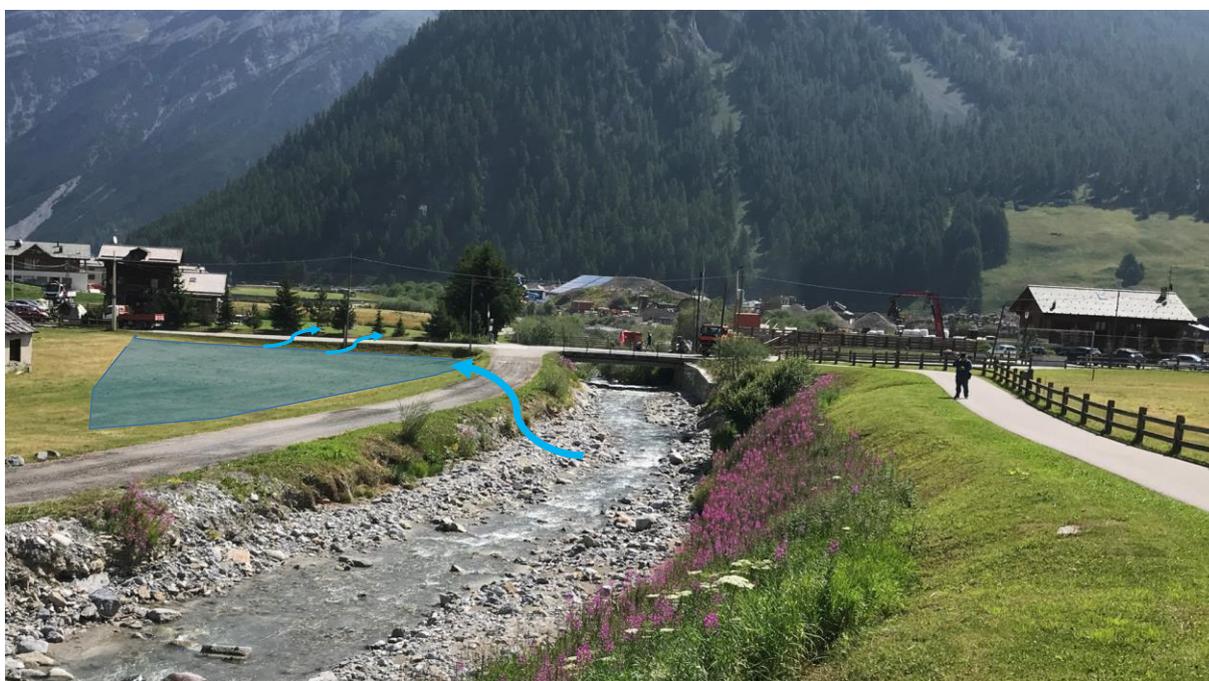
Figura 22 – Planimetria generale risultati modello 2D con riferimento all'evento di piena T=100 anni, inviluppo massimi tiranti idrici



Il ponte stradale situato a valle della confluenza con il t. Saliente, dove l'alveo per un tratto di circa 100 m presenta sezioni ristrette, risulta insufficiente al passaggio della piena, provocando esondazioni che si propagano principalmente in destra idraulica interessando il parcheggio comunale posto immediatamente a valle.

Dall'immagini si evidenzia che le esondazioni nell'area del conoide interessano in modo preponderante le aree poste in sinistra idraulica, interessando parzialmente la sede stradale di via Beltram. L'insufficienza generata dal ponte di via Molin provoca il sormonto dell'argine sinistro e la conseguente formazione di allagamenti nelle aree pianeggianti circostanti poste a valle, dove la propagazione della piena fa registrare tiranti generalmente inferiori a 1 m.

Figura 23 – Dinamica dell'esondazione zona ponte di via Molin



Con riferimento alla zona del conoide a valle del ponte di via Molin si riportano:

- in Figura 24 la planimetria con indicazione del massimo inviluppo dei tiranti idrici calcolati, espressi in m;
- in Figura 25 la planimetria con indicazione delle massime velocità della corrente, espresse in m/s;
- in Figura 26 la planimetria delle aree allegate con indicazione delle direzioni di flusso.

Figura 24 – Area Conoide, risultati modello 2D con riferimento all’evento di piena T=100 anni, involucro massimi tiranti idrici

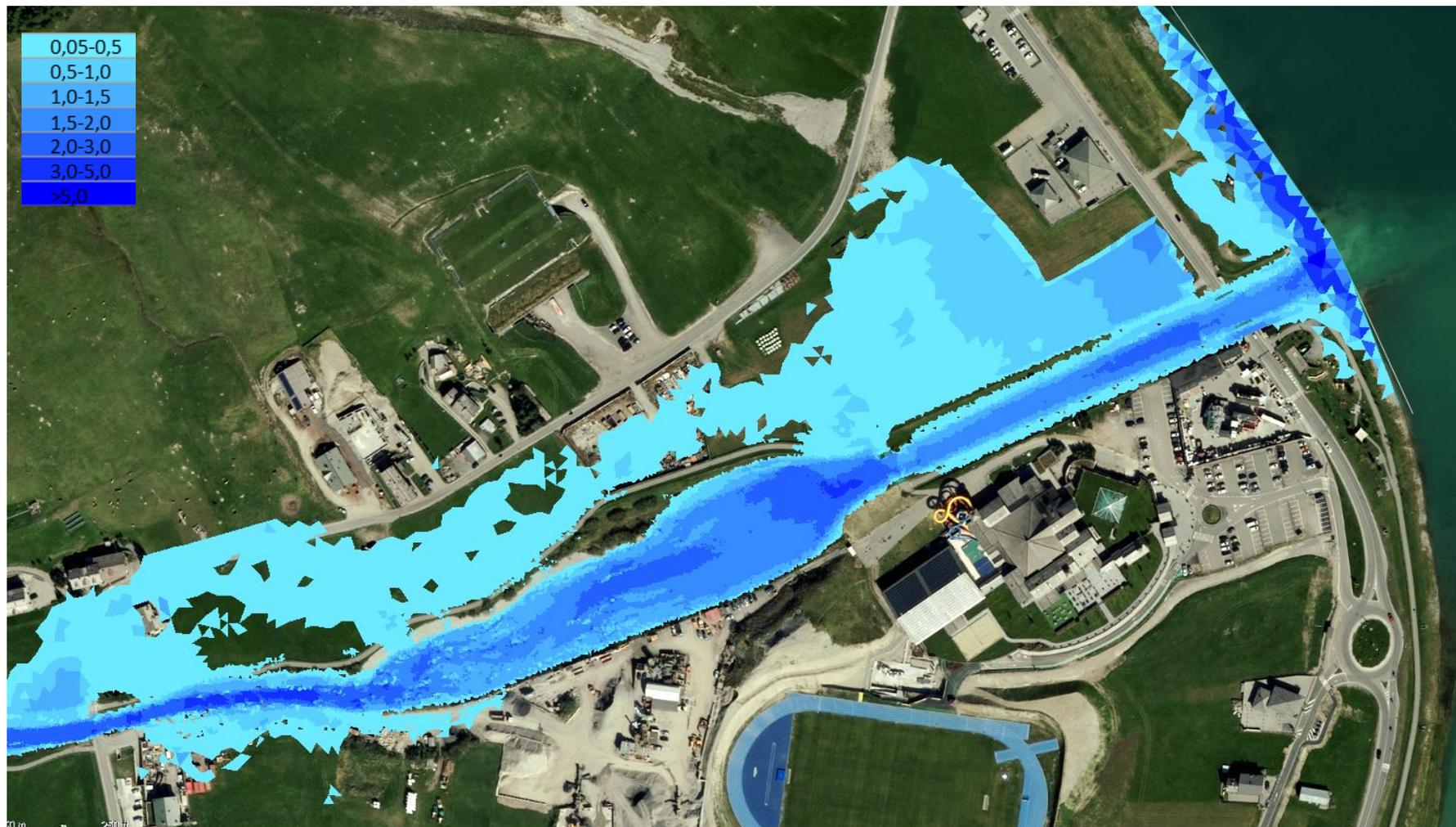


Figura 25 – Area Conoide, risultati modello 2D con riferimento all'evento di piena T=100 anni, velocità

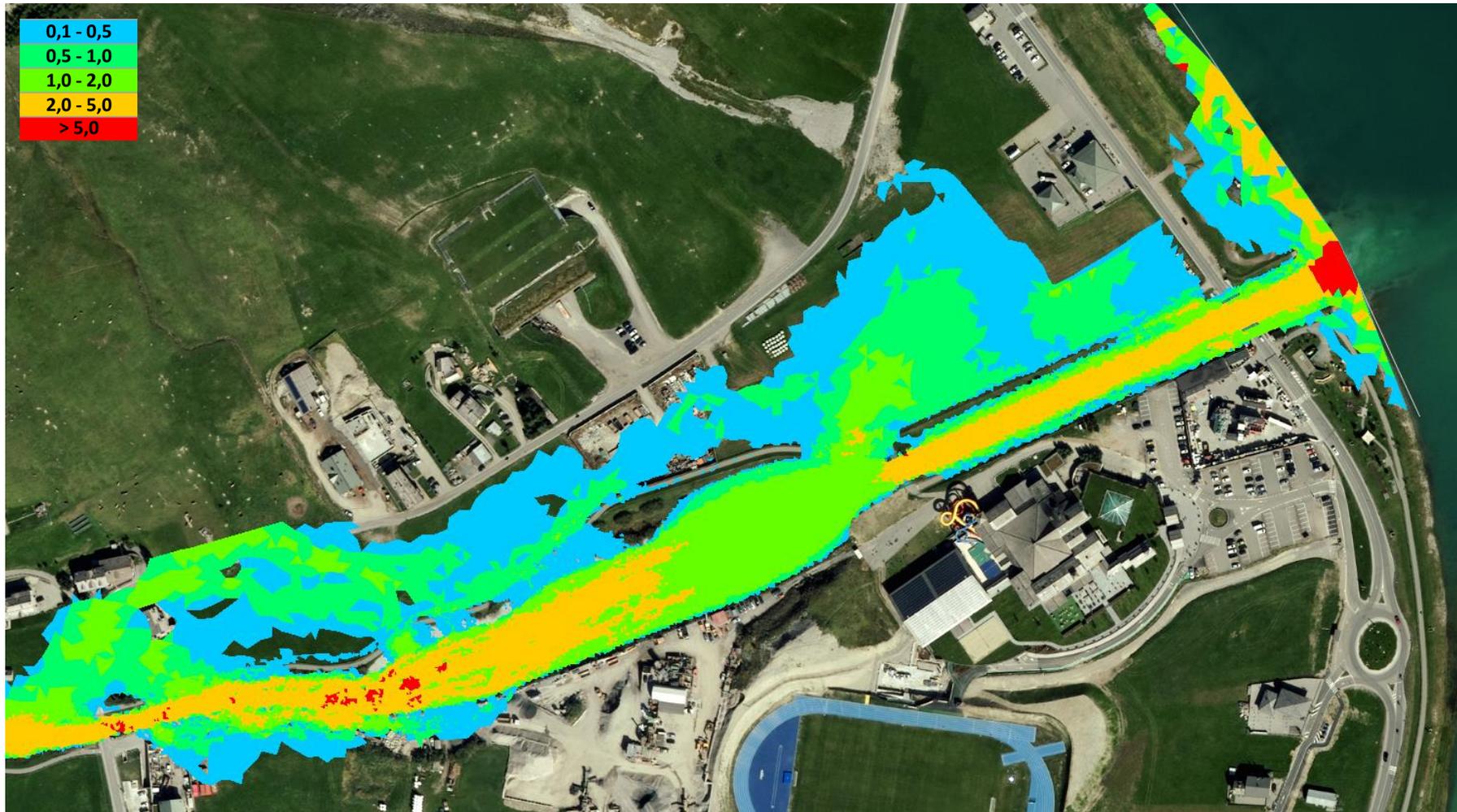
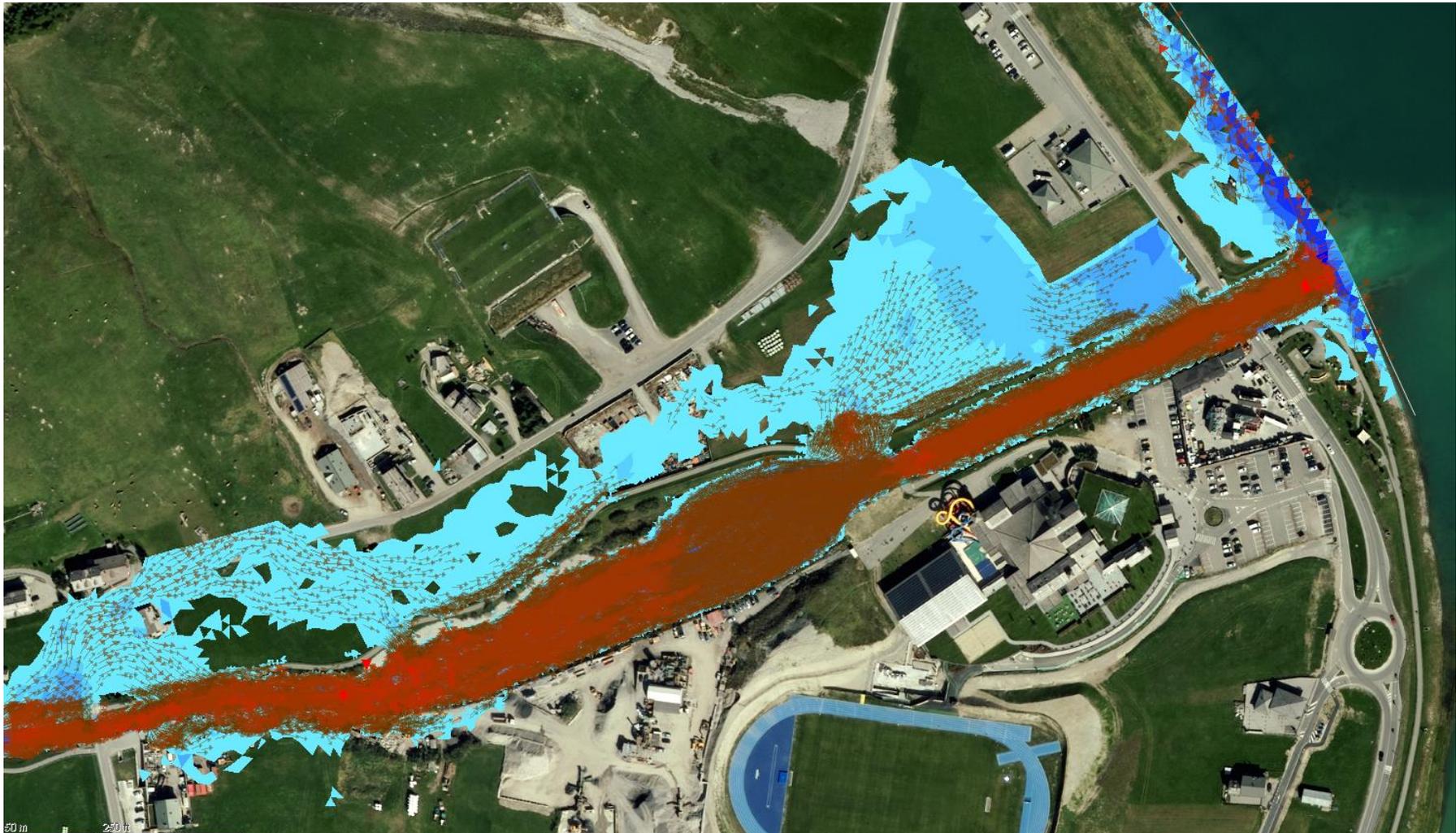


Figura 26 – Area Conoide, risultati modello 2D con riferimento all’evento di piena T=100 anni, direzioni di flusso



Si riportano di seguito i risultati in termini di massimi tiranti calcolati in corrispondenza di alcune sezioni significative, da cui si nota l'insufficienza delle sezioni L1 e L7 situate a monte del ponte di via Molin e della passerella pedonale.

Figura 27 – Planimetria con localizzazione delle sezioni di calcolo

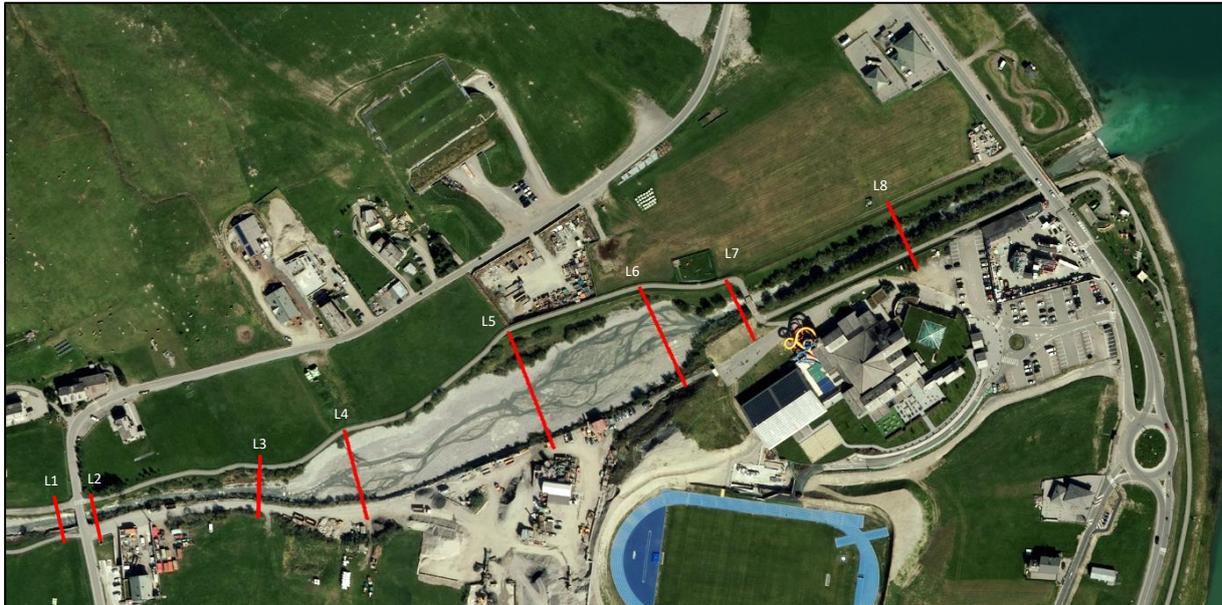


Figura 28 – Sezione L1, Ponte di via Molin, tirante massimo per evento $T_r=100$ anni

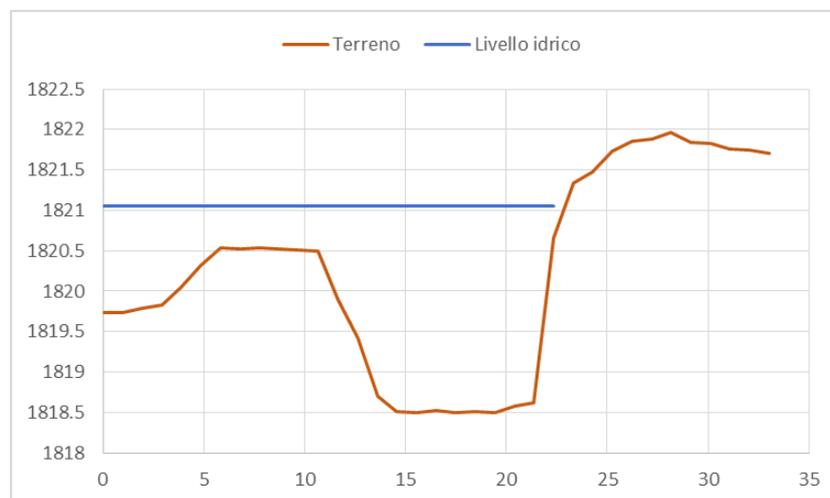


Figura 29 – Sezione L2, tirante massimo per evento Tr=100 anni

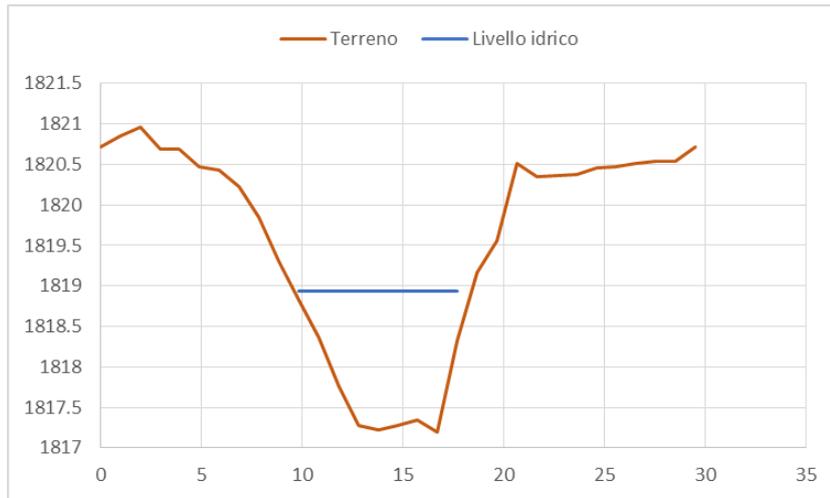


Figura 30 – Sezione L3, tirante massimo per evento Tr=100 anni

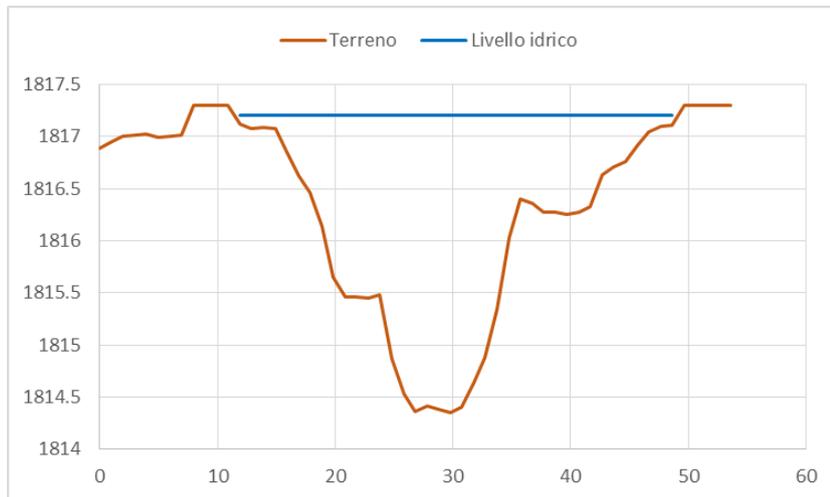


Figura 31 – Sezione L4, tirante massimo per evento Tr=100 anni

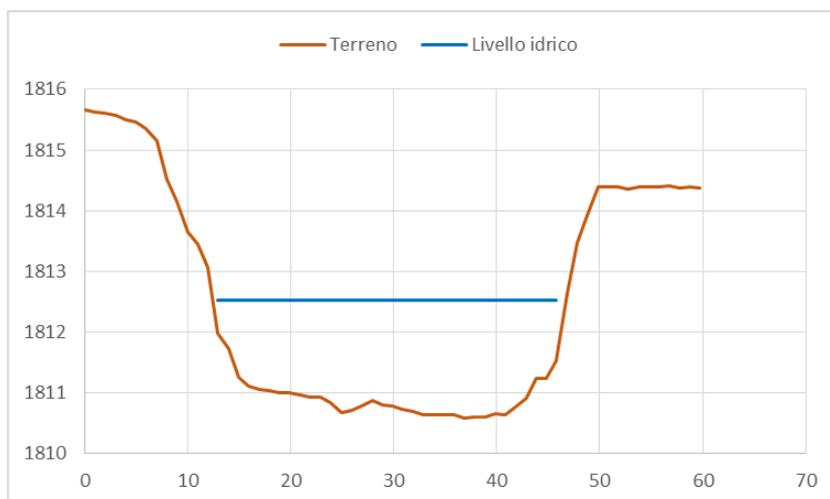


Figura 32 – Sezione L5, tirante massimo per evento Tr=100 anni

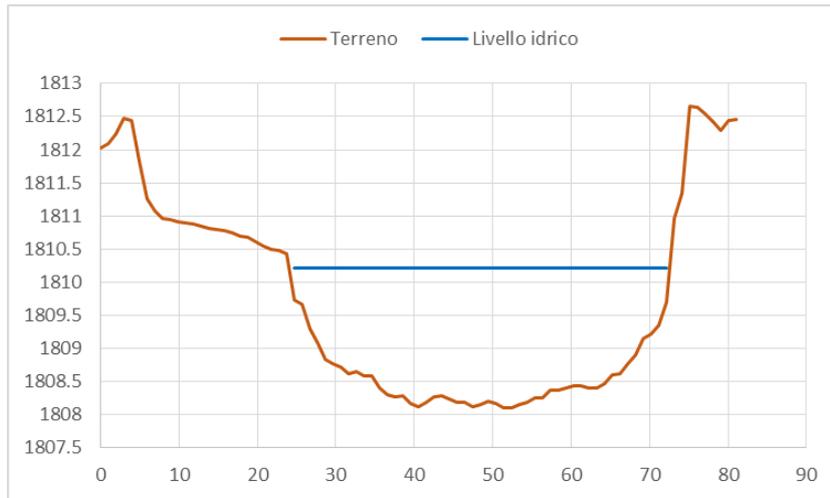


Figura 33 – Sezione L6, tirante massimo per evento Tr=100 anni

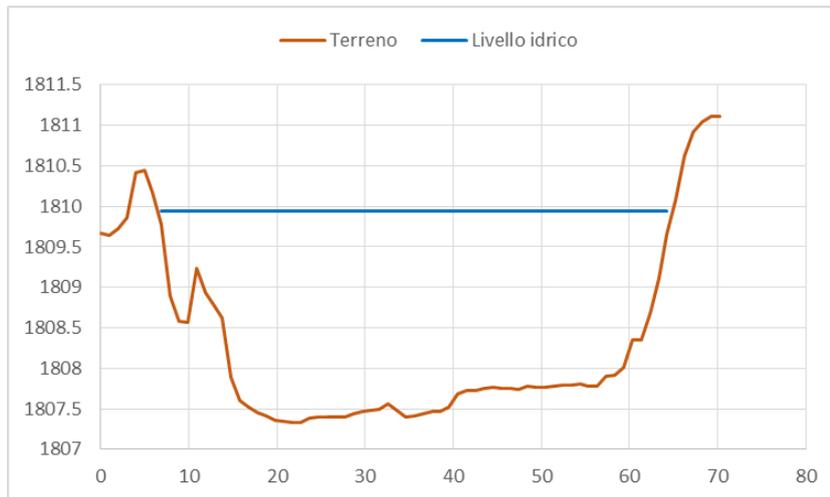


Figura 34 – Sezione L7, passerella pedonale, tirante massimo per evento Tr=100 anni

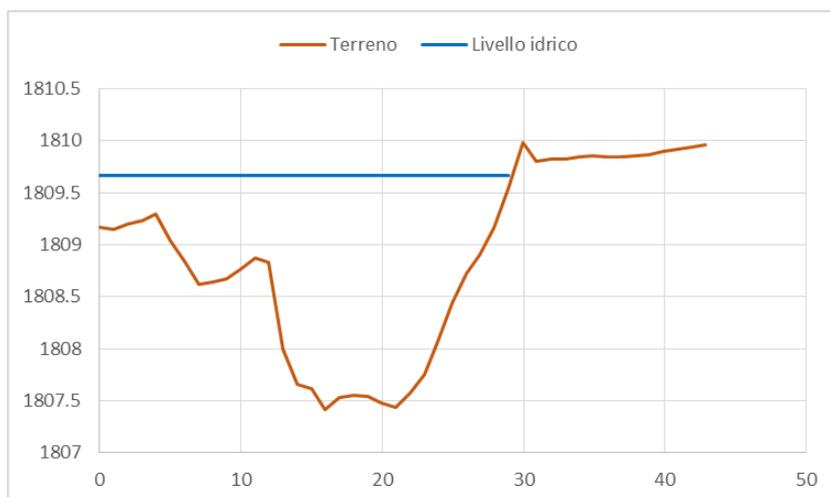
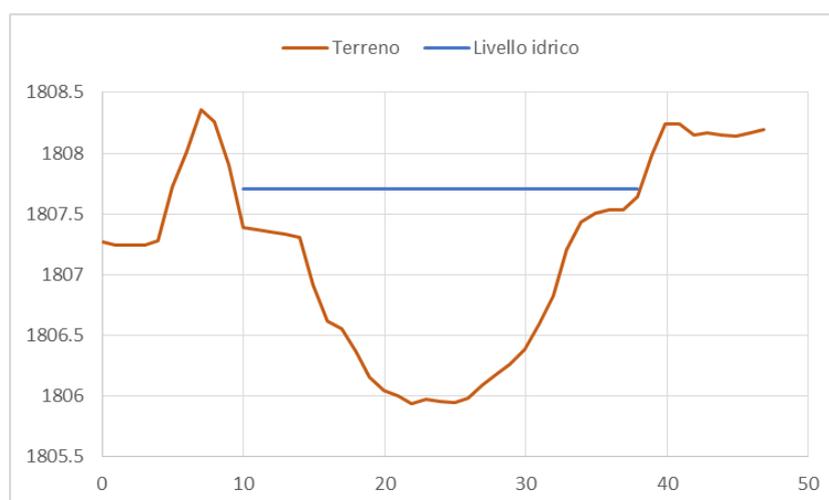


Figura 35 – Sezione L8, tirante massimo per evento Tr=100 anni



Per quanto concerne la compatibilità idraulica dei ponti lungo il tratto modellato risulta che:

- il ponte stradale a valle della confluenza, il ponte di via Molin e la passerella pedonale risultano insufficienti allo smaltimento della portata centennale;
- il ponte di via Rasia risulta compatibile al passaggio della portata centennale ma non adeguato in quanto presenta un franco idraulico inferiore a 1 m.

Tabella 11 – verifica di compatibilità idraulica degli attraversamenti

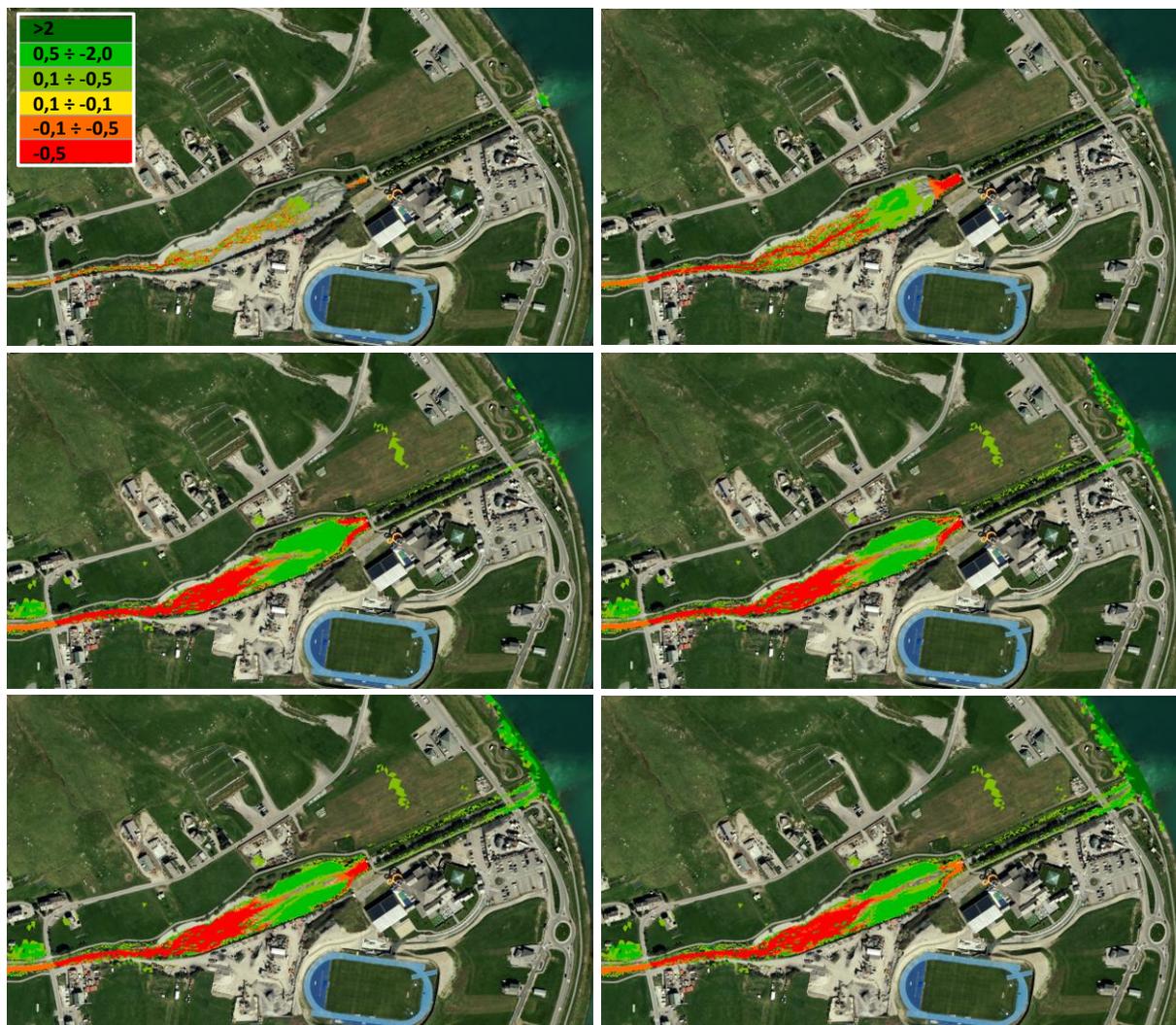
Ponte	Intradosso	Estradosso	Livello piena	Franco idraulico	Verifica di compatibilità	Verifica di adeguatezza
Stradale valle confl.	1855.20	1854.50	1855.00	> 0.00	Non compatibile	Non adeguato
via Molin	1820.00	1821.00	1820.80	> 0.00	Non compatibile	Non adeguato
passerella pedonale	1809.30	1809.80	1809.55	> 0.00	Non compatibile	Non adeguato
via Rasia	1807.40	1808.80	1806.85	0.55	Compatibile	Non adeguato

Per quanto concerne l'analisi dei fenomeni di trasporto solido i risultati della modellazione hanno permesso di valutare le dinamiche di erosione e deposito sulla base delle caratteristiche geomorfologiche locali all'interno dell'alveo, risultando coerenti con le osservazioni di campo. Come premesso, tale tipologia di modellazione consente di effettuare delle valutazioni di massima stante le approssimazioni e incertezze insite nell'implementazione del modello stesso e nei dati in ingresso.

Si riporta in Figura 36 la dinamica dei fenomeni di erosione e deposito nell'area della vasca di

trattenuta del sedimento, dove nei toni verdi sono indicate le altezze di materiale depositato, nei toni rossi le aree dove si verifica erosione del fondo.

Figura 36 – Dinamica dei fenomeni di erosione e deposito

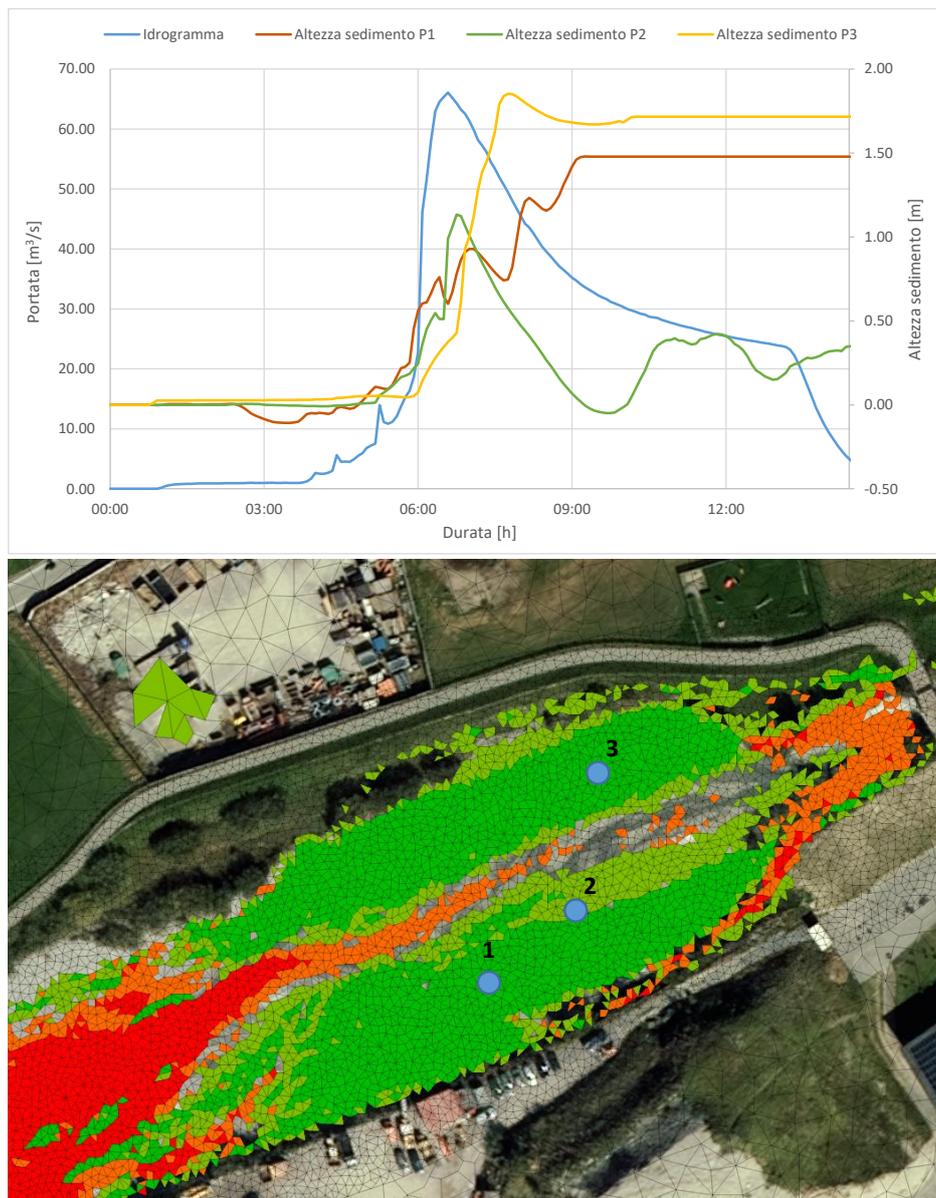


Al termine dell'evento il volume di sedimento accumulatosi all'interno della vasca risulta pari a circa 5'000 m³, a fronte di un volume movimentato nel corso di tutto l'evento di circa 22'000 m³ (massimo volume movimentabile dato dalla capacità di trasporto nel tratto modellato). Dalle immagini si nota che nella zona di ingresso della vasca di sedimentazione si verificano fenomeni di erosione a causa dell'elevata velocità della corrente (2÷5 m/s). Nella metà di valle della vasca, dove la velocità della corrente si riduce a seguito dell'allargamento delle sezioni, il materiale trasportato tende a depositarsi, raggiungendo altezze di sedimento nel corso della piena di circa 1÷2 m con conseguenti effetti sui tiranti idrici. Nel canale

cementato che collega la vasca allo sbocco a lago, le velocità della corrente tornano ad essere elevate impedendo la deposizione di sedimenti lungo tutto il tratto.

Dal grafico di Figura 37, dove si riporta sull'asse primario l'idrogramma liquido e sull'asse secondario la variazione del fondo in 3 differenti punti della vasca (P1, P2 e P3, individuati in figura), si nota la differente tempistica tra l'evoluzione dei fenomeni di accumulo di materiale e il picco dell'onda di piena liquida.

Figura 37 – Idrogramma liquido ed evoluzione dei fenomeni di deposito

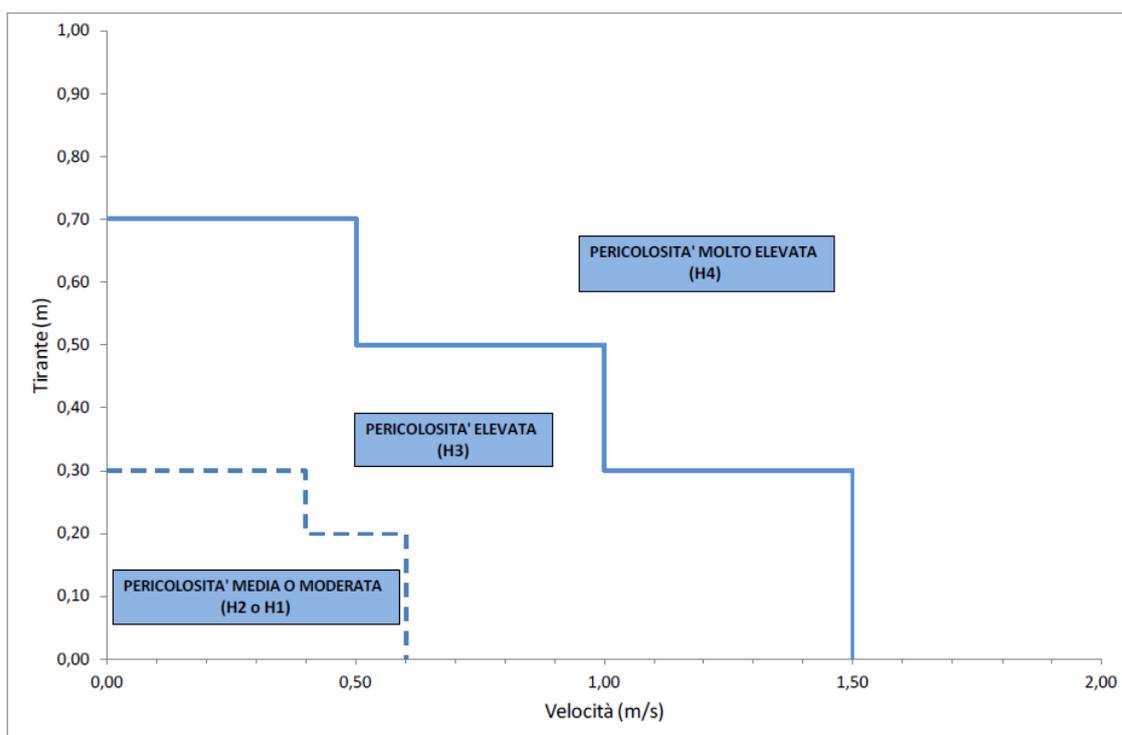


Al termine dell'evento, in corrispondenza dei punti P1 e P3, situati in aree di deposito laterali, l'altezza di sedimento depositato risulta superiore a 1 m.

4. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA E OPERE DI MITIGAZIONE NECESSARIE

A seguito dei risultati della modellazione descritta nel presente studio, sono state ridefinite parzialmente le zone di pericolosità idraulica per l'evento con tempo di ritorno centennale, in relazione alle altezze idriche degli allagamenti e alle velocità della corrente, , conformemente alle indicazioni normative del d.g.r. IX/2616/2011 “*Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio*”. In particolare l'Allegato 4 “*Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio di esondazione*” fornisce le indicazioni per gli studi finalizzati alla valutazione e alla zonazione della pericolosità e del rischio di esondazione. Al punto 3.4 vengono descritte le modalità di zonazione della pericolosità. All'interno delle aree esondabili individuate devono essere delimitate zone a diverso livello di pericolosità idraulica, sulla base, in particolare, dei tiranti idrici e delle velocità di scorrimento. Per la classificazione dei diversi livelli di pericolosità idraulica si fa riferimento al grafico seguente.

Figura 38 – Zonizzazione della pericolosità – d.g.r. IX/2616/2011, Allegato 4, comma 3.4



In funzione dei risultati della modellazione (Figura 39), da cui è possibile estrarre per ciascuna cella di calcolo i valori massimi di tirante e velocità, è stata redatta la mappa della

pericolosità idraulica dell'area distale del conoide, riporta in Figura 40.

Figura 39 – Planimetria massimi tiranti e velocità

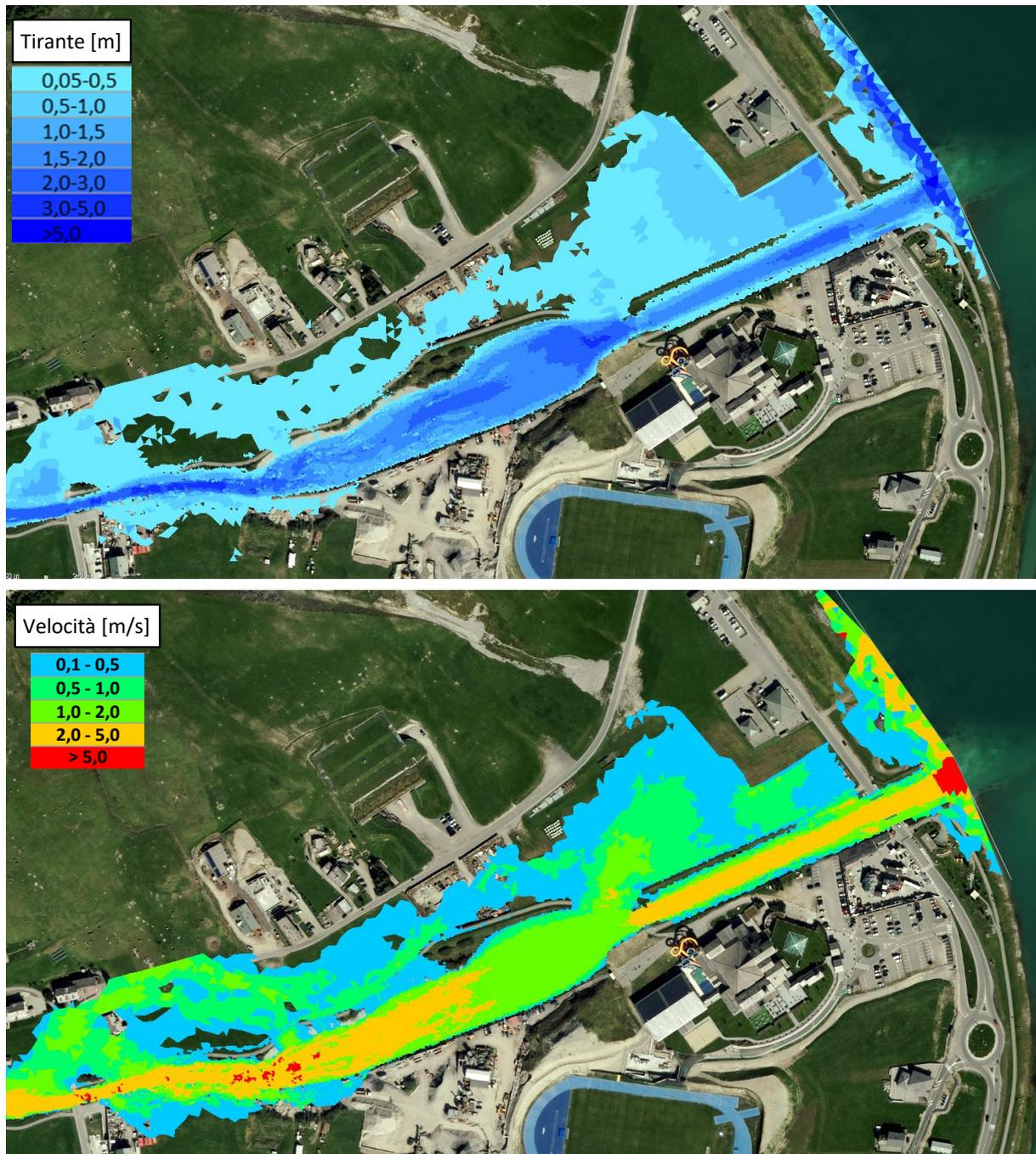
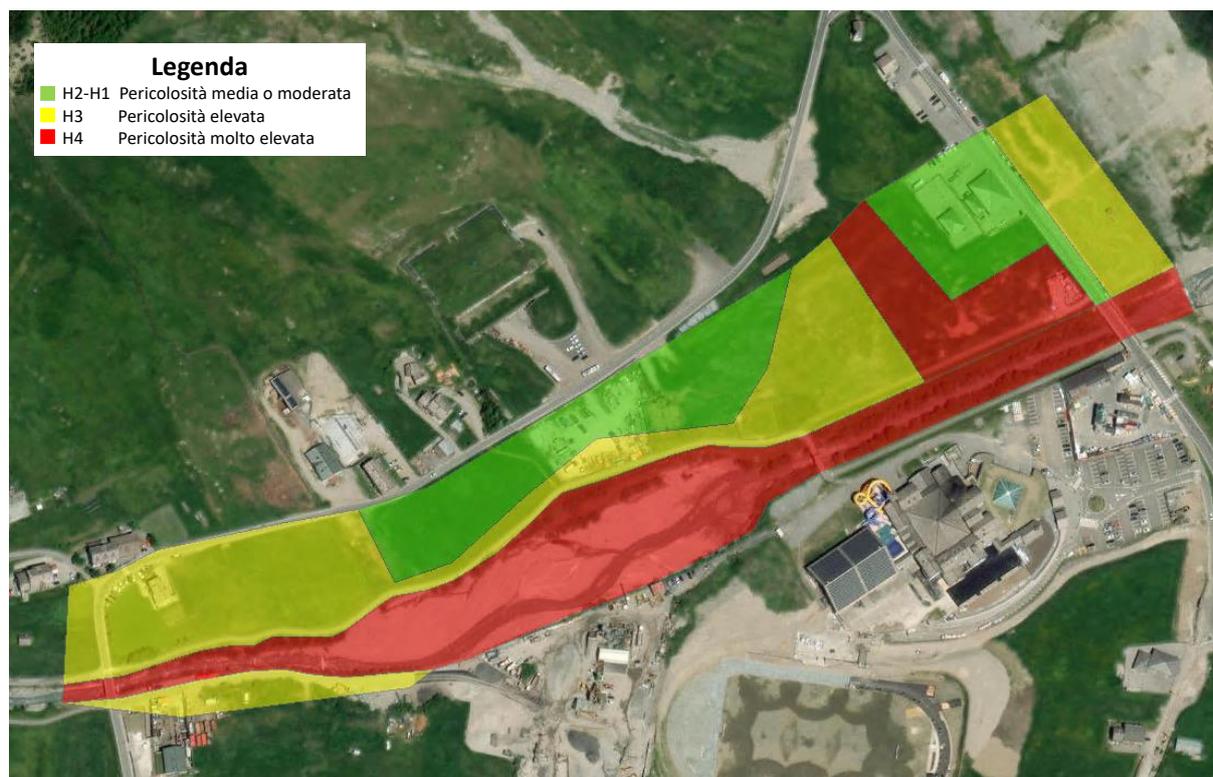
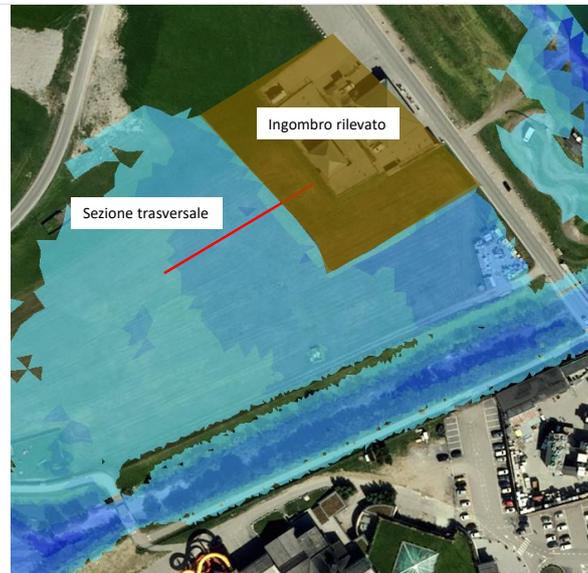
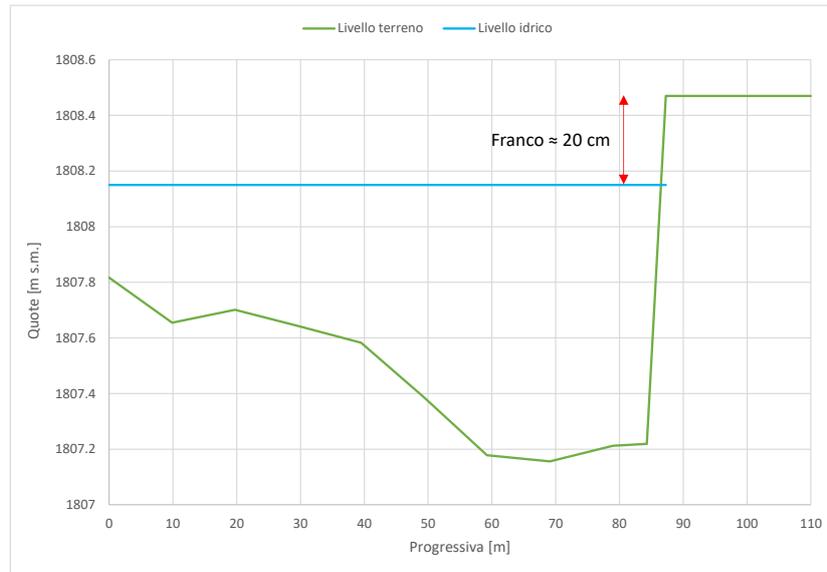


Figura 40 – Mappa della pericolosità idraulica



La modellazione ha evidenziato che nelle aree di esondazione in sinistra idraulica le velocità hanno valori tutto sommato contenuti (generalmente minori di 1.0-1.5 m/s), soprattutto nella parte inferiore del conoide. In tale zona pertanto la pericolosità è sostanzialmente governata dai tiranti idrici, con valori maggiori di 1 m in corrispondenza della zona antistante il rilevato dell'autolavaggio classificata quindi come zona a pericolosità molto elevata (H4). L'area del rilevato, pur non risultando soggetta a fenomeni di allagamento a seguito della modellazione svolta, è stata classificata con un livello di pericolosità media – moderata (H2-H1) in relazione alla mancanza di un adeguato franco idraulico della quota di sommità del rilevato rispetto alla massima altezza di allagamento. Come visibile dalla sezione di Figura 41 nell'area antistante il rilevato il franco residuo è pari a circa 20 cm, ossia paragonabile all'ordine di incertezza dei tiranti idrici della modellazione.

Figura 41 – Sezione trasversale di allagamento zona rilevato

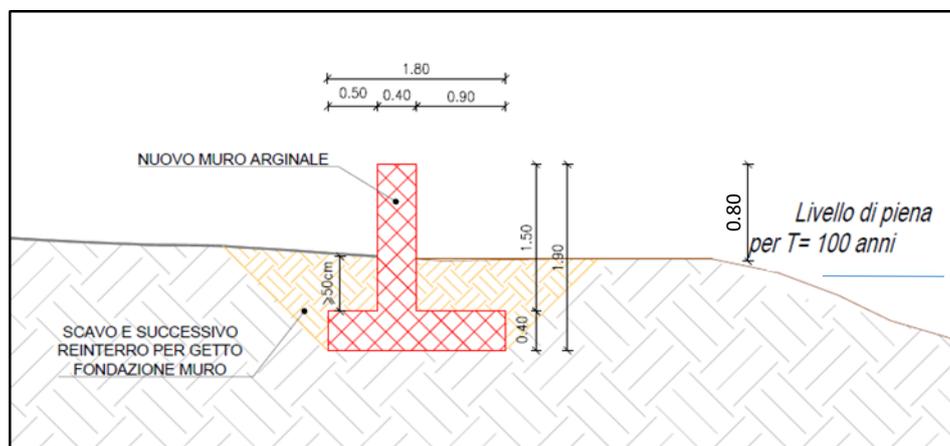


Si suggerisce pertanto l'adozione di opere di difesa idraulica quale la formazione di un cordolo di recinzione di altezza adeguata lungo tutto il perimetro dell'area rilevata in oggetto. La posizione e la tipologia del muro sono riportate nelle figure seguenti.

Figura 42 – Posizione indicativa muro arginale



Figura 43 – Tipologico muro arginale



Milano, aprile 2022

IL PROFESSIONISTA INCARICATO

Dott. Ing. Stefano Croci

Ha collaborato

Dott. Ing. Matteo Peduzzi

Allegato 1

Analisi granulometriche

Per la classificazione dei sedimenti si può far riferimento alla progressione proposta dall' American Geophysical Union e riportata in tabella nella tabella vengono evidenziate con maggiore dettaglio le classi diametriche che interessano i corsi d'acqua. La classificazione per diametri segue la scala di Wentworth che si basa su una progressione esponenziale dei diametri: la base è 2 e l'esponente è l'indice $-\phi$ (sarà quindi: $D = 2^{-\phi}$, con il diametro D espresso in mm; od anche $-\phi = \log_2 D$). Generalmente ogni classe è costituita da incrementi dell'indice $-\phi$ pari a 0.5 o, se si desidera una descrizione più minuziosa del campione, di 0.25. In questo modo con valori di $-\phi$ compresi fra 12 e -12 si descrive l'intera granulometria (tabella I). La transizione tra valori positivi e negativi di $-\phi$ avviene in corrispondenza dei diametri delle sabbie. La tabella è stata predisposta una suddivisione in classi che tiene conto della impossibilità del metodo di rilievo in campo di poter distinguere con precisione le granulometrie più fini (in genere si arriva a distinguere in modo accettabile le sabbie molto grosse dalle sabbie grosse e, con un poco di attenzione, le grosse dalle medio fini). Nella stessa tabella si è invece privilegiata la distinzione in classi per le granulometrie più grossolane, utilizzando incrementi di 0.5 dell'indice ϕ .

Tipo di sedimento	Indice: $-\phi$ $2^{-\phi}$	Classe diametrica D (mm)
Massi molto grossi	$2^{12} - 2^{11.5}$	4096 – 2896
Massi molto grossi	$2^{11.5} - 2^{11}$	2896 – 2048
Massi grossi	$2^{11} - 2^{10.5}$	2048 – 1448
Massi grossi	$2^{10.5} - 2^{10}$	1448 - 1024
Massi medi	$2^{10} - 2^{9.5}$	1024 – 724
Massi medi	$2^{9.5} - 2^9$	724 – 512
Massi piccoli	$2^9 - 2^{8.5}$	512 – 362
Massi piccoli	$2^{8.5} - 2^8$	362 – 256
Ciottoli grossi	$2^8 - 2^{7.5}$	256 – 181
Ciottoli grossi	$2^{7.5} - 2^7$	181 – 128
Ciottoli piccoli	$2^7 - 2^{6.5}$	128 – 90
Ciottoli piccoli	$2^{6.5} - 2^6$	90 – 64
Ghiaia molto grossa	$2^6 - 2^5$	64 – 32
Ghiaia grossa	$2^5 - 2^4$	32- 16
Ghiaia media	$2^4 - 2^3$	16 – 8
Ghiaia fine	$2^3 - 2^2$	8 – 4
Ghiaia molto fine	$2^2 - 2^1$	4 – 2
Sabbia molto grossa	$2^1 - 2^{0.5}$	2 - 1.4
Sabbia grossa	$2^{0.5} - 2^{-1}$	1.4 - 0.5
Sabbia da media a molto fine	$2^{-1} - 2^{-4}$	0.5 - 0.06
Limo	$2^{-4} - 2^{-8}$	0.06 - 0.004
Argilla	$2^{-8} - 2^{-12}$	0.004 - 0.002

Il metodo universalmente adottato per la stima analitica della granulometria, prevede il prelievo nell'alveo di una quantità di materiale sufficientemente rappresentativa della gamma granulometrica costituente il letto. Questo campione è quindi sottoposto ad un'analisi che consiste nel vagliare i sedimenti con dei setacci a maglie quadrate aventi dimensioni standard. La curva che sintetizza queste misure è appunto chiamata granulometrica ed esprime l'andamento delle percentuali in peso del campione che sono passate attraverso le maglie dei rispettivi vagli.

Metodo numerale

La procedura per pesata si applica senza difficoltà ai corsi d'acqua caratterizzati da letti sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi, giacché è sufficiente sottoporre ad un laboratorio geotecnico un campione prelevato in alveo di volume abbastanza modesto e dell'ordine, al più, di qualche decimetro cubo.

Nel caso invece si desideri pervenire alla curva granulometria di un letto con sedimenti grossolani (torrenti montani ad elevata pendenza), aventi taglie granulometriche che vanno dalle sabbie a massi dell'ordine di 0.5-1.0 m ed oltre, la metodologia anzidetta non è praticabile per tre ordini di motivi: per avere un campione sufficientemente rappresentativo occorrerebbe asportare dall'alveo e vagliare un volume di sedimenti dell'ordine di qualche metro cubo; la vagliatura di granulometrie così grossolane risulterebbe evidentemente onerosa, oltreché evidentemente di non semplice esecuzione (accesso non agevole al luogo e difficoltà all'utilizzo di vagli di grosse dimensioni); infine, nell'asportazione di una così ingente quantità di materiale, si rischierebbe di non riuscire a differenziare la granulometria del materiale superficiale da quella del sottostrato.

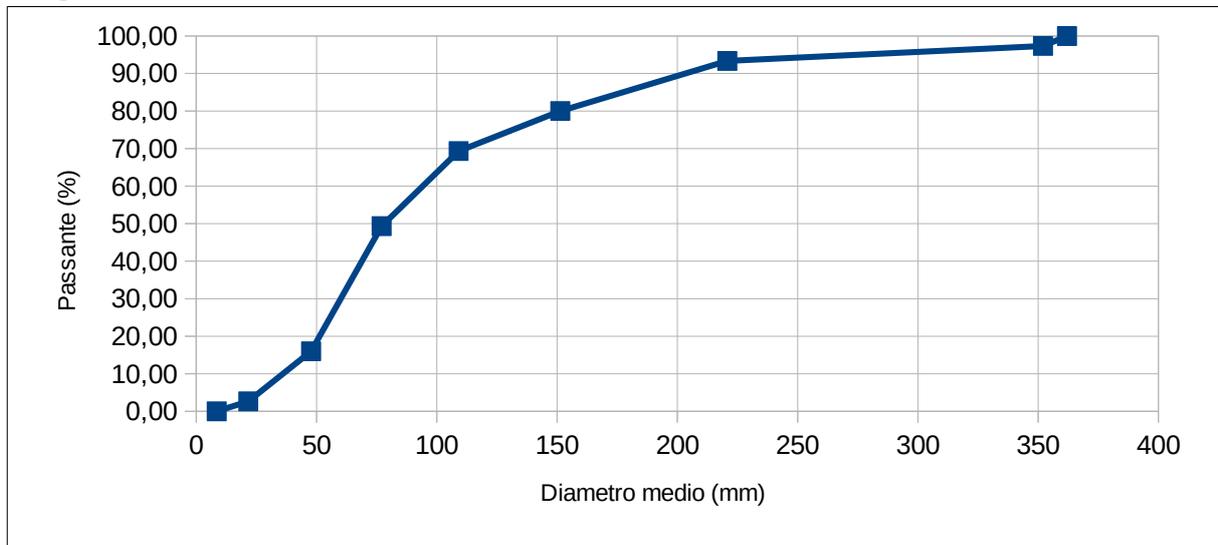
Si sono campionati esattamente 81 diametri, tracciando sul letto una griglia rettangolare costituita da 27 nodi in senso longitudinale ed 3 in senso trasversale alla corrente; per la griglia si sono prescelte maglie quadrate della dimensione di 0.3 m. In tabella vengono riportati (in cm) i valori dei diametri misurati in corrispondenza agli incroci delle maglie.

Granulometria 1			Granulometria 2		
7	13	8	8	2	2
5	4	15	2	2	7
6	8	4	12	6	2
7	3	4	8	4	3
5	5	8	10	4	4
7	14	9	8	2	6
5	6	5	6	1	2
9	8	3	22	1	16
6	6	14	3	6	2
4	20	25	6	1	25
4	10	6	2	8	11
9	6	4	1	1	10
2	28	8	25	8	30
3	6	4	4	10	22
1	12	5	18	1	1
2	2	15	2	2	18
3	4	1	7	16	10
10	3	35	7	1	4
10	8	2	3	7	22
8	4	7	6	1	4
17	16	2	12	3	7
5	6	22	8	3	4
4	7	13	4	4	6
11	13	8	8	4	2
7	13	8	12	6	5
11	10	7	7	5	4
6	8	4	6	12	6

Granulometria numerale 1

Classe diametrica D (mm)		Diametro medio della classe (mm)	Numero ciottoli trattenuto	Numero ciottoli trattenuto cumulado	Numero ciottoli passanti cumulado	Passante %
512	362	362,0	0	0	81	100,00
362	256	300,0	2	2	79	97,53
256	181	232,0	3	5	76	93,83
181	128	170,0	9	14	67	82,72
128	90	110,0	10	24	57	70,37
90	64	75,4	18	42	39	48,15
64	32	49,6	30	72	9	11,11
32	16	22,9	8	80	1	1,23
16	8	10,0	1	81	0	0,00

Curva granulometrica numerale



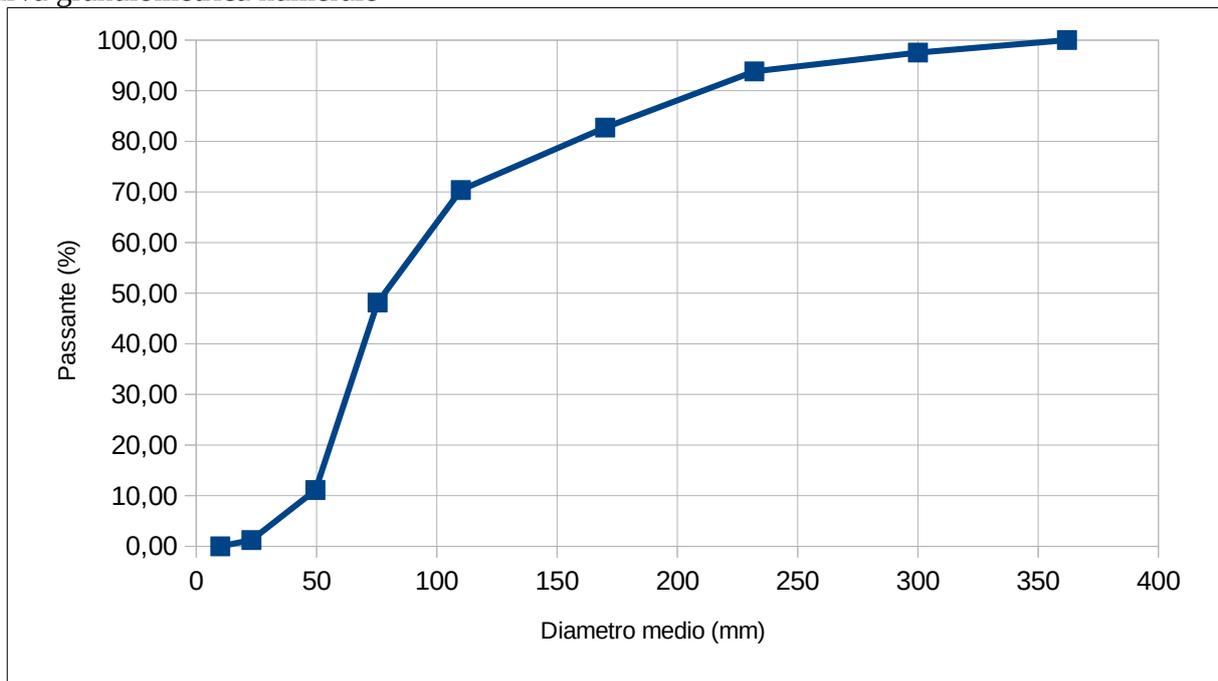
Calcolo del Dm (diametro medio)

Diametro medio della classe (D _i)	Frequenza relativa % (f _i)	D _i *f _i (mm)
362,0	0,0	0,0
350,0	1,2	432,1
223,3	4,9	1102,9
143,0	12,3	1765,4
101,0	12,3	1246,9
77,1	17,3	1333,3
51,3	37,0	1901,2
25,0	12,3	308,6
10,0	2,5	24,7
	100	8115,2
Dm =8115,2/100		81

Granulometria numerale 2

Classe diametrica D (mm)	Diametro medio della classe (mm)	Numero ciottoli trattenuto	Numero ciottoli trattenuto cumulado	Numero ciottoli passanti cumulado	Passante %
512	362	0	0	81	100,00
362	256	2	2	79	97,53
256	181	3	5	76	93,83
181	128	9	14	67	82,72
128	90	10	24	57	70,37
90	64	18	42	39	48,15
64	32	30	72	9	11,11
32	16	8	80	1	1,23
16	8	1	81	0	0,00

Curva granulometrica numerale



Calcolo del Dm (diametro medio)

Diametro medio della classe (D _i)	Frequenza relativa % (f _i)	D _i *f _i
362,0	0,0	0,0
300,0	1,2	370,4
232,0	6,2	1432,1
170,0	4,9	839,5
110,0	11,1	1222,2
75,4	16,0	1209,9
49,6	28,4	1407,4
22,9	21,0	481,5
10,0	11,1	111,1
	100	7074,1
Dm = 7074,1/100		71

Ubicazione punti di indagine



Granulometria 1







Granulometria 2

