

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DICCA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale



**TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN
INGEGNERIA CIVILE**

**Modellazione idraulica per la stima delle soglie
critiche del torrente Rupinaro**

Relatore:

Chiar.^{mo} Prof. Ing. Giorgio Boni

Allievo:

Andrea Sbardella

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

1	Introduzione	1
2	La modellazione idraulica.....	3
2.1	Il caso studio del torrente Rupinaro	3
2.2	Costruzione del modello	4
2.3	Definizione degli scenari di piena	9
2.4	Risultati della modellazione.....	11
3	Rete di monitoraggio e scale di deflusso	14
4	Validazione con gli eventi osservati	23
4.1	Verifica contemporaneità dei picchi di piena	24
4.2	Verifica distribuzione delle precipitazioni nel bacino	30
4.3	Verifica dell'ipotesi di contributo unitario uniforme.....	37
4.4	Gli eventi del 23/10/2023 e 17/10/2024	38
5	Stima delle soglie critiche.....	41
5.1	Soglie di esondazione spondale	41
5.2	Soglie di sormonto delle opere trasversali al corso d'acqua.....	44
5.2.1	La copertura del rio Campodonico	50
5.3	Le soglie nelle sezioni di misura.....	52
6	Conclusioni e sviluppi futuri.....	55
7	Bibliografia	57

Indice delle Figure

Figure 2.1 – Localizzazione del bacino del Rupinaro	3
Figure 2.2 - Conformazione del bacino del Rupinaro	4
Figure 2.3 - Tronchi, sezioni e junctions del modello HEC-RAS	5
Figure 2.4 - Junction 1, confluenza rio Bacezza.....	6
Figure 2.5 - Junction 2, confluenza rio Rupinaro e rio Campodonico.....	7
Figure 2.6 - Tipologia di alveo nel reticolo modellato	8
Figure 2.7 - Modellazione del ponte di Viale Tappani in HEC-RAS.....	8
Figure 2.8 - Inserimento Leeves in sezione R39 del tronco 1	9
Figure 2.9 - Flow Accumulation del bacino del Rupinaro	10
Figure 2.10 - Profili del pelo libero del tronco 1	11
Figure 2.11 - Profili del pelo libero del tronco 2	12
Figure 2.12 - Profili del pelo libero del tronco 3	12
Figure 2.13 - Profili del pelo libero del tronco 4	13
Figure 2.14 - Profili del pelo libero del tronco 5	13
Figure 3.1 - Rete di monitoraggio integrata del bacino del Rupinaro	14
Figure 3.2 - Scala di deflusso modellata di Argine Castagnola.....	16
Figure 3.3 - Scala di deflusso modellata di Argine Sanguineti	16
Figure 3.4 - Scala di deflusso modellata di Copertura Campodonico	17
Figure 3.5 - Livelli idrometrici pre-evento misurati di sensori comunali negli eventi selezionati	18
Figure 3.6 - Idrogramma di piena del 13 giugno 2018	19
Figure 3.7 - Sito d'installazione dell'idrometro di Copertura Campodonico e relativo avvallamento.....	19
Figure 3.8 - Sezione dell'idrometro Argine Castagnola nel modello HEC-RAS.....	20
Figure 3.9 - Conformazione dell'alveo nell'intorno dell'idrometro di Argine Castagnola (vista dal ponte di Via Castagnola - Street view di Google Maps).....	20
Figure 3.10 - Scala di deflusso stimata dell'idrometro di Argine Castagnola.....	21
Figure 3.11 - Scala di deflusso stimata dell'idrometro di Copertura Campodonico ..	22
Figure 4.1 - Picchi di piena degli eventi che raggiungono almeno il primo scenario di piena modellato.....	24
Figure 4.2 - Idrogramma di piena del 29/10/2018	25
Figure 4.3 - Idrogramma di piena del primo picco del 3/11/2019.....	25
Figure 4.4 - Idrogramma di piena del primo picco del 3/11/2019.....	26
Figure 4.5 - Idrogramma di piena del 2/10/2020	26
Figure 4.6 - Idrogramma di piena dell'11/04/2021	27
Figure 4.7 - Idrogramma di piena del 30/12/2022	27
Figure 4.8 - Idrogramma di piena del 23/10/2023	28
Figure 4.9 - Idrogramma di piena del 17/10/2024.....	28
Figure 4.10 - Idrogramma di piena del 6/05/2025	29
Figure 4.11 - Intensità media correlata al picco di piena nei due sottobacini.....	37
Figure 4.12 - Distribuzione della pioggia nell'evento del 23/10/2023.....	39
Figure 4.13 - Distribuzione della pioggia nell'evento del 17/10/2024.....	40
Figure 5.1 - Tratti più vulnerabili ad esondazione spondale.....	42
Figure 5.2 - Vista dal ponte di Via Descalzi verso monte (tronco 1)	42
Figure 5.3 - Vista dal ponte di Via S.Pier di Canne verso valle (tronco 2)	43
Figure 5.4 - Vista dal ponte privato del civico 71 di Via S. Ruffino (tronco 4).....	44

Figure 5.5 - Costruzione dell'arco di circonferenza per il ponte ferroviario.....	45
Figure 5.6 - Ponti più vulnerabili al sormonto.....	47
Figure 5.7 - Ponte di Corso Italia (verso monte)	47
Figure 5.8 - Ponte di Via Castagnola (vista verso monte)	48
Figure 5.9 - Ponte di Via S. Ruffino (verso valle).....	48
Figure 5.10 - Ponte Hi-Lex (verso valle).....	49
Figure 5.11 - Fine della copertura del rio Campodonico (verso monte).....	50
Figure 5.12 - Vista verso valle del brusco restringimento della copertura di rio Campodonico	51
Figure 5.13 - Vista verso valle del resto della spalla del vecchio ponte e relative travi	51
Figure 5.14 - Vista verso monte del sistema di travi nel tratto terminale della copertura	52
Figure 5.15 - Soglie critiche e massimo registrato all'idrometro di Argine Castagnola	53
Figure 5.16 - Soglie critiche e massimo registrato all'idrometro di Copertura Campodonico	54

Indice delle Tabelle

Tabella 2-1 - Aree drenate e parametro A dei tronchi modellati	10
Tabella 2-2 - Scenari di piena modellati	11
Tabella 3-1 - Sensori idrometrici della rete comunale.....	15
Tabella 3-2 - Sensori pluviometrici della rete comunale integrata con ARPAL e Osservatorio Raffaelli	15
Tabella 3-3 - Quote degli zeri idrometrici	21
Tabella 4-1 - Picchi di piena degli eventi più intensi convertiti in portata.....	23
Tabella 4-2 - Orari UTC dei picchi di piena e relativi shift rispetto a Castagnola	29
Tabella 4-3 - Tempi di concentrazione dei tributari	30
Tabella 4-4 - Orari UTC picchi di piena arrotondati a 10 minuti	31
Tabella 4-5 - Mappe di precipitazione interpolate da pluviometri (sopra) e da radar ARPAL (sotto).....	36
Tabella 4-6 - Verifica dell'uniformità del contributo unitario	38
Tabella 5-1 - Tratti critici per esondazione spondale	44
Tabella 5-2 - Ponti critici a sormonto	46
Tabella 5-3 - Soglie riassuntive per ogni tronco	52
Tabella 5-4 - Ponti più critici a sormonto	53

1 Introduzione

I bacini idrografici di limitata estensione rappresentano uno dei contesti più critici dal punto di vista del rischio idraulico. La ridotta superficie drenata e i brevi tempi di risposta agli eventi meteorici determinano infatti la formazione di onde di piena caratterizzate da rapidi incrementi di portata e livello idrometrico, rendendo particolarmente complessa la previsione e la gestione degli eventi estremi. Tale criticità assume particolare rilevanza nei contesti urbanizzati, dove la presenza di attraversamenti, restringimenti di sezione e coperture dei corsi d'acqua può ridurre significativamente la capacità di deflusso, aumentando il rischio di esondazione e di interferenza con le infrastrutture.

Negli ultimi anni, l'evoluzione delle reti di monitoraggio idrometeorologico e la crescente disponibilità di modelli idraulici hanno reso possibile integrare osservazioni in tempo reale e simulazioni numeriche per migliorare la conoscenza del comportamento idrologico dei bacini e supportare le attività di previsione e gestione del rischio. In questo contesto, la definizione di soglie idrometriche associate a specifici scenari di criticità costituisce uno strumento di particolare interesse operativo, poiché consente di interpretare direttamente le misure registrate dagli idrometri in termini di possibili effetti sul territorio.

La presente tesi si inserisce in tale ambito e ha come caso di studio il bacino del torrente Rupinaro, nel Comune di Chiavari (GE), caratterizzato da un sistema idraulico fortemente influenzato dalla presenza di numerosi attraversamenti e opere di copertura e per lunghi tratti contraddistinto da dimensionamento delle arginature insufficiente per il transito di piene con tempi di ritorno inferiori a 50 anni.

La gestione operativa del rischio idraulico del torrente Rupinaro è demandata ai Piani Comunali di Protezione Civile del Comune di Chiavari, nei quali sono definite specifiche fasi operative che il C.O.C. (Centro Operativo Comunale) attiva al superamento di soglie pluviometriche prefissate. Quando anche un solo pluviometro della rete di monitoraggio comunale supera un accumulo orario di 30 mm e 50 mm vengono attivate le fasi operative rispettivamente di preallarme e di allarme. Queste garantiscono un adeguato margine temporale di sicurezza, pur non essendo supportata da uno studio idrologico dedicato.

Attualmente la rete di monitoraggio comunale comprende anche tre sensori idrometrici, due installati sui due tributari principali e uno nel tratto terminale. Gli idrometri, tuttavia, attualmente sono solo un supporto al monitoraggio in tempo reale e non sono legati all'attivazione di determinate fasi operative, in quanto le loro osservazioni non sono riconducibili a specifici scenari di criticità all'interno di tutto il reticolo.

Un altro strumento di supporto che viene attualmente impiegato dal C.O.C. di Chiavari è il Modello Piccoli Bacini sviluppato da ARPAL, che, a partire da una previsione a brevissimo termine del campo di pioggia alimentato da dati radar e pluviometrici della

rete OMIRL, fornisce, mediante un modello afflussi-deflussi di tipo Nash, dieci possibili scenari degli idrogrammi di piena su un orizzonte temporale di un'ora. Quando la portata simulata è prevista superare determinati valori soglia viene mandato un avviso al Comune. Nel caso del torrente Rupinaro questo modello lavora su una sezione chiusura alla foce e le soglie sono state valutate da ARPAL nell'intorno della sezione stessa.

In tale contesto, il presente lavoro si propone di integrare osservazioni di monitoraggio, modellazione idraulica e analisi degli eventi storici in un'unica procedura con l'obiettivo di definire delle soglie idrometriche direttamente collegate a scenari di criticità valutati lungo tutto il corso d'acqua, e integrabili nei vari strumenti di monitoraggio che il Comune di Chiavari ha a disposizione.

Nella tesi è stata sviluppata una metodologia che consenta di collegare le informazioni fornite dalla rete di monitoraggio agli scenari di criticità idraulica individuati mediante modellazione numerica. A tal fine sono state ricostruite le scale di deflusso delle principali sezioni idrometriche del bacino, ottenute integrando le informazioni provenienti dal modello idraulico con le osservazioni dei sensori stessi, consentendo la ricostruzione di curve di deflusso precedentemente non disponibili.

Successivamente, la coerenza delle scale di deflusso ricostruite è stata verificata mediante l'analisi di diversi eventi di piena osservati, confrontando le risposte idrologiche dei principali sottobacini con la distribuzione spaziale delle precipitazioni. Tale fase ha consentito di valutare la consistenza delle ipotesi adottate per la modellazione idraulica e di verificare la rappresentatività delle relazioni livello-portata ricostruite.

Sulla base delle scale di deflusso così ottenute è stata infine sviluppata una metodologia che estende il tradizionale approccio di definizione delle soglie idrometriche, riferite alle sole condizioni idrauliche locali della sezione di misura, consentendo di associare ciascun livello osservato anche a criticità di altri tratti del reticolo modellato, considerando sia le condizioni di esondazione spondale sia il raggiungimento di condizioni critiche presso ponti e coperture. Le soglie così definite costituiscono pertanto uno strumento di immediata interpretazione delle misure provenienti dalla rete di monitoraggio durante la gestione delle emergenze di protezione civile.

L'elaborato è articolato in sette capitoli. Dopo la descrizione dell'area di studio, vengono illustrate le caratteristiche del modello idraulico e la procedura adottata per la ricostruzione delle scale di deflusso, introducendo i sensori della rete di monitoraggio pluvio-idrometrica e le relative serie storiche. Successivamente sono presentate le verifiche condotte mediante gli eventi di piena osservati, l'analisi della distribuzione spaziale delle precipitazioni e la validazione delle ipotesi adottate. L'ultima parte della tesi è dedicata all'individuazione delle soglie di criticità idraulica e alla loro traduzione in soglie idrometriche operative, seguita dalle conclusioni e dai possibili sviluppi futuri.

2 La modellazione idraulica

2.1 Il caso studio del torrente Rupinaro

Il torrente Rupinaro è situato nel versante tirrenico della Liguria di levante (Figure 2.1), in provincia di Genova, diviso dai comuni di Leivi a monte e di Chiavari a valle, in quest'ultimo sono presenti le maggiori criticità idrauliche e comprende l'intero reticolo che è stato analizzato nel seguito dello studio. Il suo bacino idrografico rientra nella competenza dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale e confina a W in senso orario con il fosso Piscia, il rio Rico e il torrente Semorile, a Nord e a Est con il fiume Entella, e a Sud con il Mar Ligure e aree scolanti. Ha un'estensione di 10.6 km² ed è caratterizzato da versanti ad acclività elevata, che generano risposte repentine alle piogge intense che fanno parte della climatologia della zona.

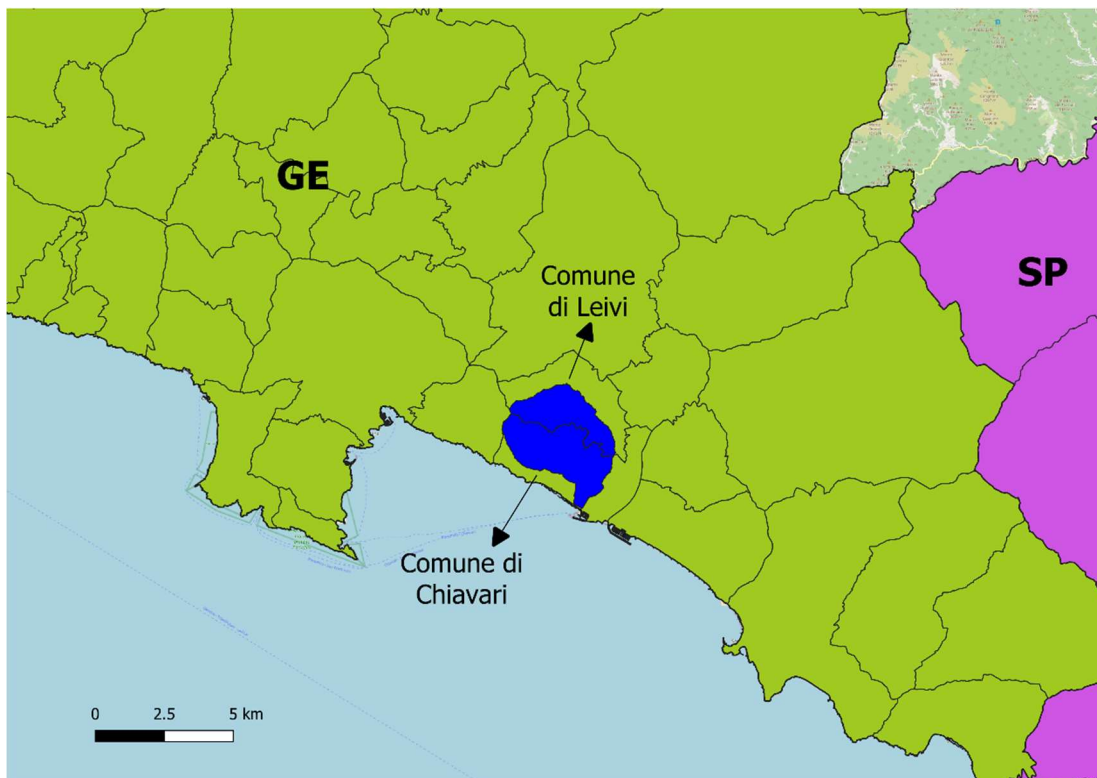


Figure 2.1 – Localizzazione del bacino del Rupinaro

Il reticolo idrografico è formato da due affluenti principali: il rio Rupinaro da sinistra (5.5 km²) e il rio Campodonico da destra (3.6 km²), che alla loro confluenza in località San Pier di Canne formano il torrente Rupinaro (Figure 2.2).

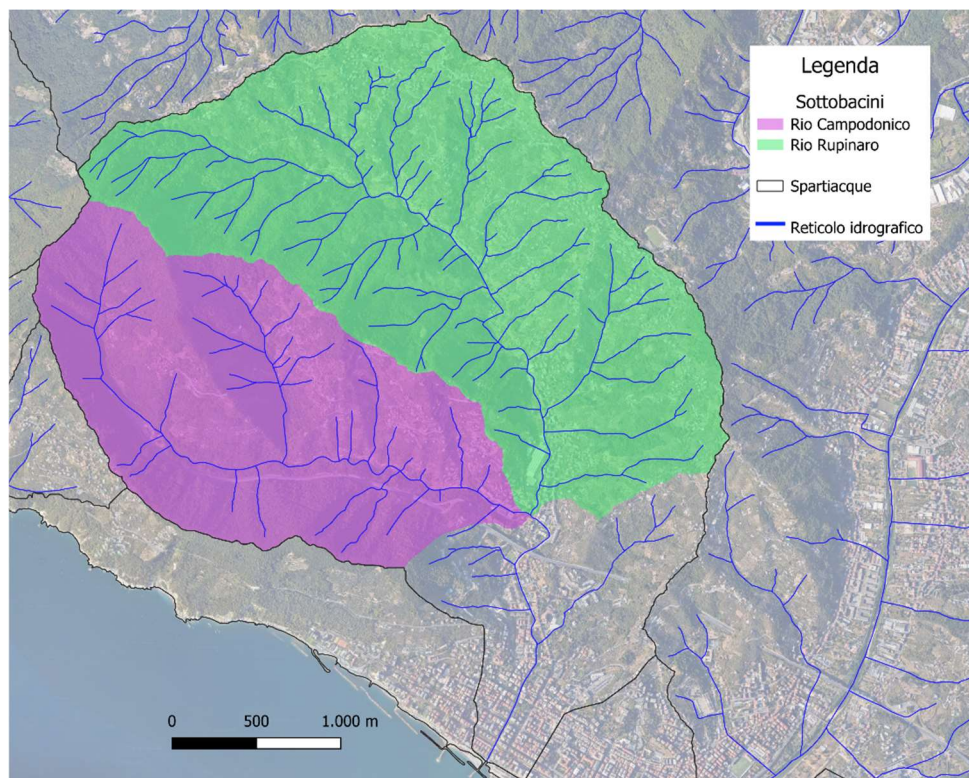


Figure 2.2 - Conformazione del bacino del Rupinaro

2.2 Costruzione del modello

La modellazione è stata eseguita sul software HEC-RAS 6.6 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers. Il modello è stato costruito a partire dal rilievo eseguito nel 2021 da Studio Majone Ingegneri Associati a supporto di uno studio idraulico finalizzato alla stabilità di alcuni muri d'argine, del quale si sono avute a disposizione le quote riferite al livello medio mare di 121 sezioni, comprensive di dettagli di ponti e coperture.

Si è deciso di dividere il corso d'acqua in 5 tronchi uniti attraverso 2 Junctions (Figure 2.3):

- Tronco 1, 28 sezioni sul tratto terminale del torrente Rupinaro;
- Tronco 2, 29 sezioni nel tratto di monte del torrente Rupinaro;
- Tronco 3, 16 sezioni sul rio Bacezza;
- Tronco 4, 15 sezioni sul rio Campodonico;
- Tronco 5, 33 sezioni sul rio Rupinaro;5

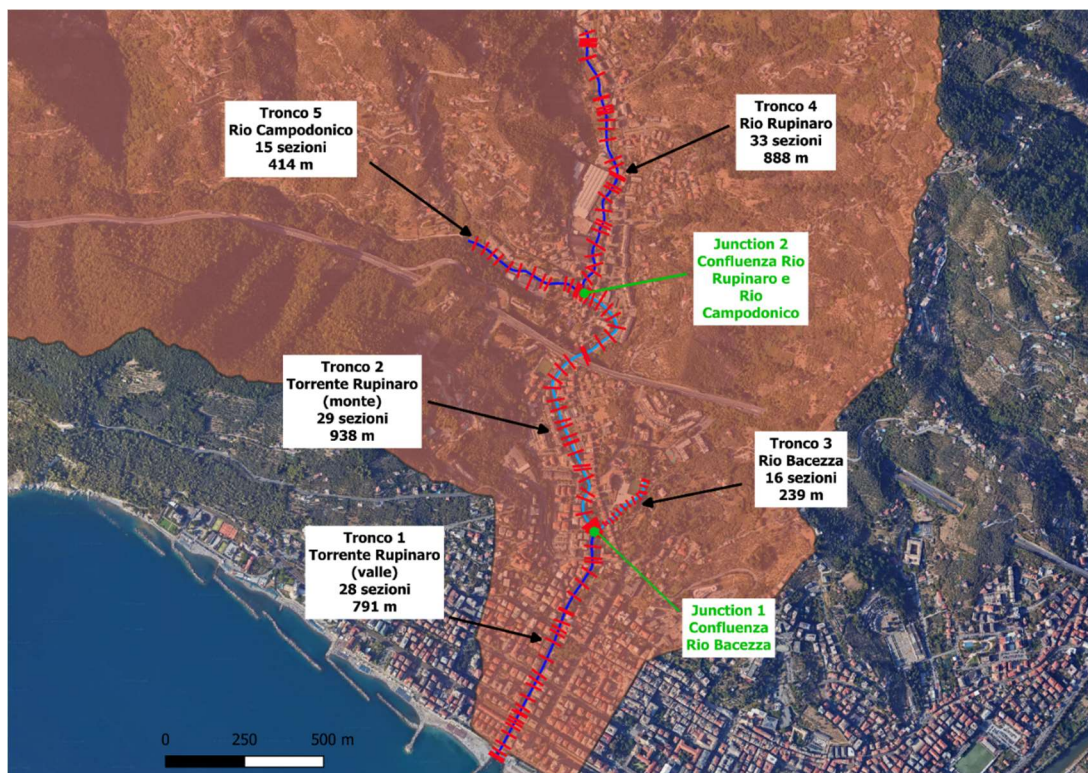


Figure 2.3 - Tronchi, sezioni e junctions del modello HEC-RAS

Essendo le sezioni distanziate mediamente di 25 m è stato necessario raffittirle per ottenere un profilo della corrente più dettagliato in relazione alle dimensioni dell'alveo. Sono state quindi generate per ciascun tronco delle sezioni intermedie con un passo di 5 m attraverso il Tool di HEC-RAS "XS Interpolation" che esegue un'interpolazione lineare tra due sezioni originarie. Inoltre, per descrivere meglio quelle che sono le reali curvature dell'alveo sono state eseguite manualmente delle traslazioni rigide in planimetria delle sezioni interpolate, attraverso l'editor GIS di HEC-RAS: RAS Mapper. A valle di questa operazione è stato fatto infine un controllo visivo qualitativo delle sezioni interpolate.

Al fine di ottenere la continuità del modello tra un tronco e un altro sono state aggiunte manualmente delle sezioni nell'intorno delle due Junction copiandole dalla sezione contigua nello stesso tronco e modificandone i punti con l'approccio descritto al paragrafo precedente. È stata aggiunta anche una sezione terminale alla foce per modellare meglio l'influenza dello sbocco in mare sul profilo nel tratto terminale.

Le Junction sono modellabili con due approcci differenti:

- Metodo dell'energia: non tiene conto dell'angolo d'immissione del tributario e delle spinte idrodinamiche dei tributari (più snello e stabile);
- Metodo del bilancio della quantità di moto: tiene conto della perdita di carico a seguito dell'angolo d'immissione del tributario nonché delle spinte idrodinamiche (più completo ma instabile);

Nella Junction 1 (Figure 2.4), che unisce i tronchi 1, 2 e 3, si è deciso di adottare il metodo del bilancio dell'energia in quanto, nonostante un angolo d'immissione piuttosto consistente il rapporto di area drenata tra i due contributi è di circa 1:20, che significa una portata decisamente trascurabile del rio Bacezza, il cui tronco viene

modellato esclusivamente a fini di valutazione del profilo nell'intorno della sua confluenza. Si è eseguita una breve analisi di sensitività con rapporti tra i due contributi compresi tra 1:15 e 1:25 e non si è notata alcuna differenza nei profili.



Figure 2.4 - Junction 1, confluenza rio Bacezza

Nella Junction 2 (Figure 2.5) si è deciso di adottare il metodo del bilancio della quantità di moto perché il rapporto tra il contributo del rio Campodonico e del rio Rupinaro è di circa 2:3. Inoltre, il rio Rupinaro ha una traiettoria d'immissione con una brusca curva avente un raggio di curvatura di circa 40 m e la zona nell'intorno della confluenza è una delle zone storicamente critiche del corso d'acqua; motivi per cui è necessario conteggiare esplicitamente gli effetti delle spinte dei due flussi per descrivere al meglio i profili di rigurgito.

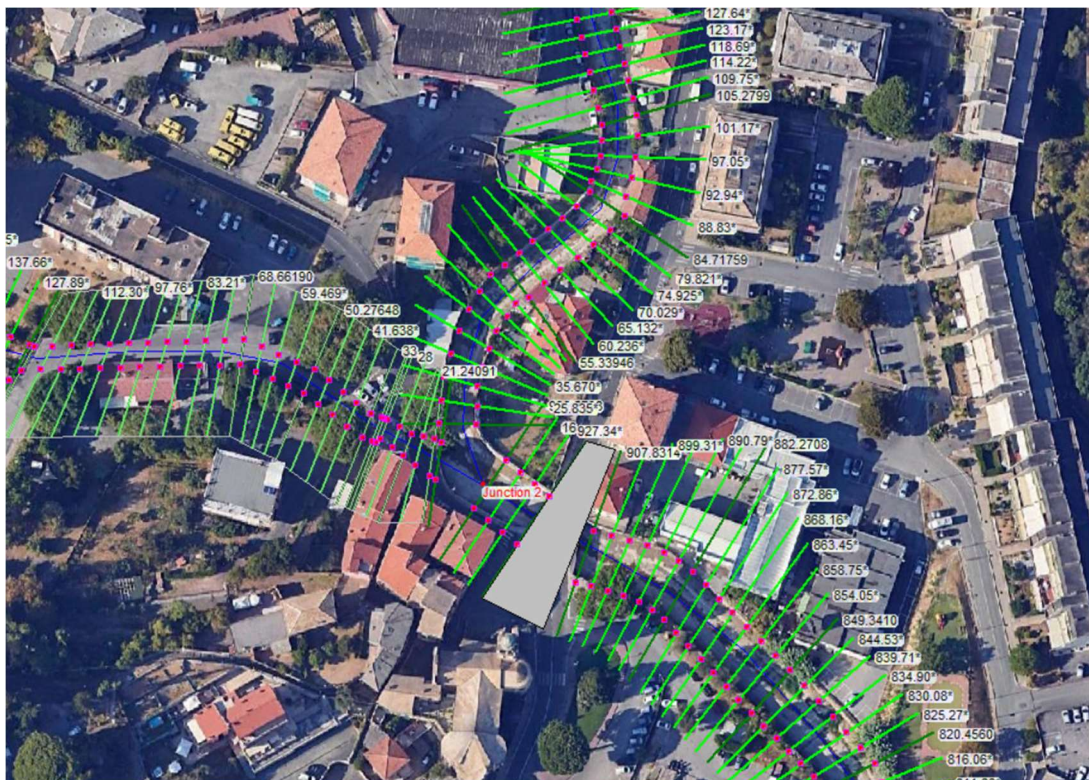


Figure 2.5 - Junction 2, confluenza rio Rupinaro e rio Campodonico

Per quanto concerne la rugosità del fondo e delle pareti il software impiega il coefficiente di Manning “n” (inverso del coefficiente di Gaukler-Strickler), che lungo i tratti studiati sono stati scelti sulla base del tipo di alveo adottando i valori impiegati nello studio idraulico del 2021, decisione supportata anche da dei sopralluoghi:

- Alveo artificiale con pavimentazione cementizia: $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$;
- Alveo naturale con presenza di vegetazione e fondo irregolare: $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$;

Si è assunto alveo artificiale con $n = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ per i tronchi 1 e 2, per il tronco 5 nel tratto della copertura del rio Campodonico sez. C6, e nel tronco 4 dalla sezione di chiusura alla confluenza del rio delle Lamme sez. S1, più a monte si è assunto alveo naturale con $n = 0.04 \text{ s/m}^{1/3}$. Unica eccezione per il rio Bacezza dove, per le caratteristiche ibride dell'alveo, è stato assunto un valore intermedio di $n = 0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ (Figure 2.6).



Figure 2.6 - Tipologia di alveo nel reticolo modellato

I rilievi delle sezioni contengono anche le quote delle opere lungo il torrente quali ponti, coperture e briglie (Figure 2.7). I Ponti sono stati modellati come Bridges, le coperture come Lids e le briglie come salti di quota tra due sezioni ravvicinate.

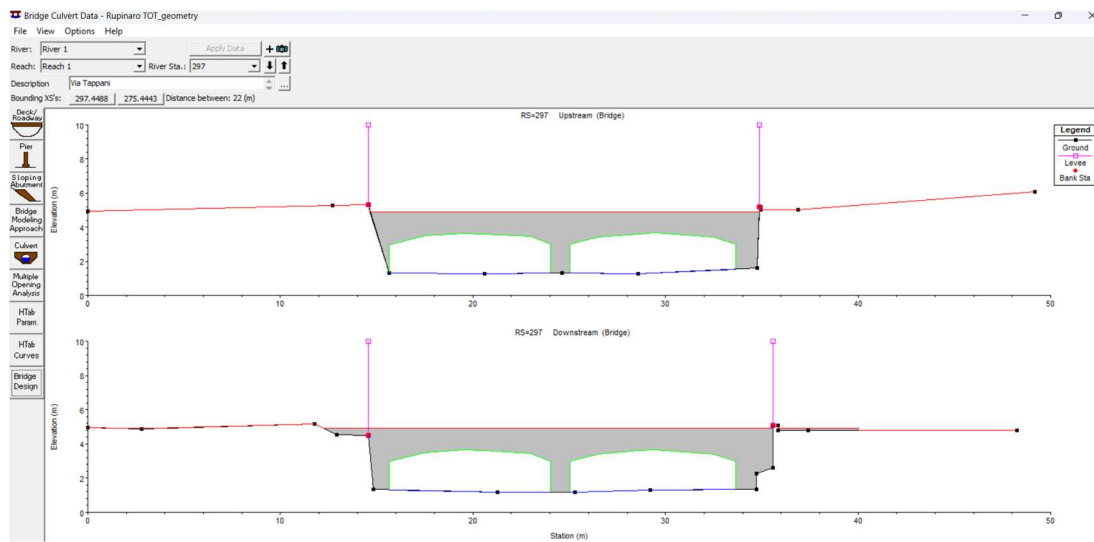


Figure 2.7 - Modellazione del ponte di Viale Tappani in HEC-RAS

Si sono inserite come condizioni al contorno per ciascuna sezione iniziale la profondità critica, nelle Junctions si impone la continuità del profilo del pelo libero e alla foce viene imposta la quota del livello del mare nella sezione terminale.

Per garantire infine il confinamento del corso d'acqua entro le sponde vengono inseriti dei levees (Figure 2.8).

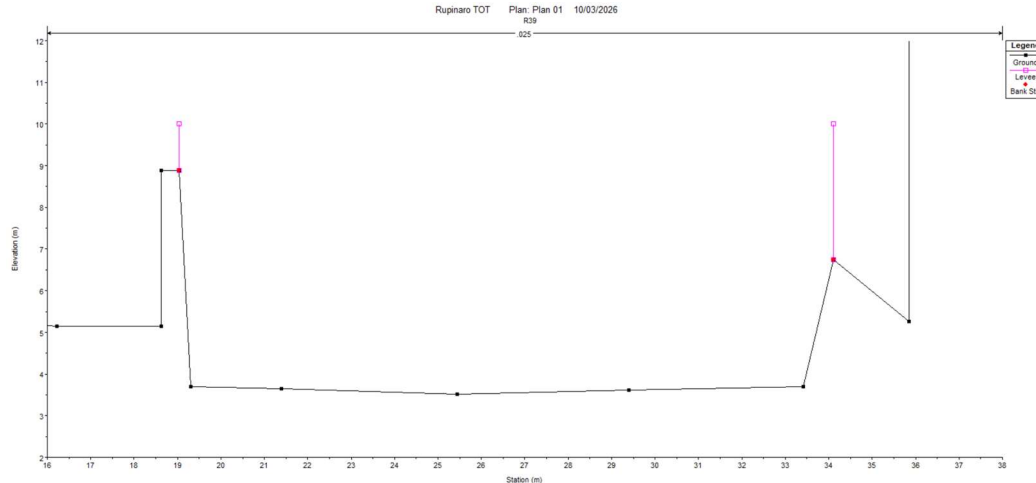


Figure 2.8 - Inserimento Levees in sezione R39 del tronco I

2.3 Definizione degli scenari di piena

Si è deciso di assumere 20 scenari di piena con portate diverse a partire da $10 \text{ m}^3/\text{s}$ con uno step di $5 \text{ m}^3/\text{s}$, definite a partire dal primo tronco e ripartendole nei vari tronchi assumendo un contributo unitario uniforme su tutto il bacino, rendendo cioè direttamente proporzionale la portata all'area drenata da quel tronco. Tale ragionamento viene proposto assumendo che negli eventi alluvionali il campo di pioggia copra abbastanza uniformemente l'intero bacino. Tale assunzione è supportata dal fatto che il bacino ha un'estensione limitata rispetto alla scala di un evento temporalesco organizzato e persistente, unica tipologia di condizioni meteorologiche in grado di scaricare a terra quantità di pioggia capaci di stressare un bacino di tali dimensioni.

$$\frac{Q_i}{Q_j} = \frac{S_i}{S_j} = \text{cost} \rightarrow Q_i = Q_j \cdot \frac{S_i}{S_j} \quad (1)$$

Dove Q_i e S_i sono rispettivamente la portata e la superficie dell'area drenata dalla sezione i .

È quindi possibile definire la portata Q_i funzione della portata alla sezione di chiusura e del coefficiente adimensionale A_i , definito come rapporto dell'area alla sezione i e quella alla sezione di chiusura.

$$\begin{cases} A_i = \frac{S_i}{S_{tot}} = [-] \\ Q_i = Q_{tot} \cdot A_i \end{cases} \quad (2)$$

Non si sono considerate portate inferiori ai $10 \text{ m}^3/\text{s}$ in quanto i rilievi delle sezioni non sono sufficientemente dettagliati da poter descrivere la reale traiettoria e quota del profilo per portate piccole che, peraltro, non sono d'interesse.

Per determinare i valori delle aree drenate si è impiegato il software Qgis 3.34.12 in cui, a partire dal `dtm_liguria_2017.tiff` ritagliato sul bacino idrologico del Rupinaro, in `Bacini_idrografici.shp` (entrambi i prodotti scaricati dal Geoportale di RL), si è ottenuto il prodotto `Flow Accumulation.tiff` attraverso i Tools di SAGA "Fill Sinks

(Wang & Liu)” e “Flow Accumulation”. Tale file contiene, rasterizzati sulla griglia di 5 m, i valori di area drenata da ciascun pixel (Figure 2.9).

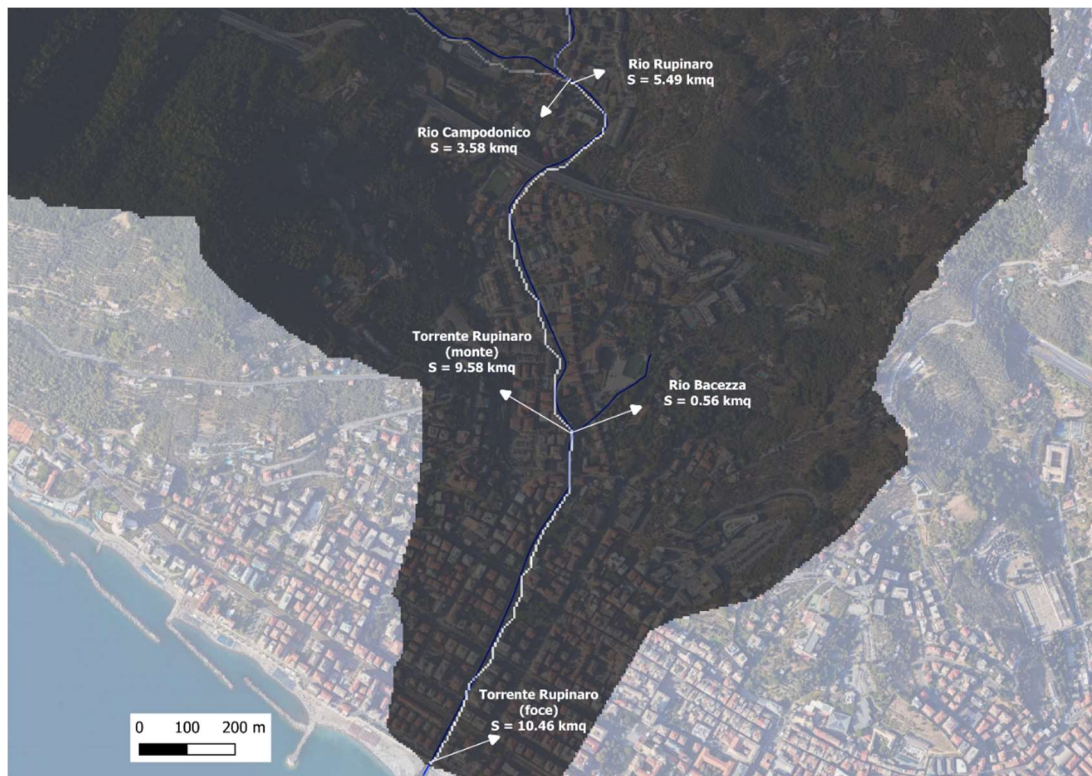


Figure 2.9 - Flow Accumulation del bacino del Rupinaro

Dai valori di area drenata alle sezioni di chiusura di ciascun tronco si ricavano i coefficienti “A” (Tabella 2-1) da applicare alla portata definita in ciascuno dei 20 scenari al fine di garantire un contributo unitario uniforme.

Tronco	1	2	3	4	5
S [km ²]	10.46	9.58	0.56	5.49	3.58
A [-]	1.00	0.92	0.05	0.52	0.34

Tabella 2-1 - Aree drenate e parametro A dei tronchi modellati

Da cui si ottengono i 20 scenari di portata (Tabella 2-2), ottenuti tramite l’equazione (2).

Portate uniformemente distribuite [m ³ /s]					
scenario	Tronco 1	Tronco 2	Tronco 3	Tronco 4	Tronco 5
Q1	10	9.16	0.54	5.25	3.42
Q2	15	13.74	0.80	7.87	5.13
Q3	20	18.32	1.07	10.50	6.85
Q4	25	22.90	1.34	13.12	8.56
Q5	30	27.48	1.61	15.75	10.27
Q6	35	32.06	1.87	18.37	11.98
Q7	40	36.63	2.14	20.99	13.69

Q8	45	41.21	2.41	23.62	15.40
Q9	50	45.79	2.68	26.24	17.11
Q10	55	50.37	2.94	28.87	18.82
Q11	60	54.95	3.21	31.49	20.54
Q12	65	59.53	3.48	34.12	22.25
Q13	70	64.11	3.75	36.74	23.96
Q14	75	68.69	4.02	39.36	25.67
Q15	80	73.27	4.28	41.99	27.38
Q16	85	77.85	4.55	44.61	29.09
Q17	90	82.43	4.82	47.24	30.80
Q18	95	87.01	5.09	49.86	32.51
Q19	100	91.59	5.35	52.49	34.23
Q20	105	96.17	5.62	55.11	35.94

Tabella 2-2 - Scenari di piena modellati

2.4 Risultati della modellazione

La modellazione viene eseguita in regime di moto vario (mixed), da cui si ottengono i seguenti profili del pelo libero (Figure 2.10, Figure 2.11, Figure 2.12, Figure 2.13, Figure 2.14).

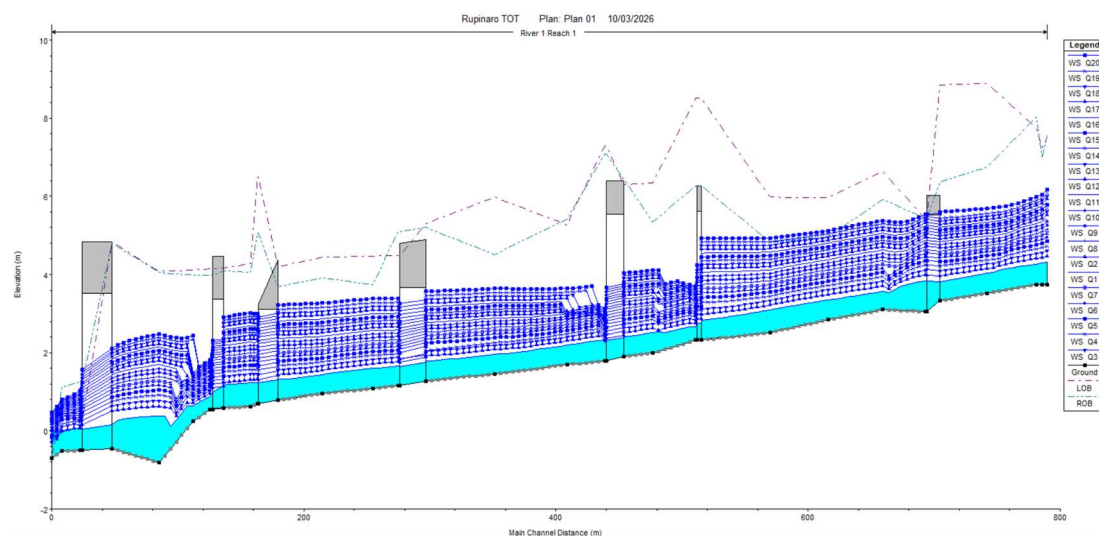


Figure 2.10 - Profili del pelo libero del tronco 1

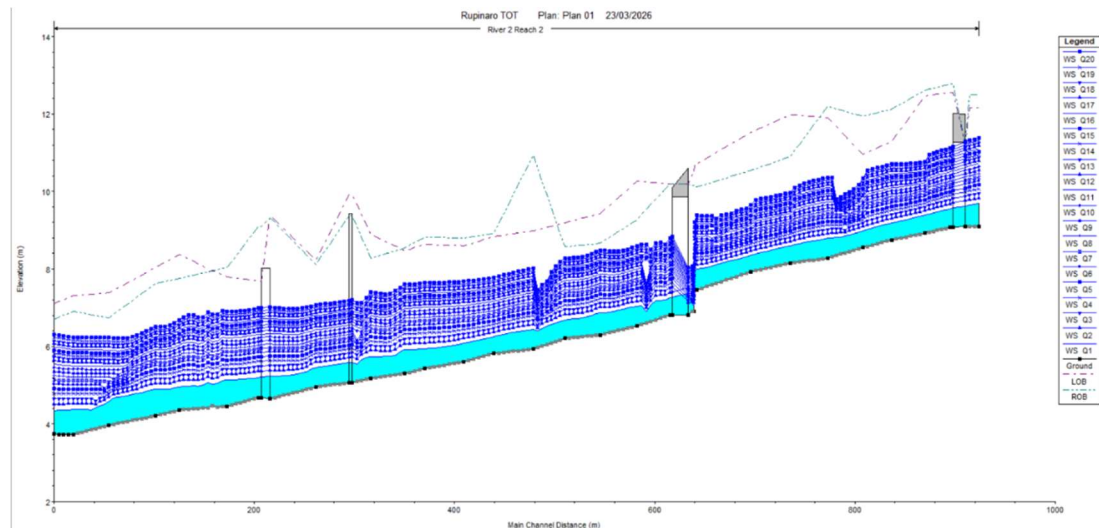


Figure 2.11 - Profili del pelo libero del tronco 2

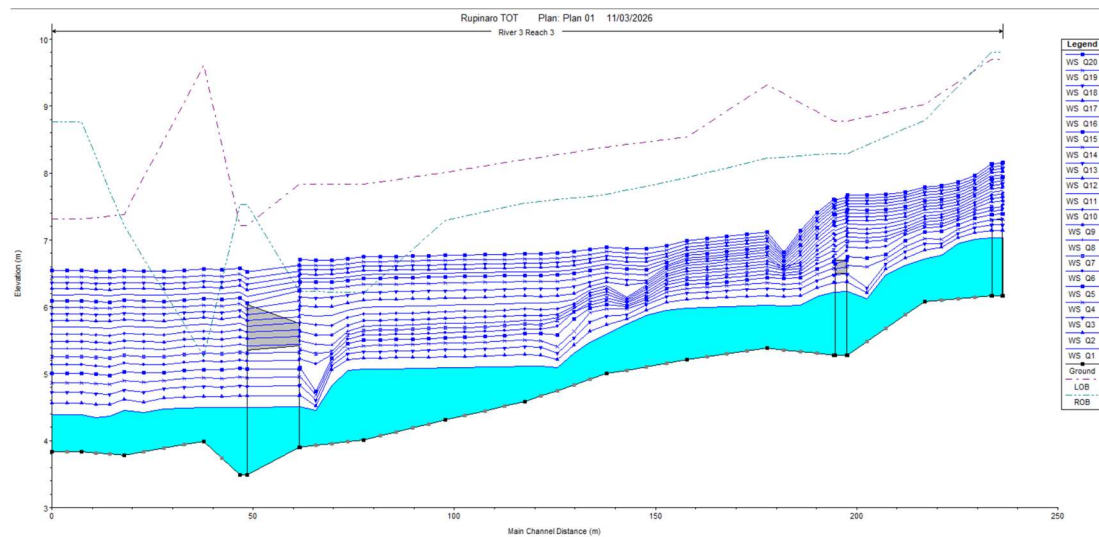


Figure 2.12 - Profili del pelo libero del tronco 3

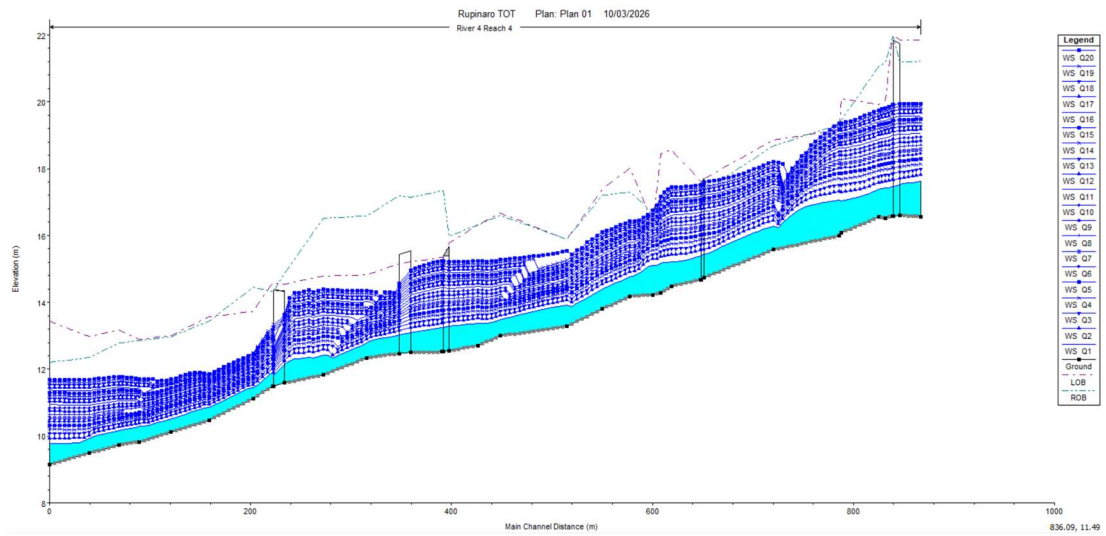


Figure 2.13 - Profili del pelo libero del tronco 4

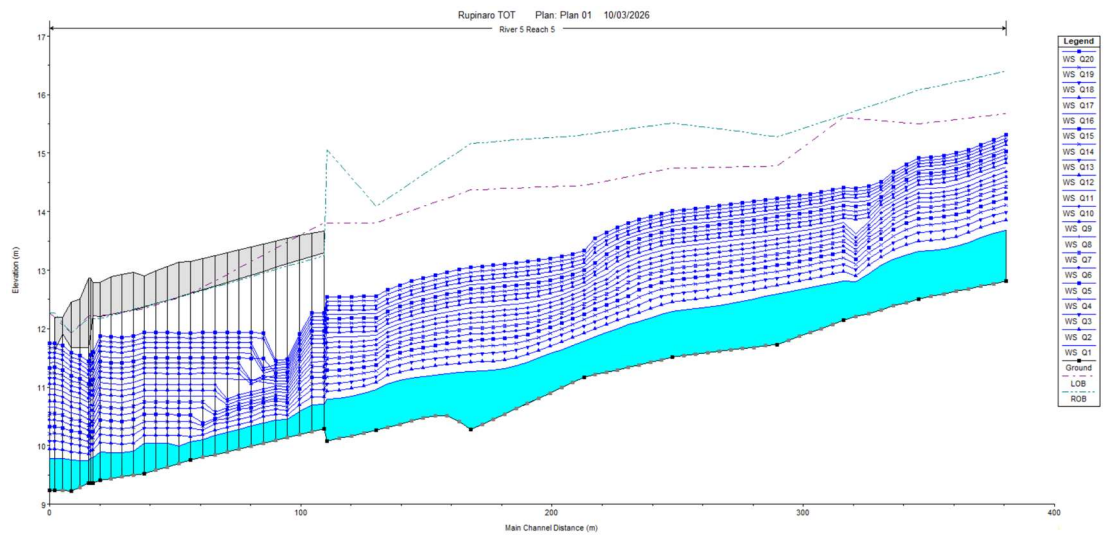


Figure 2.14 - Profili del pelo libero del tronco 5

3 Rete di monitoraggio e scale di deflusso

Al fine di validare il modello e le ipotesi fatte si usufruisce delle osservazioni dei sensori idrometrici presenti lungo il reticolo per i quali però non si hanno a disposizione delle scale di deflusso. Vengono per cui costruite delle scale di deflusso partendo dai profili degli scenari modellati in HEC-RAS, stimando empiricamente lo zero idrometrico attraverso gli idrogrammi di piena osservati dai sensori durante eventi meteo-idrologici che hanno superato una determinata soglia pluviometrica.

La rete di monitoraggio pluvio-idrometrica del Comune di Chiavari dedicata al bacino del torrente Rupinaro è nata nel 2016 ed è composta da 3 idrometri e 3 pluviometri che nel corso degli anni hanno subito modifiche del sito d'installazione o di sensoristica. I cambi di ubicazione degli idrometri sul rio Rupinaro, tronco 4, e sul torrente Rupinaro, tronco 1, sono stati eseguiti nel 2018. Si decide di considerare la serie storica solo degli eventi caratterizzati dall'attuale posizione dei sensori.

Il dataset della rete comunale in questo elaborato viene integrato con i dati di due pluviometri, uno della rete OMIRL e l'altro dell'Osservatorio Raffaelli dal 1883 (Figure 3.1, Tabella 3-1, Tabella 3-2).

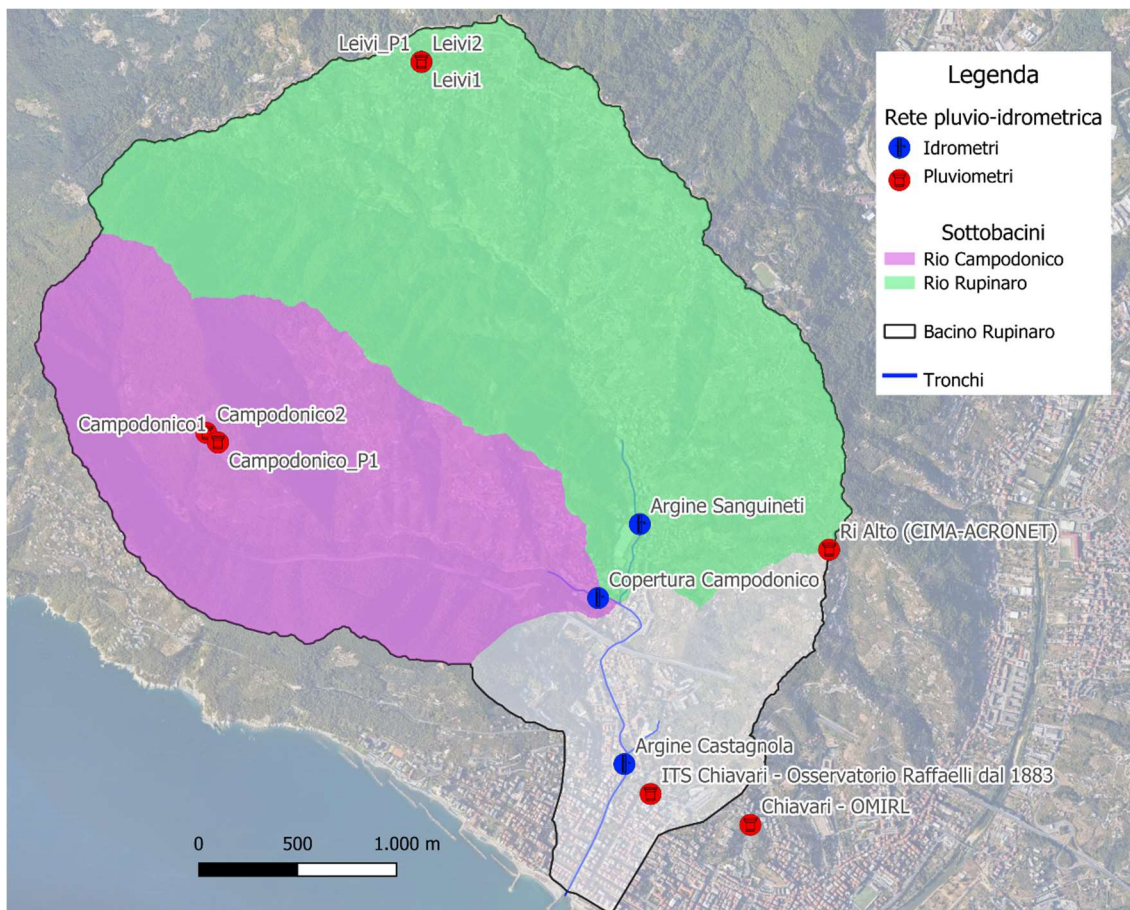


Figure 3.1 - Rete di monitoraggio integrata del bacino del Rupinaro

st_id	name	h _{sensor} [m]	Lat; Lon (WGS84)	Elev [m]	Notes (orario UTC)
140124 64	Argine Sanguineti	4.25	44.33251; 9.32293	17	Dal 05-04-2018 10:24
150948 15	Copertura Campodonico	4.45	44.32917; 9.32027	14	
150948 17	Argine Castagnola	3.10	44.32161; 9.32189	5	Dal 05-04-2018 13:24

Tabella 3-1 - Sensori idrometrici della rete comunale

st_id	name	Lat; Lon (WGS84)	Elev [m]	Notes (orario UTC)
1	Campodonico1	44.33630; 9.29622	305	
2	Campodonico2	44.33675; 9.29548	305	Dal 01-07-2020 00:00
3	Leivi1	44.35358; 9.30920	235	
4	Leivi2	44.35358; 9.30920	235	Dal 01-07-2020 00:00
190902 52	Leivi_P1	44.35358; 9.30920	235	Dal 04-04-2021 00:00
200301 32	Campodonico_P1	44.33630; 9.29622	305	Dal 04-04-2021 00:00
15191	Ri Alto (CIMA- ACRONET)	44.33132; 9.33492	105	
CHIVI	CHIAVARI (OMIRL)	44.31885; 9.32978	50	
	ITS Chiavari (Osservatorio Raffaelli)	44.32025; 9.32355	47	

Tabella 3-2 - Sensori pluviometrici della rete comunale integrata con ARPAL e Osservatorio Raffaelli

Si riportano allora le scale di deflusso ottenute con la modellazione idraulica alle sezioni corrispondenti agli idrometri nelle loro attuali posizioni, ricavate attraverso il tool “Rating curve” di HEC-RAS (Figure 3.2, Figure 3.3, Figure 3.4).

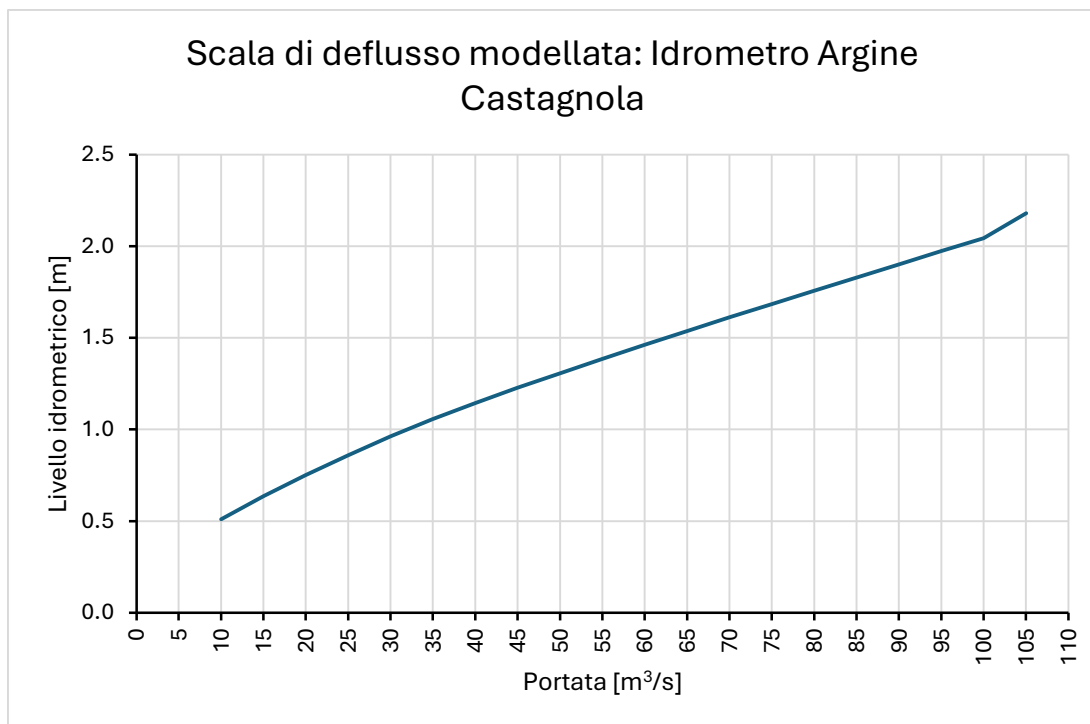


Figure 3.2 - Scala di deflusso modellata di Argine Castagnola

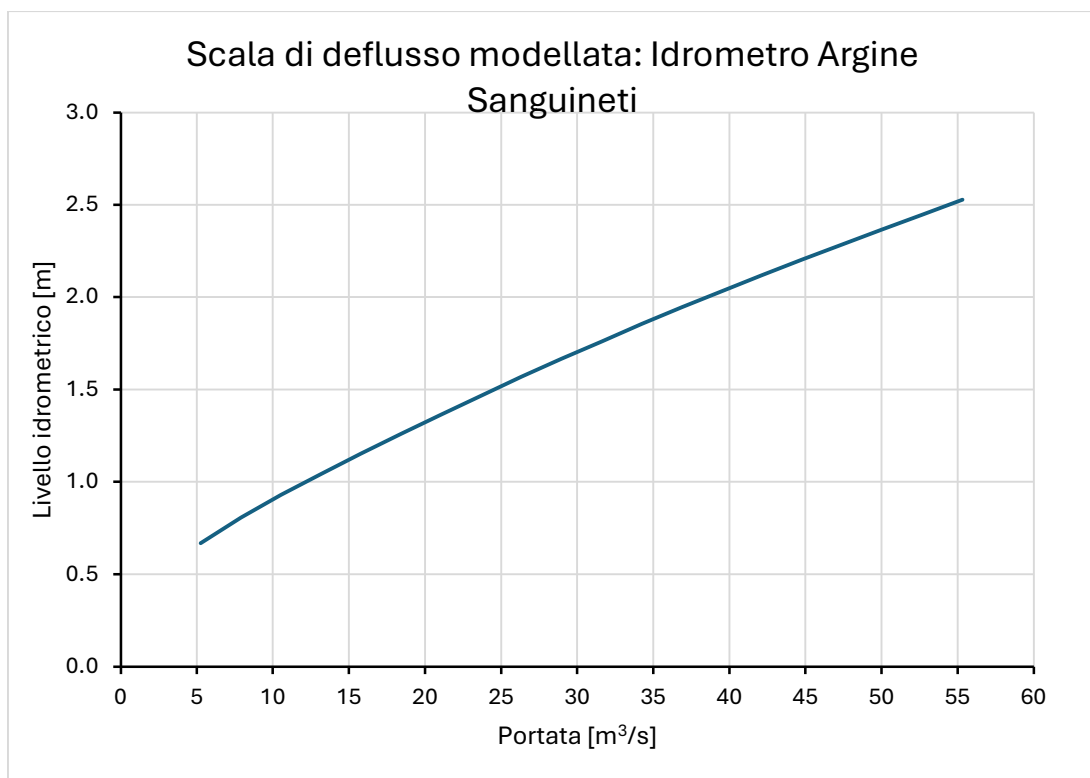


Figure 3.3 - Scala di deflusso modellata di Argine Sanguineti

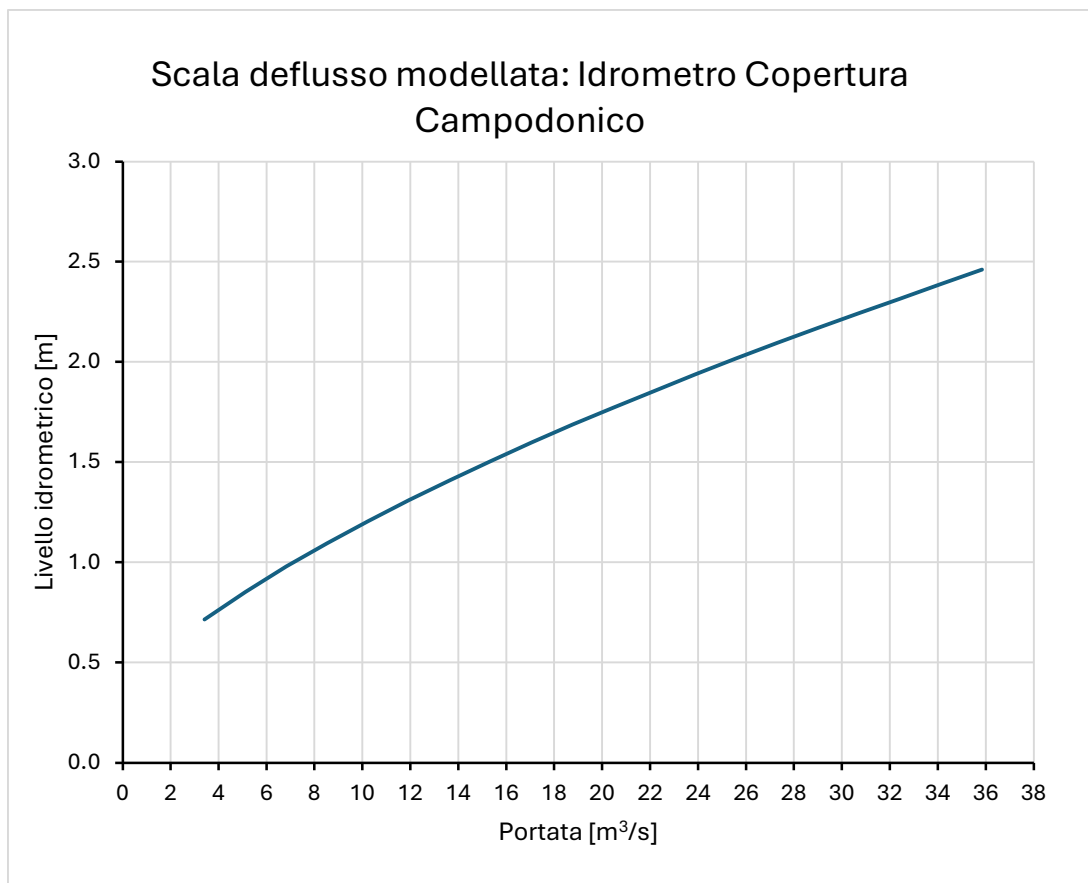


Figure 3.4 - Scala di deflusso modellata di Copertura Campodonico

Le scale di deflusso modellate impiegano come zero idrometrico la quota minima dell'alveo in quella determinata sezione. Per poter convertire adeguatamente le altezze idrometriche in portata è necessario determinare la reale quota dello zero idrometrico di ciascun sensore.

In primo luogo, si conduce un controllo sulla stabilità del fondo che ciascun idrometro misura in condizioni di assenza d'acqua al di sotto del sensore.

Le misure idrometriche impiegate in quest'analisi vengono selezionate identificando quegli eventi in cui i pluviometrici della rete comunale hanno registrato una cumulata oraria di almeno 20 mm. Applicando questo filtro si hanno a disposizione 52 idrogrammi di piena.

La quota del fondo viene identificata empiricamente dal valore di altezza idrometrica che si osserva prima del passaggio della piena. Si scartano tutti quegli eventi in cui si evidenzia un disturbo/rumore legato alla presenza di vegetazione al di sotto dello strumento (Figure 3.5).

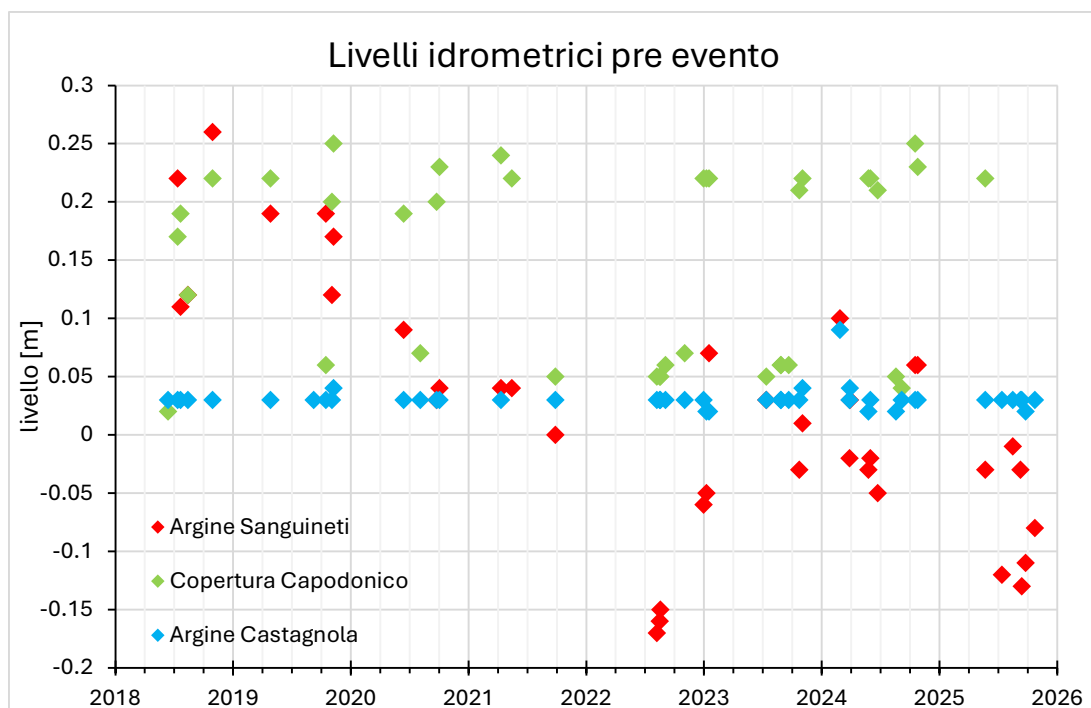


Figure 3.5 - Livelli idrometrici pre-evento misurati di sensori comunali negli eventi selezionati

Nella sezione di Argine Castagnola la quota del fondo alveo è ben identificabile e si attesta intorno a 0.03 m.

Nella sezione di Argine Sanguineti è presente una tendenza decrescente piuttosto discontinua e non compatibile con l'annuale pulizia dell'alveo svolta dal comune tra giugno e luglio, si decide per cui di non stimare la curva di deflusso per questo idrometro non avendo a disposizione informazioni più dettagliate per condurre un'indagine risolutiva.

Nella sezione di Copertura Campodonico l'apparente forte rumore è legato alla morfologia dell'alveo che passa da naturale ad artificiale in prossimità del sensore stesso. La platea in calcestruzzo ha un'iniziale contropendenza che crea un avvallamento di circa 21 cm (Figure 3.7) che nei periodi più secchi si svuota per poi riempirsi nuovamente con l'arrivo della prima parte di piena, passata la quale la pozza rimane colma (Figure 3.6). Tale gradino è stato opportunamente modellato in HEC-RAS, ottenendo quindi la quota dello zero idrometrico nel modello coincidente con quella del sensore, essendo che l'installazione è in mezzeria, circa al di sopra del punto più profondo.

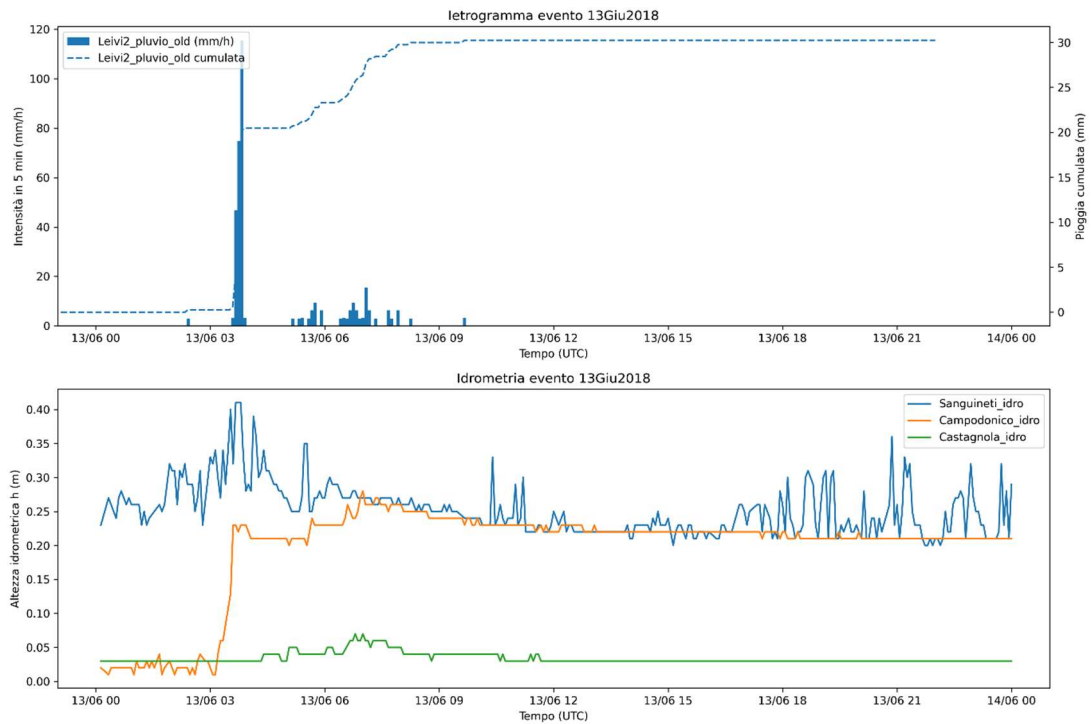


Figure 3.6 - Idrogramma di piena del 13 giugno 2018

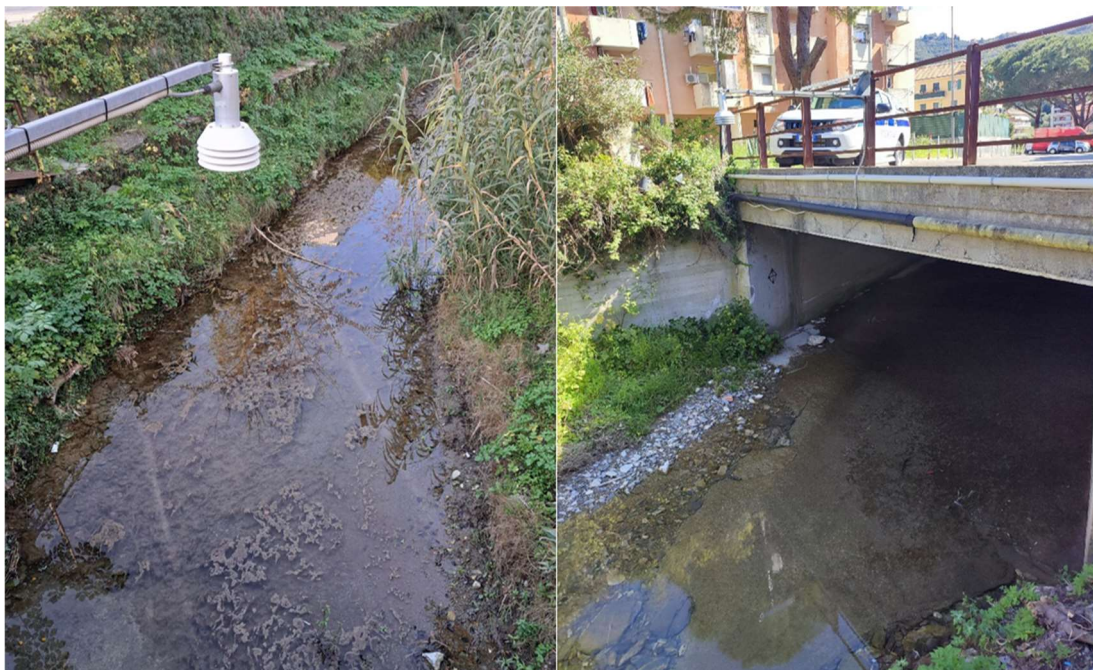


Figure 3.7 - Sito d'installazione dell'idrometro di Copertura Campodonico e relativo avvallamento

L'idrometro di Argine Castagnola è stato installato in argine, e per ottenere la reale quota dello zero idrometrico è necessario fare una stima del dislivello tra il punto in cui il sensore esegue la misura e il punto di quota minima a centro alveo da cui parte la scala di deflusso modellata (Figure 3.8). Non potendo usufruire di rilievi più

dettagliati si esegue questa collimazione sulla base del rilievo topografico con cui è stato costruito il modello, e conoscendo lo sbraccio del sensore rispetto al coronamento del muro d'argine.

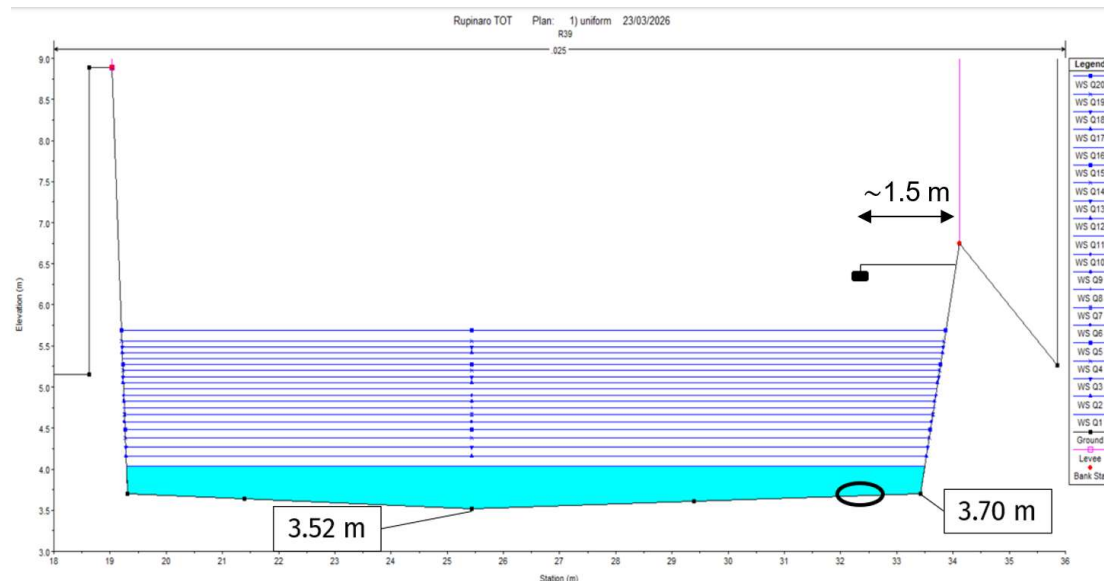


Figure 3.8 - Sezione dell'idrometro Argine Castagnola nel modello HEC-RAS

I due punti, richiamati in Figure 3.8 con la quota slm, sono il fondo in centro alveo e la base del muro d'argine destro, il cui dislivello è di 18 cm. Il punto di misura del quale si sta stimando la quota è distante circa 1 m dalla base del muro e la distanza tra il fondo alveo e il muro è circa 8 m. Supponendo una pendenza circa uniforme del fondo (Figure 3.9) la quota del punto su cui mira l'idrometro ha una quota di 3.67 m slm. Se si considera la misura idrometrica del fondo secondo l'idrometro, che si assesta sui 3 cm, si ottiene uno zero idrometrico ad una quota di 3.64 m slm.

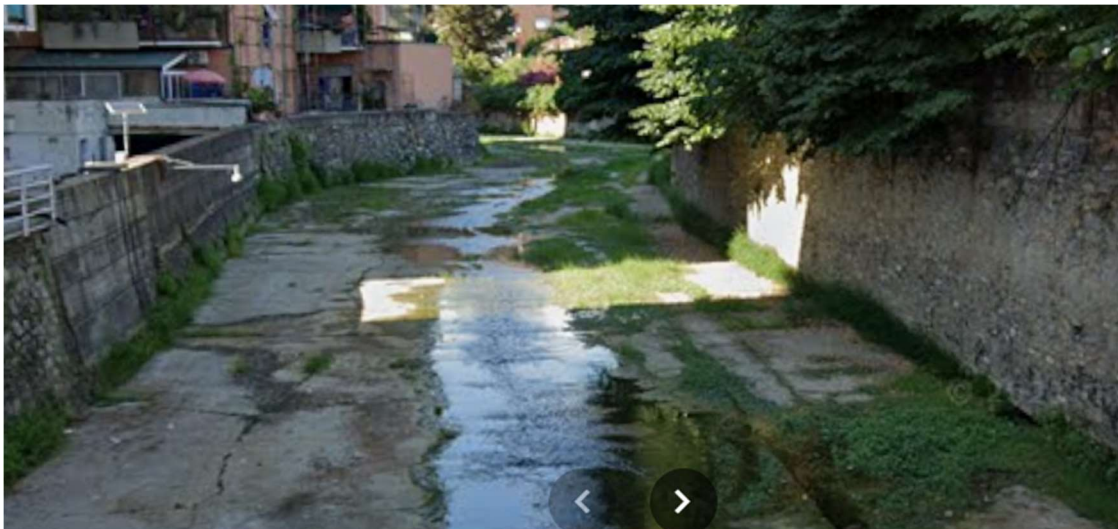


Figure 3.9 - Conformazione dell'alveo nell'intorno dell'idrometro di Argine Castagnola (vista dal ponte di Via Castagnola - Street view di Google Maps)

In funzione delle considerazioni appena fatte si definisce la quota degli zeri idrometrici dei sensori della rete comunale (Tabella 3-3).

Idrometro	Misura fondo [m]	Quota fondo HEC-RAS [m slm]	Quota zero idrometrico stimata [m slm]
Copertura Campodonico	0.21	10.08	10.29
Argine Sanguineti	variabile	12.71	n.c.
Argine Castagnola	0.03	3.52	3.64

Tabella 3-3 - Quote degli zeri idrometrici

Le curve di deflusso native ottenute dalla modellazione in HEC-RAS vengono per cui traslate della differenza tra la quota del fondo modellato e quella dello zero idrometrico stimato (Figure 3.10, Figure 3.11).

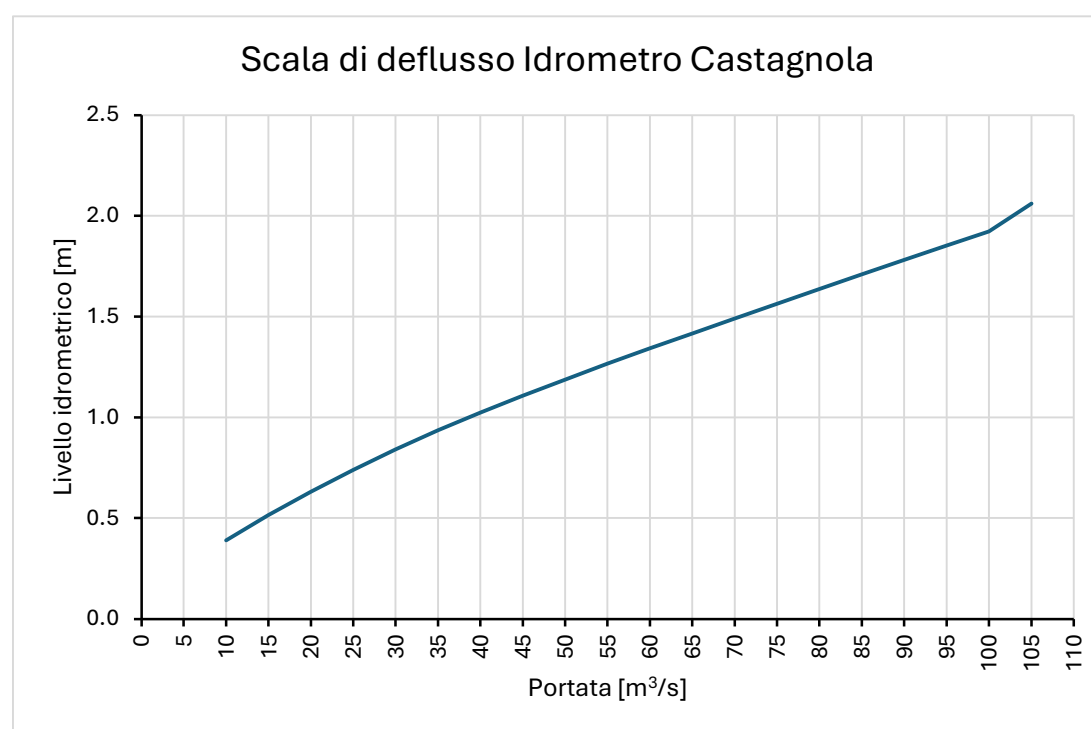


Figure 3.10 - Scala di deflusso stimata dell'idrometro di Argine Castagnola

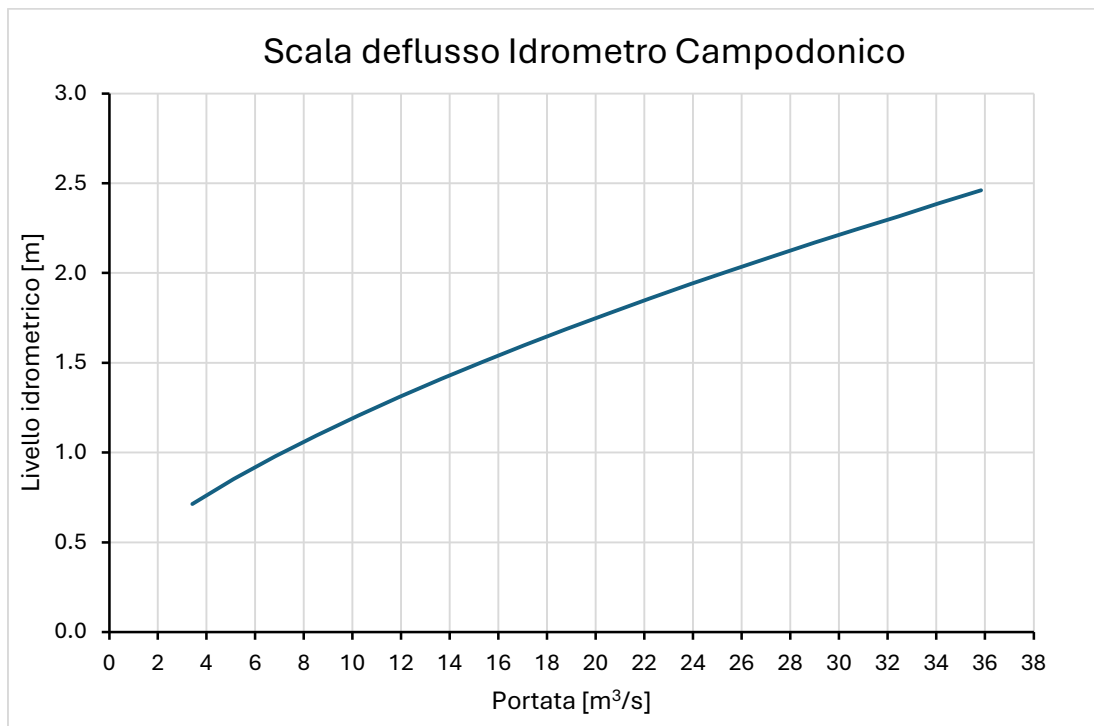


Figure 3.11 - Scala di deflusso stimata dell'idrometro di Copertura Campodonico

4 Validazione con gli eventi osservati

L'uniformità del contributo unitario all'interno del bacino è un'ipotesi che ha permesso di legare le caratteristiche idrauliche dei vari tratti modellati in un unico scenario di piena. È possibile verificarne la validità controllando che il rapporto tra i picchi di piena osservati sia uguale a quello delle relative aree drenate.

Vengono quindi impiegate le scale di deflusso ottenute al capitolo precedente per stimare i picchi di piena degli eventi più severi, selezionando solamente quelli in cui gli idrometri di Argine Castagnola e di Copertura Campodonico abbiano misurato almeno il livello corrispondente al primo scenario modellato, ovvero rispettivamente 0.39 m e 0.71 m (Tabella 4-1 e Figure 4.1).

L'evento del 3 novembre 2019 presenta due picchi distinti in cui entrambi superano il primo scenario modellato, vengono per cui considerati entrambi.

evento	Copertura Campodonico		Argine Castagnola	
	H _{max}	Q _{max}	H _{max}	Q _{max}
	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]
29-ott-18	0.86	5.3	0.65	20.9
03-nov-19 (1)	0.78	4.3	0.56	16.8
03-nov-19 (2)	0.85	5.1	0.62	19.1
02-ott-20	0.94	6.3	0.7	23.2
11-apr-21	1.03	7.5	0.73	24.5
30-dic-22	0.77	4.1	0.51	14.6
23/24-ott-23	1.52	15.4	1.06	41.7
17-ott-24	1.4	13.4	1.04	41.1
06-mag-25	0.96	6.6	0.64	18.2

Tabella 4-1 - Picchi di piena degli eventi più intensi convertiti in portata

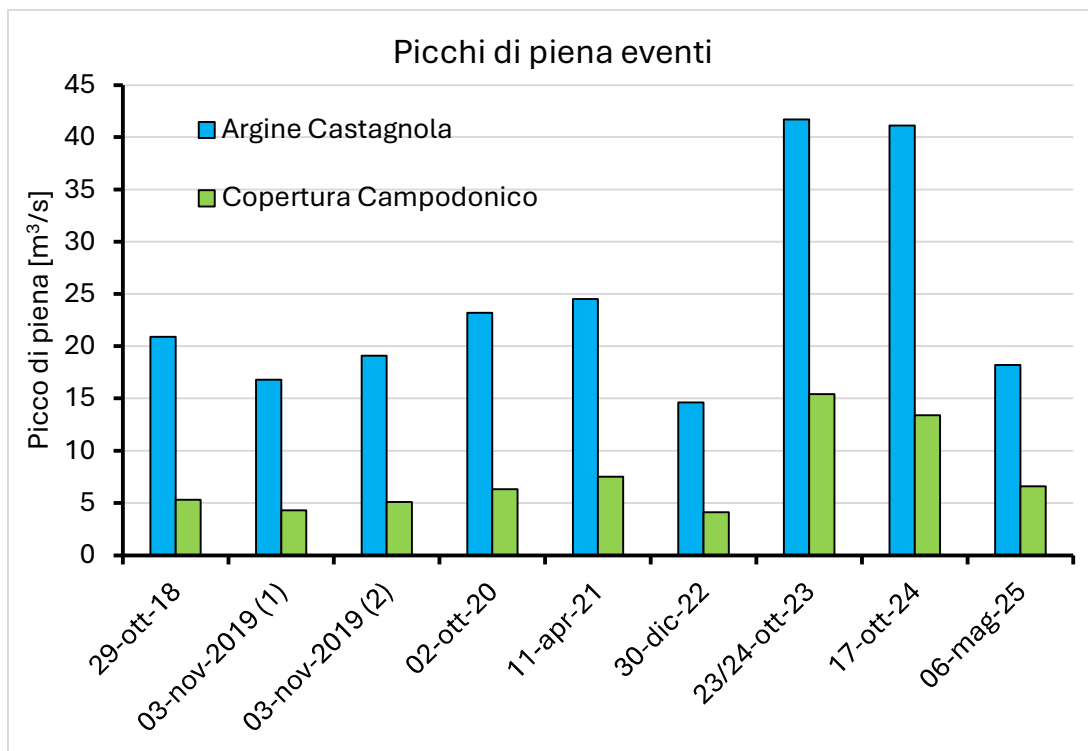


Figure 4.1 - Picchi di piena degli eventi che raggiungono almeno il primo scenario di piena modellato

4.1 Verifica contemporaneità dei picchi di piena

Affinché i valori di picco registrati nelle diverse sezioni possano essere confrontati, è necessario verificare che essi siano riferibili alla medesima onda di piena e che gli eventuali ritardi di propagazione risultino compatibili con le caratteristiche idrauliche del reticolo. Si vanno per cui a visualizzare gli andamenti nel tempo delle altezze idrometriche degli eventi selezionati e non le portate (non avendo a disposizione la curva di deflusso univoca per l'idrometro di Sanguineti non è possibile lavorare sull'idrogramma di piena). Le serie storiche antecedenti al 2023 sono state estratte dal database gestionale della rete di monitoraggio e presentano una risoluzione temporale di 4 minuti. In alcuni eventi sono inoltre presenti dati mancanti, talvolta anche in prossimità del colmo di piena. Per gli eventi più recenti sono stati invece utilizzati direttamente i dati registrati dai datalogger, caratterizzati da una risoluzione temporale di 2 minuti e privi di lacune nei periodi analizzati.

Si riportano gli idrogrammi con uno zoom di un'ora intorno al picco (Figure 4.2, Figure 4.3, Figure 4.4, Figure 4.5, Figure 4.6, Figure 4.7, Figure 4.8, Figure 4.9, Figure 4.10).

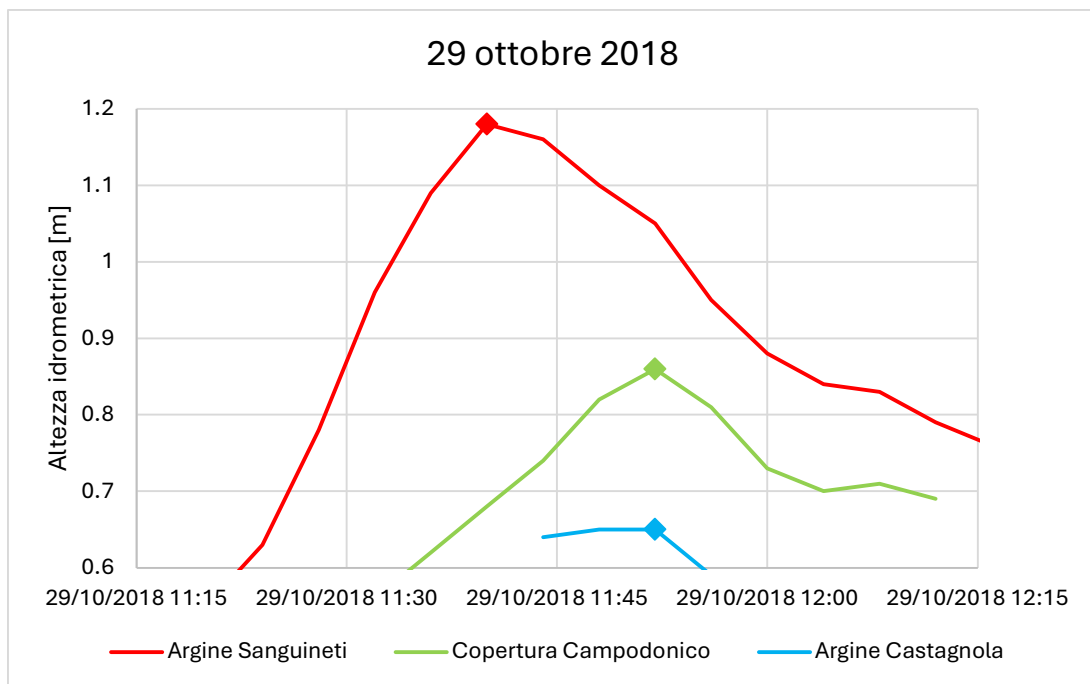


Figure 4.2 - Idrogramma di piena del 29/10/2018

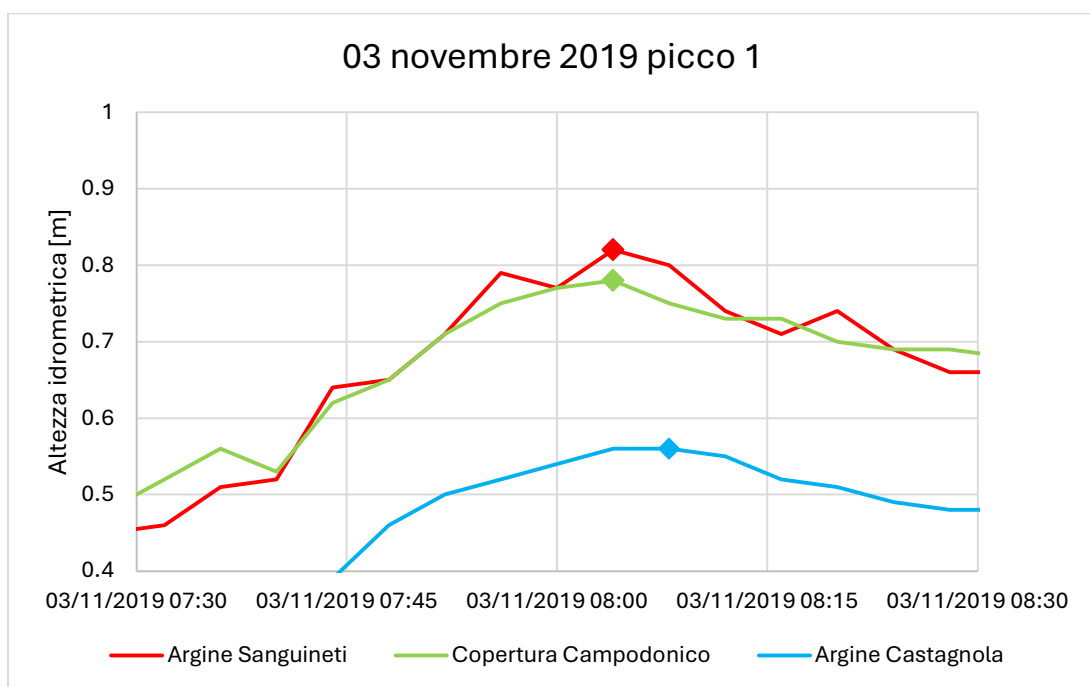


Figure 4.3 - Idrogramma di piena del primo picco del 3/11/2019

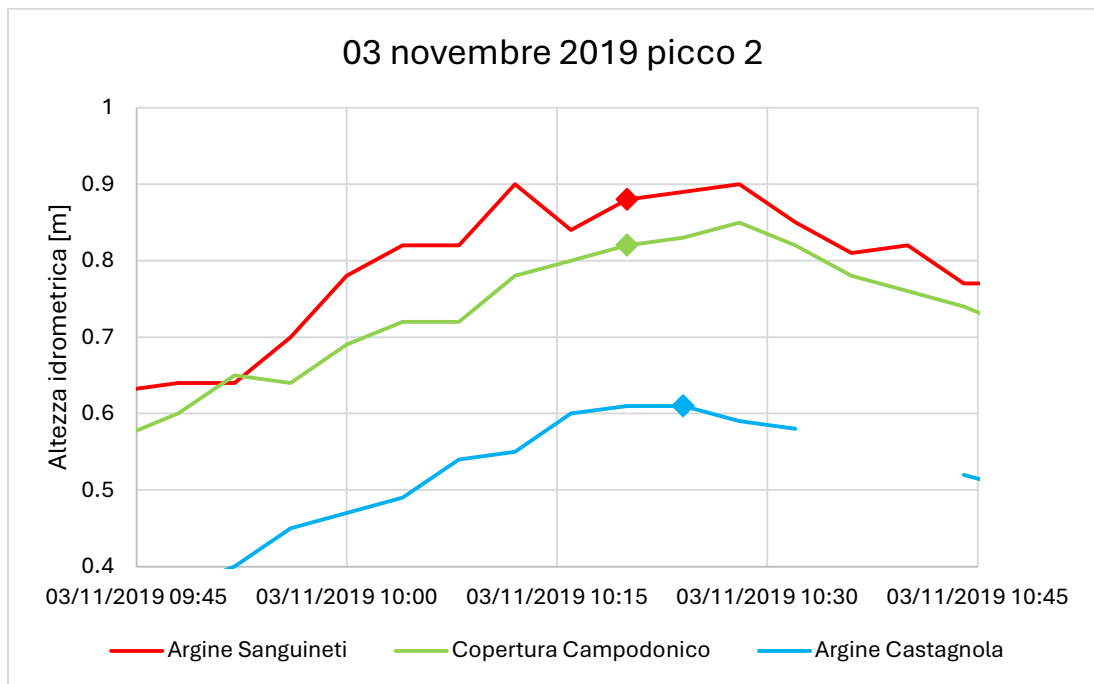


Figure 4.4 - Idrogramma di piena del primo picco del 3/11/2019

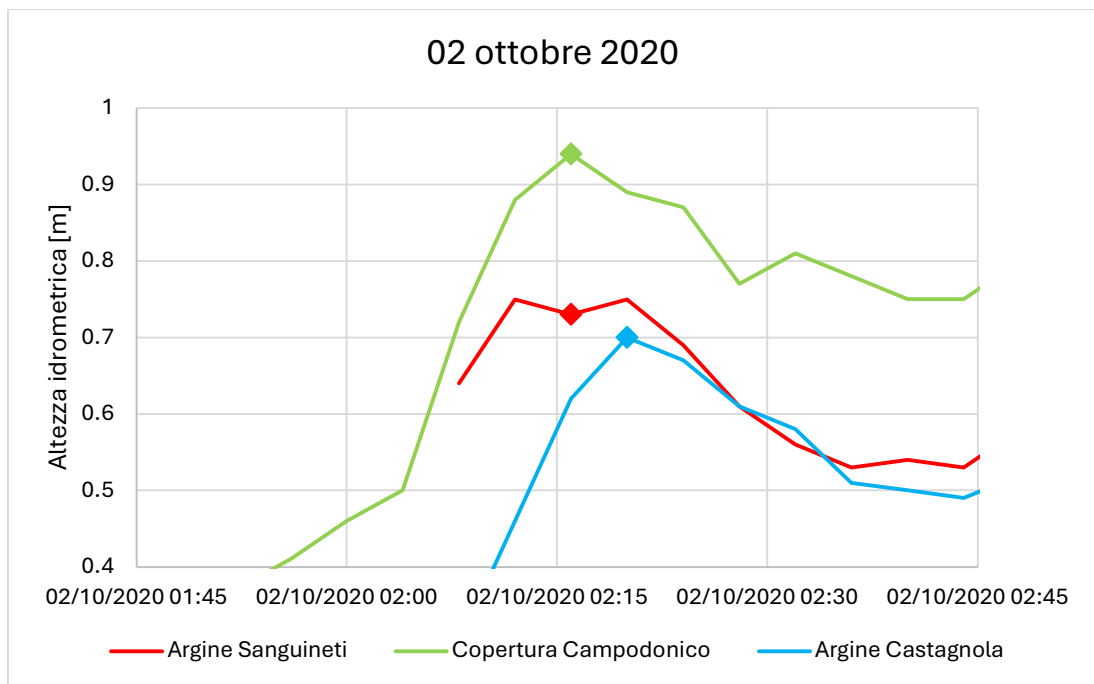


Figure 4.5 - Idrogramma di piena del 2/10/2020

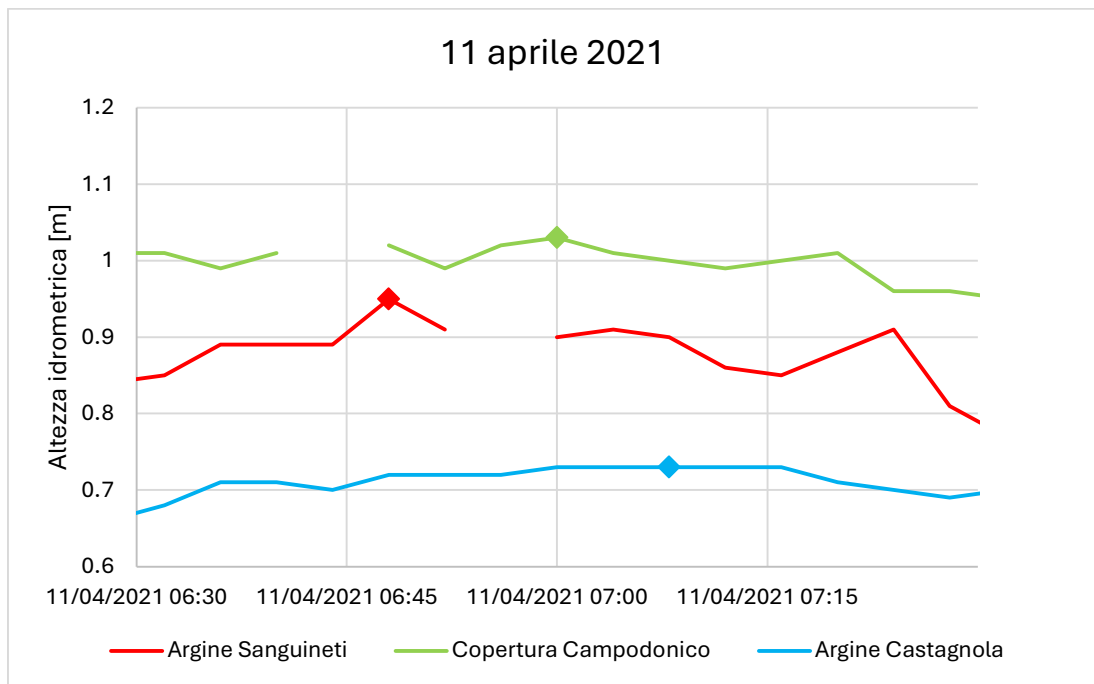


Figure 4.6 - Idrogramma di piena dell'11/04/2021

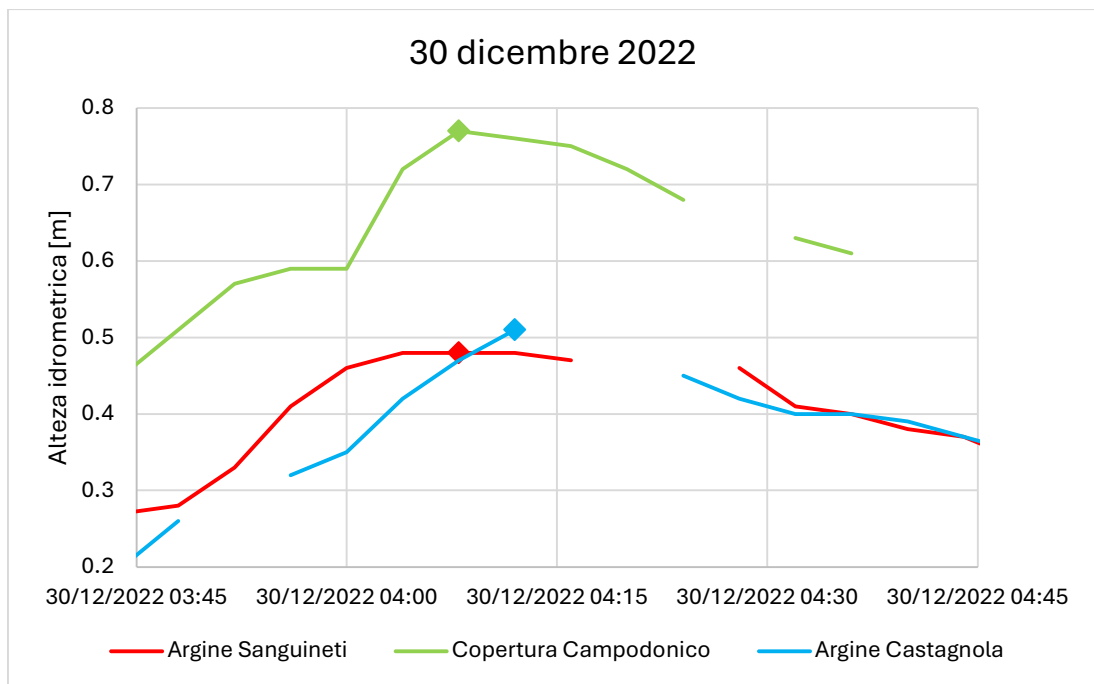


Figure 4.7 - Idrogramma di piena del 30/12/2022

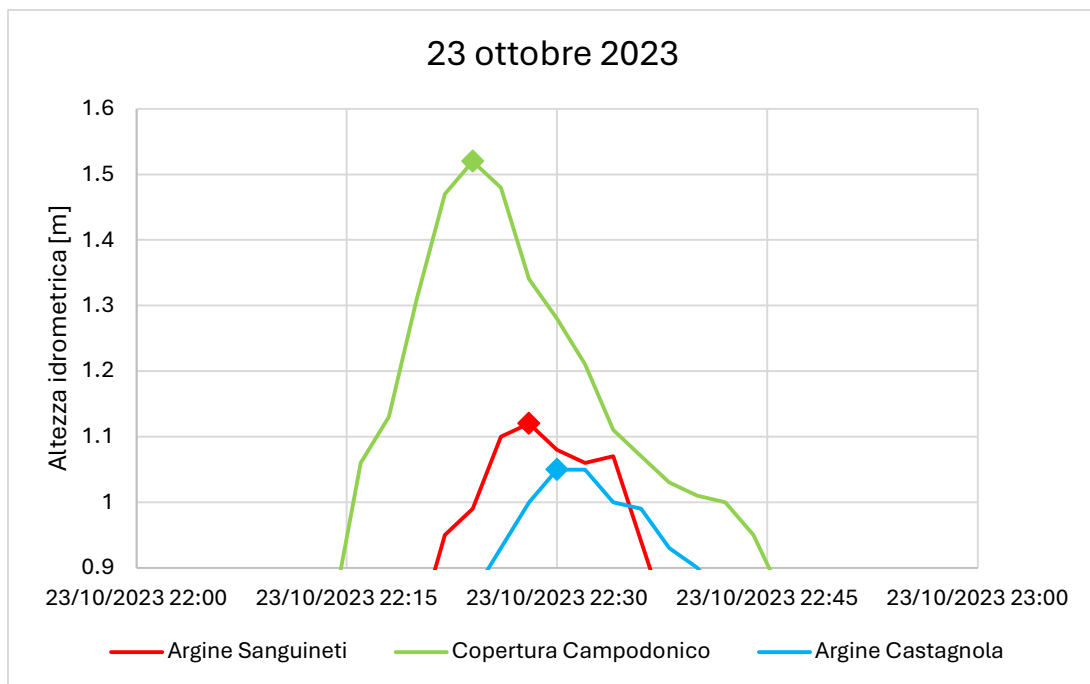


Figure 4.8 - Idrogramma di piena del 23/10/2023

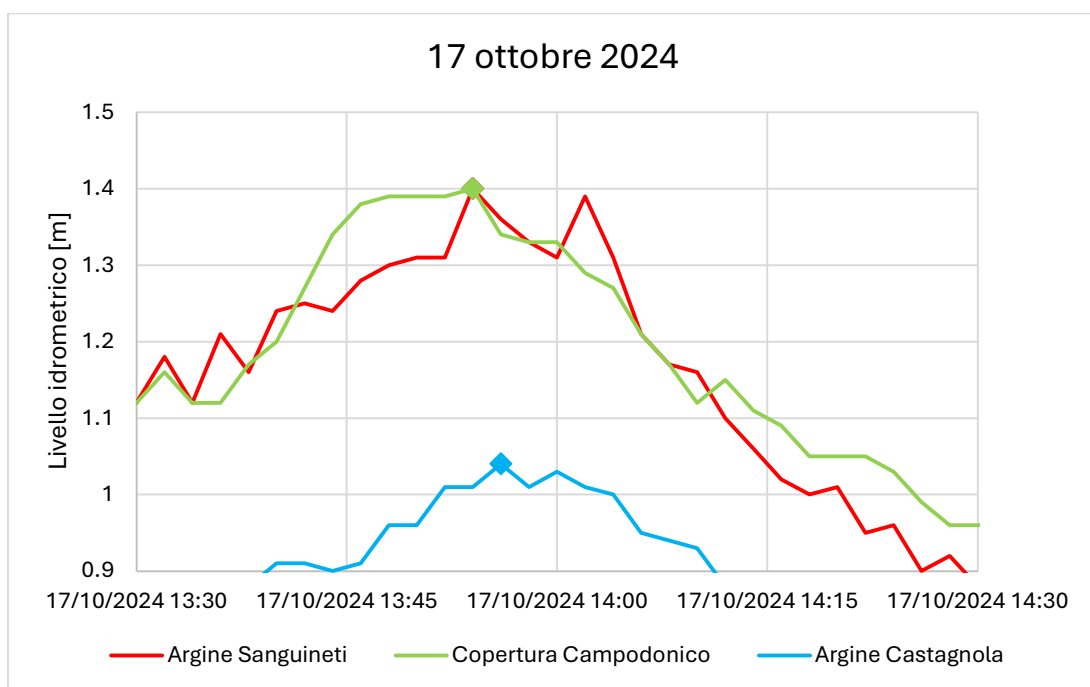


Figure 4.9 - Idrogramma di piena del 17/10/2024

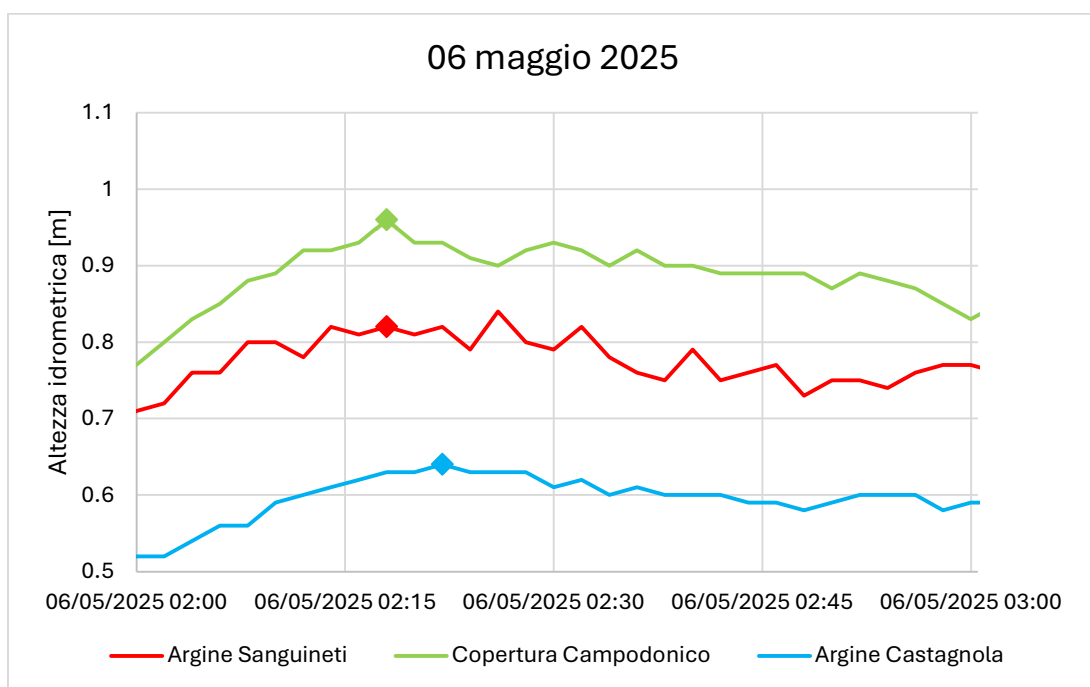


Figure 4.10 - Idrogramma di piena del 6/05/2025

Certi eventi tra quelli selezionati non hanno dei picchi ben identificabili con la stessa risoluzione del dataset. Anche per via di oscillazioni turbolente del pelo libero questi non sono nitidi. Tra gli eventi esaminati quelli in cui è possibile ben identificare ragionevolmente il picco sono: 29 ottobre 2018, primo picco del 3 novembre 2019, 2 ottobre 2020, 23 ottobre 2023 e 17 ottobre 2024.

Si riporta nella Tabella 4-2 l'orario UTC dei picchi identificati per questi ultimi eventi, e i relativi shift temporali rispetto al transito del picco alla sezione di Castagnola:

evento	Orario picco [hh:mm UTC]			Shift [hh:mm]	
	Campodonico	Sanguineti	Castagnola	shift Camp	shift Sang
29-ott-18	11:52	11:40	11:52	00:00	00:12
03-nov-19 (1)	08:04	08:04	08:08	00:04	00:04
02-ott-20	02:16	02:16	02:20	00:04	00:04
23-ott-23	22:24	22:28	22:32	00:08	00:04
17-ott-24	13:54	13:54	13:56	00:02	00:02
Media				00:04	00:05

Tabella 4-2 - Orari UTC dei picchi di piena e relativi shift rispetto a Castagnola

L'analisi dei tempi di occorrenza dei picchi è stata condotta con il solo scopo di verificare la correlabilità temporale dei massimi registrati nelle diverse sezioni e quindi

la possibilità di confrontarne i valori nell'ambito della verifica dell'ipotesi di distribuzione uniforme del contributo unitario di piena sul bacino. A tal fine sono stati considerati gli eventi caratterizzati da un andamento sufficientemente definito degli idrogrammi, per i quali l'individuazione visiva del colmo risultasse ragionevolmente univoca. I ritardi medi osservati tra le sezioni Campodonico-Castagnola e Sanguineti-Castagnola risultano rispettivamente pari a circa 3,6 e 5,2 minuti. Tali valori devono essere interpretati tenendo conto della risoluzione temporale delle misure, pari a 4 minuti per la maggior parte del periodo di osservazione (2 minuti per gli eventi più recenti), nonché della presenza occasionale di dati mancanti e dell'incertezza intrinseca nell'individuazione del picco in presenza di massimi poco pronunciati o caratterizzati da brevi plateau.

Nonostante tali limitazioni, i ritardi osservati risultano contenuti e coerenti sia con le distanze tra le sezioni lungo il reticolo idrografico (circa 1100 m tra Campodonico e Castagnola e circa 1430 m tra Sanguineti e Castagnola) sia con le velocità di corrente stimate mediante modellazione idraulica per le condizioni di piena analizzate che risultano tra 2 e 4 m/s lungo i tratti d'interesse. Considerando inoltre che la durata caratteristica degli eventi è dell'ordine di alcune ore, le differenze temporali rilevate possono essere ritenute trascurabili ai fini del presente studio. I massimi individuati nelle diverse sezioni sono pertanto considerati riferibili alla medesima onda di piena e risultano confrontabili per l'analisi dei rapporti tra le portate al colmo e le rispettive aree drenate.

4.2 Verifica distribuzione delle precipitazioni nel bacino

A questo punto viene verificato che l'intensità media delle precipitazioni correlata al picco di piena di ciascun evento sia circa uniforme all'interno del bacino. Conoscendo la dislocazione dei pluviometri nel bacino e l'orario in cui si è registrato il picco si calcola l'intensità media della pioggia durante il tempo di concentrazione riferito ad ogni tronco contenente gli idrometri installati lungo i due tributari principali. Per il tempo di concentrazione (Tabella 4-3) si utilizza la formula per i piccoli bacini liguri sviluppata da Fondazione CIMA:

$$t_{conc_i} = 0.25 + 0.27 \cdot \sqrt{S_i [km^2]} = [minuti] \quad (3)$$

tronco	S [km ²]	T _{conc} [minuti]
5	3.58	46
4	5.49	53

Tabella 4-3 - Tempi di concentrazione dei tributari

I due tempi di concentrazione dei due sottobacini tributari vengono approssimati a multipli di 10 minuti, risoluzione delle mappe di cumulata radar che ARPAL ha messo a disposizione per questa tesi. Si dispone di cinque dataset pluviometrici a risoluzione 5 minuti i cui relativi sensori sono dislocati uniformemente nell'intorno del bacino.

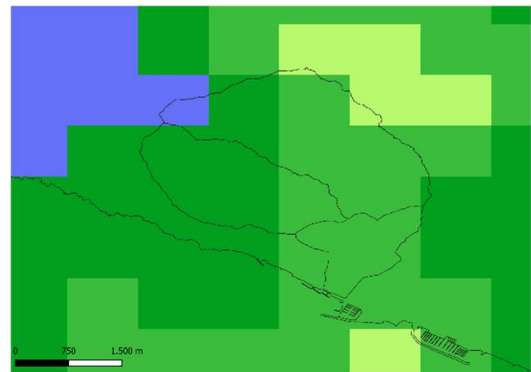
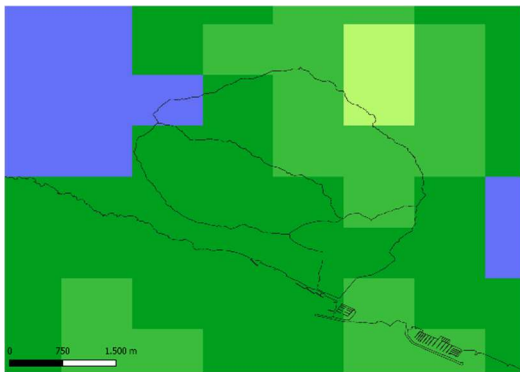
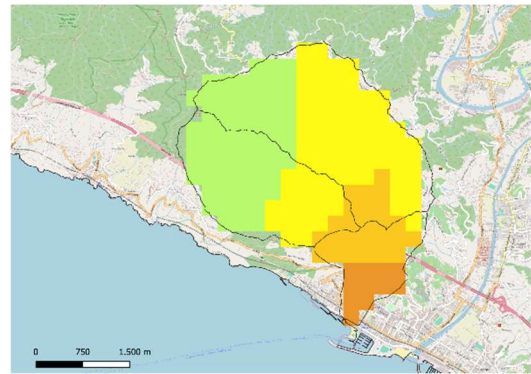
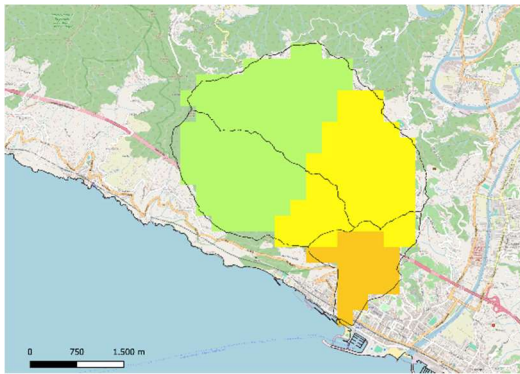
La precipitazione media areale è stata stimata mediante interpolazione spaziale dei dati pluviometrici puntuali con metodo IDW (Inverse Distance Weighting), utilizzando una ponderazione proporzionale all'inverso del cubo della distanza. I valori medi sui singoli sottobacini sono stati successivamente ricavati mediante analisi zonale in ambiente QGIS. Si impiega inoltre la cumulata dei dati radar sullo stesso intervallo temporale come verifica della distribuzione della pioggia su una scala maggiore. La cumulata della pioggia sarà quindi calcolata nell'arco del tempo di concentrazione, approssimato a 50 minuti per entrambi i sottobacini, a monte dell'orario di passaggio del colmo di piena approssimato anch'esso a multiplo di 10 minuti, vedi Tabella 4-4 (orari UTC):

evento	Campodonico	Sanguineti
29-ott-18	11:50	11:40
03-nov-19 (1)	08:00	08:00
03-nov-19 (2)	10:20	10:20
02-ott-20	02:20	02:20
11-apr-21	07:00	06:50
30-dic-22	04:10	04:10
23-ott-23	22:20	22:30
17-ott-24	13:50	13:50
06-mag-25	02:20	02:20

Tabella 4-4 - Orari UTC picchi di piena arrotondati a 10 minuti

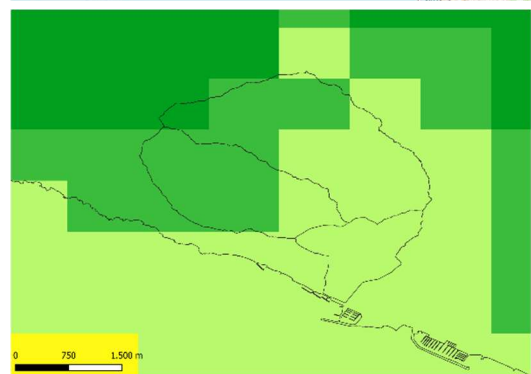
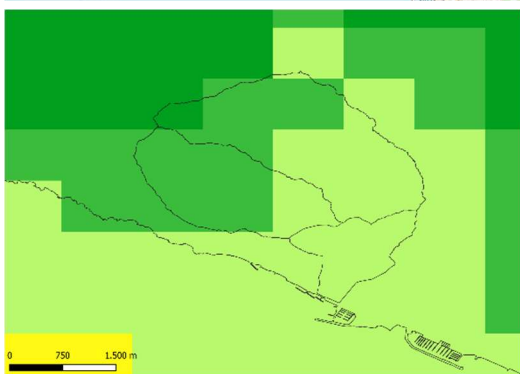
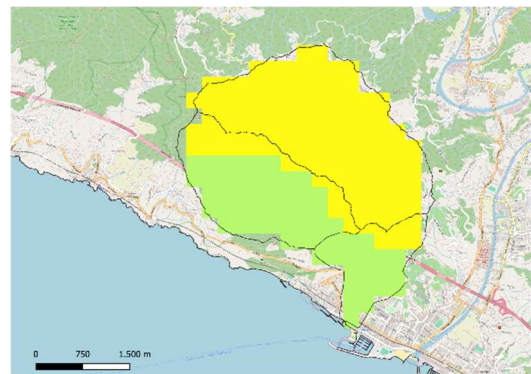
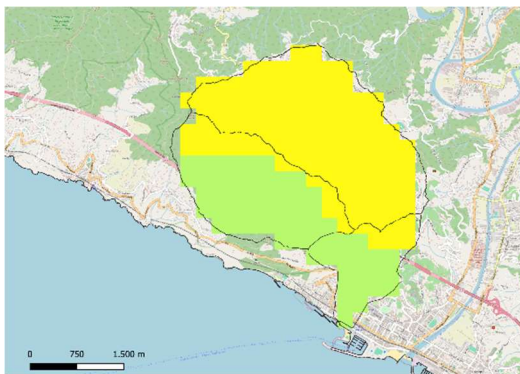
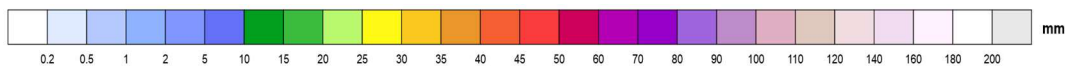
Vengono riportate le mappe delle precipitazioni cumulate nei 50 minuti precedenti il passaggio dei picchi nelle due sezioni: a sinistra le mappe interpolate dei pluviometri e le cumulate radar ARPAL (non sempre disponibili) riferite al picco di Campodonico e a destra quelle riferite al picco di Sanguineti (Tabella 4-5).

Si ricorda che le cumulate radar hanno l'unico scopo di stimare la distribuzione delle precipitazioni, non sono una misura delle piogge, parametro che può essere misurato direttamente solo da un pluviometro.



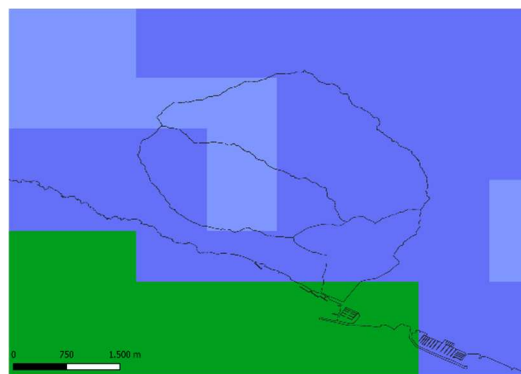
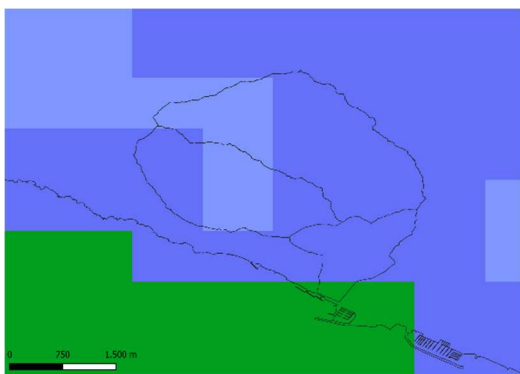
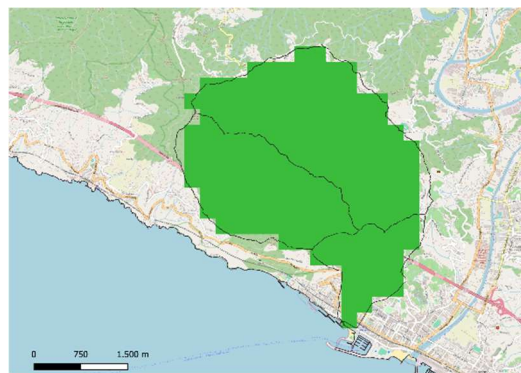
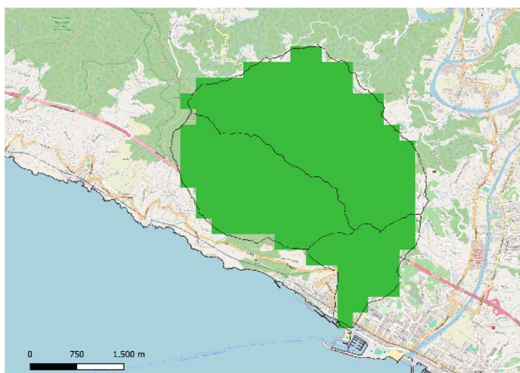
Picco Campodonico: 29/10/2018 11:50
UTC

Picco Sanguineti: 29/10/2018 11:40
UTC



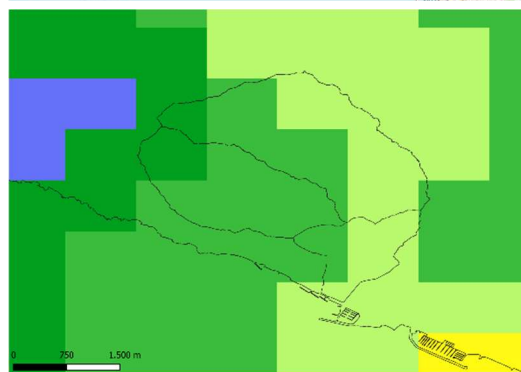
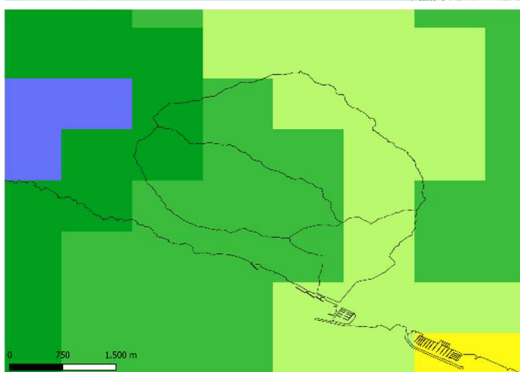
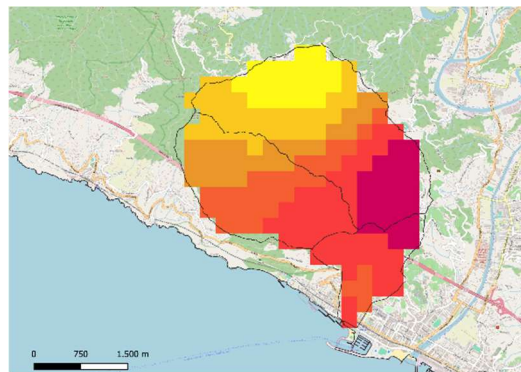
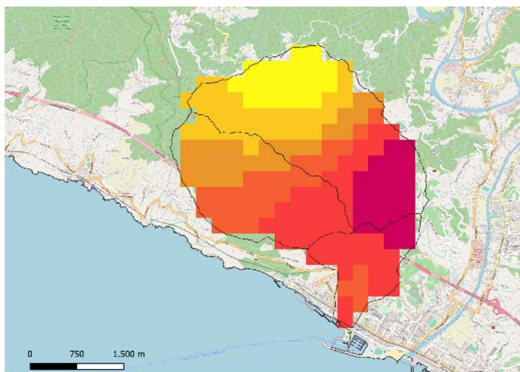
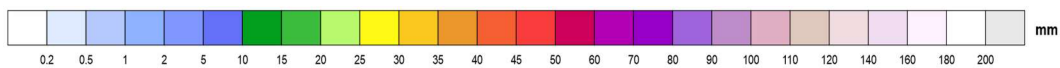
Picco Campodonico: 03/11/2019 08:00
UTC

Picco Sanguineti: 03/11/2019 08:00
UTC



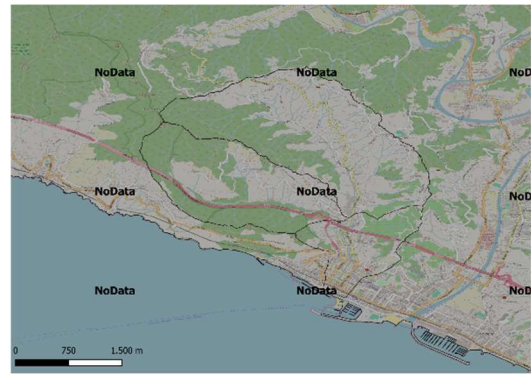
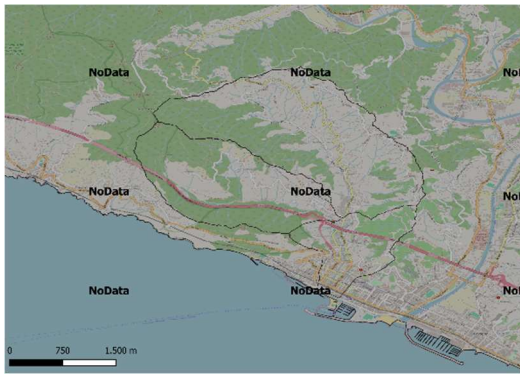
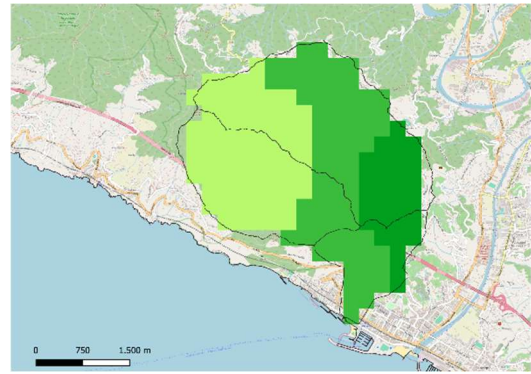
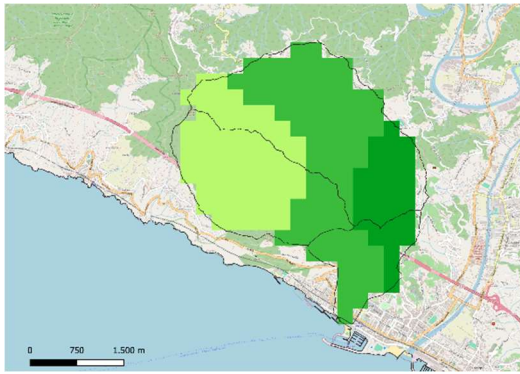
Picco Campodonico: 03/11/2019 10:20
UTC

Picco Sanguineti: 03/11/2019 10:20
UTC



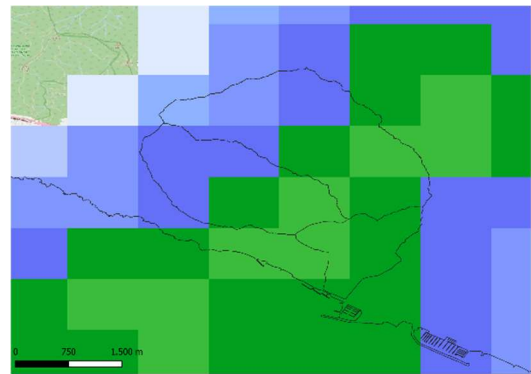
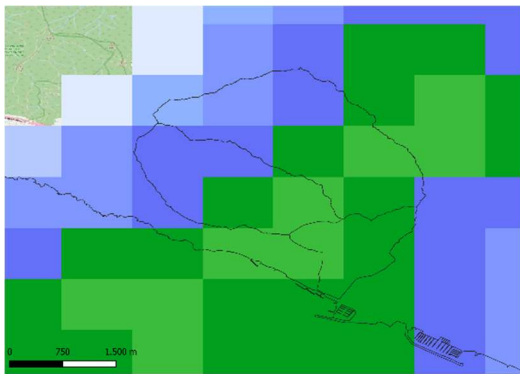
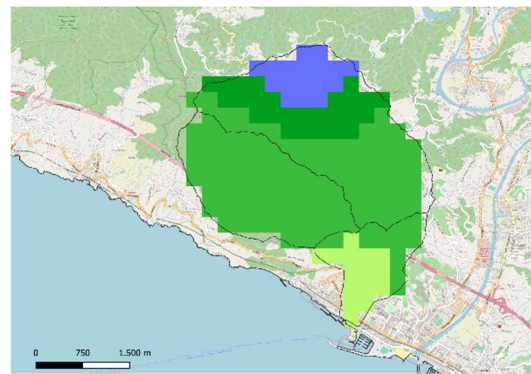
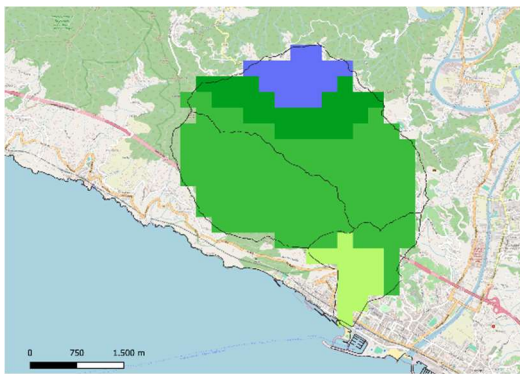
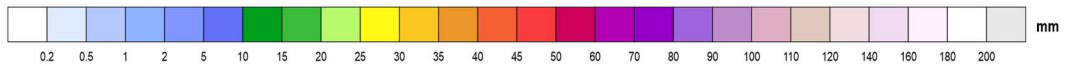
Picco Campodonico: 02/10/2020 02:20
UTC

Picco Sanguineti: 02/10/2020 02:20
UTC



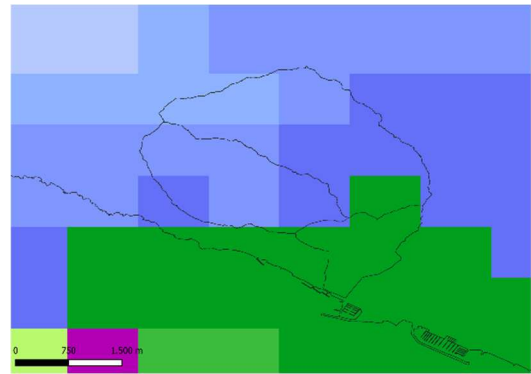
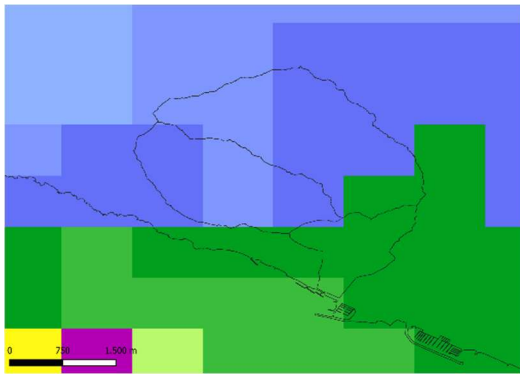
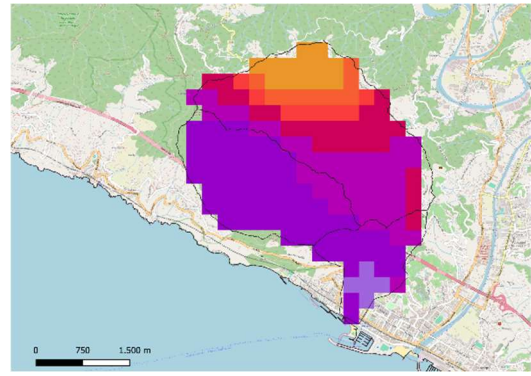
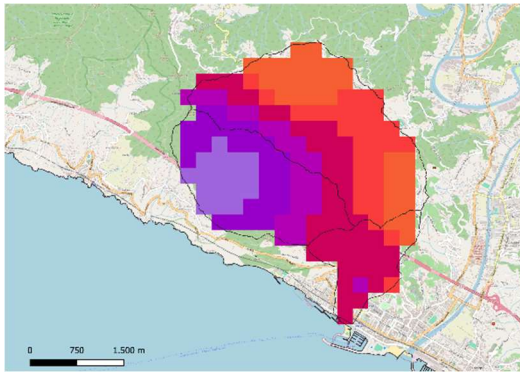
Picco Campodonico: 11/04/2021 07:00
UTC

Picco Sanguineti: 11/04/2021 06:50
UTC



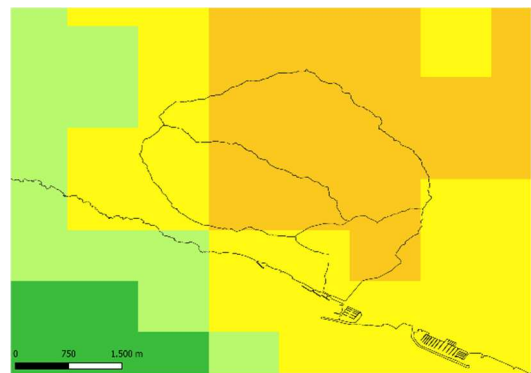
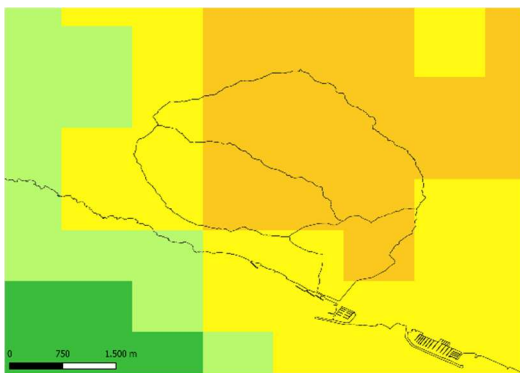
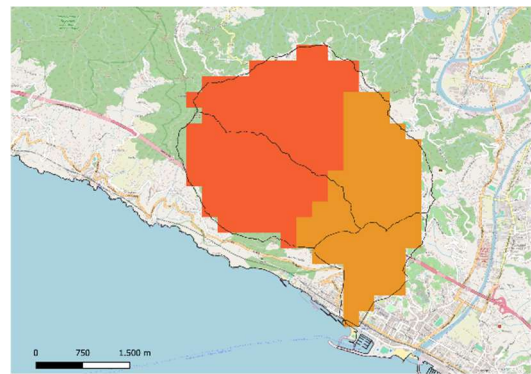
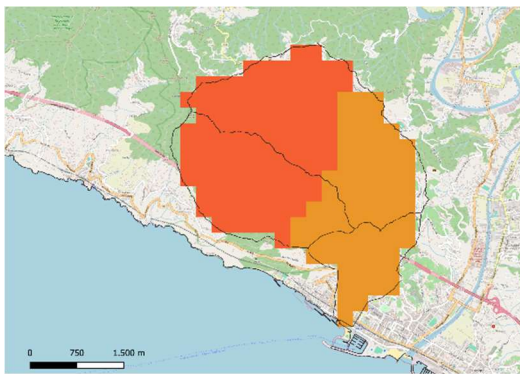
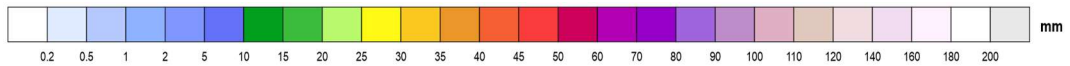
Picco Campodonico: 30/12/2022 02:10
UTC

Picco Sanguineti: 30/12/2022 02:10
UTC



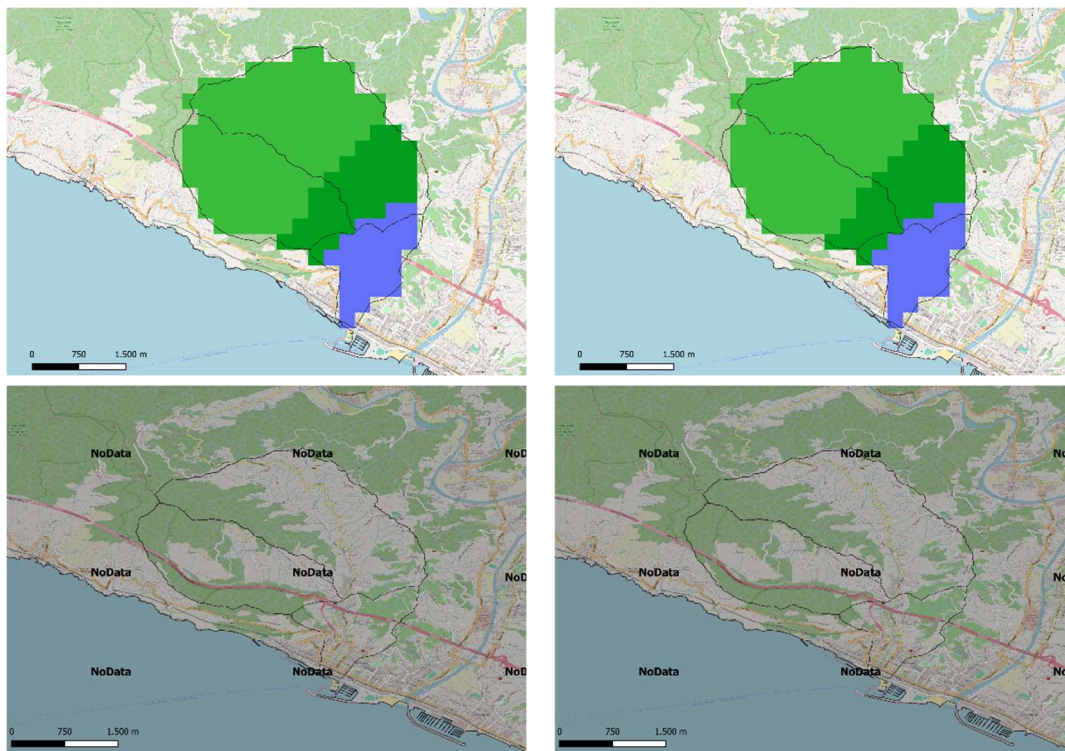
Picco Campodonico: 23/10/2023 22:20
UTC

Picco Sanguineti: 23/10/2023 22:30
UTC



Picco Campodonico: 17/10/2024 13:50
UTC

Picco Sanguineti: 17/10/2024 13:50
UTC



Picco Campodonico: 06/05/2025 02:20
UTC

Picco Sanguineti: 06/05/2025 02:20
UTC

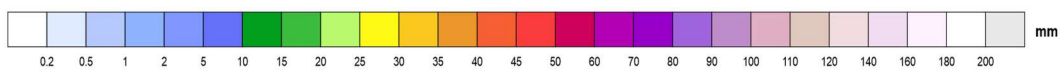


Tabella 4-5 - Mappe di precipitazione interpolate da pluviometri (sopra) e da radar ARPAL (sotto)

Si nota come la distribuzione delle precipitazioni sia sempre circa uniforme tranne nell'evento del 23 ottobre 2023 in cui le piogge più intense si sono concentrate nel sottobacino del rio Campodonico. Ciò è confermato anche dalla distribuzione delle precipitazioni secondo il radar ARPAL e dal calcolo delle intensità di pioggia medie all'interno dei due sottobacini (Figure 4.11).

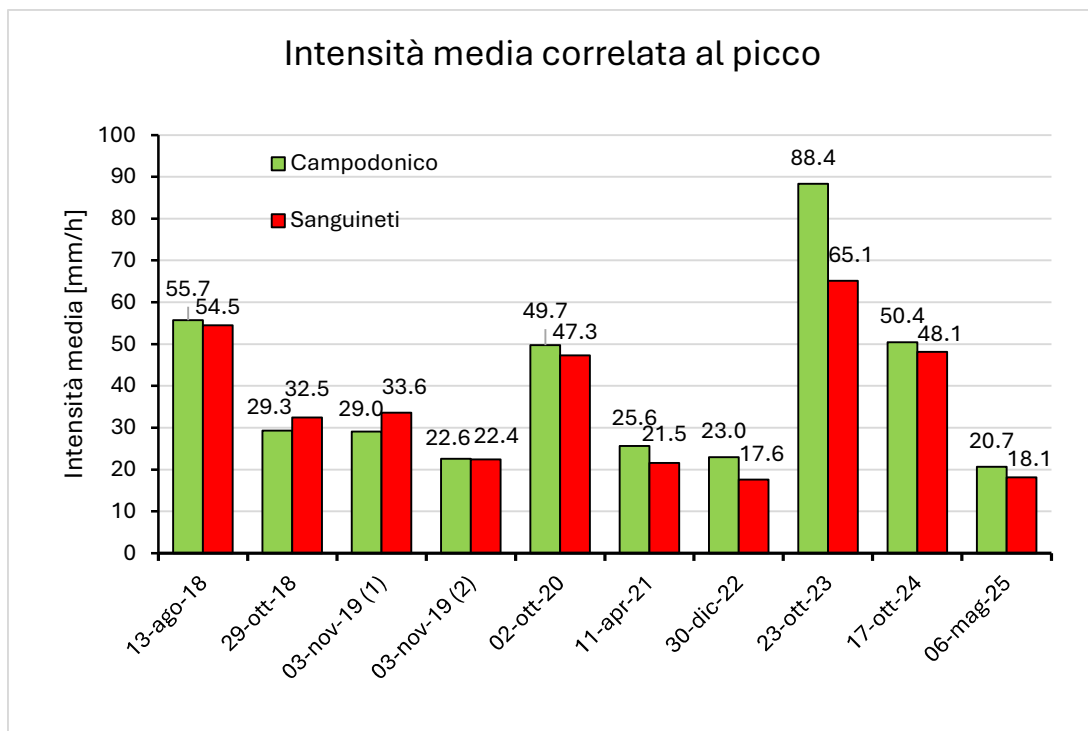


Figure 4.11 - Intensità media correlata al picco di piena nei due sottobacini

Ad eccezione dell'evento del 23 ottobre 2023, le precipitazioni mostrano una distribuzione spaziale sostanzialmente uniforme tra i due sottobacini considerati. Tale evidenza supporta l'utilizzo degli eventi selezionati per la verifica dell'ipotesi di contributo unitario uniforme.

4.3 Verifica dell'ipotesi di contributo unitario uniforme

Verificata la contemporaneità dei picchi di piena e l'uniformità della pioggia all'interno del bacino durante gli eventi più intensi, si procede a verificare l'ipotesi di contributo unitario uniforme.

Per fare ciò si controlla che il rapporto dei picchi nei due idrometri per cui è stato possibile stimare la curva di deflusso sia lo stesso delle aree drenate dalle due sezioni:

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{S_a}{S_b} = \text{costante} \quad (4)$$

$$\frac{\frac{Q_a}{Q_b}}{\frac{S_a}{S_b}} = 1 \quad (5)$$

Tale controllo, per via delle approssimazioni legate al rilievo dell'alveo, ai dati a disposizione e alle metodologie applicate, viene condotto accettando una tolleranza del 20%.

Di seguito si riporta la Tabella 4-6 con l'esito dei controlli di proporzionalità, secondo cui i rapporti dei vari eventi deve essere uguale a 1.

evento	Copertura Campodonico [m ³ /s]	Argine Castagnola [m ³ /s]	$\frac{Q_5}{Q_1} / \frac{S_5}{S_1}$
29-ott-18	5.3	20.9	0.75
03-nov-19 (1)	4.3	16.8	0.75
03-nov-19 (2)	5.1	19.1	0.79
02-ott-20	6.3	23.2	0.80
11-apr-21	7.5	24.5	0.90
30-dic-22	4.1	14.6	0.83
23-ott-23	15.4	41.7	1.09
17-ott-24	13.4	41.1	0.96
06-mag-25	6.6	18.2	1.07
MEDIA			0.88

Tabella 4-6 - Verifica dell'uniformità del contributo unitario

I risultati ottenuti mostrano una buona coerenza con l'ipotesi di proporzionalità tra portata al colmo e area drenata. Il valore medio del parametro di verifica risulta pari a 0.88, con scostamenti generalmente contenuti entro la tolleranza del 20% assunta per tenere conto delle incertezze associate alla ricostruzione delle scale di deflusso, alla definizione degli zeri idrometrici e alla qualità dei dati disponibili. Tali approssimazioni hanno probabilmente portato ad una sovrastima delle portate a Castagnola o una sottostima alla sezione di Copertura Campodonico.

4.4 Gli eventi del 23/10/2023 e 17/10/2024

Tra tutti gli eventi selezionati si vuole concentrare l'analisi sugli eventi più intensi che hanno dato luogo alle piene più severe e alle risposte più rapide: il 23 ottobre 2023 e il 17 ottobre 2024.

Nel primo di questi due eventi la distribuzione delle piogge è stata decisamente non uniforme e sbilanciata verso i quadranti più sud-orientali del bacino, cioè il sottobacino del rio Campodonico, come evidenziano i dati pluviometrici dell'evento (Figure 4.12). Questo emerge anche dal rapporto di verifica dei contributi unitari, che risulta 1.09, superiore di oltre il 20% rispetto alla media. Tale comportamento risulta coerente con la distribuzione spaziale delle precipitazioni osservata durante l'evento, caratterizzata da accumuli significativamente maggiori nel sottobacino del rio Campodonico rispetto al resto del bacino.

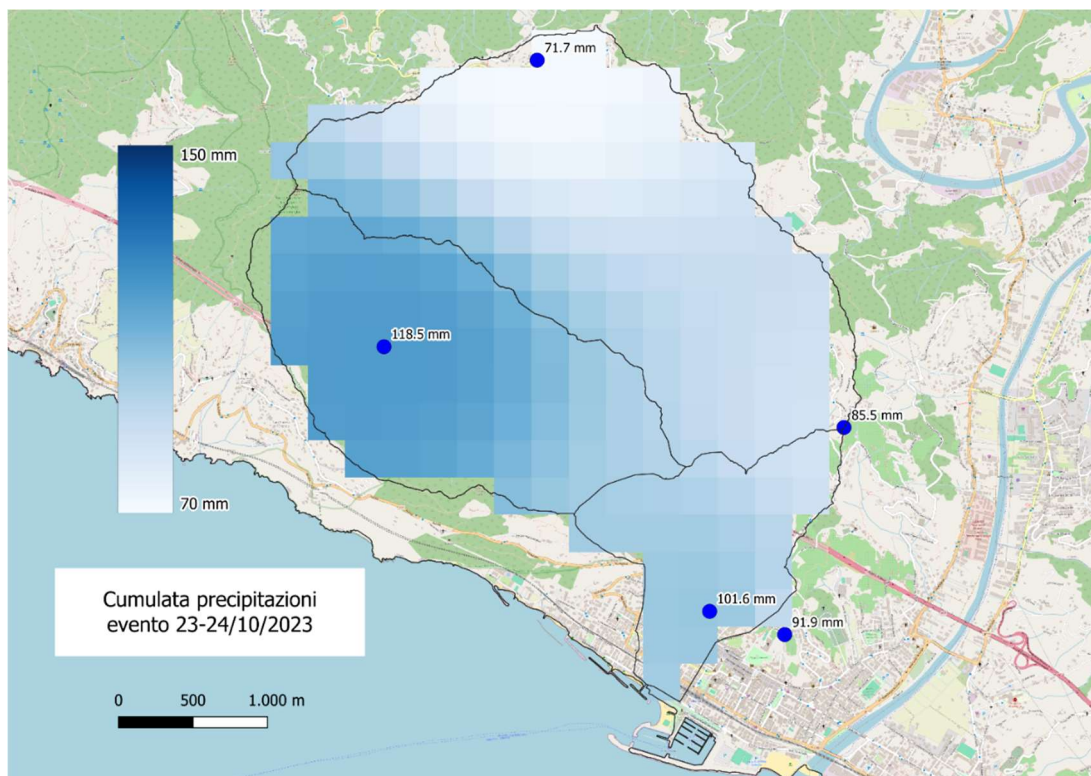


Figure 4.12 - Distribuzione della pioggia nell'evento del 23/10/2023

Nell'evento del 17 ottobre 2024 si sono registrate precipitazioni piuttosto uniformi all'interno del bacino così come confermano i pluviometri durante l'intero evento (Figure 4.13). Anche il rapporto di controllo dei contributi unitari pari a 0.96 tende molto a 1 e contemporaneamente segue la tendenza al ribasso che la media suggerisce.

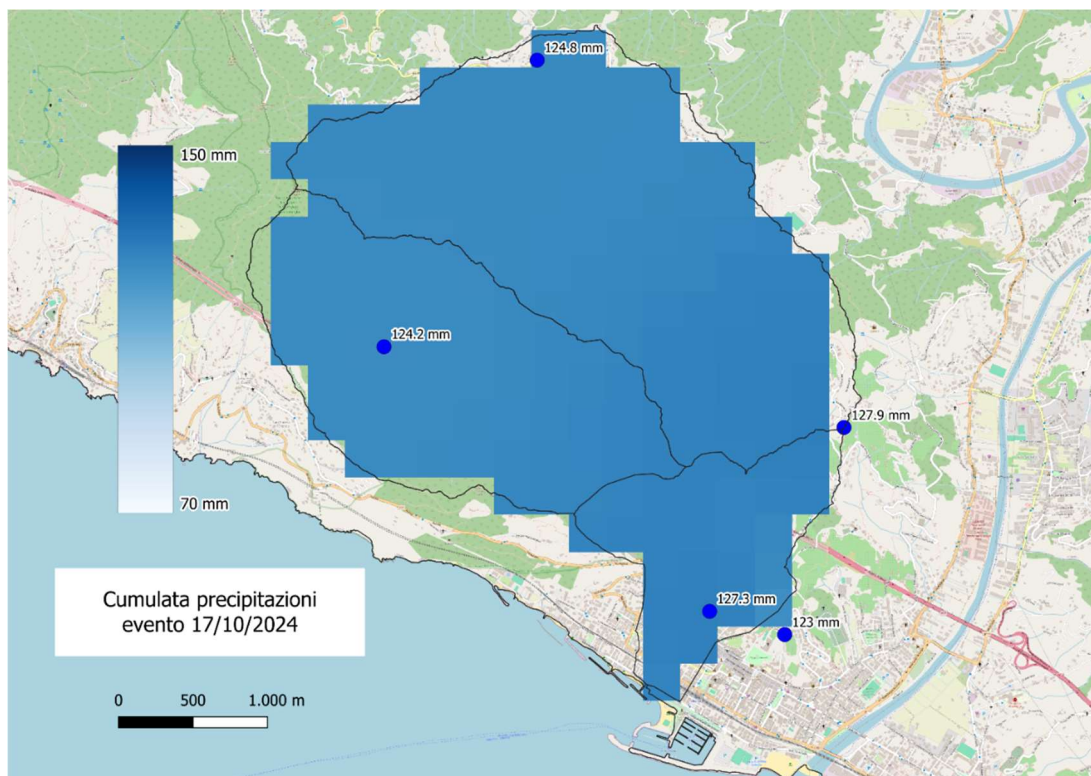


Figure 4.13 - Distribuzione della pioggia nell'evento del 17/10/2024

Gli eventi analizzati forniscono un riscontro osservativo favorevole alle ipotesi adottate nel presente studio, pur nel quadro delle incertezze associate alla qualità dei dati disponibili e alle semplificazioni introdotte nella modellazione.

5 Stima delle soglie critiche

Una volta verificata la coerenza delle ipotesi adottate e definite le relazioni tra livelli idrometrici e portate nelle sezioni monitorate, è possibile utilizzare il modello idraulico per individuare gli scenari di criticità lungo il reticolo del torrente Rupinaro e dei suoi principali tributari.

L'obiettivo dell'analisi è individuare, per ciascun tratto modellato, i valori di portata corrispondenti al raggiungimento di condizioni potenzialmente critiche dal punto di vista idraulico. Questo approccio permette di identificare per qualsiasi scenario il valore della quota del pelo libero in un qualsiasi altro punto del torrente. A tal fine sono state considerate sia le condizioni di esondazione spondale sia il raggiungimento delle quote critiche degli attraversamenti presenti lungo il reticolo, assumendo come livelli di riferimento la quota degli argini e quella dell'intradosso delle opere d'attraversamento. Per entrambe le tipologie di criticità sono stati inoltre valutati scenari caratterizzati da franchi residui pari a 1.0 m e 0.5 m.

5.1 Soglie di esondazione spondale

L'analisi dei profili idraulici simulati ha evidenziato che le condizioni più gravose per il superamento delle quote arginali si concentrano in alcuni tratti specifici del reticolo, caratterizzati da ridotte capacità di smaltimento o da particolari configurazioni geometriche dell'alveo.

I settori maggiormente vulnerabili risultano localizzati nei seguenti tratti (Figure 5.1):

- Tronco 1, R42 - R43 (station 615 m – 569 m) in sponda destra tra il ponte di Via Castagnola e quello di Via Descalzi (Figure 5.2);
- Tronco 2, R22 - R23 (station 558 m – 522 m) in sponda destra in Via dei Lertora (Figure 5.3);
- Tronco 4, S2-5 – S5 (station 667 m - 608 m) in sponda destra tra la passerella privata del civico 71 di Via S. Ruffino e la confluenza con il rio Rostio (Figure 5.4);

Per il tronco 5 non sono state individuate condizioni significative di esondazione spondale all'interno degli scenari simulati.

Per “station” si intende la distanza da valle verso monte lungo il modello HEC-RAS dell’asta del corso d’acqua.



Figure 5.1 - Tratti più vulnerabili ad esondazione spondale



Figure 5.2 - Vista dal ponte di Via Descalzi verso monte (tronco 1)



Figure 5.3 - Vista dal ponte di Via S.Pier di Canne verso valle (tronco 2)



Figure 5.4 - Vista dal ponte privato del civico 71 di Via S. Ruffino (tronco 4)

Le portate corrispondenti ai diversi livelli di criticità individuati sono riportate nella Tabella 5-1.

Tronco	Station [m]	franco 1 m	franco 0.5 m	esondazione
1	570 - 616	Q6	Q12	Q19
2	522 - 558	Q9	Q15	-
4	624 - 682	Q7	Q11	Q16

Tabella 5-1 - Tratti critici per esondazione spondale

5.2 Soglie di sormonto delle opere trasversali al corso d'acqua

Parallelamente è stata effettuata una verifica delle opere di attraversamento presenti lungo il reticolo, individuando per ciascun tronco i ponti e le coperture che raggiungono, per primi, condizioni di criticità.

Per i ponti a travata è stata assunta come quota di riferimento la minima quota dell'intradosso, mentre per i ponti ad arco è stato adottato il criterio previsto dal

Regolamento Regionale Liguria n. 3/2011, secondo cui il franco idraulico deve essere verificato su almeno i due terzi della luce libera dell'opera.

A tale scopo è stata sviluppata una procedura geometrica semplificata che consente di determinare la quota corrispondente ai due terzi della luce dell'arcata a partire dalle caratteristiche geometriche rilevate: ogni arcata si assume descrivere un arco di una circonferenza passante per l'intradosso della chiave di volta (assunta in mezzeria) e i due punti di appoggio tra spalla e pilone, che si assumono essere alla stessa quota, quella minima tra i due (Figure 5.5).

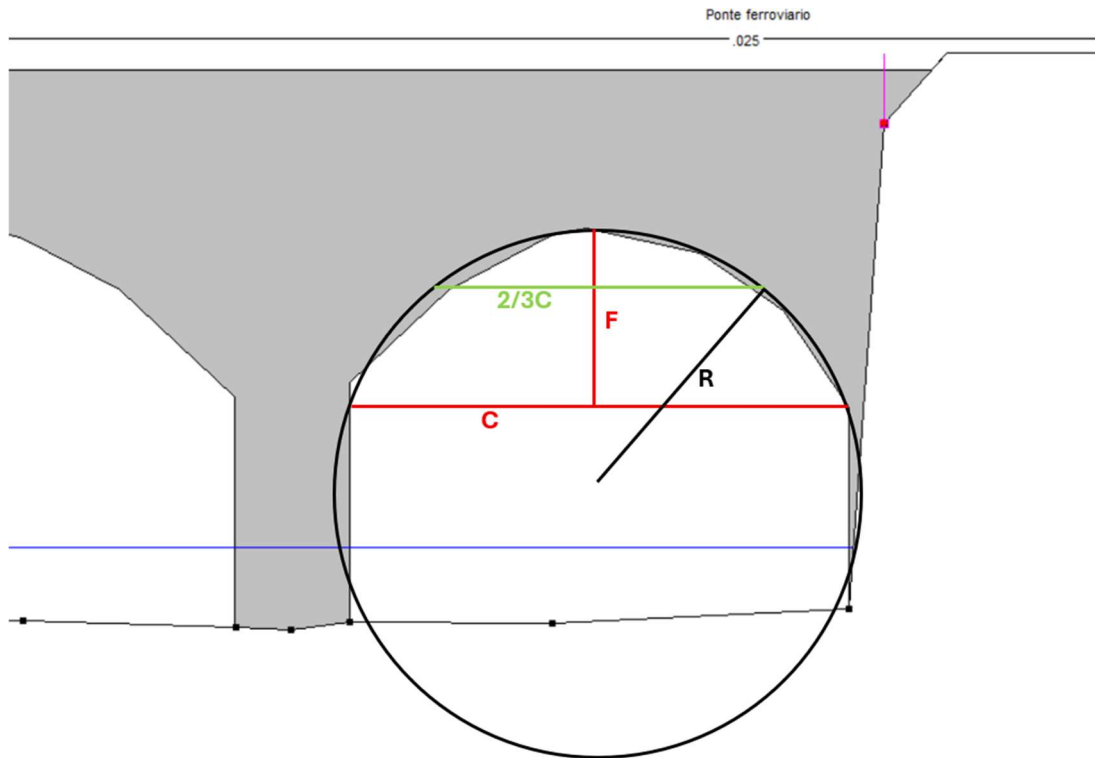


Figure 5.5 - Costruzione dell'arco di circonferenza per il ponte ferroviario

Conoscendo la lunghezza della corda L_C e della freccia L_F , si può ottenere la quota della corda $2/3C$ come:

$$Z_{2/3C} = Z_{volta} - \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{\left(\frac{2}{3}L_C\right)^2}{4}} \right) \quad (6)$$

Dove il raggio della circonferenza R è:

$$R = \frac{L_C^2}{8F} + \frac{L_F}{2} \quad (7)$$

I risultati dell'analisi hanno evidenziato che le opere maggiormente sensibili risultano essere (Tabella 5-2, Figure 5.6):

- Tronco 1, Via Castagnola (station 705 m, Figure 5.8) e Corso Italia (station 180 m, Figure 5.7);
- Tronco 2, Via S. Ruffino (station 922 m, Figure 5.9);
- Tronco 4, Ponte del civ 71 di Via S.Ruffino (station 667 m) e Hi-Lex (station 375 m, Figure 5.10);
- Tronco 5, copertura (station 15 m – 29 m, Figure 5.11);

Tronco	Ponte	Sezione	Franco 1 m	Franco 0.5 m	Sormonto
1	Via Castagnola	705	Q8	Q14	Q20
1	C.so Italia	180	Q4	Q9	Q15
2	Via S. Ruffino	922	Q7	Q13	Q20
4	Ponte civ 71	667	Q10	Q14	Q20
4	Hi-Lex	375	Q8	Q14	Q20
5	Copertura	15	Q8	Q13	Q19

Tabella 5-2 - Ponti critici a sormonto



Figure 5.6 - Ponti più vulnerabili al sormonto



Figure 5.7 - Ponte di Corso Italia (verso monte)



Figure 5.8 - Ponte di Via Castagnola (vista verso monte)



Figure 5.9 - Ponte di Via S. Ruffino (verso valle)



Figure 5.10 - Ponte Hi-Lex (verso valle)

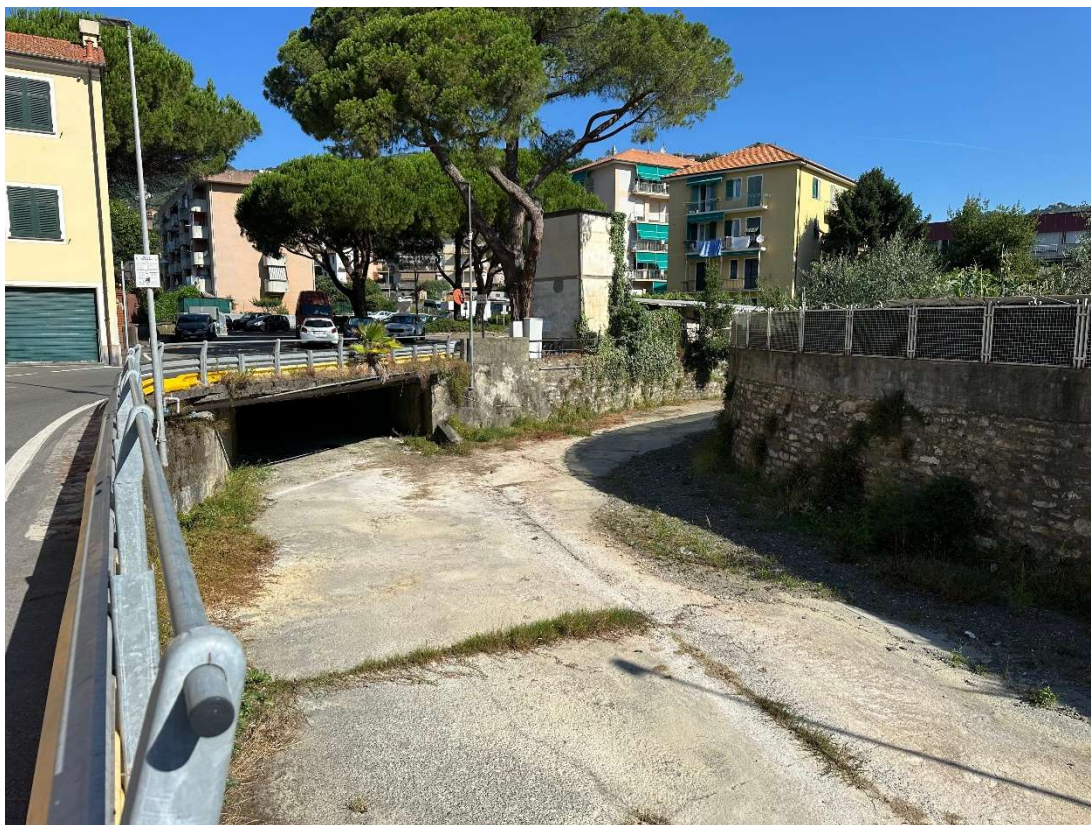


Figure 5.11 - Fine della copertura del rio Campodonico (verso monte)

5.2.1 La copertura del rio Campodonico

Le criticità all'interno della copertura sul rio Campodonico sono legate ad un restringimento negli ultimi 15 m in cui la sezione passa da 6.4 m di larghezza e 2.7 m di altezza a 4.9 m di larghezza e 2.3 m di altezza. Questo restringimento di sezione è dovuto ai resti del vecchio ponte di Via per Maxena demolito negli anni '60 (Figure 5.12, Figure 5.13, Figure 5.14).

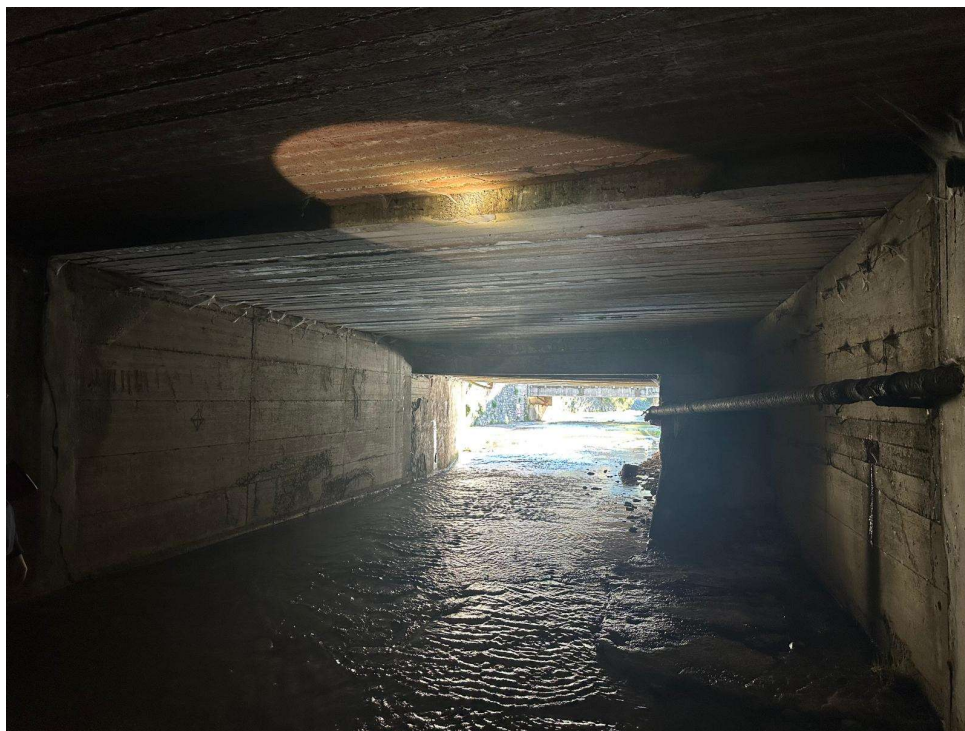


Figure 5.12 - Vista verso valle del brusco restringimento della copertura di rio Campodonico



Figure 5.13 - Vista verso valle del resto della spalla del vecchio ponte e relative travi



Figure 5.14 - Vista verso monte del sistema di travi nel tratto terminale della copertura

5.3 Le soglie nelle sezioni di misura

Si riporta una Tabella 5-3 riassuntiva di tutte le soglie identificate per ogni tronco modellato:

Tronco	Station/Ponte	Q_1m [m ³ /s]		Q_0.5m [m ³ /s]		Q_critica [m ³ /s]	
1	Via Castagnola	Q8	45	Q14	75	Q20	105
	570 – 616 (dx)	Q6	35	Q12	65	Q19	100
	C.so Italia	Q4	25	Q9	50	Q15	80
2	522 – 558 (dx)	Q9	45.79	Q15	73.27	-	-
	Via S. Ruffino	Q7	36.67	Q13	64.18	Q20	96.27
4	Ponte civ 71	Q10	28.97	Q14	39.51	Q20	55.31
	Hi-Lex	Q8	23.7	Q14	39.51	Q20	55.31
	624 – 682 (dx)	Q7	20.99	Q11	31.49	Q16	44.61
5	Copertura	Q8	15.4	Q13	23.96	Q19	34.23

Tabella 5-3 - Soglie riassuntive per ogni tronco

Per avere il massimo margine di sicurezza si prende la minore soglia critica per ciascun tratto del corso d'acqua, riportando tale valore ad ogni sezione strumentata al fine di poter associare ad ogni valore di livello idrometrico osservato una soglia

corrispondente ad un noto scenario di criticità idraulica in altri punti del reticolo modellato (Tabella 5-4).

Tronco	Sezioni/Ponte	Q_1m [m ³ /s]		Q_0.5m [m ³ /s]		Q_critica [m ³ /s]	
1	C.so Italia	25	Q4	50	Q9	80	Q15
2	Via S. Ruffino	36.67	Q7	64.18	Q13	96.27	Q20
4	624 – 682 (dx)	20.99	Q7	31.49	Q11	44.61	Q16
5	Copertura	15.4	Q8	23.96	Q13	34.23	Q19

Tabella 5-4 - Ponti più critici a sormonto

Individuati gli scenari delle soglie più critiche, si osserva che quello più conservativo è quello del ponte di Corso Italia, nel primo tronco modellato. Si riporta tale scenario e i relativi franchi nelle scale di deflusso dei due idrometri (Figure 5.15, Figure 5.16).

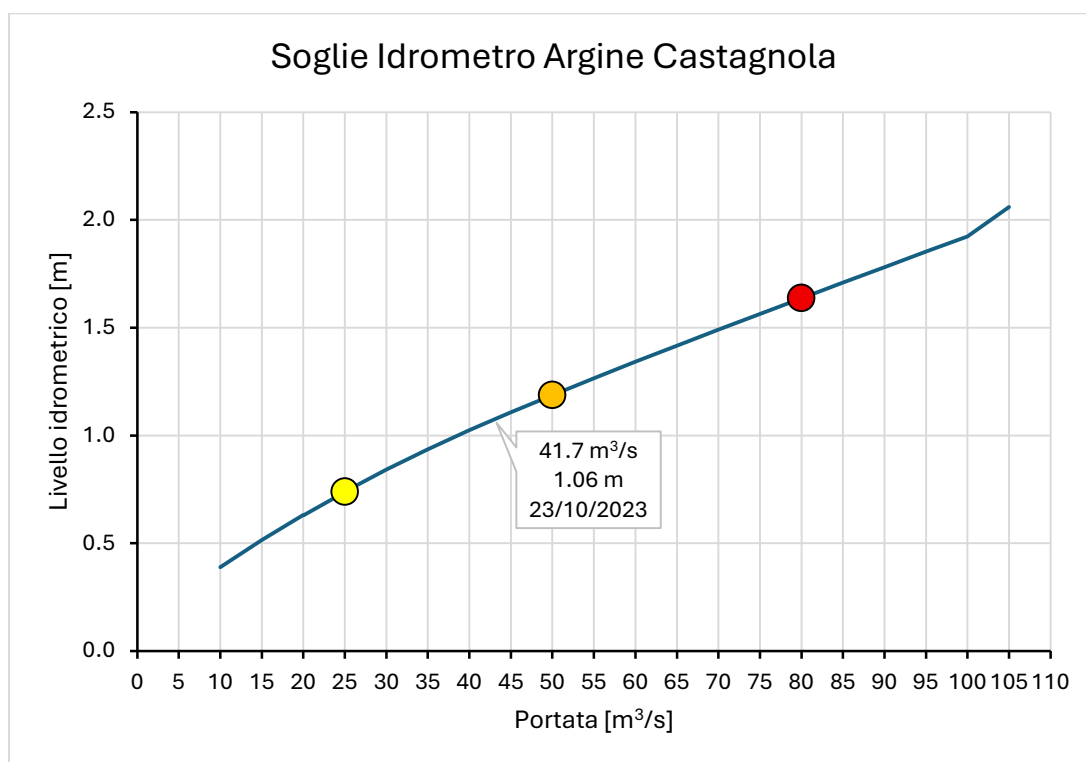


Figure 5.15 - Soglie critiche e massimo registrato all'idrometro di Argine Castagnola

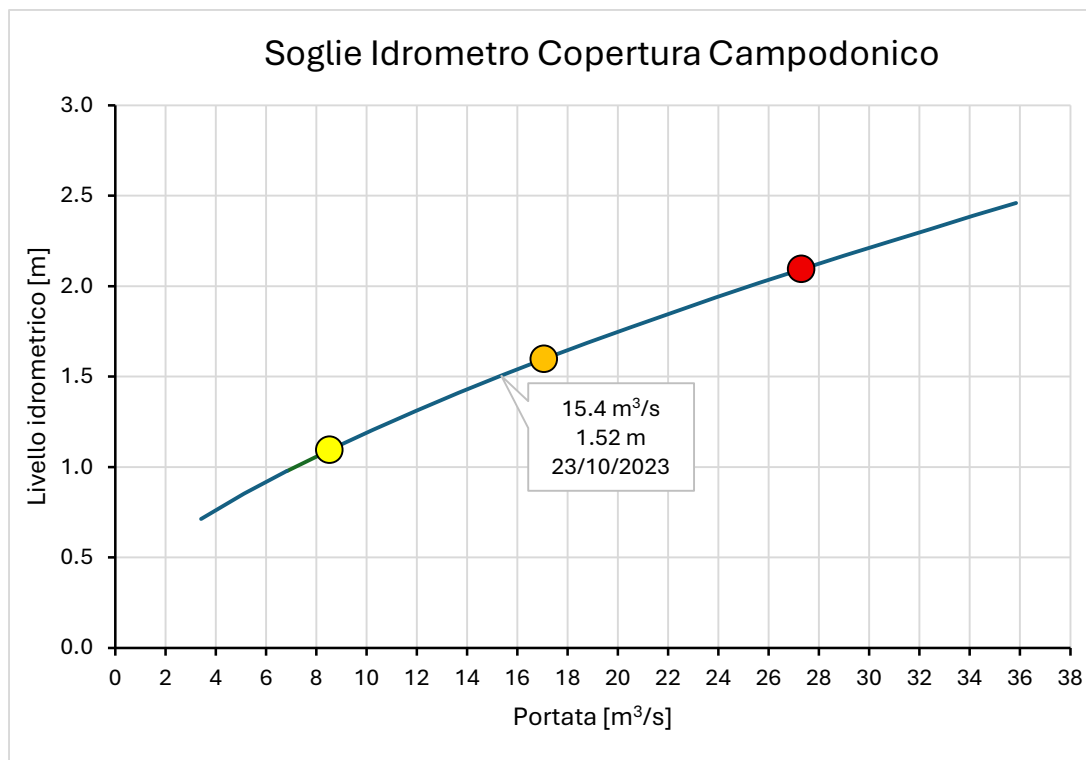


Figure 5.16 - Soglie critiche e massimo registrato all'idrometro di Copertura Campodonico

Il confronto tra le soglie individuate e la serie storica dei livelli registrati evidenzia come nessuno degli eventi osservati abbia raggiunto le condizioni associate al franco residuo di 0.5 m rispetto alla soglia più cautelativa individuata dal modello, corrispondente alla criticità del ponte di Corso Italia.

In particolare, l'evento del 23 ottobre 2023, che rappresenta il massimo evento registrato dalla rete di monitoraggio nel periodo analizzato, ha raggiunto valori prossimi alle soglie operative definite per il tratto terminale del rio Campodonico e per il tronco vallivo del torrente Rupinaro, senza tuttavia determinare il superamento delle condizioni di sicurezza considerate nello studio.

Le soglie ottenute costituiscono pertanto uno strumento direttamente utilizzabile nell'ambito del monitoraggio in tempo reale del bacino, consentendo di associare i livelli registrati dagli idrometri a specifici scenari di criticità idraulica individuati mediante modellazione numerica.

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto ha consentito di definire una relazione quantitativa tra le misure della rete di monitoraggio pluvioidrometrica del bacino del torrente Rupinaro e gli scenari di criticità idraulica individuati mediante modellazione idraulica monodimensionale. L'integrazione tra rilievi topografici, dati idrometrici, dati pluviometrici e simulazioni numeriche ha permesso di ricostruire le scale di deflusso di due delle sezioni strumentate e di associare i livelli idrometrici osservati a specifici scenari di piena lungo il reticolo modellato.

Le ipotesi adottate nel corso dello studio hanno fornito risultati complessivamente coerenti con le osservazioni disponibili. In particolare, l'analisi degli eventi di piena selezionati ha evidenziato una sostanziale contemporaneità dei picchi registrati nelle diverse sezioni monitorate, con ritardi compatibili con le caratteristiche geometriche del reticolo e trascurabili rispetto alla durata complessiva degli eventi. Ciò ha consentito di confrontare i valori di colmo registrati nelle diverse sezioni e di verificare l'ipotesi di distribuzione uniforme del contributo unitario di piena all'interno del bacino.

L'analisi delle precipitazioni associate agli eventi considerati ha mostrato come, nella maggior parte dei casi, la distribuzione spaziale della pioggia sia risultata sufficientemente uniforme tra i principali sottobacini. Tale evidenza è risultata coerente con i rapporti osservati tra le portate al colmo e le rispettive aree drenate. Il parametro di verifica adottato ha infatti restituito valori medi prossimi all'unità, confermando la sostanziale validità dell'ipotesi assunta entro il livello di accuratezza compatibile con le incertezze del dataset e delle metodologie impiegate.

Particolarmente significativi risultano gli eventi del 23 ottobre 2023 e del 17 ottobre 2024, caratterizzati dalle risposte idrologiche più intense tra quelle analizzate. Nel primo caso la distribuzione delle precipitazioni è risultata fortemente concentrata nel sottobacino del rio Campodonico, con conseguente incremento del contributo relativo di tale tributario rispetto a quanto osservato negli eventi caratterizzati da precipitazioni più uniformi. Nel secondo caso, al contrario, la distribuzione delle precipitazioni è risultata sostanzialmente omogenea sull'intero bacino e il rapporto tra i contributi dei sottobacini ha mostrato un'elevata coerenza con l'ipotesi di proporzionalità rispetto alle aree drenate. Tali risultati evidenziano l'importanza dell'integrazione tra monitoraggio idrometrico e monitoraggio meteorologico per una corretta interpretazione della risposta idrologica del bacino durante gli eventi intensi.

L'analisi idraulica ha inoltre consentito di individuare i tratti maggiormente vulnerabili del reticolo, sia in termini di possibile esondazione spondale sia in relazione al raggiungimento delle quote critiche degli attraversamenti e delle coperture. Per ciascuna criticità sono state definite soglie di riferimento associate a differenti livelli di franco idraulico, successivamente ricondotte alle sezioni strumentate mediante le scale di deflusso ricostruite. Questo approccio consente di associare direttamente le misure provenienti dalla rete di monitoraggio a scenari di criticità idraulica localizzati, fornendo uno strumento operativo potenzialmente utile sia per le attività di protezione civile sia per la gestione in tempo reale degli eventi di piena.

Le principali fonti di incertezza dello studio sono riconducibili alla qualità e alla densità dei rilievi topografici disponibili, alla ricostruzione delle quote degli zeri idrometrici e all'assenza di una curva di deflusso affidabile per la sezione di Argine Sanguineti. Nonostante tali limitazioni, i risultati ottenuti mostrano una coerenza complessiva tale da supportare la validità dell'impostazione metodologica adottata e delle soglie individuate.

Tra i possibili sviluppi futuri si evidenzia l'opportunità di realizzare rilievi topografici dedicati alle sezioni strumentate, finalizzati alla determinazione diretta delle quote degli zeri idrometrici e alla ricostruzione di scale di deflusso maggiormente affidabili. Un ulteriore approfondimento riguardante l'evoluzione morfologica dell'alveo in corrispondenza della sezione di Argine Sanguineti potrebbe inoltre consentire la definizione di una relazione livello-portata anche per tale stazione. L'installazione di aste idrometriche di controllo in corrispondenza dei sensori esistenti permetterebbe infine di incrementare l'affidabilità della rete di monitoraggio e di disporre di una misura ridondante particolarmente utile durante gli eventi di piena più severi.

Le informazioni prodotte nel presente lavoro costituiscono una base metodologica facilmente estendibile ad ulteriori aspetti della gestione del rischio idraulico, quali la valutazione della vulnerabilità delle opere attraversanti, la definizione di procedure operative di protezione civile e la calibrazione del modello piccoli bacini di ARPAL. In particolare, la disponibilità di soglie idrometriche direttamente correlate a scenari di criticità idraulica rappresenta un elemento di potenziale interesse per l'implementazione di sistemi di monitoraggio e supporto alle decisioni sempre più orientati verso il nowcasting e la gestione in tempo reale del rischio.

7 Bibliografia

- HEC-RAS v6.6 (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), U.S. Army Corps of Engineers. Software per la modellazione idraulica monodimensionale e bidimensionale.
- QGIS Geographic Information System v3.34.12. Open Source Geospatial Foundation Project.
- OpenStreetMap contributors. Banca dati cartografica collaborativa utilizzata come cartografia di base.
- Google Satellite. Immagini satellitari utilizzate come layer cartografico di base.
- Geoportale Regione Liguria. Regione Liguria. Geoportale regionale. Dataset cartografici utilizzati per il presente lavoro (DTM - Modello Digitale del Terreno - Liguria ed. 2023, Administrative Units, Reticolo Idrografico e Bacini Idrografici sc. 1:10000 DGR n.1280/2023 e altri tematismi).
- ARPAL. Dati georiferiti di cumulata di pioggia su 10 minuti stimata da radar meteorologici (formato GeoTIFF).
- ARPAL. Serie storica pluviometrica per gli eventi citati a risoluzione temporale di 5 minuti della stazione di Chiavari (codice: CHIVI, rete OMIRL).
- RETEMET. Serie storiche della rete di monitoraggio pluviometrico e idrometrico del Comune di Chiavari, mantenuta da RETEMET.
- Rilievo topografico dell'alveo del torrente Rupinaro eseguito nel lavoro: “Interventi di sistemazione idraulica del tratto di fondo valle del T. Rupinaro in comune di Chiavari – Adeguamento / risanamento / consolidamento / ristrutturazione delle difese spondali e del ponte Castagnola (RUPM)” commissionato dal Comune di Chiavari a Studio Majone Ingegneri Associati nel 2021, utilizzato per la costruzione del modello idraulico.
- ACRONET. Serie storica pluviometrica per gli eventi citati a risoluzione temporale di 5 minuti della stazione: ITS Chiavari - Osservatorio Raffaelli dal 1883 (rete ACRONET).
- Regolamento 14 luglio 2011, n. 3 - Regolamento recante disposizioni in materia di tutela delle aree di pertinenza dei corsi d'acqua. Regione Liguria
- ARPAL. Documentazione tecnica relativa al Modello Piccoli Bacini.
- Fondazione CIMA. Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri – Rapporto finale. Documento citato dalla Regione Liguria nella D.G.R. n. 357/2008 e utilizzato quale riferimento per la formula empirica del tempo di concentrazione dei piccoli bacini liguri.