



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia,
dell'Ambiente ed Urbanistica

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**MODELLAZIONE IDROLOGICA DEL
BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME MISA**

**HYDROLOGICAL MODELING OF THE MISA
RIVER BASIN**

Relatore: Ch.ma Prof.ssa Giovanna Darvini

Correlatore: Dott. Lorenzo Melito

Tesi di Laurea di:

Natalie Bianchi

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Sommario

Il lavoro svolto nella presente tesi è finalizzato alla modellazione idrologica del bacino idrografico del fiume Misa. Questo progetto si prefigge lo scopo di tarare un modello idrografico per la previsione di eventi di piena.

L'elaborazione del seguente modello idrologico assume una rilevanza cruciale a causa dei frequenti eventi alluvionali registratisi nel bacino negli ultimi anni: in particolare si ricordano le drammatiche esondazioni del 2014 e la più recente del 2022. L'esondazione di un corso d'acqua rappresenta un rischio per l'incolumità della popolazione, per le attività umane e per le perdite economiche associate ad essa: risulta pertanto fondamentale uno studio analitico volto alla ricerca di sistemi di difesa idraulica e possibili metodi di mitigazione del rischio idrogeologico.

Gli strumenti utilizzati per la realizzazione del progetto comprendono l'estrazione della rete idrografica del bacino con modelli digitali di elevazione del terreno (DTM), i dati delle precipitazioni e i dati delle portate relativi al bacino, forniti dalla Protezione Civile delle Marche.

Per la creazione del modello è stato utilizzato il Software HEC-HMS (4.9), idoneo a simulare processi idrologici completi di sistemi di bacini idrografici. L'HEC-HMS è un programma che si basa sulla separazione del flusso idrologico in pezzi gestibili e sulla costruzione di confini che delimitino il bacino di interesse.

La realizzazione del modello è stata possibile grazie alla sovrapposizione di più livelli (*layers*), creati grazie a specifiche componenti del software, ognuno volto alla descrizione di un preciso aspetto idrologico e inseriti con lo scopo di creare una rete idrologica il più possibile coincidente con la rete reale. Il software mediante l'inserimento dei livelli è in grado di individuare il flusso e di suddividere l'intero bacino in vari sottobacini.

Il modello è stato calibrato mediante l'inserimento di due eventi di piena con disponibilità di dati reali di precipitazione e di portata, in particolare si tratta degli eventi di maggio 2014 e dicembre 2021. Sono stati ottenuti dei risultati di calibrazione soddisfacenti per quanto riguarda la simulazione delle portate osservate dell'evento del 2021, al contrario ci sono stati alcuni problemi con la simulazione dell'evento del 2014 dovute alla mancanza di dati diretti di portata e all'eccezionalità dell'evento temporalesco.

Indice

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | Bacino idrografico del fiume Misa..... | 9 |
| 1.1 | Inquadramento geografico e territoriale | 9 |
| 1.2 | Aspetti idrologici | 11 |
| 1.3 | Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico..... | 16 |
| 1.4 | Esondazioni rilevanti del fiume | 17 |
| 1.4.1 | Esondazione del fiume del 2014..... | 17 |
| 1.4.1.1 | Precipitazioni in corso di evento..... | 17 |
| 1.4.1.2 | Idrometria..... | 18 |
| 1.4.2 | Esondazione del fiume del 2022..... | 23 |
| 1.4.2.1 | Precipitazioni in corso di evento..... | 23 |
| 2 | Analisi idrologica dei dati..... | 29 |
| 2.1 | Raccolta e analisi dei dati pluviometrici | 31 |
| 2.2 | Analisi delle portate | 35 |
| 3 | Creazione di un modello idrologico georeferenziato | 40 |
| 3.1 | Software HEC-HMS | 40 |
| 3.2 | Dati acquisiti..... | 41 |
| 3.3 | Identificazione della rete e dei sottobacini..... | 44 |
| 3.4 | Stima dei parametri | 48 |
| 3.4.1 | Parametri per il metodo delle perdite (<i>Loss method</i>)..... | 48 |
| 3.4.2 | Parametri per il metodo di trasformazione (<i>Transform method</i>)..... | 50 |
| 3.4.3 | Parametri per il metodo del flusso di base (<i>Baseflow method</i>)..... | 52 |
| 3.4.4 | Parametri per il metodo della traslazione dei flussi (<i>Routing method</i>) 54 | |
| 3.5 | Simulazione di un evento di precipitazione | 55 |
| 3.5.1 | Modello meteorologico (<i>Meteorologic Models</i>) | 56 |
| 3.5.2 | Specifiche di controllo (<i>Control Specifications</i>) | 56 |
| 3.5.3 | Analisi dell'evento del 2021 | 58 |
| 3.5.4 | Analisi dell'evento del 2014 | 59 |
| 3.6 | Calibrazione del modello | 61 |
| 3.6.1 | Calibrazione del modello all'evento del 2021 | 62 |
| 3.6.2 | Calibrazione del modello all'evento del 2014 | 72 |
| 4 | Discussione..... | 82 |
| 5 | Conclusioni | 84 |
| 6 | Riferimenti..... | 85 |

Elenco delle figure:

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Disposizione degli strumenti e localizzazione delle sezioni a Ponte Garibaldi (Google Earth) | 12 |
| Figura 1.2 - River Gauge..... | 12 |
| Figura 1.3 - Idrometro della Protezione Civile..... | 13 |
| Figura 1.4 – Sezione dell’alveo, rilievo del 2018..... | 14 |
| Figura 1.5 - Sezione dell’alveo in corrispondenza di River Gauge, rilievo del 2019, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro | 14 |
| Figura 1.6 - Sezione dell’alveo in corrispondenza dell’idrometro della Protezione Civile, rilievo del 2019, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro | 14 |
| Figura 1.7 - Sezione dell’alveo in corrispondenza di River Gauge, rilievo del 2018, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro | 15 |
| Figura 1.8 - Illustrazione dei parametri e delle quote utilizzati | 15 |
| Figura 1.9 - Senigallia, Ponte Corso II Giugno, esondazione del 2014 | 18 |
| Figura 1.10 - Senigallia, zona Via XXIV Maggio e sottopasso Viale IV Novembre, esondazione del 2014..... | 18 |
| Figura 1.11 - Precipitazioni registrate nella stazione di Arcevia, dal 30 aprile al 7 maggio 2014 | 19 |
| Figura 1.12 - Precipitazioni registrate nella stazione di Senigallia, dal 30 aprile al 7 maggio 2014 | 19 |
| Figura 1.13 - Precipitazioni registrate nella stazione di Barbara, dal 30 aprile al 7 maggio 2014 | 20 |
| Figura 1.14- Precipitazioni registrate nella stazione di Bettollelle, dal 30 aprile al 7 maggio 2014 | 20 |
| Figura 1.15 – Precipitazioni registrate nella stazione di Montecarotto-Colle, dal 30 aprile al 7 maggio 2014..... | 21 |
| Figura 1.16 - Precipitazioni registrate nella stazione di Corinaldo, dal 30 aprile al 7 maggio 2014 | 21 |
| Figura 1.17 - Livelli idrometrici, dal 30 aprile al 7 maggio 2014..... | 22 |
| Figura 1.18 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Senigallia, dal 10 al 20 settembre 2022..... | 23 |
| Figura 1.19 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Montecarotto-Colle, dal 10 al 20 settembre 2022 | 24 |
| Figura 1.20 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Barbara, dal 10 al 20 settembre 2022 | 24 |
| Figura 1.21 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Arcevia, dal 10 al 20 settembre 2022 | 24 |
| Figura 1.22 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Bettollelle, dal 10 al 20 settembre 2022 | 25 |
| Figura 1.23 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Corinaldo, dal 10 al 20 settembre 2022..... | 25 |
| Figura 1.24 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Bettollelle, dal 10 al 20 settembre 2022 | 25 |
| Figura 1.25 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Corinaldo, dal 10 al 20 settembre 2022..... | 26 |

| | |
|--|----|
| Figura 1.26 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Passo Ripe, dal 10 al 20 settembre 2022 | 26 |
| Figura 1.27 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Pianello di Ostra, dal 10 al 20 settembre 2022 | 26 |
| Figura 1.28 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Ponte Garibaldi, dal 10 al 20 settembre 2022..... | 27 |
| Figura 1.29 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Serra De' Conti, dal 10 al 20 settembre 2022 | 27 |
| Figura 1.30 – Foto aerea che rappresenta l’estensione dell’esonazione del Misa del settembre 2022 (foto estratta dal quotidiano SenigalliaNotizie)..... | 28 |
| Figura 2.1 - Annale Idrologico del 2014, Bettollelle, Tabella I con i dati minimi e massimi giornalieri..... | 31 |
| Figura 2.2 - Disposizione dei pluviometri | 32 |
| Figura 2.3 – Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Senigallia relativi all’evento del 2014..... | 34 |
| Figura 2.4 - Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Bettollelle relativi all’evento del 2014..... | 34 |
| Figura 2.5 - Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Montecarotto-Colle relativi all’evento del 2014..... | 34 |
| Figura 2.6 - Ubicazione degli idrometri in giallo | 36 |
| Figura 2.7 – Grafico portata-elevazione della stazione idrometrica di Bettollelle | 37 |
| Figura 2.8 - Grafico portata-elevazione della stazione di Corinaldo | 38 |
| Figura 2.9 - Grafico portata-elevazione della stazione di Serra De’ Conti | 39 |
| Figura 3.1- DTM delle Marche con passo 20 m × 20 m con rispettiva legenda | 42 |
| Figura 3.2 – Rappresentazione del bacino del Misa, dei suoi sottobacini, del reticolo idrografico e delle aste fluviali principali tramite shapefile. | 43 |
| Figura 3.3 - Sink Location e rispettiva legenda..... | 44 |
| Figura 3.4 - Accumulo del flusso (Flow Accumulation) e rispettiva legenda..... | 45 |
| Figura 3.5 - Ingrandimento della Figura 3.4..... | 45 |
| Figura 3.6 - Direzione del flusso e rispettiva legenda | 0 |
| Figura 3.7 - Ingrandimento della Figura 3.7..... | 0 |
| Figura 3.8 - Flussi identificati (Identify Streams) e rispettiva legenda | 46 |
| Figura 3.9 - Ingrandimento della posizione del punto di interruzione | 46 |
| Figura 3.10 - Suddivisione del bacino in sottobacini..... | 47 |
| Figura 3.11 – Illustrazione, a titolo di esempio, dei flussi relativi ad un sottobacino .. | 52 |
| Figura 3.12 - Specifiche di controllo dell'evento del 2014 | 57 |
| Figura 3.13 - Specifiche di controllo per l'evento del 2021 | 57 |
| Figura 3.14 - Andamento del livello idrometrico dal 10 al 14 dicembre, alla stazione di misura di Ponte Garibaldi durante l'evento del 2021 | 58 |
| Figura 3.15 - Andamento della portata (m ³ /s) stimata alla stazione di misura di Ponte Garibaldi durante l'evento del 2021 | 59 |
| Figura 3.16 - Andamento del livello idrometrico dal 2 maggio al 5 maggio, per le tre stazioni di misura attive durante l'evento del 2014..... | 60 |
| Figura 3.17 - Andamento delle portate (m ³ /s) ricavate dalle scale di deflusso per l’evento del 2014 | 60 |
| Figura 3.18 - SIMULAZIONE 1: Inizio calibrazione all’evento del 2021 | 63 |
| Figura 3.19 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, NSE = 0.599 | 64 |
| Figura 3.20 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, NSE = 0.575 | 65 |
| Figura 3.21 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, NSE = 0.386 | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.22 - SIMULAZIONE 5: calibrazione con lag pari a 12 minuti, NSE = 0.49567 | |
| Figura 3.23 - SIMULAZIONE 6: calibrazione con lag pari a 15 minuti, NSE = 0.616 | |
| | 67 |
| Figura 3.24 - SIMULAZIONE 7: calibrazione con lag pari a 16 minuti, NSE = 0.647 | |
| | 68 |
| Figura 3.25 - SIMULAZIONE 8: calibrazione con lag pari a 17 minuti, NSE = 0.671 | |
| | 68 |
| Figura 3.26 - SIMULAZIONE 9: calibrazione, NSE = 0.685 | 69 |
| Figura 3.27 - SIMULAZIONE 10: calibrazione finale con lag pari a 20 minuti, NSE = 0.707 | 70 |
| Figura 3.28 - Tabella riassuntiva della calibrazione sull'evento del 2021 | 70 |
| Figura 3.29 - Calibrazione finale, NSE = 0.918 | 71 |
| Figura 3.30 - Tabella riassuntiva della calibrazione sull'evento del 2021, effettuata con i dati di portata "ripuliti" | 71 |
| Figura 3.31 - SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Corinaldo | 73 |
| Figura 3.32 - SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Bettollelle | 73 |
| Figura 3.33 - SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Serra De' Conti | 74 |
| Figura 3.34 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.627 | 75 |
| Figura 3.35 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, Bettollelle, NSE = 0.816 | 75 |
| Figura 3.36 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = - 0.745 | 76 |
| Figura 3.37 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.575 | 77 |
| Figura 3.38 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Bettollelle, NSE = 0.872 | 77 |
| Figura 3.39 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = - 0.346 | 78 |
| Figura 3.40 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.652 | 79 |
| Figura 3.41 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Bettollelle, NSE = 0.908 | 79 |
| Figura 3.42 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = 0.105 | 80 |
| Figura 3.43 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Corinaldo | 81 |
| Figura 3.44 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Bettollelle | 81 |
| Figura 3.45 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Serra De' Conti | 81 |

Elenco delle tabelle:

| | |
|---|----|
| Tabella 2.1 - Coordinate e quota delle stazioni pluviometriche utilizzate | 31 |
| Tabella 2.2 - Estensione temporale dei dati RM e RT | 33 |
| Tabella 2.3 – Coordinate e quota delle stazioni idrometriche..... | 35 |
| Tabella 2.4 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Bettollele | 37 |
| Tabella 2.5 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Corinaldo..... | 38 |
| Tabella 2.6 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Serra De' Conti . | 39 |
| Tabella 3.2 - Scale di deflusso relative all'analisi delle portate dell'evento del 2014 . | 60 |
| Tabella 3.3 - NSE per il controllo dell'abilità predittiva del modello..... | 61 |

Capitolo 1

1. Bacino idrografico del fiume Misa

1.1 Inquadramento geografico e territoriale

Il bacino del fiume Misa si colloca nella Regione Marche, in particolare si sviluppa interamente nel bacino marchigiano più esterno, nella provincia di Ancona. Il bacino idrografico del fiume copre in totale 19 comuni: Arcevia, Barbara, Belvedere Ostrense, Castelleone di Suasa, Corinaldo, Genga, Mergo, Montecarotto, Monte Porzio, Ostra, Ostra Vetere, Poggio San Marcello Rosora, Sassoferrato, Senigallia, Serra de' Conti, San Quirico, Trecastelli.

Il bacino è caratterizzato da uno stile strutturale tipico dell'Appennino umbro marchigiano.

Il bacino idrografico può essere brevemente diviso in due aree:

- area montana, caratterizzata da rilievi aspri e versanti ripidi incisi dai corsi d'acqua minori; essa è costituita da un sistema di pieghe e faglie da cui emergono sia formazioni cretache che paleogene, tra cui quella della Maiolica, delle Marne a Fuocidi e della serie delle Scaglie, nonché formazioni della successione miocenica del Bisciario, dello Schlier, della Formazione Marnoso-Arenacea, della Gessoso-Solfifera e delle Argille a Colombacci;
- area di collina e di pianura alluvionale, dove affiorano le formazioni della successione plio-pleistocenica caratterizzata da argille, argille marnose, argille sabbioso-siltose e da depositi continentali quaternari che hanno contribuito alla formazione dei terrazzi alluvionali dal I al IV ordine.

Il reticolo idrografico è asimmetrico e il deflusso idrico lungo l'alveo del fiume Misa è alimentato prevalentemente dagli affluenti di sinistra, in particolare dal fiume Nevola che si immette nei pressi della località di Brughetto.

Il reticolo è caratterizzato da valli a V strette e profonde nella parte più montana del bacino idrografico mentre, nella parte prevalentemente collinare e pianeggiante è caratterizzata da terreni pelitico-arenacei, le valli si ampliano e sui versanti si osservano dei depositi alluvionali terrazzati che si sviluppano con l'aumentare della quota.

Le differenti caratteristiche geologico-strutturali dell'area hanno creato delle condizioni favorevoli all'insorgere di movimenti franosi. Queste sono maggiormente evidenti nella porzione più occidentale del bacino dove i versanti presentano una pendenza maggiore e sono caratterizzati da particolari forme che favoriscono il fenomeno erosivo. Su questi si sono generati fenomeni franosi

classificabili come colamenti derivanti dalla combinazione di scivolamenti traslazionali e rotazionali, assecondati dall'acclività del territorio che facilita il trasporto dei materiali erosi verso valle.

Anche nel resto del territorio, sono stati riscontrati dei diffusi processi d'instabilità dovuti alle caratteristiche geomeccaniche delle formazioni presenti, piuttosto che dagli elevati dislivelli dei versanti. In queste aree, nonostante le basse pendenze, i versanti facilmente erodibili sono stati sommersi da estese coperture eluvio-colluviali che risultano, in condizioni di elevate precipitazioni, fortemente instabili.

In effetti la comparsa di eventi franosi può essere data anche dalla tipologia di materiale che compone il suolo di una determinata zona o da recenti attività geomorfologiche che ivi si sono sviluppate. Ad esempio, la composizione del suolo influisce notevolmente sulla sua capacità drenante, a dimostrazione di ciò terreni ad elevata percentuale di limo, prevalenti nel territorio marchigiano, tendono a creare un ristagno superficiale di acqua che evolve poi in fenomeni di ruscellamento nel caso di eventi intensi.

Persino la presenza e il tipo di vegetazione caratteristica di un territorio influiscono sul comportamento del processo erosivo, la presenza di piante lungo i versanti limita il ruscellamento e diminuisce la velocità del flusso, ridimensionando di conseguenza anche l'erosione.

I fenomeni franosi si innescano tipicamente in concomitanza ad eventi di precipitazione intensi durante i quali l'acqua ha modo di infiltrarsi all'interno del suolo e causare una conseguente instabilità dei pendii.

Nella parte centrale del bacino idrografico, sono presenti delle frane che interferiscono con la dinamica degli alvei fluviali del Misa e del suo principale affluente di sinistra, il Nevola. Più numerose sono le frane che interferiscono direttamente con la dinamica fluviale dei corsi d'acqua minori, essendo loro stessi, talora, una tra le cause d'innescamento di fenomeni gravitativi.

Gli alvei del Misa e del Nevola scorrono tra i terrazzi fluviali, di varia ampiezza e di diverso ordine, che i suddetti fiumi hanno formato nel tempo ai loro lati. Tali terrazzi sono costituiti prevalentemente da ghiaia e ciottoli calcarei.

Nella parte finale del bacino idrografico del Misa sono presenti dei depositi di spiaggia antica (Olocene) che occupano tutta la fascia costiera per un'ampiezza di circa un chilometro. Lungo la fascia costiera è stata identificata, mediante dei sondaggi, una litologia composta costituita da ghiaie e sabbie variamente associate a limi e argille, con presenza di livelli torbosi che identificano presumibilmente ambienti lagunari di transizione. Infine, sono presenti depositi di spiaggia attuali costituiti da sabbie uniformemente distribuite lungo tutto il litorale.

I corsi fluviali del Misa e del Nevola presentano un andamento meandriforme mediamente accentuato, in particolare nel tratto finale del Misa a partire dalla confluenza con il fiume Nevola sino alla foce. (Martini, 2018, pp. 9,10)

1.2 Aspetti idrologici

Si riportano di seguito alcune informazioni idrologiche estratte dal “Progetto definitivo per la realizzazione di Area Agricola di compensazione idraulica in località Bettolle” e alcune considerazioni riguardanti le analisi idrologiche idrauliche esaminate con lo scopo di progettare i primi interventi urgenti dal Consorzio di Bonifica delle Marche.

Il Bacino del Misa ha una superficie di 378.64 km². Nella sezione di chiusura individuata alla foce la quota è di 0 m s.l.m.m. L’asta denominata Misa ha origine a quota 260 m s.l.m.m. circa e si sviluppa per 45.10 km con una pendenza totale del 0.46%. L’altezza media del bacino è di 198.28 m s.l.m.m.

La relazione idrologica si pone lo scopo di valutare le portate di picco relative ai tempi di ritorno di 50-100-200 anni e di stimare i volumi necessari alla laminazione di tali picchi di piena, considerando una portata che non causi allagamenti in particolare nella città di Senigallia. Tale portata ammissibile è stata stimata pari a circa 240 m³/s.

Infatti, le sezioni del fiume che attraversano il centro della città sono in grado di smaltire valori di portata compresi tra 270 e 320 m³/s.

Nonostante ciò, suddetti valori di portata, dovrebbero essere ridotti almeno a 200 m³/s per assicurare le condizioni di sicurezza necessarie ad evitare allagamenti. Infatti, la piena del 2005, caratterizzata da una portata stimata intorno ai 200 m³/s, provocò comunque una lieve esondazione.

Per ridurre tali valori di portata, oltre a porre maggiore attenzione nei riguardi della manutenzione ordinaria e straordinaria dell’alveo del fiume, sarebbe necessario laminare i picchi ed aumentare il più possibile la capacità di deflusso nel tratto cittadino.

In pratica, per riuscire in una laminazione efficace si dovrebbero sottoporre a laminazione almeno 7.31 milioni di m³, questo assicurerebbe una portata transitante nel centro di Senigallia di 240 m³/s e garantirebbe dunque il passaggio seppur senza franchi di sicurezza sotto ai ponti.

La laminazione si può ripartire sui tre tronchi principali del fiume:

- sul Nevola è possibile laminare circa 2.24 milioni di m³ per assicurare una portata uscente di 140 m³/s;
- sul Misa a monte della confluenza con il Nevola si potrebbero laminare circa 2.07 milioni di m³ per garantire una portata uscente di 210 m³/s;
- sul Misa a valle della confluenza con il Nevola la laminazione dovrebbe essere di circa 3 milioni di m³ per poter arrivare ad una portata uscente di 240 m³/s.

(Martini, 2018, p. 11)

La sezione trasversale dell'alveo fluviale del Misa è nota grazie a due rilievi effettuati nel 2018 e nel 2019 nella città di Senigallia, rispettivamente uno ricavato tramite lo strumento di River Gauge, l'altro con l'idrometro posizionato dalla Protezione Civile sul Ponte Garibaldi.

Il River Gauge è installato nelle vicinanze di Ponte Garibaldi circa 21.1 m più a monte della stazione idrometrica della Protezione Civile, sulla sponda sinistra.

Di seguito nelle Figure 1.1, 1.2 e 1.3 sono illustrate le disposizioni degli strumenti a Ponte Garibaldi.



Figura 1.1 – Disposizione degli strumenti e localizzazione delle sezioni a Ponte Garibaldi (Google Earth)

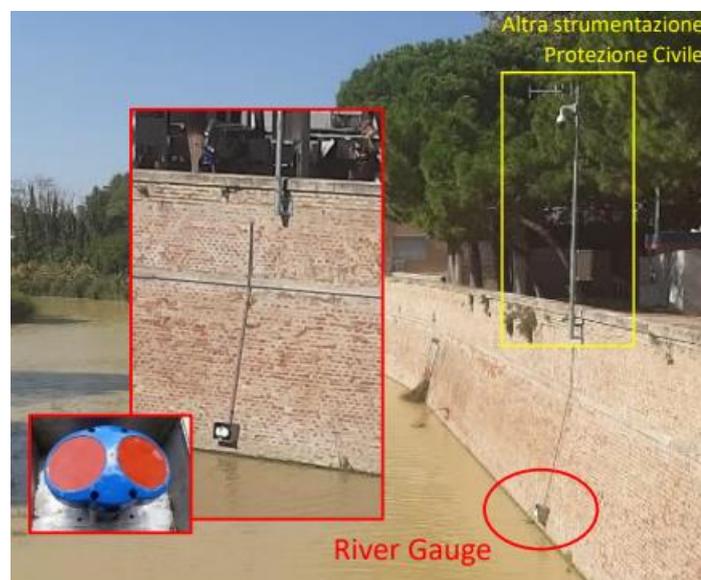


Figura 1.2 - River Gauge



Figura 1.3 - Idrometro della Protezione Civile

Il River Gauge è composto da:

- un ADCP che rileva la velocità della corrente, dunque, ricava i dati di portata in maniera indiretta;
- un sensore acustico collocato sulla sommità dello strumento che rileva il livello della superficie libera;
- un sensore di pressione collocato in basso che si attiva in caso di malfunzionamento del sensore acustico, anche questo è un rilevatore del livello della superficie libera;
- un termistore che rileva la temperatura.

Questa strumentazione restituisce il livello della superficie libera rilevabile anche quando lo strumento non è totalmente sommerso, la velocità media della corrente riscontrabile però solo in caso di strumento sommerso e la portata. Si noti che lo strumento restituisce misure attendibili solo quando è realmente sommerso dall'acqua.

I dati sono riferiti all'ora di Greenwich e le misurazioni vengono effettuate con intervalli di due minuti.

Durante il rilievo del 2018 (rappresentato in Figura 1.4) sono stati battuti i punti dell'alveo lungo la sezione trasversale in corrispondenza del River gauge e delle spallette utilizzate appositamente per fornire una chiusura adeguata della sezione. Le quote planimetriche sono riferite al WGS84 UTM33T, mentre le quote altimetriche sono riferite ad uno zero collocato 0.33 m al di sopra del sensore acustico River gauge.

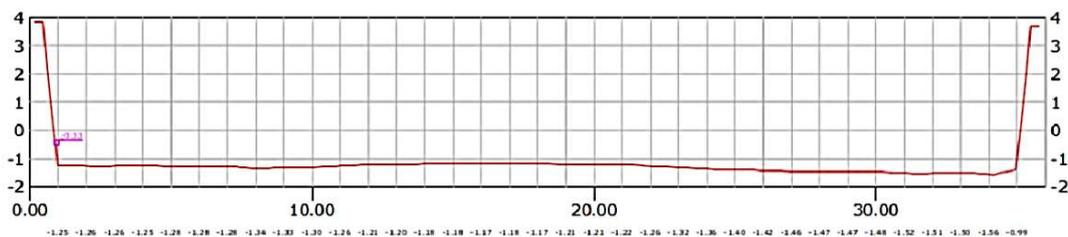


Figura 1.4 – Sezione dell'alveo, rilievo del 2018

Durante il rilievo del 2019 sono stati battuti i punti dell'alveo lungo due sezioni trasversali, una in corrispondenza del River gauge (Figura 1.5) e una in corrispondenza dell'idrometro della Protezione Civile (Figura 1.6). Le quote planimetriche sono anche qui riferite al WGS84 UTM33T; invece, quelle altimetriche sono riferite allo zero dell'idrometro.

Sono presenti anche i punti battuti nel precedente rilievo ma con le quote altimetriche riferite allo zero dell'idrometro (Figura 1.7).

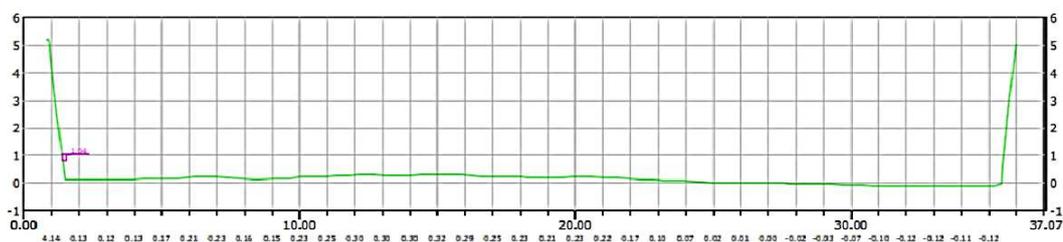


Figura 1.5 - Sezione dell'alveo in corrispondenza di River Gauge, rilievo del 2019, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro

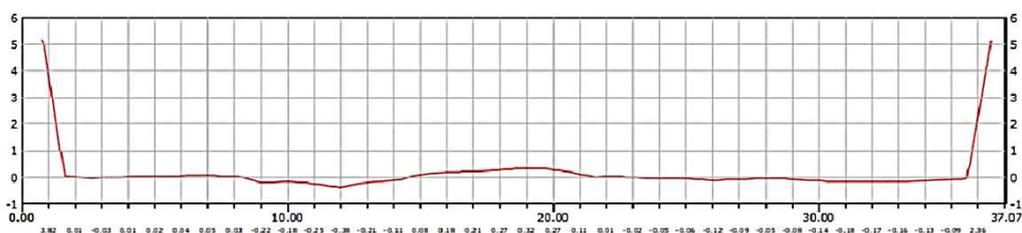


Figura 1.6 - Sezione dell'alveo in corrispondenza dell'idrometro della Protezione Civile, rilievo del 2019, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro

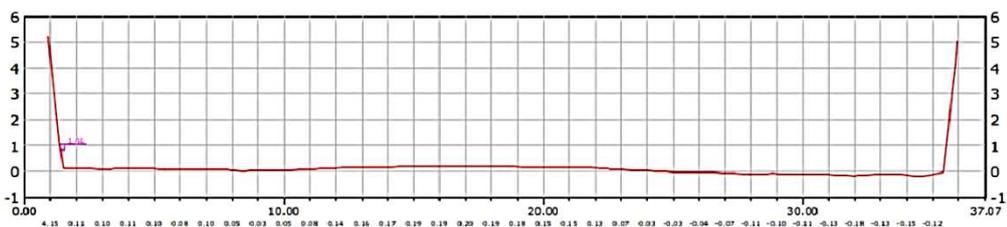


Figura 1.7 - Sezione dell'alveo in corrispondenza di River Gauge, rilievo del 2018, riferimento altimetrico con lo zero dell'idrometro

I sistemi di riferimento adottati nei due rilievi differiscono di 1.37 m. Lo zero dell'idrometro di Ponte Garibaldi è stato posizionato sui 4 metri dell'asta idrometrica appoggiata al muro di sponda del fiume leggermente inclinato. Supponendo che la graduazione dell'asta non tenga conto di questa inclinazione, la traslazione del sistema di riferimento dovrebbe essere corretta dell'eventuale errore. Considerando un valore medio della pendenza del muro, è possibile stimare un errore pari a circa 3-4 cm nella definizione dello zero dell'idrometro. È possibile quindi considerare la differenza tra i due sistemi di riferimento pari a 1.34 m anziché 1.37 m.

Si noti che, in corrispondenza della sponda sinistra, le due sezioni, relative al River Gauge (sezione RG) e all'idrometro della Protezione Civile (sezione PG), si trovano a due quote differenti: il fondo della sezione di Ponte Garibaldi si trova circa 9 cm più in basso rispetto a quello del River Gauge (Figura 1.8). Essendo distanti 21.1 m, la pendenza locale del fiume è circa 0.43%. Le sezioni, pur non avendo un andamento costante, hanno tra loro, in media, un dislivello di circa 14 cm. (Validazione Strumenti MORSE - River gauge, pp. 12-15)

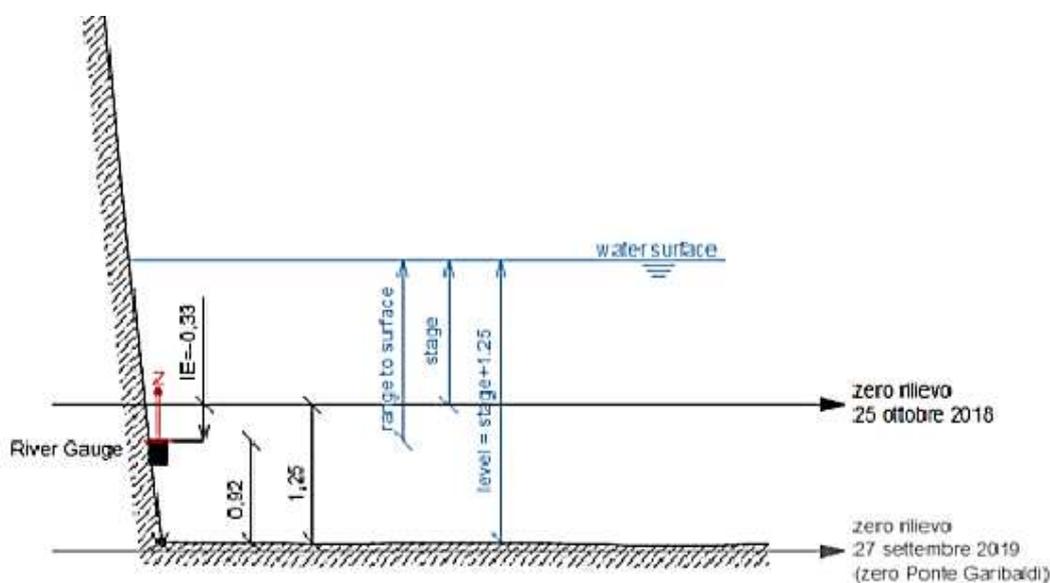


Figura 1.8 - Illustrazione dei parametri e delle quote utilizzati

Il rischio maggiore di esondazione nella città di Senigallia è rappresentato dal Misa e dal funzionamento delle arginature del fiume già esistenti.

Essendo le probabilità di esondazione molto elevate, la regione ha realizzato un sistema di monitoraggio ed ha redatto il “Piano per l’Assetto Idrogeologico-PAI” in cui individua le aree a rischio idraulico elevato.

A seguito dell’evento del 2014, il Decreto del Segretario Generale dell’Autorità di bacino regionale n.49 del 27.07.2016, ha definito una nuova classificazione delle aree a rischio esondazione del Misa. La drammaticità dell’evento e la constatata frequenza degli eventi metereologici estremi ha evidenziato proprio l’importanza del controllo delle condizioni degli argini del fiume; infatti, le esondazioni sono causate prevalentemente dalla rottura, dall’erosione o dal sifonamento degli argini.

(Protezione Civile, 2018, p. 16)

1.3 Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico

Come si è avuto modo di verificare la crisi climatica in corso sta intensificando la frequenza di eventi metereologici estremi, come alluvioni, frane, incendi o siccità. (Increase of extreme events in a warming world, 2011, p. 16)

Il surriscaldamento terrestre conseguente il cambiamento climatico ha modificato il regime delle precipitazioni, questo spiega la concentrazione di grandi quantità di pioggia in lassi di tempo molto ridotti che causano le cosiddette “bombe d’acqua” distruttive. (Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings, 2012, p. 16)

I sistemi urbani per la raccolta e la gestione delle acque piovane risultano inadeguati poiché dimensionati su modelli metereologici ormai superati: pertanto, nei prossimi anni eventi di questo tipo diventeranno sempre più frequenti e devastanti.

Il tema della sicurezza idraulica non può essere sottovalutato, in modo particolare in un territorio fortemente vulnerabile come quello delle Marche. L’evento del 2014, ma anche il più recente del 2022, confermano una profonda sofferenza idraulica a cui si potrebbe tentare di far fronte tramite vari accorgimenti, ad esempio la pulizia dei letti dei fiumi, l’innalzamento degli argini, l’inserimento di vasche di laminazione o addirittura la riorganizzazione delle aree urbanizzate interessate.

1.4 Esondazioni rilevanti del fiume

Il bacino del Misa ha conosciuto una ricca quantità di eventi alluvionali che sono stati documentati a partire dal XV secolo.

Oggi, per essere in grado di attuare dei piani di prevenzione efficaci è necessario essere a conoscenza della storia idrologica della zona e degli eventi remoti idrologicamente importanti che l'hanno segnata. Imprescindibile è dunque l'esigenza di inserire in database geografici la georeferenziazione delle aree inondate nei vari periodi e la rappresentazione delle zone più a rischio.

La città di Senigallia, nello specifico, è bersaglio di eventi alluvionali estremi documentati dal 1472, di fatto il lavoro presentato nel volume "Misa Amaro" redatto da Santoni e Morici offre un chiaro quadro d'insieme degli eventi storici più rilevanti. Tale progetto basa la valutazione dei singoli casi sulle conseguenze documentate e sulla quantità di danni provocati classificando gli eventi sulla base della gravità; quindi, vengono distinte alluvioni di portata eccezionale a cui conseguono gravi danni, alluvioni di grande portata e piene di minore portata.

Sfortunatamente, la statistica e il calcolo delle probabilità non sono in grado di prevedere i periodi in cui potrebbero avvenire le alluvioni, sono stati però elencati i mesi in cui la probabilità di piogge abbondanti e grandi mareggiate risulta maggiore, e mesi in cui tali eventi non sono mai stati registrati. In particolar modo nel mese di giugno non è mai stato documentato alcun evento estremo nella città di Senigallia, al contrario la stagione autunnale è testimone di oltre 17 eventi drammatici.

(Misa Amaro - Piogge intense, inondazioni e alluvioni storiche a Senigallia, 2021, p. 17)

1.4.1 Esondazione del fiume del 2014

1.4.1.1 Precipitazioni in corso di evento

Tra le giornate del 2 e del 4 maggio 2014 il territorio marchigiano è stato colpito da precipitazioni intense che hanno determinato un innalzamento dei livelli idrometrici con conseguenti fenomeni di esondazione.

I principali effetti si sono avuti a Senigallia, dove l'esondazione del Misa ha allagato gran parte del territorio, colpendo in particolar modo il centro della città e le frazioni situate lungo il corso del fiume.

Le precipitazioni del 2 maggio sono state precedute da un periodo molto piovoso che ha determinato la saturazione dei suoli e conseguentemente ridotto la capacità di infiltrazione delle acque nel terreno. Effettivamente la media mensile delle precipitazioni del mese di aprile 2014 è stata di circa 99 mm.

Nello specifico nei cinque giorni precedenti il 2 maggio è stata inoltre misurata un'altezza media di precipitazione di oltre 40 mm sull'intero territorio regionale, con cumulate maggiori nella porzione centro settentrionale.

(Ferretti, 2014, pp. 17,18)



Figura 1.9 - Senigallia, Ponte Corso II Giugno, esondazione del 2014



Figura 1.10 - Senigallia, zona Via XXIV Maggio e sottopasso Viale IV Novembre, esondazione del 2014

1.4.1.2 Idrometria

A seguito delle precipitazioni che hanno interessato la regione, si sono verificati dei fenomeni di piena su gran parte dei bacini centro-settentrionali, in particolar modo il bacino più colpito è stato quello del Misa.

Sono di seguito riportati i grafici dei dati di precipitazione riferiti alle stazioni pluviometriche di Arcevia (Figura 1.11), Senigallia (Figura 1.12), Barbara

(Figura 1.13), Bettolelle (Figura 1.14), Colle-Montecarotto (Figura 1.15) e Corinaldo (Figura 1.16).

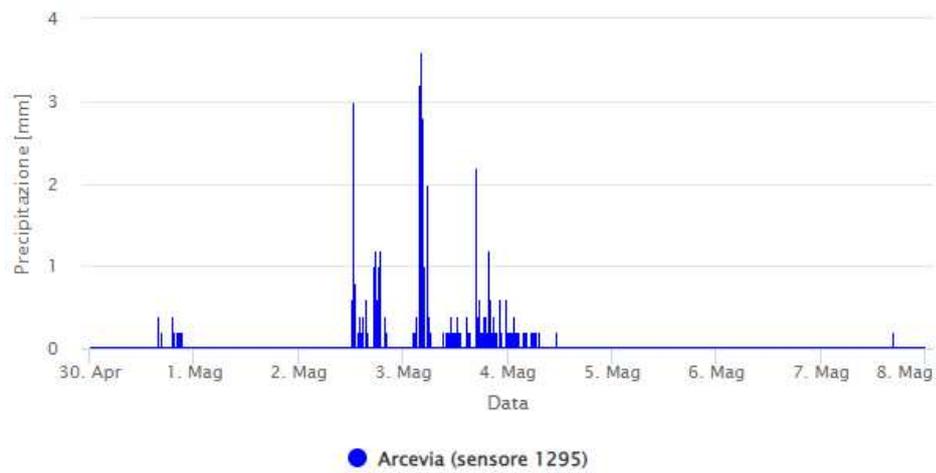


Figura 1.11 - Precipitazioni registrate nella stazione di Arcevia, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

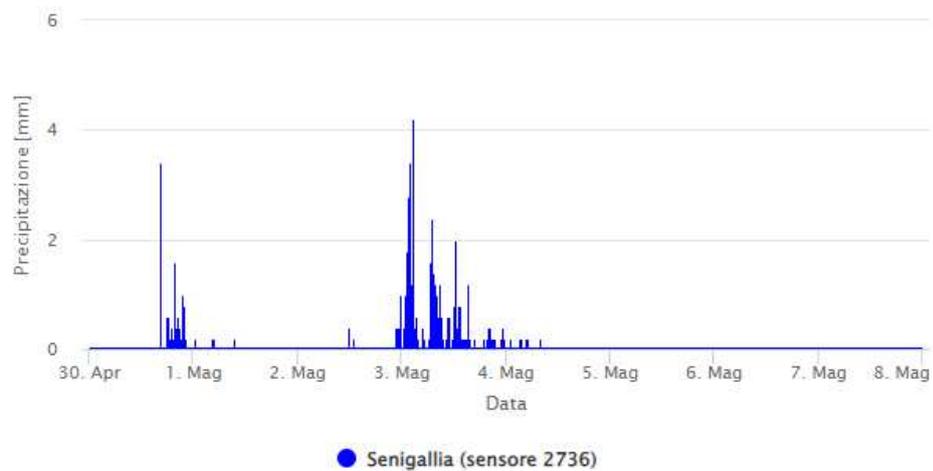


Figura 1.12 - Precipitazioni registrate nella stazione di Senigallia, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

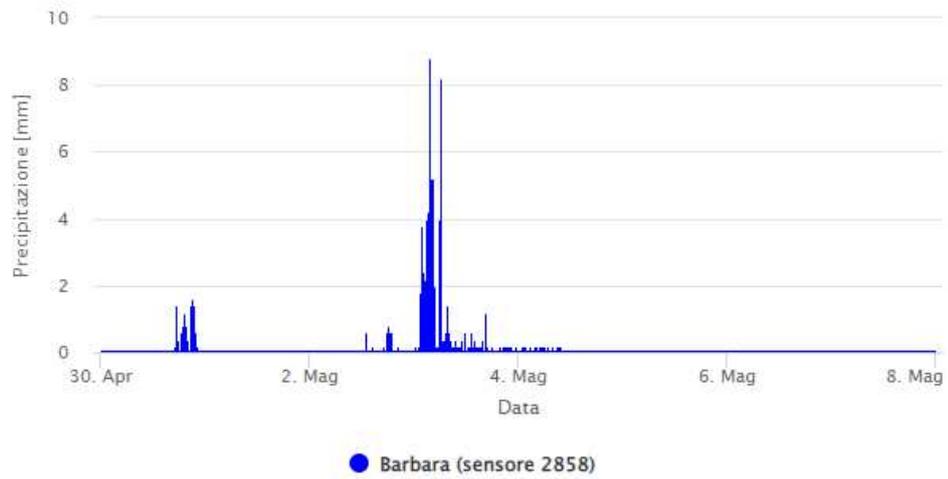


Figura 1.13 - Precipitazioni registrate nella stazione di Barbara, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

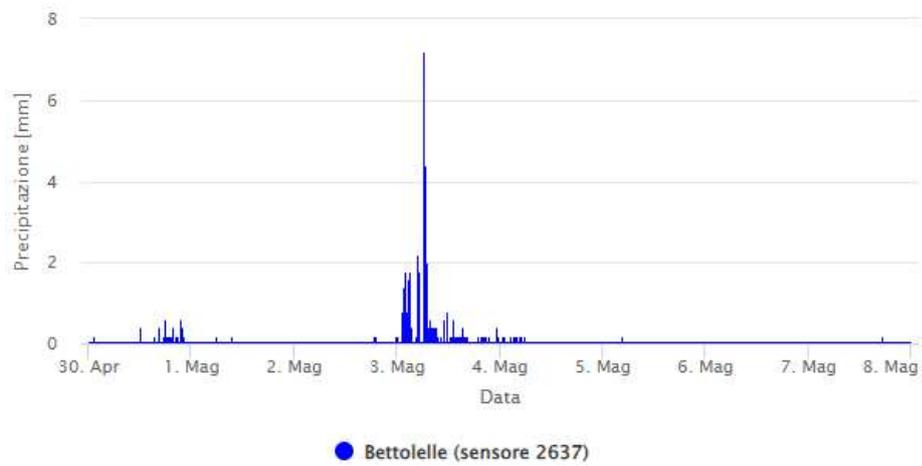


Figura 1.14- Precipitazioni registrate nella stazione di Bettolle, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

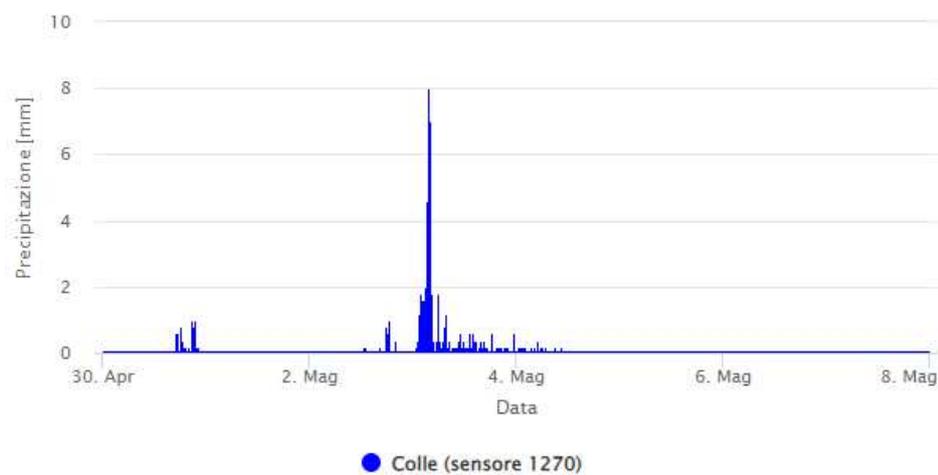


Figura 1.15 – Precipitazioni registrate nella stazione di Montecarotto-Colle, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

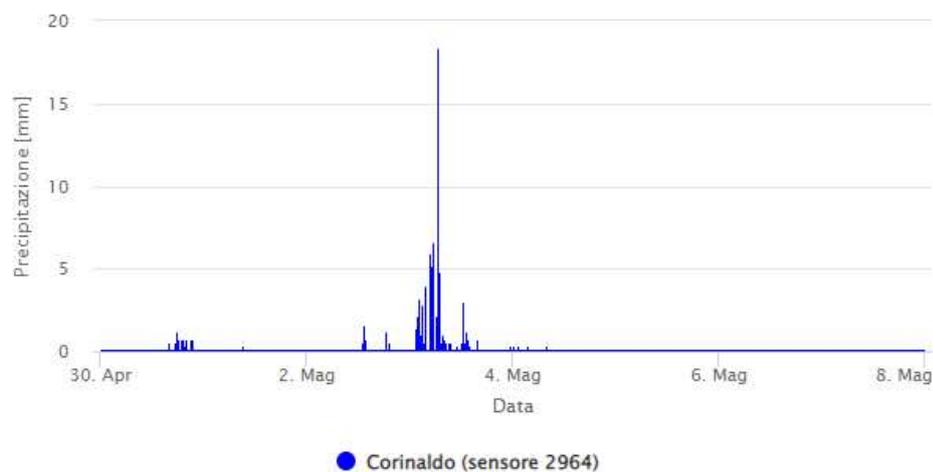


Figura 1.16 - Precipitazioni registrate nella stazione di Corinaldo, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

Sono inoltre mostrati nella Figura 1.17 i grafici dei livelli idrometrici riferiti alle stazioni pluviometriche di Bettolle, Corinaldo e Serra De' Conti.

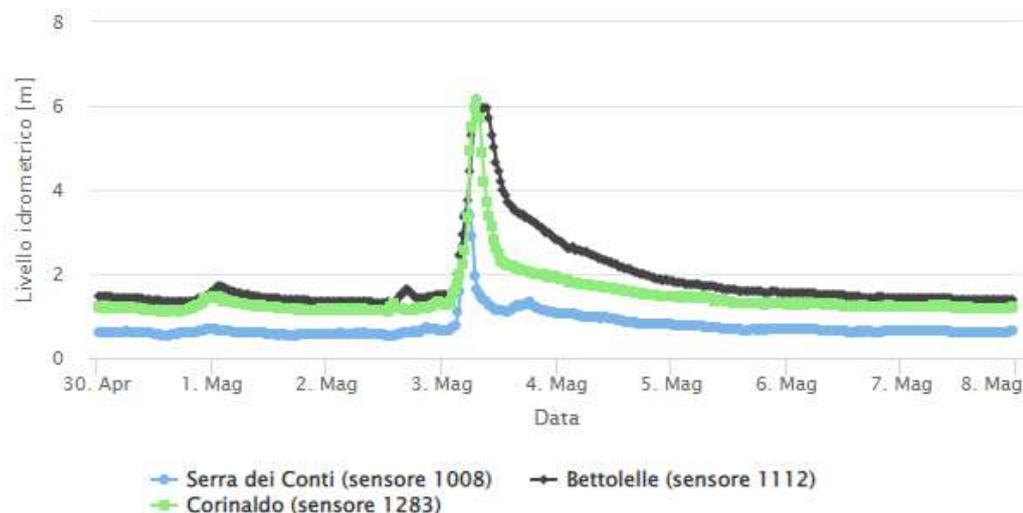


Figura 1.17 - Livelli idrometrici, dal 30 aprile al 7 maggio 2014

I tre idrogrammi rappresentano chiaramente l'andamento impulsivo dell'evento e la sua rapidità.

In corrispondenza della stazione di Bettolle (Figura 1.17) si è avuto un innalzamento complessivo del livello idrico superficiale di circa 4.5 m in 5 ore. In particolare, nell'arco di due ore e mezzo, si è avuto un incremento del tirante idraulico di circa 3 m dalle 5 alle 7.30 del 3 maggio.

Considerazioni simili si possono fare per la stazione di Corinaldo in cui l'innalzamento del livello idrometrico è stato registrato di circa 4.5 m.

Per quanto riguarda invece la stazione di Serra dei Conti il livello è incrementato molto meno rispetto alle altre due stazioni, risulta infatti registrato un aumento di 3 m circa.

Le caratteristiche del campo di precipitazione descritte hanno causato un innalzamento repentino anche dei livelli idrometrici nei bacini secondari, come visibile dagli idrogrammi registrati a Monte San Vito sul Triponzio e a Passatempo sul Fiumicello, affluente in destra del fiume Musone (Ferretti, 2014, p. 22)

La rapida risposta dei bacini è stata determinata dall'intensità delle precipitazioni, dalle preesistenti condizioni di saturazione dei suoli che hanno favorito il deflusso in ruscellamento, e dai terreni prevalentemente impermeabili che caratterizzano questi bacini.

1.4.2 Esondazione del fiume del 2022

1.4.2.1 Precipitazioni in corso di evento

Il 15 settembre 2022 un evento meteorologico di eccezionale intensità ha interessato le provincie di Ancona e Pesaro-Urbino, in particolare le zone del Senigalliese in provincia di Ancona e dell'Alto Pesarese al confine con l'Umbria.

Sono stati misurati circa 420 mm di pioggia caduti nell'arco di poche ore, quantità che mediamente vengono misurate in un anno.

I tempi di ritorno delle cumulate di pioggia negli intervalli di tempo di 3 e 6 ore hanno raggiunto dei valori fuori scala rispetto alle metodologie utilizzate, sicuramente superiori ai 1000 anni. Nello specifico nella stazione pluviometrica di Colle, situata tra Montecarotto e Serra De' Conti, sono stati misurati 162.4 mm e 186.4 mm negli intervalli delle 3 e 6 ore, valori che hanno superato i record storici di precipitazione di tutta la serie registrata nelle Marche a partire dal 1929.

Gli idrometri situati a valle della confluenza del Misa e del Nevola sono stati danneggiati e travolti dall'improvvisa ondata di piena, causando la mancata segnalazione dell'aumento repentino dei livelli e rendendo impossibile il monitoraggio di quanto si stava verificando. (Marche, 2022, p. 23)

Di seguito, nelle Figure 1.18, 1.19, 1.20, 1.21, 1.22 e 1.23, sono riportati gli istogrammi di precipitazione registrati da tutte le stazioni pluviometriche del bacino; nelle Figure 1.24, 1.25, 1.26, 1.27, 1.28 e 1.29 sono illustrati gli andamenti del livello misurati nelle varie stazioni idrometriche.

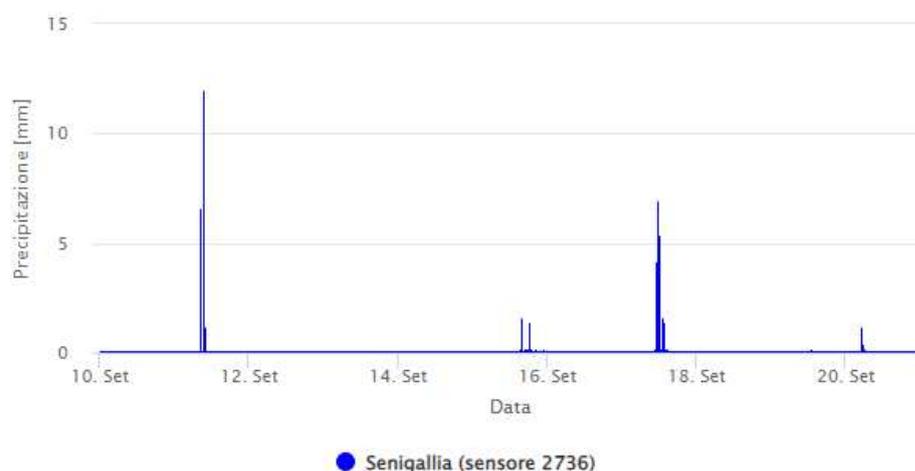


Figura 1.18 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Senigallia, dal 10 al 20 settembre 2022

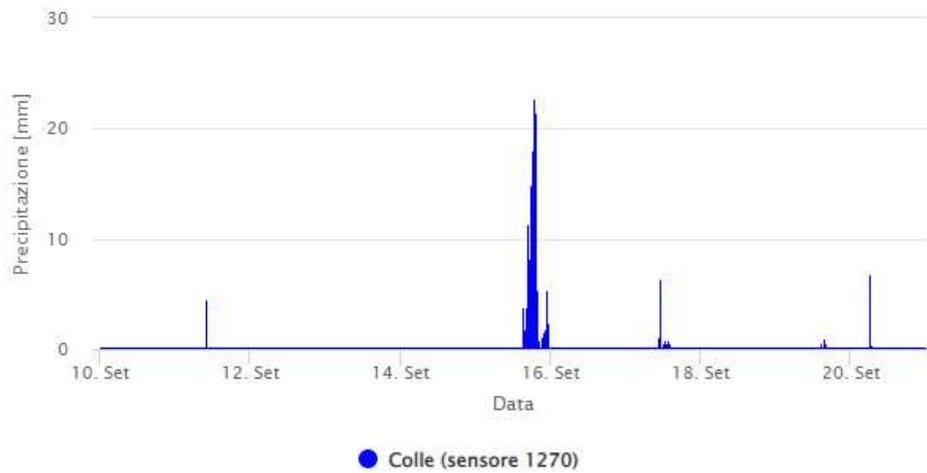


Figura 1.19 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Montecarotto-Colle, dal 10 al 20 settembre 2022

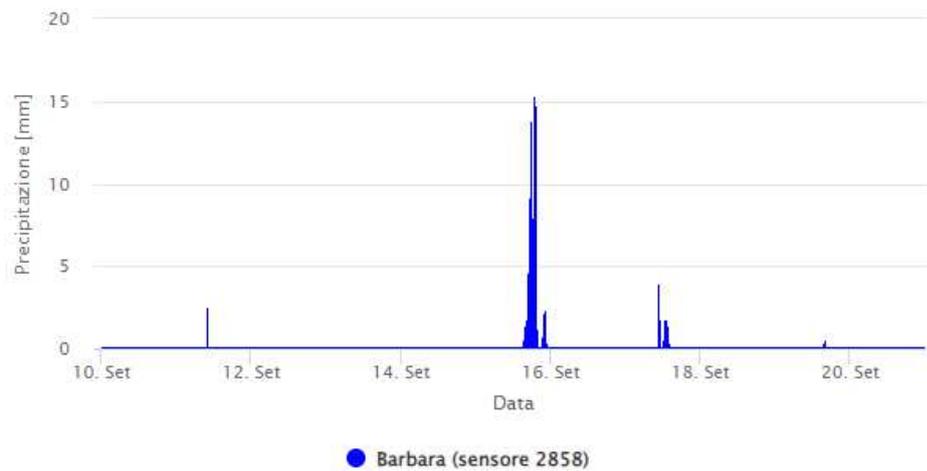


Figura 1.20 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Barbara, dal 10 al 20 settembre 2022

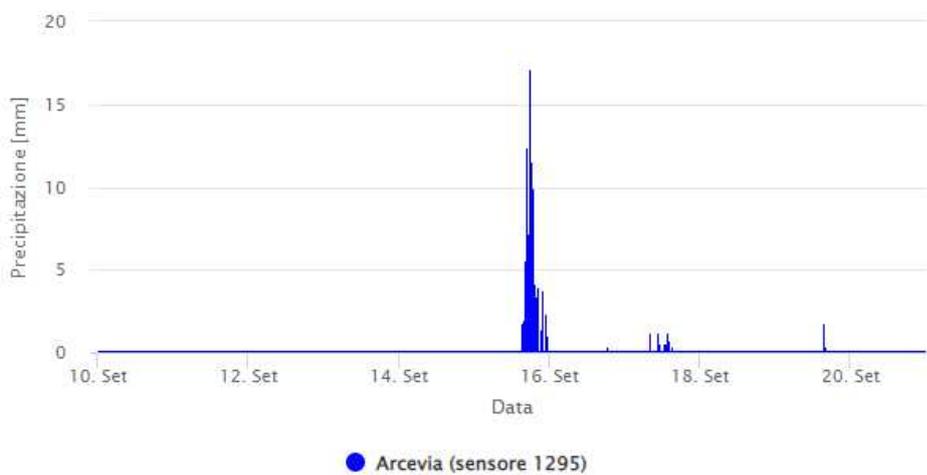


Figura 1.21 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Arcevia, dal 10 al 20 settembre 2022

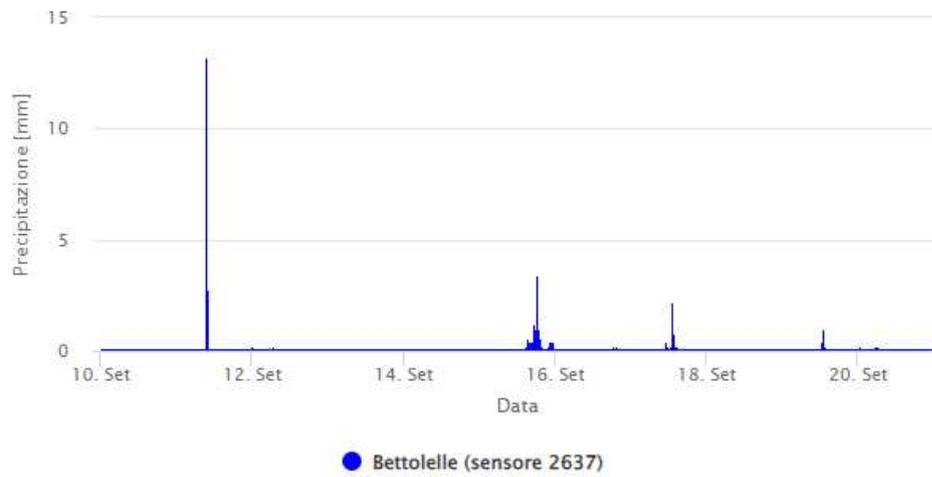


Figura 1.22 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Bettolle, dal 10 al 20 settembre 2022

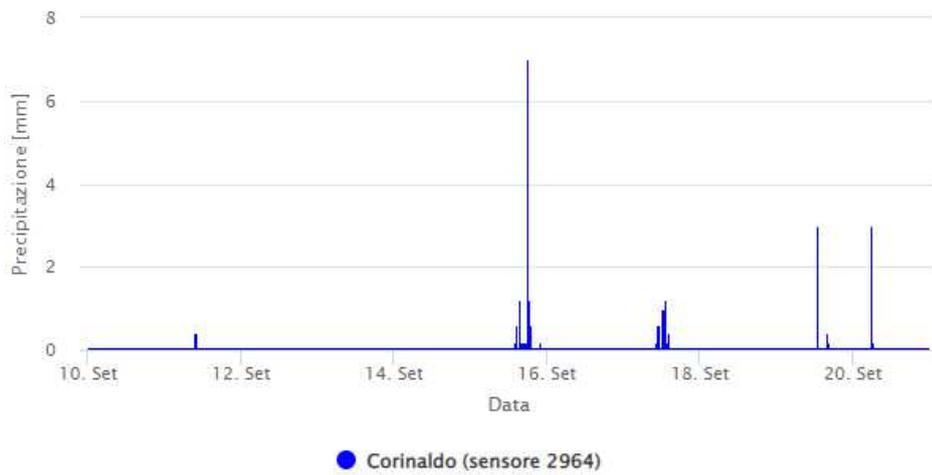


Figura 1.23 - Istogramma delle precipitazioni relativo alla stazione pluviometrica di Corinaldo, dal 10 al 20 settembre 2022

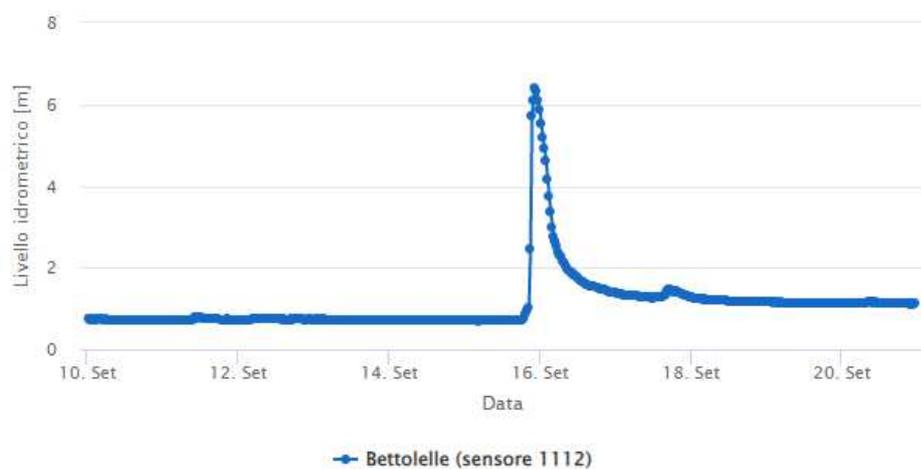


Figura 1.24 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Bettolle, dal 10 al 20 settembre 2022

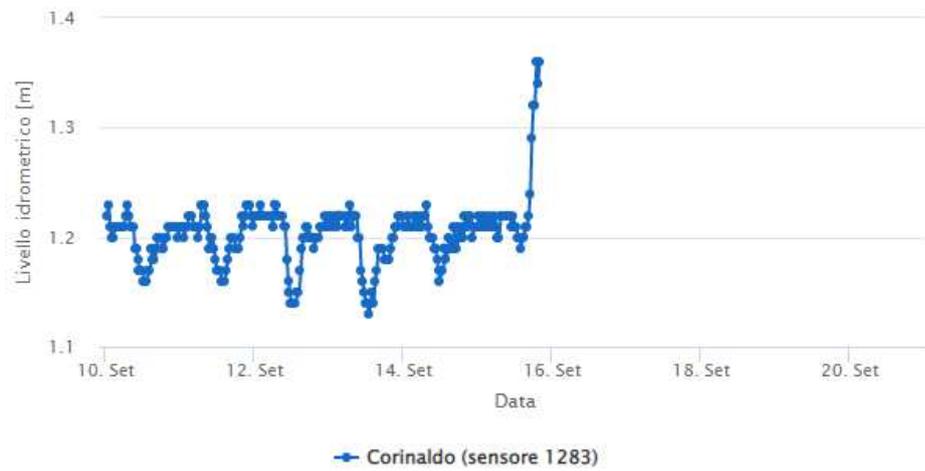


Figura 1.25 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Corinaldo, dal 10 al 20 settembre 2022



Figura 1.26 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Passo Ripe, dal 10 al 20 settembre 2022



Figura 1.27 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Pianello di Ostra, dal 10 al 20 settembre 2022

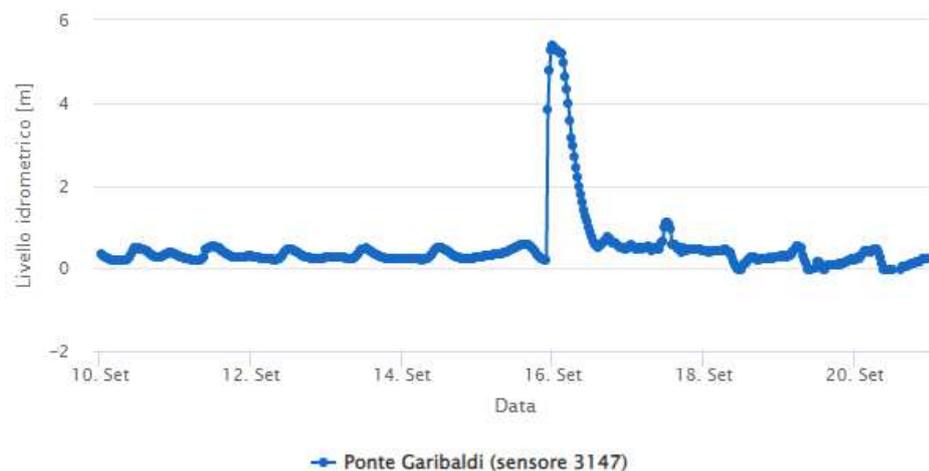


Figura 1.28 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Ponte Garibaldi, dal 10 al 20 settembre 2022



Figura 1.29 - Andamento del livello idrometrico relativo alla stazione idrometrica di Serra De' Conti, dal 10 al 20 settembre 2022

L'evento ha determinato una grave situazione di pericolo per l'incolumità delle persone, causando vittime, allagamenti, l'isolamento di diverse località, frane, esondazioni, danneggiamenti ad infrastrutture viarie, edifici pubblici e privati e danni alla rete dei servizi essenziali.

Il Consiglio dei ministri ha dichiarato uno stato di emergenza della durata di dodici mesi.

Per l'attuazione dei primi interventi urgenti è stato previsto uno stanziamento di 5 milioni di euro sul fondo per le emergenze nazionali (di cui all'articolo 44, comma 1, del decreto legislativo n. 1 del 2018).



Figura 1.30 – Foto aerea che rappresenta l'estensione dell'esondazione del Misa del settembre 2022 (foto estratta dal quotidiano SenigalliaNotizie)

Capitolo 2

2 Analisi idrologica dei dati

La realizzazione e adeguata calibrazione di un modello idrologico richiede la disponibilità di dati idrologici acquisiti mediante un'adeguata quantità di misurazioni di precipitazioni e portate nel bacino in esame.

I dati idrologici utilizzati in questa tesi per modellare il bacino del Misa sono stati tratti dall'estrattore SIRMIP (Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico) messo a disposizione dalla Protezione Civile regionale e liberamente accessibile online previa registrazione. (SIRMIP online, n.d., pp. 28-40)

Il Centro Funzionale Multirischio della Protezione Civile gestisce la rete di monitoraggio della Regione Marche; la rete è formata dalla fusione di due reti, una meccanica (RM) ed una in telemetria (RT).

La rete meccanica della Regione Marche è nata nel 1916 grazie al Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). A partire da quella data il SIMN si occupò della collocazione degli strumenti di misura quali termometri e pluviometri e della pubblicazione dei risultati ottenuti dalle elaborazioni sugli annali idrologici.

Dopo il trasferimento delle competenze degli uffici periferici del SIMN alle regioni è stato incaricato il servizio della Protezione Civile ad assolvere alle funzioni trasferite. Con questo trasferimento avvenuto nel 2002 le regioni hanno potenziato le reti di monitoraggio, trasformando la rete in un servizio a tempo reale con strumenti digitali. In attuazione del programma per il potenziamento delle reti di monitoraggio meteo-idro-pluviometriche (L.n. 267 del 03/08/1998), la Regione Marche si è dotata di un sistema di monitoraggio in telemetria.

Le stazioni che lavorano in telemetria sono delle stazioni automatiche per le quali non è necessario un operatore che rilevi i dati, poiché i sensori sono tutti elettronici e hanno la possibilità di essere visualizzati in tempo reale. Le stazioni meccaniche sono invece quelle più datate con strumentazioni non elettroniche che necessitano della presenza di un operatore per la rilevazione dei dati e la successiva archiviazione.

A partire dal 2004 la rete automatica si è ingrandita fino ad arrivare nel 2009 ad avere 53 termometri, 77 pluviometri, 13 anemometri, 15 barometri, 30 igrometri, 16 sensori di radiazione solare e 7 nivometri. Sono inoltre disponibili 70 idrometri ad ultrasuoni e microonde, a 52 dei quali è associata un'asta idrometrica per la calibrazione della misura.

Molte vecchie strumentazioni sono state dismesse e sostituite con nuovi strumenti in telemetria collegati ad un centro funzionale per la lettura in tempo

reale. Questa sostituzione della strumentazione ha prodotto sì un grande vantaggio nell'efficacia del funzionamento della rete, ma ha introdotto una problematica legata all'archiviazione dei dati. Di fatto lo scambio della strumentazione ha portato alla creazione di due serie temporali di dati misurate da due sistemi di misurazione diversi. Per questo nasce il problema dell'omogeneità delle serie, è possibile considerare una serie omogenea dal momento in cui il monitoraggio e la misura dei dati non sono mai stati interrotti nel tempo, ed è quindi possibile utilizzare i dati per ricavare dei dati statistici affidabili. Al contrario la non omogeneità di una serie non permette di fare calcoli probabilistici attendibili poiché le due serie vanno considerate separatamente e non possono essere unite come una lunga e unica serie temporale.

Sul SIRMIP sono disponibili dati di temperatura, precipitazione, livello idrometrico e portata (nel caso sia stata definita la scala di deflusso relativa alla sezione idrometrica locale o siano state prese delle misure dirette), pressione atmosferica, umidità relativa, radiazione solare, direzione e velocità del vento ed altezza del manto nevoso. Tali dati sono di due tipologie, a seconda del loro stato di validazione:

- dati originali, ovvero registrati dai sensori senza alcuna verifica a posteriori;
- dati validati, ovvero quelli sottoposti ad una prima verifica strumentale ma non ufficiale.

I dati presenti nel database possono subire variazioni in fase di revisione e validazione.

Gli unici dati ufficiali sono quelli che vengono pubblicati sugli annali idrologici reperibili sul sito dell'ISPRA o dal SIRMIP online.

Gli annali idrologici sono dei documenti che contengono i dati relativi alle osservazioni pluviometriche e idrometriche. Questi documenti venivano pubblicati già nel 1918 nei Bollettini Idrografici in cui i dati si riportavano in delle tabelle mensili; a partire dal 1921 queste pubblicazioni vennero separate in due sezioni (Parte I e Parte II), finché nel 1927 furono denominate Annali Idrologici. Seguirono numerose integrazioni e modifiche fino al 1951 quando fu consolidata l'ultima versione. Oggi nella prima parte degli annali si trovano le informazioni relative alla termometria (sezione A) e alla pluviometria (sezione B), mentre nella seconda parte sono reperibili dati sugli afflussi meteorologici (sezione A), sull'idrometria (sezione B) e sui bilanci idrologici (sezione C). (ISPRA, n.d., p. 30)

Viene di seguito riportato a titolo di esempio un estratto dell'annale idrologico del 2014 riferito alla stazione di misura di Bettollele, in particolare è rappresentata in Figura 2.1 la Tabella I, appartenente alla prima parte della sezione A relativa alla termometria. Nella seguente tabella sono riportati i valori massimi e minimi rilevati giornalmente mediante l'uso di un termometro e le rispettive medie mensili.

| SENIGALLIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (TA) | Bacino: Misa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | (6m s.l.m.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8.5 | 2.1 | 12.3 | 5.8 | 12.9 | 2.2 | 17.8 | 0.0 | 21.0 | 10.5 | 19.8 | 10.9 | 23.4 | 19.2 | 25.3 | 17.5 | 26.9 | 14.9 | 22.4 | 14.2 | 15.0 | 8.7 | 14.7 | 11.8 |
| 2 | 9.2 | 0.0 | 0.0 | 6.5 | 12.9 | 2.7 | 19.6 | 7.5 | 18.5 | 10.5 | 20.9 | 10.6 | 25.6 | 16.9 | 27.1 | 18.1 | 21.2 | 14.9 | 22.0 | 16.2 | 16.5 | 5.6 | 17.5 | 9.5 |
| 3 | 14.8 | 2.5 | 8.1 | 7.4 | 11.2 | 5.9 | 18.6 | 7.8 | 17.4 | 11.9 | 23.1 | 10.9 | 27.2 | 17.6 | 28.7 | 21.2 | 20.6 | 16.5 | 20.8 | 13.5 | 17.3 | 5.1 | 13.0 | 10.8 |
| 4 | 8.2 | 5.4 | 10.1 | 7.1 | 12.8 | 6.9 | 17.1 | 12.6 | 13.3 | 11.9 | 23.4 | 12.0 | 25.1 | 14.5 | 29.7 | 17.9 | 20.6 | 17.3 | 21.0 | 12.0 | 20.3 | 6.9 | 14.0 | 8.7 |
| 5 | 17.9 | 7.0 | 13.1 | 9.0 | * | * | 14.3 | 10.4 | 16.1 | 15.4 | 24.0 | 15.7 | 26.7 | 17.1 | 27.3 | 18.9 | 21.6 | 17.3 | 20.8 | 12.8 | 20.7 | 11.4 | 11.4 | 8.3 |
| 6 | 16.9 | 7.8 | 12.7 | 8.5 | 12.8 | 7.7 | 16.3 | 10.2 | 17.5 | 15.5 | 26.6 | 15.5 | 26.2 | 18.9 | 26.3 | 19.3 | 23.9 | 17.7 | 20.9 | 11.6 | 21.8 | 13.2 | 11.3 | 9.2 |
| 7 | 11.0 | 2.9 | 10.3 | 2.0 | 12.9 | 6.8 | 17.7 | 8.7 | 21.2 | 10.3 | 25.6 | 14.7 | 29.4 | 19.6 | 26.5 | 17.2 | 23.8 | 15.7 | 20.2 | 11.6 | 16.7 | 13.8 | 11.9 | 6.4 |
| 8 | 10.7 | 2.1 | 14.9 | 9.2 | 13.3 | 6.3 | 20.2 | 7.7 | 21.7 | 11.8 | 26.7 | 15.6 | 30.3 | 19.0 | 26.8 | 16.8 | 23.8 | 15.0 | 23.1 | 13.7 | 14.3 | 12.6 | 12.9 | 8.3 |
| 9 | 11.7 | 1.0 | 16.3 | 11.5 | * | * | 25.3 | 13.0 | 18.4 | 8.4 | 28.0 | 16.2 | 28.0 | 19.5 | 28.5 | 19.9 | 24.7 | 15.9 | 24.7 | 12.9 | 17.0 | 12.0 | 12.0 | 6.8 |
| 10 | 10.0 | 2.2 | 14.4 | 7.7 | * | * | 16.5 | 4.6 | 21.8 | 11.3 | 28.3 | 17.1 | 28.7 | 16.2 | 32.0 | 20.5 | 26.0 | 18.3 | 23.4 | 13.7 | 18.1 | 11.8 | 11.9 | 8.3 |
| 11 | 17.0 | 7.8 | 14.3 | 8.9 | * | * | 19.1 | 7.5 | 22.6 | 16.9 | 29.0 | 17.3 | 32.1 | 14.7 | 29.9 | 19.0 | 24.0 | 16.7 | 25.7 | 13.5 | 18.4 | 11.8 | 10.3 | 3.6 |
| 12 | 12.3 | 6.5 | 9.2 | 7.0 | * | * | 18.1 | 7.7 | 25.0 | 15.3 | 30.8 | 17.9 | 35.6 | 15.7 | 32.6 | 19.2 | 20.9 | 13.6 | 26.2 | 14.5 | 17.3 | 10.7 | 11.2 | 0.0 |
| 13 | 9.1 | 7.0 | 11.8 | 11.4 | * | * | 18.9 | 8.1 | 19.7 | 12.5 | 30.4 | 18.4 | 27.8 | 18.9 | 29.9 | 20.8 | 16.8 | 11.2 | 23.8 | 14.9 | 19.2 | 10.9 | 12.0 | 2.8 |
| 14 | 10.5 | 5.7 | 15.5 | 7.4 | * | * | 16.5 | 6.2 | 20.9 | 10.4 | 29.0 | 17.2 | 23.9 | 19.0 | 33.8 | 18.8 | 21.6 | 12.3 | 25.0 | 17.0 | 17.4 | 8.0 | 16.6 | 3.0 |
| 15 | 11.6 | 2.7 | 11.9 | 9.6 | * | * | 24.3 | 9.3 | 20.9 | 8.0 | 23.9 | 16.5 | 24.9 | 16.9 | 28.9 | 16.8 | 22.9 | 12.7 | 22.5 | 17.2 | 17.9 | 7.5 | 14.8 | 4.0 |
| 16 | 7.4 | 3.6 | 16.1 | 5.6 | * | * | 15.3 | 8.9 | 18.0 | 12.6 | 33.5 | 17.1 | 25.7 | 17.7 | 28.4 | 14.3 | 23.1 | 14.5 | 22.7 | 17.0 | 17.2 | 10.1 | 11.4 | 5.0 |
| 17 | 13.6 | 4.6 | 20.6 | 7.3 | * | * | 14.3 | 6.1 | 19.1 | 11.4 | 19.3 | 14.8 | 28.5 | 18.3 | 25.6 | 16.7 | 23.4 | 13.9 | 25.1 | 16.0 | 19.5 | 8.9 | 12.1 | 7.0 |
| 18 | 15.9 | 9.5 | 20.1 | 5.6 | * | * | 14.3 | 6.5 | 20.2 | 9.2 | 21.3 | 15.6 | 29.6 | 18.5 | 24.1 | 22.8 | 23.0 | 13.5 | 26.1 | 18.3 | 13.0 | 7.7 | 10.7 | 6.1 |
| 19 | 11.5 | 4.9 | 13.2 | 8.0 | * | * | 16.3 | 8.0 | 23.9 | 11.5 | 23.0 | 14.9 | 29.8 | 18.3 | 27.5 | 16.5 | 22.8 | 17.0 | 24.6 | 14.4 | 18.2 | 8.2 | 12.5 | 5.6 |
| 20 | 12.7 | 5.6 | 14.9 | 9.3 | * | * | 16.8 | 7.5 | 20.7 | 12.5 | 25.0 | 14.9 | 30.4 | 18.4 | 27.9 | 16.5 | 23.8 | 17.7 | 23.1 | 13.4 | 14.1 | 5.6 | 10.6 | 3.5 |
| 21 | 13.2 | 7.8 | 11.2 | 8.3 | * | * | 16.7 | 11.1 | 21.5 | 11.0 | 26.6 | 16.3 | 33.4 | 23.8 | 28.0 | 19.1 | 24.4 | 17.6 | 22.3 | 14.4 | 14.8 | 4.7 | 8.6 | 4.7 |
| 22 | 10.2 | 4.8 | 12.3 | 6.9 | * | * | 18.2 | 8.7 | 23.5 | 13.2 | 26.8 | 16.4 | 28.7 | 17.8 | 26.5 | 17.6 | 24.7 | 17.4 | 24.1 | 16.0 | 14.6 | 8.7 | 9.9 | 4.0 |
| 23 | 14.9 | 3.1 | 15.7 | 6.7 | * | * | 17.7 | 12.1 | 28.5 | 18.1 | 28.2 | 19.1 | 24.9 | 19.3 | 26.2 | 19.3 | 26.7 | 11.6 | 16.6 | 8.4 | 12.8 | 10.5 | 6.8 | 4.0 |
| 24 | 12.8 | 6.4 | 11.6 | 6.3 | * | * | 17.8 | 14.0 | 24.7 | 16.8 | 30.3 | 21.1 | 26.3 | 18.0 | 25.5 | 15.8 | 21.0 | 8.4 | 15.0 | 9.6 | 13.6 | 10.5 | 7.8 | 2.3 |
| 25 | 8.0 | 6.0 | 11.9 | 1.8 | * | * | 19.4 | 10.8 | 24.0 | 12.2 | 29.5 | 19.5 | 25.8 | 18.1 | 25.0 | 16.6 | 20.7 | 11.8 | 16.9 | 10.8 | 11.5 | 5.9 | 6.5 | 2.4 |
| 26 | 10.0 | 0.0 | 13.7 | 3.7 | * | * | 21.7 | 10.6 | 24.3 | 15.7 | 29.5 | 17.1 | 26.5 | 19.5 | 25.0 | 15.6 | 20.3 | 10.7 | 16.7 | 8.9 | 13.2 | 8.7 | 8.1 | 3.9 |
| 27 | 8.9 | 0.1 | 14.7 | 7.3 | 11.9 | 7.8 | 19.9 | 10.2 | 23.9 | 13.2 | 25.8 | 15.5 | 27.9 | 16.5 | 29.6 | 21.3 | 20.9 | 10.2 | 16.6 | 11.4 | 12.0 | 10.1 | 11.6 | 0.1 |
| 28 | 7.2 | 2.4 | 12.5 | 3.6 | 11.1 | 8.7 | 19.8 | 11.3 | 23.3 | 14.8 | 25.5 | 16.4 | 24.7 | 17.2 | 30.7 | 17.0 | 22.3 | 11.1 | 15.7 | 9.4 | 12.4 | 9.6 | 7.8 | 2.6 |
| 29 | 4.7 | 2.1 | | | 14.8 | 4.4 | 14.9 | 9.8 | 22.3 | 12.6 | 28.1 | 16.7 | 27.7 | 20.4 | 26.0 | 15.7 | 22.6 | 9.9 | 12.2 | 10.5 | 12.0 | 10.3 | 6.7 | 1.5 |
| 30 | * | * | | | 15.8 | 3.9 | 18.6 | 11.2 | 21.4 | 14.3 | 29.5 | 16.6 | 28.1 | 16.7 | 25.0 | 14.0 | 21.7 | 11.5 | 15.1 | 6.6 | 13.1 | 10.7 | 6.3 | 0.1 |
| 31 | 12.0 | 6.9 | | | 16.7 | 5.5 | | | 23.6 | 14.0 | | | 23.6 | 16.7 | 26.1 | 17.0 | | | 15.2 | 9.3 | | | 3.0 | 0.9 |
| MEDIE | 11.0 | 4.2 | 13.3 | 6.2 | * | * | 18.1 | 9.2 | 21.2 | 12.1 | 26.0 | 16.0 | 27.0 | 17.8 | 27.8 | 17.7 | 22.7 | 14.2 | 21.0 | 13.0 | 16.0 | 9.3 | 10.8 | 6.0 |
| Med. mens. | 7.6 | | 9.8 | | * | * | 13.7 | | 16.6 | | 21.0 | | 22.4 | | 22.8 | | 18.4 | | 17.0 | | 12.7 | | 7.9 | |
| Med. norm. | 5.3 | | 6.9 | | 9.1 | | 13.2 | | 16.5 | | 21.0 | | 23.8 | | 23.9 | | 19.9 | | 15.7 | | 10.8 | | 6.3 | |

Figura 2.1 - Annale Idrologico del 2014, Bettollelle, Tabella I con i dati minimi e massimi giornalieri

2.1 Raccolta e analisi dei dati pluviometrici

Le stazioni di misura delle precipitazioni utilizzate sono le seguenti indicate nella Tabella 2.1 e illustrate in Figura 2.2:

| Nome | Latitudine | Longitudine | Quota [m] |
|--------------------|------------|-------------|-----------|
| <i>Arcevia</i> | 43°29' | 12°56' | 535 |
| <i>Barbara</i> | 43°34' | 13°1' | 186 |
| <i>Bettollelle</i> | 43°39' | 13°9' | 26.47 |
| <i>Colle</i> | 43°32' | 13°3' | 350 |
| <i>Corinaldo</i> | 43°39' | 13°2' | 218 |
| <i>Senigallia</i> | 43°42' | 13°12' | 6 |

Tabella 2.1 - Coordinate e quota delle stazioni pluviometriche utilizzate



Figura 2.2 - Disposizione dei pluviometri

Le stazioni di Barbara, Corinaldo e Montecarotto-Colle seguono delle serie omogenee, di queste stazioni sono stati utilizzati i valori della rete meccanica (RM) in aggiunta ai valori ricavati dalla rete in telemetria (RT), in quanto assicurata la continuità tra le due misure.

In particolare, la rete meccanica della stazione di Montecarotto è in continuità con le misurazioni della rete in telemetria della stazione di Colle. Essendo le due stazioni non localizzate perfettamente nella stessa postazione, nel modello idrologico sono state considerate solo le coordinate della stazione più nuova di Colle (RT).

Per le stazioni di Arcevia, Bettolle e Senigallia sono stati utilizzati i dati forniti dalla nuova rete in telemetria (RT).

Nella Tabella 2.2 sono elencate le stazioni pluviometriche e le relative date di funzionamento delle reti meccaniche e in telemetria, inoltre in base all'estensione temporale è stata valutata l'omogeneità della serie.

| Stazione | Validità della RM | Validità della RT | Omogeneità |
|--------------------------------|--|--------------------------|-------------------|
| Arcevia | 01/01/1951-31/12/2007 | 10/06/2003-01/10/2022 | No |
| Barbara | 01/01/1951-06/07/2009 | 30/11/2009-01/10/2022 | Sì |
| Bettolelle | / | 11/06/2007-01/10/2022 | No |
| Montecarotto- Colle | 01/10/1951-01/01/2008 | 17/10/2003-01/10/2022 | Sì |
| Corinaldo | 01/01/1951-01-01-2015 | 13/03/2014-01/10/2022 | Sì |
| Ostra | 01/01/1951-01/01/2008 02/01/1991-01/01/2000 | / | No |
| Senigallia | / | 01/07/2008-01/10/2022 | No |

Tabella 2.2 - Estensione temporale dei dati RM e RT

Di seguito nelle Figure 2.3, 2.4 e 2.5 vengono riportati degli esempi di istogrammi di precipitazione estratti dal SIRMIP e riferiti all'evento del 2014, in particolare sono state visualizzate le giornate che vanno dal 30 aprile al 7 maggio. Questo confronto, essendo fatto a titolo di esempio, è stato prodotto considerando solo le stazioni di Senigallia (RT), Bettolelle (RT) e Montecarotto-Colle (RM-RT).

Analizzando visivamente i grafici ottenuti si notano dei picchi molto simili tra loro che dimostrano la sincronia tra i vari sensori pluviometrici, sebbene ci siano comunque delle discrepanze dovute ovviamente al posizionamento dei pluviometri all'interno del bacino. Nello specifico il picco del 3 maggio ha raggiunto dei valori di precipitazione molto elevati in tutte e tre le stazioni prese in considerazione, si registrano infatti poco più di 4 mm nella stazione di Senigallia, circa 7 mm nella stazione di Bettolelle e 8 mm nella stazione di Montecarotto-Colle.

Si nota anche un precedente evento rilevante, sebbene di portata molto inferiore rispetto a quello sopracitato, che raggiunge il valore più significativo nella stazione di Senigallia pari a circa 3.5 mm. Nelle stazioni di Bettolelle e Montecarotto-Colle raggiunge rispettivamente 0.8 mm e 1 mm circa.

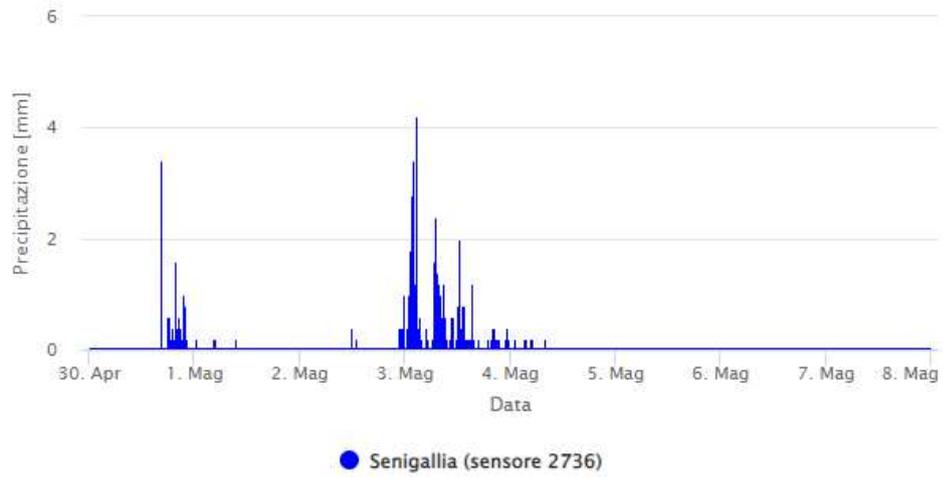


Figura 2.3 – Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Senigallia relativi all’evento del 2014

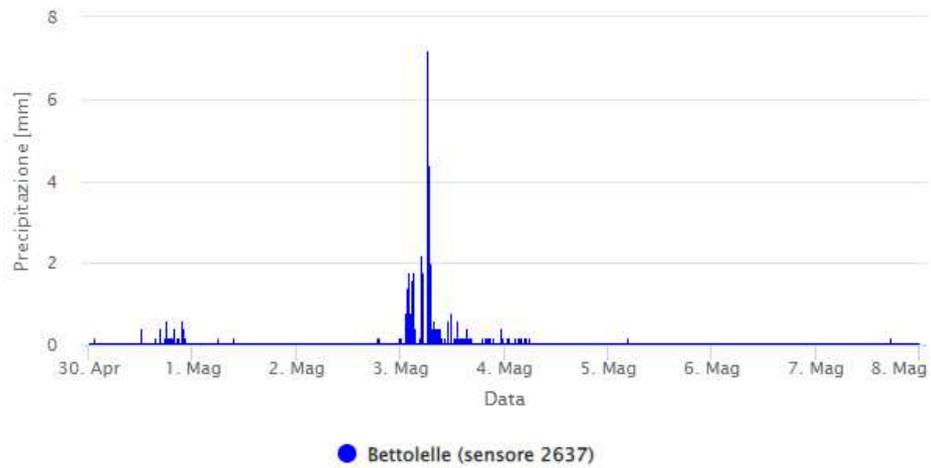


Figura 2.4 - Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Bettolle relativi all’evento del 2014

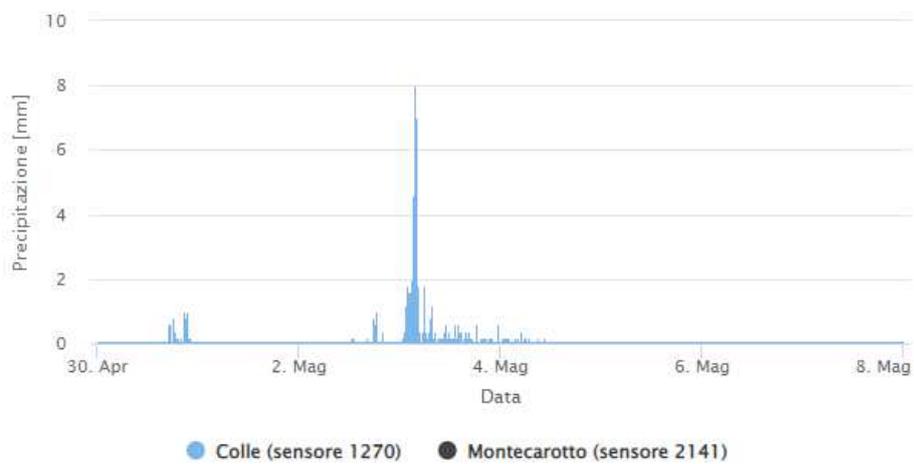


Figura 2.5 - Dati di precipitazione misurati dal pluviometro di Montecarotto-Colle relativi all’evento del 2014

2.2 Analisi delle portate

Le stazioni di misura delle portate presenti in tutto il bacino sono indicate nella Tabella 2.3:

| Nome | Anno di attivazione* | Latitudine | Longitudine | Quota [m] |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| <i>Bettolelle</i> | 2000 | 43°39' | 13°9' | 26.47 |
| <i>Corinaldo</i> | 2003 | 43°39' | 13°4' | 65.8 |
| <i>Serra De' Conti</i> | 2002 | 43°32' | 13°1' | 118.77 |
| <i>Ponte Garibaldi</i> | 2016 | 43°42' | 13°12' | 2.00 |
| <i>Pianello di Ostra</i> | 2015 | 43°37' | 13°07' | 44.00 |
| <i>Passo Ripe</i> | 2017 | 43°39' | 13°07' | 41.00 |

Tabella 2.3 – Coordinate e quota delle stazioni idrometriche

*Nella tabella è stato indicato solo l'anno di inizio del funzionamento della strumentazione in quanto tutti i sensori sono ancora attivi.

Non tutte le stazioni idrometriche sopra citate sono state utilizzate per il calcolo della portata a causa di una mancanza di disponibilità di dati. Sono state infatti utilizzate solo le stazioni di Bettolelle, Corinaldo, Serra De' Conti e Ponte Garibaldi.

Per una chiara visualizzazione sono state evidenziate con colorazione gialla le ubicazioni dei vari idrometri utilizzati per ricavare i dati portata (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Ubicazione degli idrometri in giallo

In mancanza di misurazioni dirette di portata, sono state prese in considerazione solo le stazioni con disponibilità di una scala di deflusso

La misura della portata può essere effettuata sia mediante misurazione diretta del volume che defluisce nell'unità di tempo attraverso una data sezione sia indirettamente misurando delle grandezze fisiche legate ad essa. La scala di deflusso o scala delle portate esprime, per una data sezione, la relazione tra la portata defluente Q e il tirante idrico H . L'uso di questa funzione semplifica l'acquisizione dei dati di portata, consentendo di passare in maniera diretta dal livello idrometrico al corrispondente valore di portata. In occasione di eventi naturali estremi la stabilità nel tempo della scala di deflusso, assicurata in condizioni normali, può essere modificata. Il calcolo della portata mediante la scala di deflusso è tanto più affidabile quanto più i dati rientrano nel campo delle misure sperimentali effettuate.

La stazione idrometrica di Ponte Garibaldi, per la quale non è presente alcuna scala di deflusso, è stata ad ogni modo considerata poiché è posizionata nelle vicinanze di uno strumento River Gauge, il quale consente una misurazione diretta del livello idrico.

Sono di seguito rappresentate le scale di deflusso più recenti disponibili sulla pagina del SIRMIP. Nella tabella sono stati indicati l'inizio e la fine della validità della scala con corrispondente formula per il calcolo della portata per

valori del tirante idraulico compresi in un determinato intervallo. (SIRMIP online, n.d.)

Scala di deflusso definita dalla stazione idrometrica di Bettollele riferita all'anno 2019 (Tabella 2.4, Figura 2.7):

| Inizio validità | Fine validità | Intervallo di validità | Scala di deflusso |
|-----------------|---------------|-------------------------|--|
| 2019 | 2030 | $0.85 \leq H \leq 1.03$ | $Q=2.33 \times [H-(0.84)]^{0.79}+0$ |
| 2019 | 2030 | $1.04 \leq H \leq 2.1$ | $Q=19.68 \times [H-(1.03)]^{1.24}+0.6$ |
| 2019 | 2030 | $2.11 \leq H \leq 3.8$ | $Q=64.05 \times [H-(2.1)]^{1.26}+22.01$ |
| 2019 | 2030 | $3.81 \leq H \leq 5.5$ | $Q=155.87 \times [H-(3.8)]^{1.16}+146.7$ |

Tabella 2.4 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Bettollele

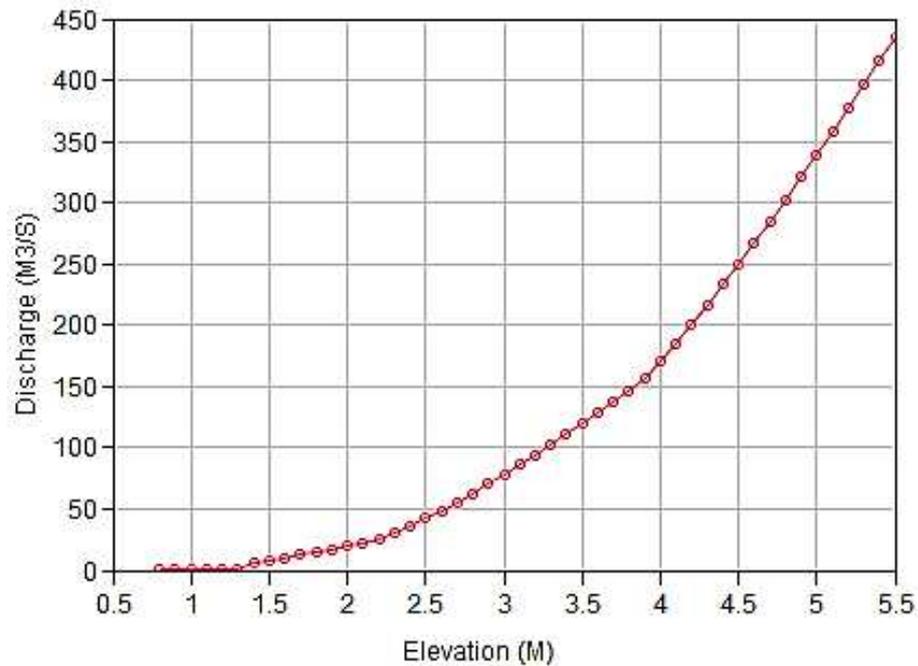


Figura 2.7 – Grafico portata-elevazione della stazione idrometrica di Bettollele

Scala di deflusso definita dalla stazione idrometrica di Corinaldo riferita all'anno 2017 (Tabella 2.5, Figura 2.8):

| Inizio validità | Fine validità | Intervallo di validità | Scala di deflusso |
|-----------------|---------------|-------------------------|--|
| 2017 | 2030 | $0.85 \leq H \leq 1.2$ | $Q=0.628 \times [H-(0.849)]^{0.975}+0$ |
| 2017 | 2030 | $1.21 \leq H \leq 1.46$ | $Q=22.094 \times [H-(1.2)]^{1.295}+0.231$ |
| 2017 | 2030 | $1.47 \leq H \leq 2.84$ | $Q=48.606 \times [H-(1.46)]^{1.18}+4.091$ |
| 2017 | 2030 | $2.85 \leq H \leq 5$ | $Q=94.37 \times [H-(2.84)]^{1.223}+75.173$ |

Tabella 2.5 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Corinaldo

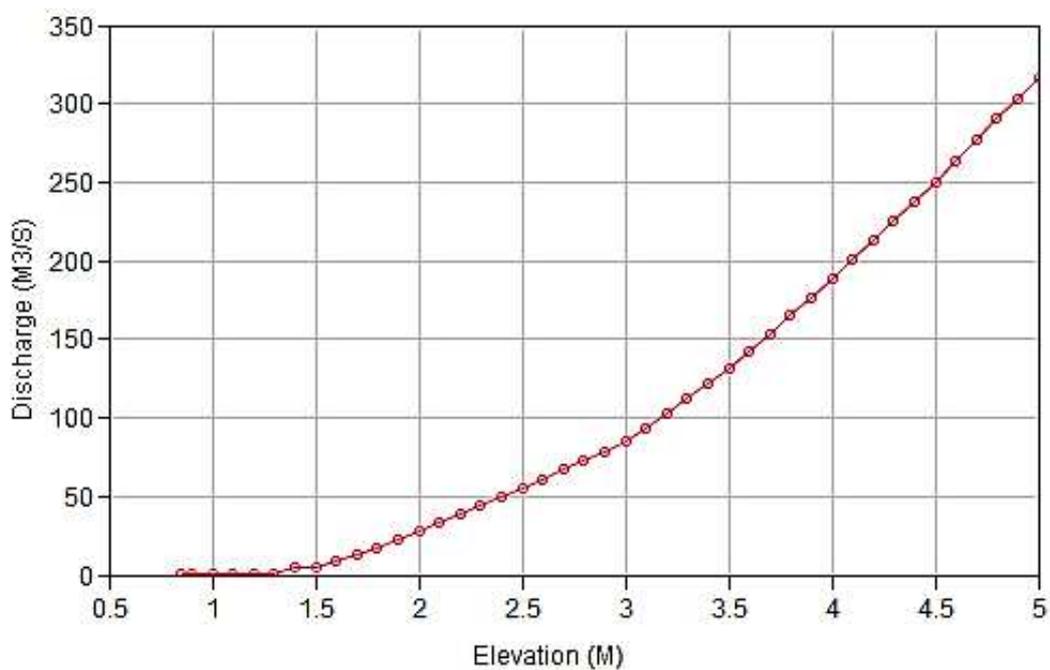


Figura 2.8 - Grafico portata-elevazione della stazione di Corinaldo

Scala di deflusso definita dalla stazione idrometrica di Serra De' Conti riferita all'anno 2015 (Tabella 2.6, Figura 2.9):

| Inizio validità | Fine validità | Intervallo di validità | Scala di deflusso |
|-----------------|---------------|-------------------------|--|
| 2015 | 2030 | $0 \leq H \leq 0.64$ | $Q=2.808 \times [H - (-0.257)]^{5.841} + 0$ |
| 2015 | 2030 | $0.65 \leq H \leq 1.56$ | $Q=16.399 \times [H - (0.64)]^{1.04} + 1.492$ |
| 2015 | 2030 | $1.57 \leq H \leq 4.5$ | $Q=39.465 \times [H - (1.56)]^{1.238} + 16.53$ |

Tabella 2.6 – Scala di deflusso relativa alla stazione idrometrica di Serra De' Conti

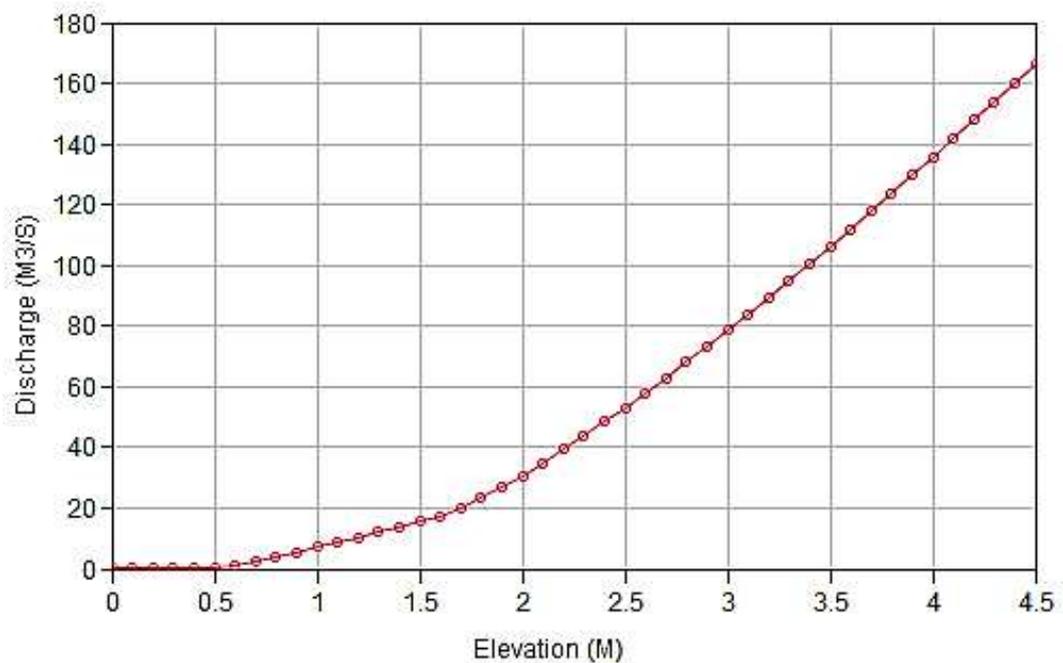


Figura 2.9 - Grafico portata-elevazione della stazione di Serra De' Conti

Capitolo 3

3 Creazione di un modello idrologico georeferenziato

L'uso dei sistemi informativi geografici (GIS) consente di effettuare un'analisi dei dati idrologici tenendo conto delle variabilità spaziali delle grandezze coinvolte.

I modelli idrologici georeferenziati sfruttano la possibilità di rappresentare un territorio eterogeneo tramite la disponibilità di dati satellitari spazialmente distribuiti per migliorare la capacità predittiva dei cicli dell'acqua.

3.1 Software HEC-HMS

I software HEC vengono sviluppati dall'Hydrologic Engineering Centre del US Army Corps of Engineers. Si tratta di programmi progettati con lo scopo di effettuare modellazioni complesse di uso frequente in campo idrologico. Un importante vantaggio legato all'uso di questi software è il loro continuo sviluppo; di fatto vengono introdotti nuovi aggiornamenti ogni anno.

Il software utilizzato nel presente lavoro per la creazione del modello idrologico del Misa è HEC-HMS. È un sistema di modellazione idrologica volto a simulare i processi di deflusso delle precipitazioni che si verificano all'interno di bacini idrografici, e a determinare le portate di piena in particolari sezioni del bacino in funzione dei tempi di ritorno considerati. Un recente aggiornamento del software ne ha potenziato la componente GIS (Geographic Information System) rendendo possibile l'elaborazione di un modello digitale del terreno (DTM), la successiva scomposizione in sottobacini idrografici e, infine, la predisposizione automatica del modello di bacino.

Il modello idrologico del Misa descritto e discusso in questa tesi è stato creato adoperando la versione 4.9 del software, pubblicata 21 gennaio 2022. Questa versione non è l'ultima che è stata rilasciata dall'Hydrologic Engineering Centre; esiste infatti una più recente versione del programma, datata al 28 gennaio 2022 (4.10) e di cui, ad oggi, si ha disposizione solo la versione non definitiva (beta).

Come ogni sistema di simulazione anche questo programma presenta delle limitazioni dovute principalmente alla modalità di progettazione e sviluppo dello stesso. Più precisamente l'estrema semplificazione del flusso rappresenta sì un vantaggio nella velocità del completamento delle simulazioni, ma anche una delle limitazioni del software.

Tutti i modelli matematici inclusi sono di tipo deterministico, quindi necessitano di condizioni al contorno, condizioni iniziali e di parametri noti. Questo tipo di

modello permette di ottenere gli stessi risultati ogni volta che si esegue una simulazione.

Il programma presenta una vasta gamma di funzionalità specifiche per la simulazione idrologica e include numerosi metodi di inserimento dei parametri necessari ad effettuare una simulazione completa.

La rappresentazione fisica di un bacino idrografico si realizza mediante l'uso di un modello di bacino e l'inserimento di elementi idrologici collegati da una rete dendritica. Gli elementi disponibili per il completamento del modello sono i sottobacini, le giunzioni, le deviazioni, i serbatoi e le sorgenti.

Il modello di bacino consente di collegare ad ogni elemento idrico un solo elemento posizionato più a valle creando in questo modo una rete idrologica.

Il processo di calcolo inizia a partire dai sottobacini posti più a monte e procede poi seguendo la direzione del flusso nella rete. I valori di deflusso calcolati di volta in volta vengono trasmessi agli elementi di valle, ai quali viene automaticamente assegnato tale afflusso. Dunque, proseguendo verso valle ad ogni elemento viene assegnato l'afflusso proveniente dagli elementi di monte.

(HEC-HMS, n.d., pp. 40,41)

3.2 Dati acquisiti

Il primo passo per la creazione del modello è stato l'introduzione nel software del Modello Digitale del Terreno (DTM) della Regione Marche. Il DTM è liberamente ottenibile dalla pagina web ufficiale della regione. (Regione Marche, n.d.)

Per il calcolo del DTM è stato utilizzato l'algoritmo *Triangulation with Linear Interpolation* e i dati che ne definiscono le linee caratteristiche sono stati trasformati in punti e calibrati mediante l'uso di un DTM di massima caratterizzato da sole curve di livello. Per il calcolo è stato adottato un totale di 78 milioni di punti.

La regione ha derivato il DTM dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) attenendosi alle specifiche tecniche prodotte dal Centro Interregionale e alle linee guida per la produzione di ortofoto digitali alla scala nominale di 1:10.000.

La CTR ha come sistema di riferimento quello di Gauss-Boaga/Roma40 – fuso Est ed è stata convertita in maniera rigorosa mediante il software Verto 2000. Concentratamente la conversione ha richiesto il passaggio dal sistema di riferimento di Gauss-Boaga ai sistemi UTM-WGS84 in coordinate piane e in coordinate ellissoidiche.

Il modello è caratterizzato da un livello di precisione pari a 2, parametro dipendente dalla fonte dei dati e dal campo di applicazione del modello, da una

precisione in quota pari a ± 2 m e una precisione altimetrica pari a ± 1 m. La griglia del modello ha un passo di 20 m e un errore sistematico inferiore ad 1 m.

(Regione Marche, n.d., p. 41)

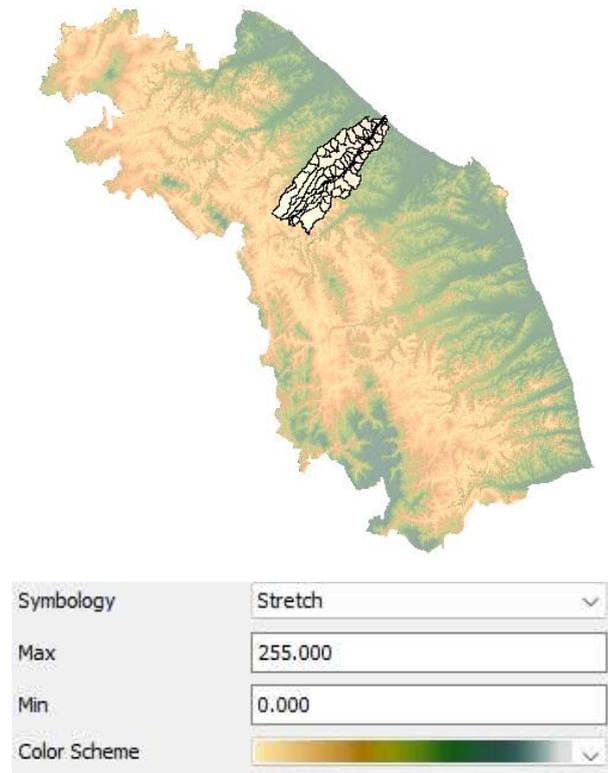


Figura 3.1- DTM delle Marche con passo $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ con rispettiva legenda

A partire dal DTM, rappresentato in Figura 3.1, è stato ricavato il DTM relativo al solo bacino del Misa mediante l'utilizzo del software ArcGIS, un sistema informativo geografico prodotto da ESRI (Environmental System Research Institute) e utilizzato per la creazione di mappe e per la gestione e analisi di dati geografici (ESRI, n.d.). La forma e le informazioni geografiche del bacino del Misa sono state fornite al software ArcGIS attraverso uno *shapefile*. Uno *shapefile* è un particolare formato di archiviazione di dati vettoriali digitali che contiene al suo interno informazioni sulla posizione geografica, sulla forma e sugli attributi associati ad un oggetto (ESRI, n.d., p. 42). In ambiente ArcGIS è stato possibile effettuare una sovrapposizione tra lo *shapefile* raffigurante il bacino del Misa e il DTM dell'intera regione, per poter quindi estrarre solo il bacino desiderato.

Il DTM del bacino del Misa ottenuto è stato quindi fornito a HEC-HMS attraverso la Componente di Gestione dei Dati del Terreno (*Terrain Data Manager*) integrata nel software. Il sistema di riferimento del bacino è stato automaticamente impostato in base al sistema di coordinate dei dati GIS del terreno. Al bacino geografico così definito, infine, è stato associato un

corrispondente modello di bacino (*Basin Model*), il cui scopo principale è quello di convertire tutte le condizioni atmosferiche insistenti sul bacino (precipitazioni) in flussi idrici calcolabili e osservabili in determinate posizioni del bacino stesso.

All'interno di HEC-HMS sono stati introdotti tre ulteriori *shapefile* contenenti dati relativi ai sottobacini, al tratto principale del Misa (e del Nevola) e agli elementi idrici secondari collegati all'elemento idrico principale. Questi file sono stati utilizzati in un secondo tempo come guida per la suddivisione dei sottobacini e per l'identificazione di tutti gli elementi che caratterizzano il bacino idrografico.

Viene illustrato in Figura 3.2 il bacino del Misa e la sovrapposizione dei tre *shapefile*.



Figura 3.2 – Rappresentazione del bacino del Misa, dei suoi sottobacini, del reticolo idrografico e delle aste fluviali principali tramite shapefile.

Il modello generato da HEC-HMS suddivide l'intero territorio in un determinato numero di celle in base alla risoluzione del DTM che è stato inserito al suo interno.

La maggior parte dei metodi inseriti nel software lavora con delle griglie composte da un'unione di celle, ad ognuna delle quali devono essere assegnati degli appropriati parametri. Dunque, per ogni cella devono essere inserite le condizioni al contorno e i dati di precipitazione disponibili.

3.3 Identificazione della rete e dei sottobacini

Per procedere all'identificazione della rete idrologica e alla suddivisione del bacino in sottobacini sono stati creati vari livelli (*layers*) in grado di costruire passo dopo passo la rete e simularne il flusso all'interno, i passaggi eseguiti sono di seguito elencati.

In primo luogo, sono stati creati due livelli mediante l'uso dello strumento *Preprocess Sinks* selezionabile dal menu GIS, strumento disponibile solo dopo l'inserimento di un modello di bacino. Questo set di dati crea un algoritmo di rimozione degli avvallamenti presenti sul terreno (rappresentato dal DTM) e produce un modello di elevazione idrologicamente corretto utilizzabile per la successiva delineazione della rete e per comprenderne al meglio la direzione del flusso.

Il primo livello è il *Sink Fill* che rappresenta proprio il terreno idrologicamente corretto da utilizzare nei successivi passaggi, il secondo livello è il *Sink Locations* (rappresentato in Figura 3.3) che invece illustra nello specifico la quantità di acqua necessaria allo spostamento del flusso da una cella a quella adiacente.

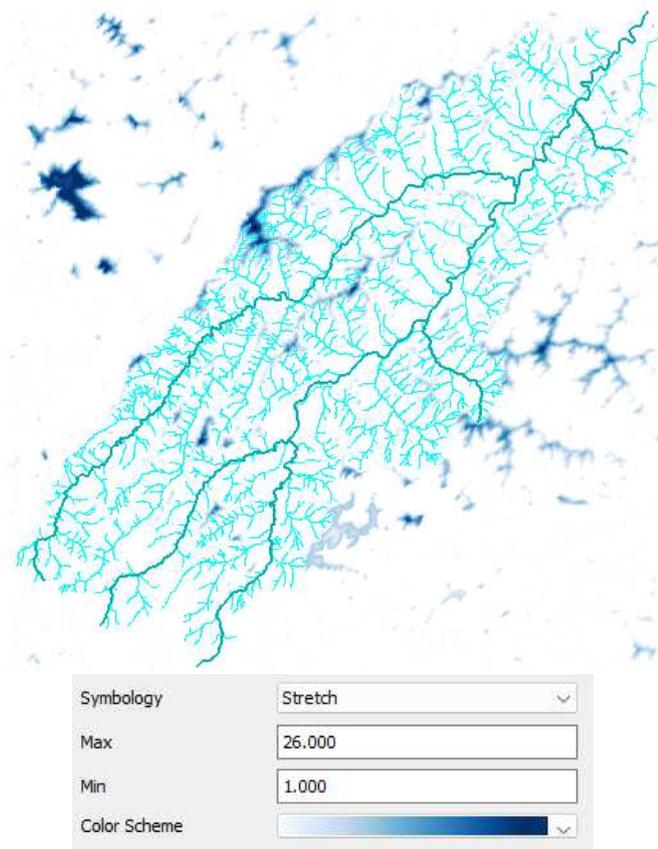


Figura 3.3 - Sink Location e rispettiva legenda

Mediante l'uso dello strumento denominato *Preprocess Drainage* o programma di drenaggio, anche questo disponibile solo dopo l'inserimento del modello di bacino, vengono inseriti due ulteriori livelli tramite la creazione di un nuovo algoritmo in grado di determinare la direzione e l'accumulo del flusso per ogni cella della griglia del terreno. Questo programma utilizza il modello di elevazione idrologicamente corretto creato nel passaggio precedente (*Preprocess Sink*).

Il *Flow Accumulation* (Figure 3.4 e 3.5) è uno dei livelli creati mediante l'uso del programma di drenaggio, questo indica il numero di celle posizionate più a monte rispetto alla cella selezionata, a titolo di esempio nella Figura 3.5 è stata scelta una cella casuale, la quale si trova a monte di 8 celle. L'altro livello è il *Flow Direction* (Figure 3.6 e 3.7) il cui set di dati illustra la direzione del flusso che si sposta da una cella posizionata più a monte ad una cella posta più a valle.

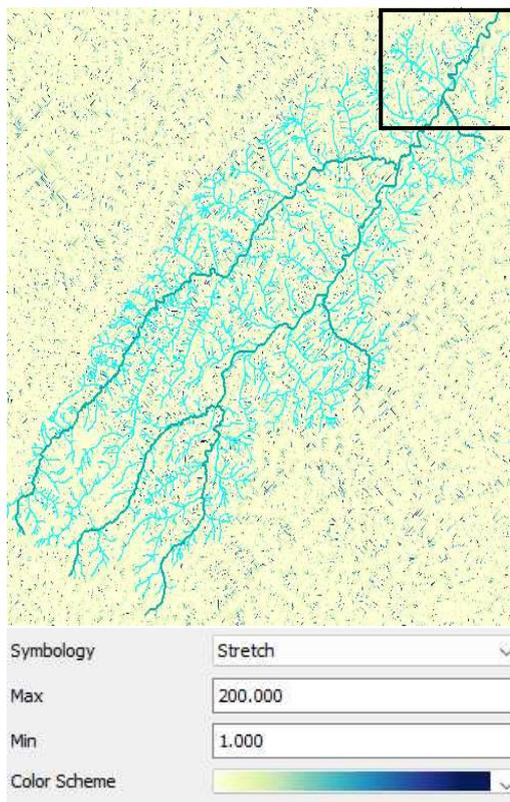


Figura 3.4 - Accumulo del flusso (Flow Accumulation) e rispettiva legenda

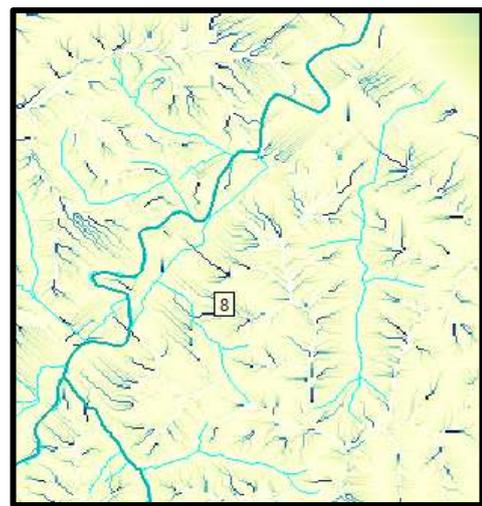


Figura 3.5 - Ingrandimento della Figura 3.4

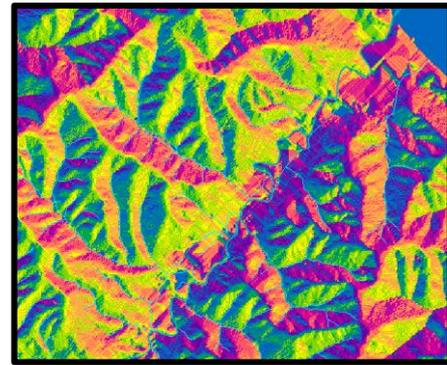
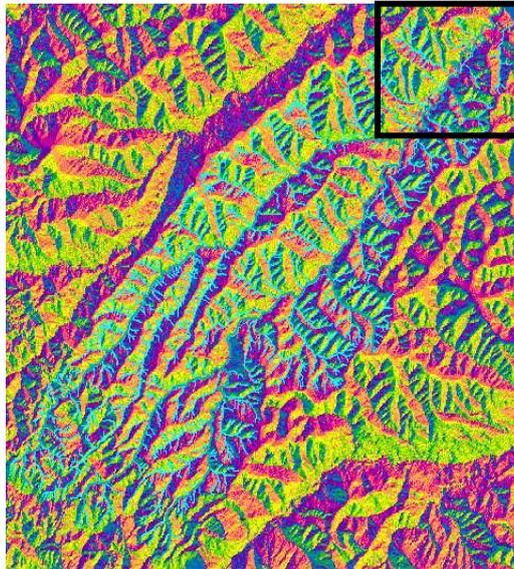


Figura 3.7 - Ingrandimento della
Figura 3.7

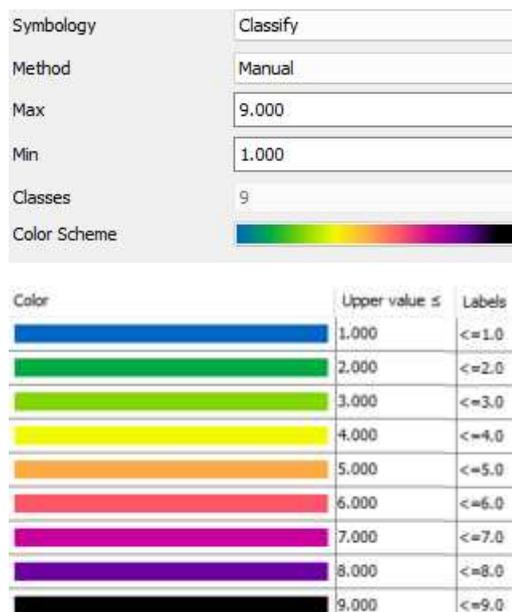


Figura 3.6 - Direzione del flusso e rispettiva
legenda

Sfruttando la funzione di identificazione dei flussi denominata *Identify Streams* (Figura 3.8), infine, il software procede alla suddivisione automatica del bacino in molteplici sottobacini, in funzione degli elementi idrici principali e secondari definiti nelle operazioni precedenti. Per l'individuazione dei sottobacini è stata utilizzata una soglia minima di superficie di drenaggio pari a 3.8 km².

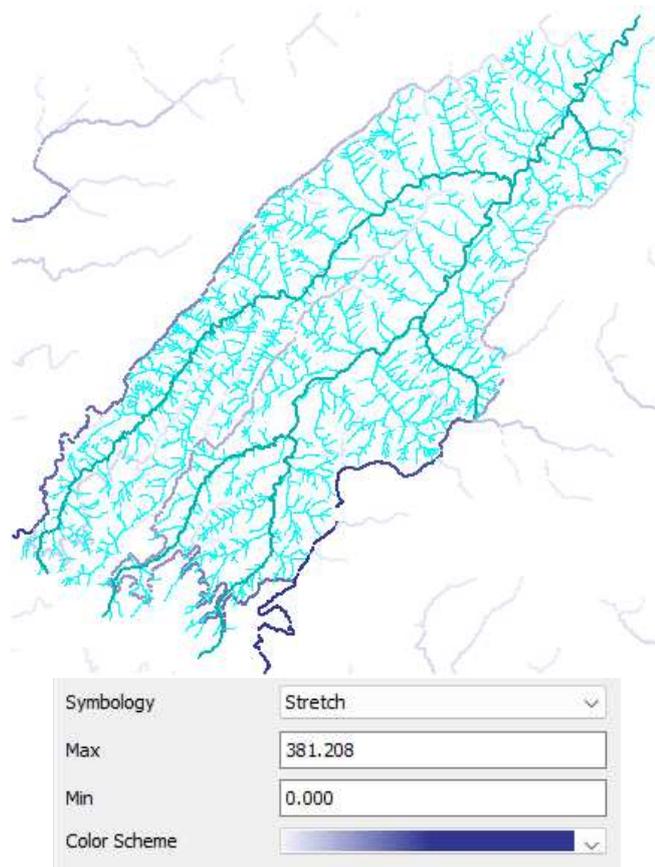


Figura 3.8 - Flussi identificati (*Identify Streams*) e rispettiva legenda

L'area di analisi viene definita, nella sua sezione finale, mediante l'introduzione di un punto di interruzione al quale il software assocerà i dati di output finali dello studio idrologico (Figura 3.9). Nello specifico, il punto di uscita è stato posizionato in corrispondenza della foce del Misa. È importante che tale punto venga individuato in corrispondenza di una cella della griglia all'interno del flusso già identificato dal programma.

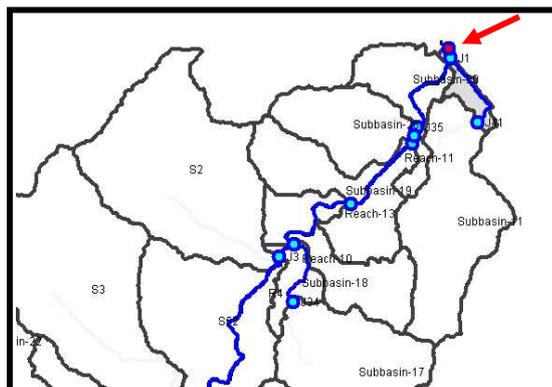


Figura 3.9 - Ingrandimento della posizione del punto di interruzione

Una volta informato il software sulla conformazione geografica e orografica del bacino, sui percorsi di deflusso delle precipitazioni e sulla sezione di uscita del bacino, si può infine procedere alla delineazione vera e propria dei sottobacini e degli elementi idrici tramite lo strumento di delineazione degli elementi (*Delineate Elements*). Essendo stata richiesta la denominazione di ogni singolo elemento, sono stati utilizzati i prefissi “J” (- *Junction*) per individuare gli elementi di giunzione tra sottobacini, “R” (- *Reach*) per gli elementi lineari di unione tra le giunzioni (aste fluviali) e “S” (- *Subbasin*) per i numerosi sottobacini. La numerazione degli elementi è avvenuta in maniera automatica, così come la definizione dei tratti e delle giunzioni.

La rete idrologica finale, rappresentata in Figura 3.10 mostra la suddivisione definitiva del territorio in un numero ampio di sottobacini, i quali fungono da superfici di drenaggio separate tra di loro. Il collegamento idrologico tra sottobacini adiacenti è fornito attraverso le giunzioni e le aste fluviali, che rivestono il ruolo di raccogliere il deflusso dei sottobacini e convogliarlo fino alla sezione di uscita. Prima dell’avvio dell’analisi idrologica, il reticolo dei sottobacini definito automaticamente dal software è stato ulteriormente adattato e modificato, mediante gli strumenti di unione (*Merge*) e taglio (*Split*), in modo da renderlo il più possibile affine alla ripartizione in sottobacini “ufficiale” fornita in formato di *shapefile*.

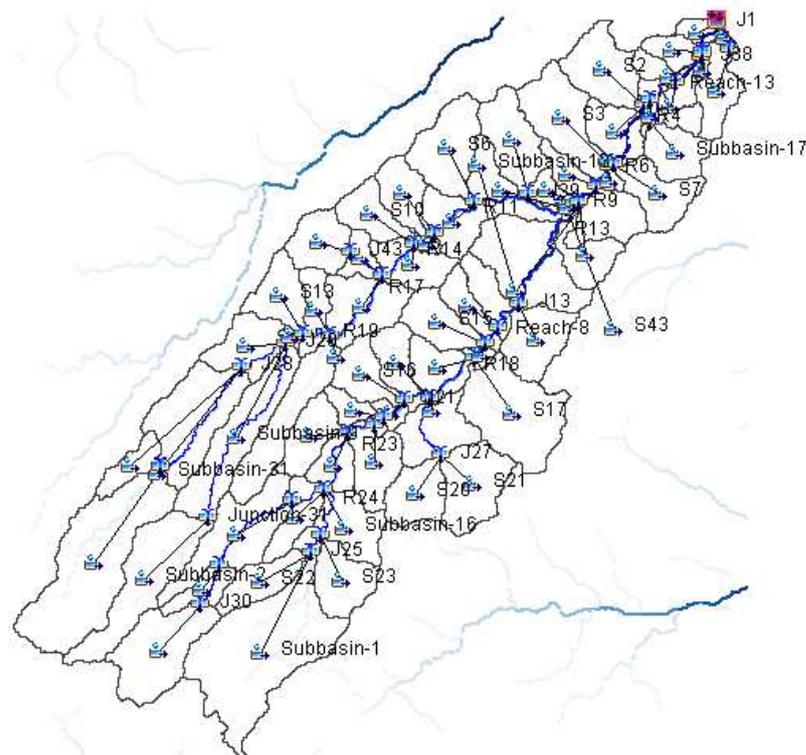


Figura 3.10 - Suddivisione del bacino in sottobacini

Le caratteristiche dei sottobacini vengono calcolate automaticamente da HEC-HMS utilizzando i sottobacini georeferenziati e i GIS. È possibile visualizzare tutte le caratteristiche analizzate dal software nella voce *Parameters* dove vengono fornite informazioni sulla massima lunghezza e pendenza del percorso di flusso (*Longest Flowpath Length, Longest Flowpath Slope*), sulla lunghezza e pendenza del percorso di flusso baricentrico (*Centroidal Flowpath Length, Centroidal Flowpath Slope*), sulla pendenza media del percorso del flusso rappresentato dal 10-85% del percorso del flusso più lungo (*10-85 Flowpath Length and Slope*), sulla pendenza del bacino (*Basin Slope*) e sul rilievo del bacino (*Basin Relief*).

3.4 Stima dei parametri

3.4.1 Parametri per il metodo delle perdite (*Loss method*)

Il deflusso superficiale e i complessi processi del sottosuolo vengono stimati tramite i cosiddetti metodi delle perdite. In totale i metodi previsti sono dodici, alcuni sono progettati principalmente per la simulazione di eventi (*Exponential method, Green and Ampt method, Gridded Green and Ampt method, Gridded SCS Curve Number method, Initial and constant method, SCS Curve Number method, Smith Parlange method*), altri sono destinati alla sola simulazione continua (*Deficit and Constant method, Gridded Deficit and Constant method, Gridded Soil Moisture Accounting method, Layered Green and Ampt method, Soil moisture accounting method*).

La simulazione continua è un processo complesso che copre un periodo di tempo molto esteso e richiede anche la conoscenza dei dati di evapotraspirazione. Al contrario la simulazione di un evento singolo è specifica per un arco di tempo breve e per essere eseguita necessita di parametri meno difficili da reperire.

Fattore comune ad entrambe le metodologie è il principio di conservazione della massa: più precisamente, data una finestra temporale di riferimento, la somma delle acque di infiltrazione e delle acque che fluiscono in superficie (*runoff*) deve necessariamente uguagliare la precipitazione in ingresso per un determinato bacino.

Per lo sviluppo del modello presentato in questa tesi è stato utilizzato il metodo del *SCS Curve Number (Soil Conservation Service)* che ha permesso la simulazione di una coppia di eventi rappresentativi. Questo metodo è in grado di effettuare una stima delle precipitazioni in eccesso inserendo i dati sulle precipitazioni e sulla copertura e uso del suolo.

I valori del *Curve Number* oscillano tra un valore massimo pari a 100, applicabile ai corpi idrici, e un valore minimo che si aggira intorno al 30, riferito a terreni molto permeabili che facilitano il processo di infiltrazione.

Questi valori vengono definiti utilizzando delle tabelle pubblicate dal SCS che permettono di ricavare un unico valore di CN in base al tipo di suolo.

Il calcolo del CN per un bacino costituito da varie tipologie di suolo viene fatto considerando la seguente formula del valore composito:

$$CN \text{ composito} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i}$$

dove i è il pedice che indica la specifica suddivisione del bacino con un uso del suolo uniforme, CN è il *Curve Number* e A è l'area drenante.

Sfruttando questo metodo il programma riesce a calcolare le precipitazioni cumulative cadute durante un evento specifico ricalcolando il volume di infiltrazione accumulato alla fine di ogni intervallo di tempo specificato nella finestra temporale del *Control Specifications*, funzione spiegata più avanti nel capitolo 3.5.2 (- Specifiche di controllo). L'infiltrazione durante ogni intervallo di tempo è data dalla differenza di volume alla fine di due intervalli di tempo adiacenti.

Il metodo prevede l'assegnazione dei seguenti parametri ad ogni sottobacino:

- La *Initial abstraction*, che definisce la quantità di precipitazione che deve cadere prima che inizi a verificarsi il *runoff* superficiale. Fino a che le precipitazioni cumulate non supereranno questo valore, quindi, l'eccesso di precipitazione e il *runoff* saranno nulli.
- Il numero della curva (*Curve Number*), che rappresenta tutte le possibili combinazioni di gruppi di suolo e uso del suolo nel sottobacino interessato.
- La percentuale di area impermeabilizzata (*Impervious*) direttamente collegata ai sottobacini.

Nel presente modello i valori della *Initial Abstraction* sono stati posti pari a zero per evitare di modificare in modo inopportuno la risposta dell'infiltrazione, e in mancanza di misurazioni reali. (Hydrologic Modeling System Manual)

I valori del *Curve Number* per i sottobacini sono stati reperiti dall'elaborato denominato "Assetto di progetto della media e bassa valle del fiume Misa" redatto dalla Regione Marche nel 2016 volto all'analisi dell'evento di piena del 2014. Lo studio eseguito nel suddetto elaborato assegna valori del CN pari a 79 per i sottobacini del fiume Misa, e pari ad 80 per i sottobacini del fiume Nevola. (Assetto di progetto media e bassa valle del fiume Misa, 2016, p. 49)

Le percentuali di impermeabilizzazione, infine, sono state recuperate dalle informazioni relative al contratto di fiume (Mappa interattiva Contratto di fiume Misa-Nevola), i valori oscillano tra un minimo del 2.3% e un massimo di circa 26.99%. La distribuzione di tali percentuali varia in base all'urbanizzazione del bacino, nelle zone più edificate, come le zone centrali

delle città, l'impermeabilizzazione è maggiore poiché la copertura del suolo impedisce l'assorbimento dell'acqua meteorica.

3.4.2 Parametri per il metodo di trasformazione (*Transform method*)

Il calcolo effettivo del deflusso superficiale, cioè la trasformazione dell'eccesso di precipitazione in ruscellamento (*runoff*), viene effettuato tramite dei metodi di trasformazione. I metodi disponibili in HEC-HMS sono nove: *Clark Unit Hydrograph*, *Kinematic Wave*, *ModClark*, *Snyder Unit Hydrograph*, *SCS Unit Hydrograph*, *User-Specified S-Graph* e *Unit Hydrograph*.

Nel presente modello è stato utilizzato il modello *Clark Unit Hydrograph* (Standard), metodo di idrografia unitaria sintetica. Il modello unitario rappresenta due processi critici della trasformazione: la traslazione lungo il flusso di drenaggio delle precipitazioni in eccesso dal punto in cui si originano fino punto in cui fuoriescono dal bacino, e l'attenuazione dell'entità della portata conseguente l'immagazzinamento dell'acqua in eccesso. Dunque, il modello sviluppa una serie di curve tempo-area volte a sviluppare un'idrogramma di traslazione che tenga conto anche degli affetti di attenuazione dovuti allo stoccaggio nel sottobacino.

Il sopracitato stoccaggio nel sottobacino è un elemento fondamentale per la trasformazione delle precipitazioni in eccesso, gli effetti di questo immagazzinamento sono rappresentabili mediante l'uso del *Linear Reservoir Model* il cui funzionamento si basa sulla seguente equazione di continuità:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t$$

dove, dS/dt indica la variazione dell'acqua immagazzinata nel tempo t , I_t è l'afflusso medio allo stoccaggio relativo al tempo t e O_t è il deflusso che si ha dall'area di stoccaggio relativo al tempo t .

Lo stoccaggio relativo al tempo t , S_t , si definisce come:

$$S_t = R O_t$$

dove R è un parametro costante.

Dalla risoluzione delle due equazioni si ottiene:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

dove C_A e C_B sono dei coefficienti di traslazione del flusso (*Routing Coefficients*). I coefficienti sono pari a:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t}$$

$$C_B = 1 - C_A$$

Il deflusso medio che si ha nell'arco del periodo t è definito pari a:

$$\bar{O}_t = \frac{1}{2} (O_{t-1} + O_t)$$

Oltre a questo modello relativo all'analisi dell'immagazzinamento dell'acqua in eccesso, nel modello di Clark viene utilizzato un ulteriore modello che è quello del *Linear Channel Model*, grazie al quale è possibile calcolare il tempo necessario affinché l'acqua fuoriesca dal bacino considerando una canalizzazione del flusso rivolta verso l'uscita del bacino. L'instradamento dell'acqua verso l'uscita presenta un ritardo nel tempo, ma non tiene conto dell'attenuazione dovuta allo stoccaggio. Questo ritardo viene rappresentato nell'istogramma tempo-area, il quale rappresenta l'area del bacino che contribuisce a far defluire l'acqua verso il punto di uscita in funzione del tempo.

Per poter applicare il modello di Clark è necessario avere a disposizione il coefficiente R (*Storage Coefficient*) e conoscere le proprietà dell'istogramma tempo-area. La relazione utilizzata in HEC-HMS è la seguente:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5}, & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5}, & t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

dove, A_t è superficie cumulata che contribuisce al tempo t , A è la superficie totale del bacino e T_c è il tempo di corrivazione. (Clark Unit Hydrograph Model, n.d., pp. 50,51)

Per il funzionamento del modello di *Clark Unit Hydrograph* in HEC-HMS devono essere inseriti i seguenti parametri:

- Il tempo di corrivazione T_c (*Time of Concentration*) che definisce il tempo massimo di percorrenza dell'acqua nel sottobacino, dal punto idrologicamente più lontano alla sezione di uscita del sottobacino:

$$T_c = 2.2 \left(\frac{(L \cdot L_c)}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0.3}$$

(Estimating Time of Concentration & Storage Coefficient, n.d., pp. 51,52)

- T_c è il tempo di corrivazione in ore.
- L (*Longest flowpath*) è il percorso di flusso più lungo (in miglia) che si estende dall'uscita del sottobacino posizionato idraulicamente più a monte (Figura 3.11, in blu). Nello specifico la lunghezza del percorso è stata convertita in km dividendo il valore già fornito nel *Component Editor* per 1.609.
- L_c (*Centroidal flowpath*) è il percorso del flusso baricentrico, anche questo espresso in miglia, si estende a partire dall'uscita di un sottobacino e giunge fino al punto, situato lungo il

percorso di flusso più lungo, posto il più vicino possibile al baricentro del sottobacino interessato (Figura 3.11, in rosso). Allo stesso modo è stato convertito in km dividendo il valore fornito per 1.609.

- *Average Slope* 10-85 è la pendenza media del percorso del flusso rappresentato dal 10-85% del percorso del flusso più lungo (Figura 3.11, in verde), il valore si esprime in piedi/miglia ed è stato convertito in km/km per garantire un'uniformità dimensionale moltiplicando il valore fornito per 5290.



Figura 3.11 – Illustrazione, a titolo di esempio, dei flussi relativi ad un sottobacino

- Il coefficiente di accumulo R (*Storage Coefficient*) che tiene conto degli effetti dovuti all'accumulo, può essere definito come il coefficiente di stoccaggio diviso per la somma del tempo di concentrazione e del coefficiente di stoccaggio;

$$\frac{R}{Tc + R} = 0.65$$

(Estimating Time of Concentration & Storage Coefficient, n.d., p. 52)

3.4.3 Parametri per il metodo del flusso di base (*Baseflow method*)

Il deflusso superficiale e i processi del sottosuolo vengono controllati e calcolati tramite dei metodi di flusso base. I metodi previsti sono in totale sei, anche in questo caso alcuni sono progettati appositamente per la simulazione di eventi (*Bounded Recession baseflow method* e *Linear Reservoir baseflow method*), altri sono destinati alla sola creazione di simulazioni continue (*Constant Monthly baseflow method*, *Non-linear Boussinesq baseflow method* e *Recession baseflow method*).

Nel modello è stato utilizzato il metodo del flusso base a serbatoio lineare (*Linear Reservoir Baseflow*) che utilizza un serbatoio lineare per modellare il flusso di base a seguito di un determinato evento temporalesco. Questo metodo può essere utilizzato sfruttando uno o più serbatoi (fino ad un massimo di tre).

Un serbatoio (*Reservoir*) è un elemento al quale giungono uno o più afflussi provenienti dagli altri elementi del bacino e dal quale si ottiene un deflusso in uscita. L'elemento del serbatoio rappresenta concettualmente un lago naturale e si modella mediante quattro diversi metodi per la traslazione del flusso (*Reservoir Routing methods*). Per suddividere gli afflussi ad ogni serbatoio si utilizzano delle frazioni di acqua ripartite tra i vari strati delle acque sotterranee; infatti, moltiplicando l'afflusso per la singola frazione è possibile determinare la quantità di afflusso ad ogni serbatoio. Conseguentemente la somma di tutte le frazioni deve risultare inferiore o uguale all'unità. Di fatto per somme inferiori all'unità, l'acqua percolata rimanente si considera una ricarica dell'acquifero; al contrario, per somme esattamente uguali all'unità, l'acqua percolata diventa parte integrante del flusso base e non contribuisce in alcun modo a ricaricare l'acquifero.

Nello specifico nel modello non è stato selezionato alcun metodo specifico per la traslazione dei flussi (*Reservoir Routing method*); quindi, non è stato considerato alcun tipo di immagazzinamento di acqua nei serbatoi, in questo modo tutti gli afflussi sono stati considerati da HEC-HMS come dei semplici deflussi. (Hydrologic Modeling System Manual, pp. 52,53)

Per utilizzare il metodo del flusso base a serbatoio lineare è necessario inserire i seguenti parametri:

- Il numero di livelli (*Number of layers*) più precisamente il numero di strati di acqua sotterranea.
- Il numero di serbatoi, il minimo numero inseribile è uno, il massimo è tre.
- Il flusso di base iniziale (*Initial Flow Type*) per ogni serbatoio determinabile tramite due metodologie differenti.
La prima richiede l'inserimento del flusso di base iniziale come uno scarico con unità di volume per tempo, particolarmente indicata nel caso in cui siano disponibili dati di portata all'uscita del sottobacino (*Discharge*).
La seconda metodologia prevede invece l'inserimento del flusso di base iniziale come un volume per area per tempo, più adatta a ricostruire il flusso iniziale tramite linee guida più generali (*Discharge per area*).
- Il tipo di flusso (*Flow type*) che può essere di tipo base (*Baseflow*) per cui l'acqua del sottosuolo viene aggiunta al deflusso totale in uscita dal sottobacino, oppure può essere un interflusso (*Interflow*) per cui l'acqua sotterranea viene canalizzata nelle celle in cui è avvenuta l'infiltrazione e viene aggiunta al flusso superficiale.
- La frazione (*GW Fraction*) determina la modalità con la quale l'acqua viene suddivisa negli strati delle acque sotterranee. Il parametro deve

essere maggiore a zero e inferiore o uguale all'unità. In particolare, quando la somma delle frazioni risulta pari ad uno non ci saranno contributi atti a ricaricare l'acquifero; per somme inferiori all'unità la percolazione ricaricherà l'acquifero.

- Il coefficiente di stoccaggio delle acque sotterranee (*GW Storage Coefficient*) viene misurato in ore e fornisce un'idea del tempo di risposta del flusso sotterraneo.

Nel modello è stato utilizzato un solo livello e un solo serbatoio, inoltre il flusso di base è stato determinato come uno scarico con unità di volume per tempo (*Discharge*). Il flusso utilizzato è quello di tipo base (*Baseflow*) e la frazione è stata posta pari ad 1 essendo stato utilizzato un solo strato di acqua sotterranea. Il coefficiente di stoccaggio delle acque sotterranee è stato inizialmente impostato pari a 24 ore, questo parametro verrà in seguito modificato nel corso delle calibrazioni.

3.4.4 Parametri per il metodo della traslazione dei flussi (*Routing method*)

I metodi per la traslazione dei flussi si basano sul concetto di flusso a canale aperto che si instaura a seguito dell'innalzamento del livello idrico, dunque, con l'arrivo di un deflusso all'interno di un canale ben definito.

I metodi si basano sull'uso delle equazioni di St. Venant (*Dynamic Wave equations*) date dalla combinazione dell'equazione della quantità di moto e dell'equazione di continuità, che a loro volta si fondano su una serie di principi base:

- la velocità è costante in qualsiasi sezione del canale considerata;
- la portata varia gradualmente in funzione della pressione idrostatica;
- non ci sono casi di circolazione laterale;
- la forma delle sezioni del canale non è variabile;
- l'acqua è caratterizzata da una densità uniforme.

Le equazioni della quantità di moto considerano le forze che agiscono su un corpo idrico in un canale aperto, uguagliando la somma delle forze gravitazionali, di pressione e di attrito al prodotto della massa del fluido e dell'accelerazione.

Le equazioni di continuità invece tengono conto del volume di acqua che scorre in un canale aperto, vengono considerati sia il volume di acqua che scorre all'interno e fuori dal canale, sia il volume della portata immagazzinata.

(Introduction to the Channel Routing Tutorials, n.d., p. 54)

I metodi di traslazione del flusso di piena sono nove: *Kinematic Wave routing method*, *Lag routing method*, *Lag and K routing method*, *modified Puls routing*

method, Muskingum routing method, Musckingum-Cunge routing method, normal Depth routing method e Straddle Stagger routing method.

Nel modello è stato utilizzato il metodo del *Lag Routing*, il quale rappresenta la traslazione delle onde di piena, è una metodologia adatta a dei corsi d'acqua relativamente brevi con tempi di percorrenza prevedibili.

I parametri da inserire per il funzionamento del metodo sono:

- Le condizioni iniziali, specificabili tramite due diverse opzioni. La prima prevede l'assunzione di una condizione stazionaria per cui il deflusso iniziale risulta pari all'afflusso dovuto dagli elementi posti a monte; la seconda necessita dell'inserimento di un valore di deflusso.
- Il *lag*, che rappresenta il tempo, in minuti, con il quale l'idrogramma di afflusso viene traslato dall'inizio alla fine del tratto fluviale di interesse.

Nel modello è stato impostato il deflusso iniziale pari all'afflusso dovuto agli elementi di monte (*Discharge=Inflow*), inoltre è stato inizialmente utilizzato un valore del *lag* pari a 5 minuti, parametro che è stato poi successivamente modificato durante il processo di calibrazione.

3.5 Simulazione di un evento di precipitazione

Il software HEC-HMS è stato progettato per semplificare i complessi processi di simulazione delle precipitazioni e del deflusso di grandi bacini idrografici e per risolvere varie tipologie di possibili problemi, dall'approvvigionamento idrico di grandi bacini fluviali sino ai deflussi di piccoli bacini urbani o naturali.

Il programma è in grado di analizzare diversi bacini idrografici, ognuno dei quali viene costruito separando il ciclo idrologico in elementi gestibili autonomamente e realizzando dei confini intorno al bacino idrografico di interesse. (Hydrologic Modeling System Manual)

Le simulazioni sono il metodo principale per ottenere dei risultati concreti di calcolo da un modello idrologico costruito in HEC-HMS. Con una singola simulazione è possibile, come dice il termine stesso, simulare i processi di deflusso che si possono potenzialmente verificare nel bacino di cui si sta compiendo la modellazione, quando esso è soggetto a tutte le condizioni geografiche e idrologiche definite a monte. Gli esiti di una simulazione, sotto forma di idrogrammi per gli eventi di interesse, possono quindi essere visualizzati sotto forma di grafici e tabelle riassuntive, utili per l'approntamento di successive analisi; in alternativa, gli idrogrammi hanno la possibilità di lavorare in combinazione con altri software atti a studiare aspetti come la disponibilità idrica, il drenaggio urbano, la previsione dei flussi e dell'urbanizzazione, la riduzione dei danni da inondazione o la regolamentazione delle pianure alluvionali.

Una sessione di simulazione in HEC-HMS viene creata combinando un modello di bacino, la cui creazione è stata descritta nella sezione precedente (3.3 – Identificazione della rete e dei sottobacini), con un modello meteorologico (*Meteorologic Model*) che descrive le condizioni al contorno del bacino di interesse e delle specifiche di controllo (*Control Specifications*) che definiscono l'intervallo di tempo della simulazione.

3.5.1 Modello meteorologico (*Meteorologic Model*)

Le informazioni meteorologiche (in termini di precipitazione) vengono inserite all'interno del programma tramite un modello meteorologico dedicato alla preparazione delle condizioni al contorno che definiscono lo spartiacque durante la simulazione. Nei modelli più complessi, che comprendono più sottobacini, il modello meteorologico deve specificare come vengono generate le precipitazioni di ogni sottobacino.

Il modello meteorologico calcola l'apporto di precipitazioni afferente ad ogni sottobacino. Esso può utilizzare sia delle precipitazioni puntuali sia delle precipitazioni fornite in forma di griglia, e ha la capacità di modellare sia le precipitazioni ghiacciate e liquide sia l'evapotraspirazione.

Nel software sono inclusi quattro diversi metodi di analisi delle precipitazioni: *User-specified hyetograph method*, *gage weights method*, *inverse distance method* e *Gridded precipitation method*.

Nel modello è stato utilizzato il metodo dello ietogramma (*User-Specified Hyetograph method*), poiché per il presente lavoro erano disponibili dati reali di precipitazione, sotto forma di istogrammi di precipitazione (o ietogrammi), provenienti da stazioni pluviometriche dislocate nel territorio del bacino del Misa. La posizione e la natura di tali stazioni è stata precedentemente discussa nella sezione 2.1 (Raccolta e analisi dei dati pluviometrici). Il metodo dello *user-specified hyetograph method* applica, ad ogni sottobacino, uno ietogramma specifico definito dall'utente, in base alla stazione pluviometrica più vicina ad esso.

3.5.2 Specifiche di controllo (*Control Specifications*)

Le specifiche di controllo gestiscono l'intervallo di tempo di tutte le simulazioni: includono una data e un orario di inizio, una data e un orario di fine e un intervallo di tempo per l'immissione dei dati. Questo comando viene inserito nella sezione *Control Specifications Manager* che si trova nel *Component Editor*.

Avendo analizzato due eventi differenti sono state inserite due specifiche di controllo diverse, una per la simulazione dell'evento del 2014, l'altra per simulare l'evento del 2021.

Di seguito, nelle Figure 3.12 e 3.13, sono state inserite le finestre relative alle specifiche di controllo di entrambi gli eventi analizzati.

Per le specifiche di controllo relative all'evento del 2014 riportate in Figura 3.12, è stata impostata come data di inizio il 2 maggio 2014, a partire dalle ore 00:15, e come data finale il 4 maggio 2014, ore 23:45. L'intervallo di tempo utilizzato è di 15 minuti.

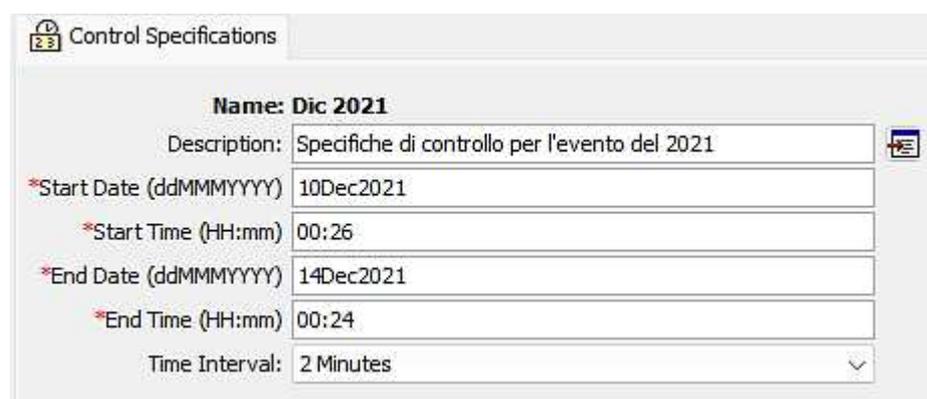


The screenshot shows a software window titled 'Control Specifications'. It contains the following fields:

| | |
|------------------------|---|
| Name: | May 2014 |
| Description: | Specifiche di controllo per l'evento del 2014 |
| *Start Date (ddMMYYYY) | 02May2014 |
| *Start Time (HH:mm) | 00:15 |
| *End Date (ddMMYYYY) | 04May2014 |
| *End Time (HH:mm) | 23:45 |
| Time Interval: | 15 Minutes |

Figura 3.12 - Specifiche di controllo dell'evento del 2014

Per le specifiche di controllo relative all'evento del 2021 riportate in Figura 3.13, è stata impostata come data di inizio il 10 dicembre 2021, a partire dalle ore 00:26, e come data finale il 14 dicembre 2021, ore 00:24. L'intervallo di tempo utilizzato è di 2 minuti, intervallo più fitto rispetto al precedente poiché i dati sono stati rilevati da una strumentazione più recente che è quella del River Gauge, precedentemente vista nella sezione 1.2 (- Aspetti Idrologici).



The screenshot shows a software window titled 'Control Specifications'. It contains the following fields:

| | |
|------------------------|---|
| Name: | Dic 2021 |
| Description: | Specifiche di controllo per l'evento del 2021 |
| *Start Date (ddMMYYYY) | 10Dec2021 |
| *Start Time (HH:mm) | 00:26 |
| *End Date (ddMMYYYY) | 14Dec2021 |
| *End Time (HH:mm) | 00:24 |
| Time Interval: | 2 Minutes |

Figura 3.13 - Specifiche di controllo per l'evento del 2021

3.5.3 Analisi dell'evento del 2021

L'evento di piena del 2021 si sviluppa dal 10 al 14 dicembre, la sua durata è di quattro giorni e il picco della piena avviene alle ore 12:36 del secondo giorno (12 dicembre) con un valore di 308.7 m³/s, valore misurato presso la stazione di misura di Ponte Garibaldi a Senigallia.

Sono di seguito illustrati i grafici con gli andamenti del livello idrico (Figura 3.14) e della portata rilevati, in particolare in Figura 3.15 è rappresentato in rosso l'idrogramma dei dati senza alcuna modifica, invece in blu l'idrogramma con i dati di portata "ripuliti" dai picchi.

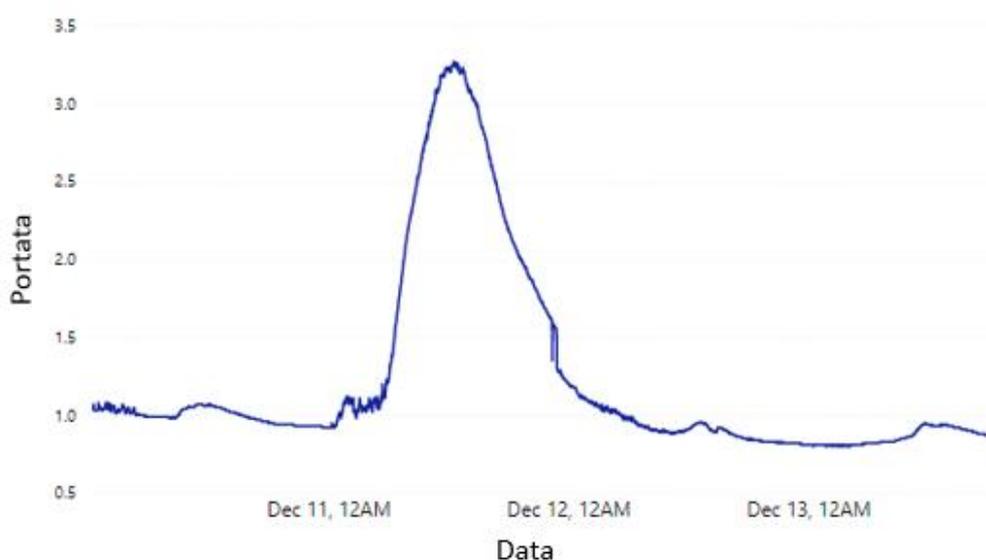


Figura 3.14 - Andamento del livello idrometrico dal 10 al 14 dicembre, alla stazione di misura di Ponte Garibaldi durante l'evento del 2021

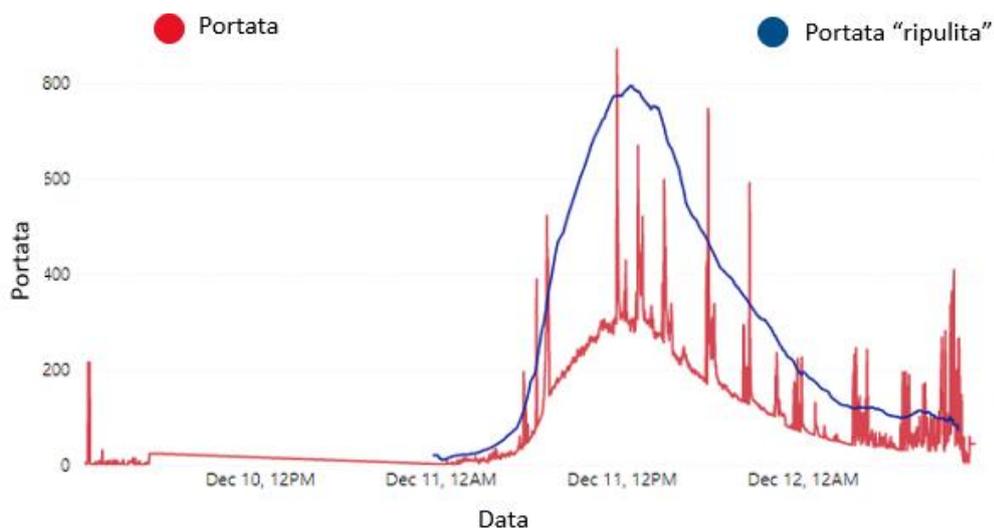


Figura 3.15 - Andamento della portata (m^3/s) stimata alla stazione di misura di Ponte Garibaldi durante l'evento del 2021

I dati di portata sono stati ripuliti per eliminare picchi anomali dovuti a dei probabili malfunzionamenti del sensore situato a Ponte Garibaldi. L'idrogramma "ripulito" è stato ottenuto da quello "non ripulito" attraverso la rimozione dei picchi. L'idrogramma di portata "ripulito" è stato infine utilizzato come termine di paragone per la calibrazione del modello sull'evento del 2021.

3.5.4 Analisi dell'evento del 2014

L'evento del 2014 si sviluppa nelle giornate dal 2 al 4 maggio, la durata totale è di due giorni e il picco della piena avviene alle ore 7:30 del 3 maggio, con un valore di portata idrica stimata a $555.88 m^3/s$. Questo valore è stato stimato presso la stazione di misura di Bettolle e ricavato dalle scale di deflusso messe a disposizione sul sito del SIRMIP della protezione Civile della regione. (SIRMIP online, n.d., pp. 59,60)

Di seguito nella Tabella 3.2 sono state inserite le scale di deflusso utilizzate per il calcolo delle portate per l'evento di piena del 2014, con i relativi intervalli temporali di validità. Nei grafici sottostanti sono anche illustrati l'andamento del livello idrometrico misurato dai vari sensori (Figura 3.16) e i rispettivi valori di portata (Figura 3.17) utilizzati per successiva la calibrazione del modello.

| Sensore | Inizio validità | Fine validità | Intervallo di validità | Scala di deflusso |
|-----------------|-----------------|---------------|-------------------------|---|
| Bettolelle | 03/2011 | 05/2015 | $0.55 \leq H \leq 4.39$ | $Q=2.33 \times [H-(0.84)]^{0.79}+0$ |
| | 03/2011 | 05/2015 | $4.4 \leq H \leq 6.35$ | $Q=185.568 \times [H-(4.39)]^{1.138}+202.776$ |
| Corinaldo | 01/2011 | 12/2014 | $0.9 \leq H \leq 4.2$ | $Q=20.76 \times [H-(0.85)]^{1.9}+0$ |
| Serra De' Conti | 01/2011 | 12/2014 | $0.4 \leq H \leq 9999$ | $Q=12.97 \times [H-(0.39)]^{1.85}+0$ |

Tabella 3.1 - Scale di deflusso relative all'analisi delle portate dell'evento del 2014

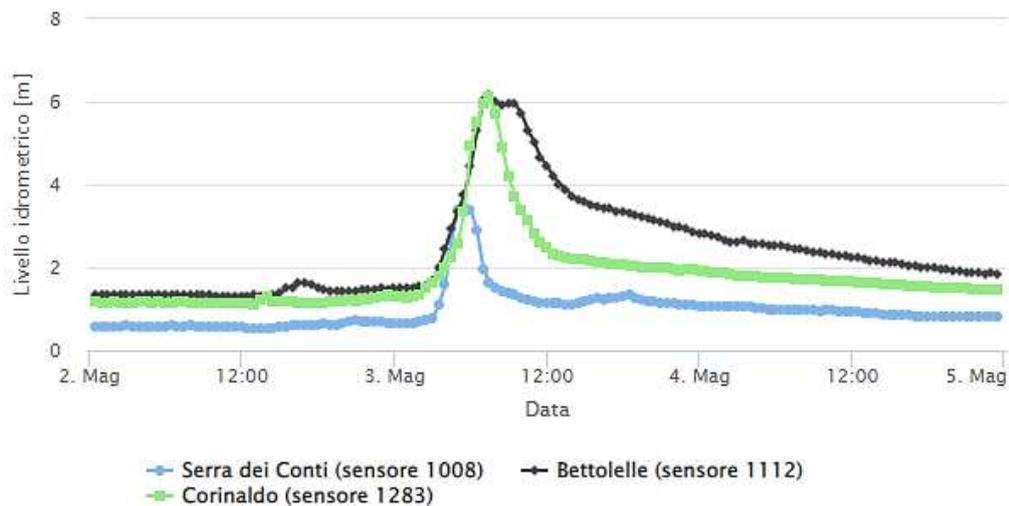


Figura 3.16 - Andamento del livello idrometrico dal 2 maggio al 5 maggio, per le tre stazioni di misura attive durante l'evento del 2014

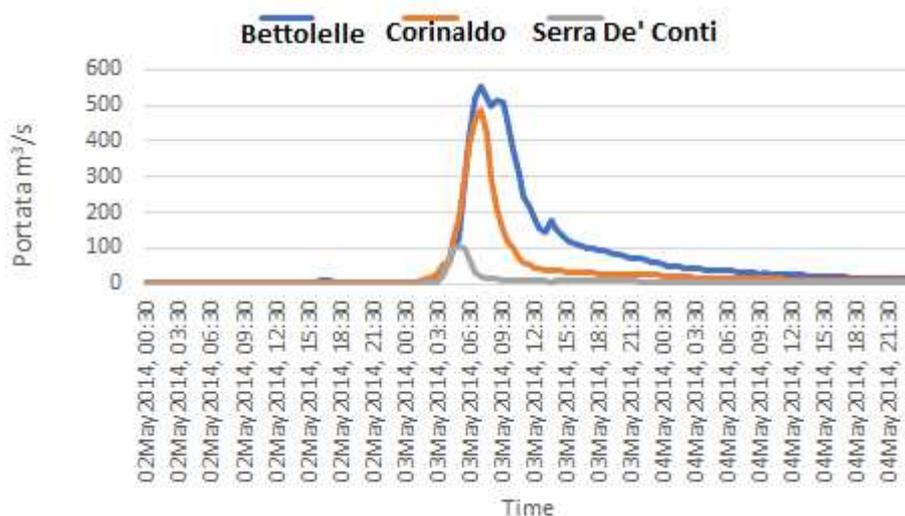


Figura 3.17 - Andamento delle portate (m^3/s) ricavate dalle scale di deflusso per l'evento del 2014

3.6 Calibrazione del modello

La calibrazione di un modello idrologico è il processo di modifica dei parametri, all'interno di intervalli coerenti e accettabili, volto ad ottenere risultati simulati che replichino le condizioni note in maniera appropriata. È un procedimento fondamentale per lo sviluppo del modello finale affinché si possa confermare un determinato livello di sicurezza nei risultati simulati ottenuti.

Per calibrare un modello è necessario confrontare i dati osservati raccolti da stazioni di misura sul campo con i risultati simulati ottenuti. Nel caso di evidenti discrepanze tra le due tipologie di dati (il dato simulato e quello osservato), si procederà alla variazione di alcuni parametri del modello e al lancio di una nuova simulazione, di cui controllare la bontà. Il processo si ripete iterativamente fino a quando il risultato simulato non risulta simile a quello realmente osservato in termini di una opportuna metrica di errore.

I risultati di riepilogo delle simulazioni conseguenti le prove di calibrazione forniscono delle utili metriche statistiche per facilitare il processo di calibrazione. La metrica utilizzata è l'efficienza di *Nash-Sutcliffe* (NSE), la quale è in grado di misurare l'abilità predittiva di un modello idrologico. Un valore pari ad uno indica una perfetta previsione dei dati osservati tramite i dati simulati; dunque, non c'è varianza nell'errore di stima. Al contrario un valore pari a zero indica che la varianza dell'errore di stima è pari alla varianza dell'errore nei dati osservati. (Calibrate a Basin Model to Event 1, n.d., p. 61)

Concretamente i valori del NSE si sfruttano per controllare l'abilità predittiva del modello: ad esempio, notando un aumento del valore si intuisce che le previsioni del modello sono migliorate rispetto alla modifica precedente.

Di seguito nella Tabella 3.3 è riportata una tabella riassuntiva con una valutazione delle prestazioni del modello in base al valore del NSE.

| Valutazione delle prestazioni | NSE |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Molto buona | $0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$ |
| Buona | $0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$ |
| Soddisfacente | $0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$ |
| Insoddisfacente | $\text{NSE} \leq 0.50$ |

Tabella 3.2 - NSE per il controllo dell'abilità predittiva del modello

3.6.1 Calibrazione del modello all'evento del 2021

Di seguito sono riportati alcuni passaggi eseguiti con lo scopo di calibrare il modello di bacino all'evento del 2021. Si fa notare che le figure presenti in questa sezione sono state prodotte adoperando, come idrogramma osservato a Ponte Garibaldi, quello “non ripulito” proveniente direttamente dallo strumento di misura (linea rossa della Figura 3.15). I corrispondenti valori NSE saranno quindi riferiti al confronto con tale idrogramma, nel quale è comunque facile intravedere l'andamento effettivo dell'onda di piena usato come linea di riferimento per la calibrazione. Giunti al termine della calibrazione, il valore NSE finale verrà calcolato utilizzando a riferimento l'idrogramma “ripulito” (linea blu della Figura 3.15), per ottenere una metrica di errore non influenzata dai picchi erronei.

Essendo la calibrazione un processo iterativo, i parametri sono stati regolati più volte affinché ci fosse un adattamento della curva dei dati simulati alla curva dei dati osservati.

Per calibrare il modello all'evento è stato preso in considerazione il sottobacino più a valle, in corrispondenza della foce, al fine di confrontare i dati di portata simulati alla sezione di chiusura del bacino con quelli realmente osservati a Ponte Garibaldi. Il risultato della prima simulazione (Simulazione 1), eseguita senza alcuna pregressa calibrazione, è mostrato in Figura 3.18, in cui è evidente la discrepanza tra le due curve; infatti, ispezionando visivamente l'idrogramma simulato (linea blu) si nota che il flusso simulato ha un volume e un valore di picco inferiori rispetto al flusso osservato.

Il valore del NSE risulta disponibile a partire dal momento in cui vengono effettuate delle modifiche al modello; dunque, all'inizio della calibrazione non ci sono informazioni a riguardo.

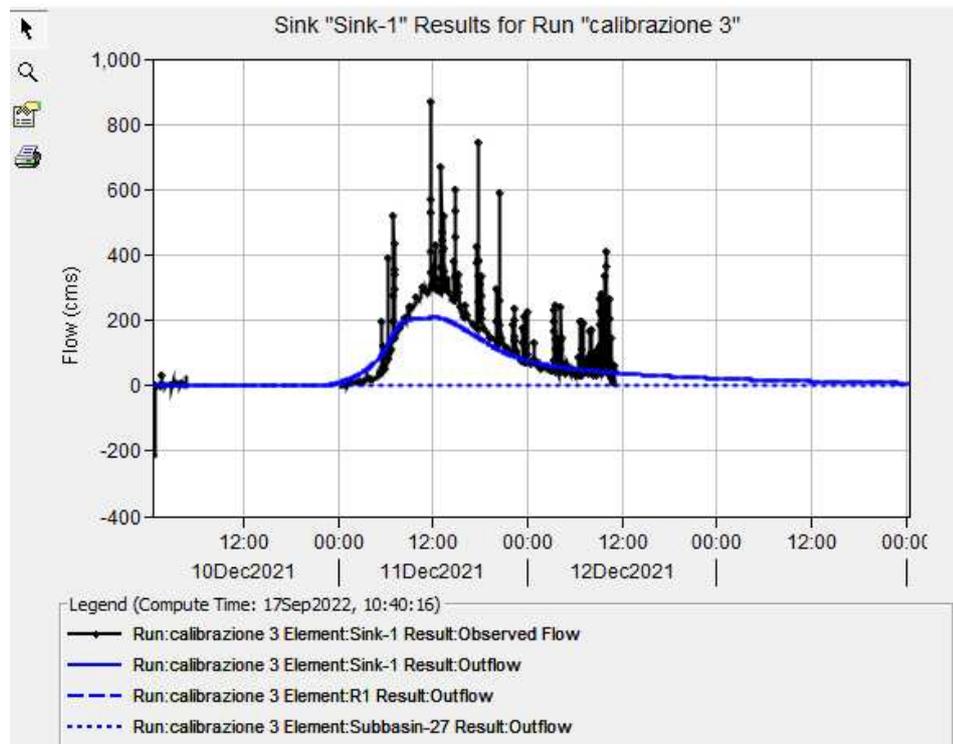


Figura 3.18 - SIMULAZIONE 1: Inizio calibrazione all'evento del 2021

Il primo parametro modificato è stato il tempo di corrivazione: effettivamente regolando il valore T_c viene migliorato il tempismo della simulazione. Nello specifico aumentando questo parametro si nota un lieve spostamento dell'idrogramma verso destra, il che significa che l'acqua arriva all'uscita del bacino più tardi rispetto alla condizione precedentemente descritta.

Durante la seconda simulazione (Simulazione 2) tutti i valori del T_c di tutti i sottobacini sono stati moltiplicati per 2, questo ha permesso la registrazione di un valore del NSE pari a 0.599. Il risultato della simulazione è mostrato in Figura 3.19.

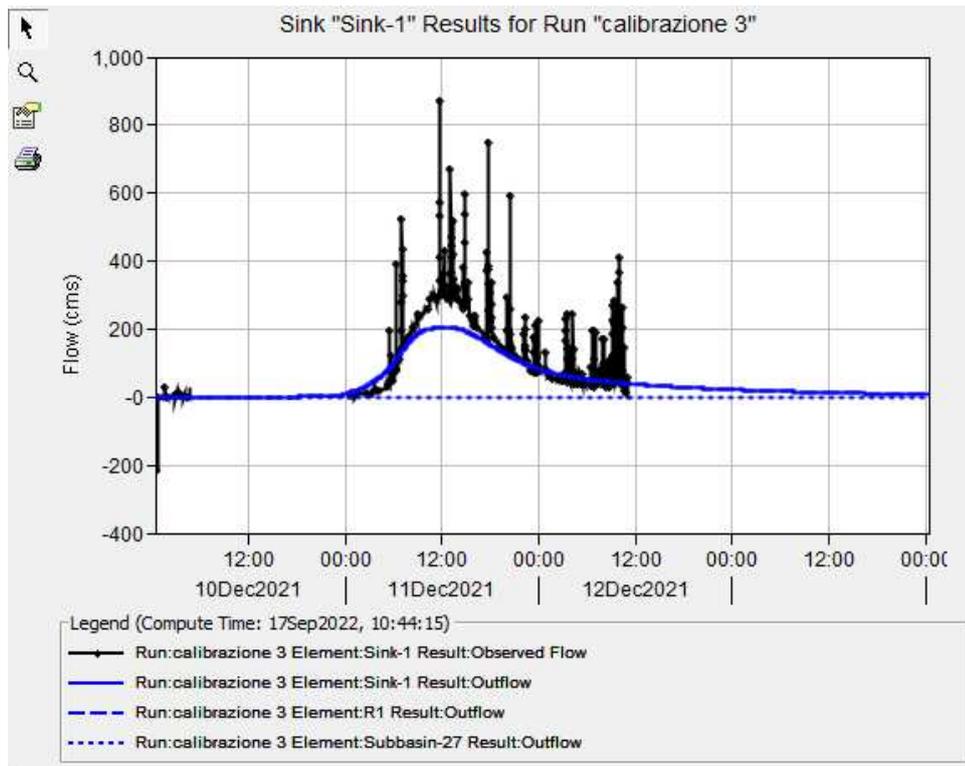


Figura 3.19 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, $NSE = 0.599$

Durante la terza simulazione (Simulazione 3) è stato modificato è stato il *lag*: tutti i valori di *lag* sono stati moltiplicati per 2. Il passaggio da un *lag* di 5 minuti ad uno di 10 minuti ha lievemente diminuito il valore dell'*NSE* che è stato registrato pari a 0.575. Il confronto tra l'idrogramma osservato e quello modellato per la nuova simulazione è mostrato in Figura 3.20. Nello specifico, aumentare il ritardo medio del deflusso di piena ha permesso una migliore coincidenza del tempo di arrivo dell'onda di piena modellata con quella effettivamente verificatasi, senza intervenire tuttavia sul picco di piena, che rimane inferiore rispetto a quello reale.

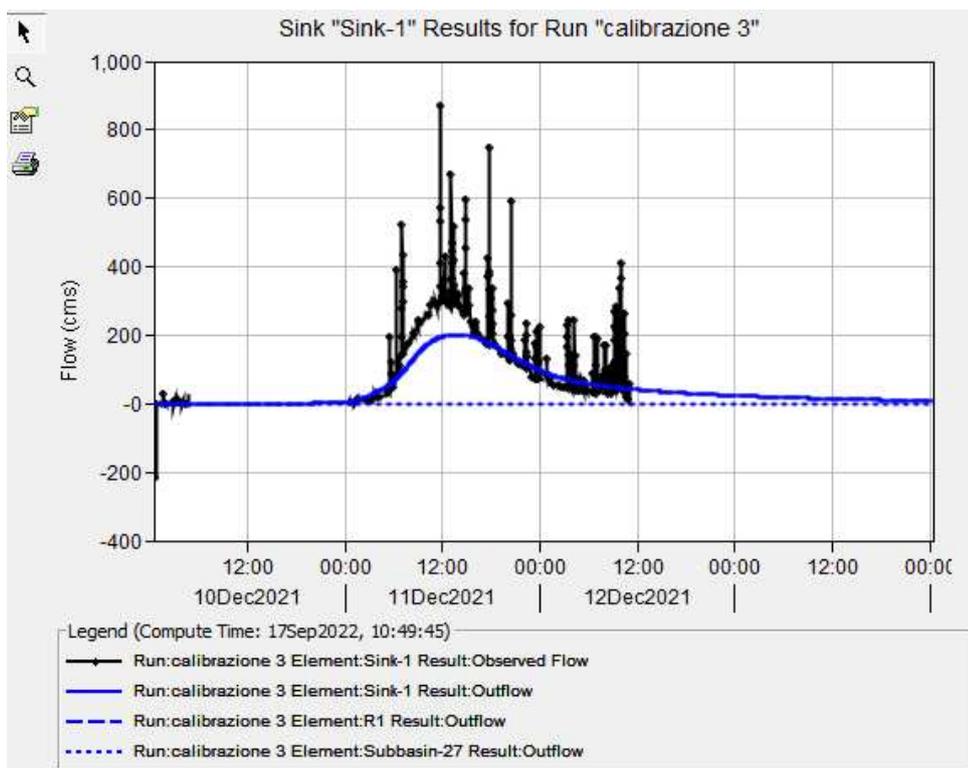


Figura 3.20 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, $NSE = 0.575$

Il terzo parametro modificato è stato il coefficiente delle acque sotterranee GW1 (*Ground Water Coefficient*), parametro che rappresenta generalmente un interflusso a risposta rapida che lascia uno bacino subito dopo un evento temporalesco. La modifica di questo coefficiente tende a spostare il tempo del flusso di picco per l'idrogramma del flusso di base.

In linea di principio, i coefficienti delle acque sotterranee da adoperare nel *Linear Reservoir method* dovrebbero essere collegati al coefficiente di stoccaggio di Clark (*Storage Coefficient, R*); questo perché i processi che influiscono sullo stoccaggio, sull'attenuazione e sulla tempistica delle acque superficiali che si infiltrano nel terreno influiscono anche sulla risposta dell'interflusso e del flusso di base.

L'acqua che si infiltra e si muove all'interno delle porosità del terreno fuoriesce in una rete di piccoli canali seguendo dei percorsi simili a quelli del deflusso diretto. La differenza risiede nel fatto che il flusso delle acque sotterranee trascorre gran parte del tempo di percorrenza nel suolo per poi uscire e unirsi al flusso di base dopo un certo tempo. Questo aspetto viene considerato e calibrato controllando il coefficiente del flusso di base o aggiungendo ulteriori serbatoi lineari, che vanno a modellare le capacità di stoccaggio e deflusso di diversi strati di terreno.

Infatti, il coefficiente (*Ground Water Coefficient, GW1*) è stato collegato al coefficiente di stoccaggio R ed è stato moltiplicato per un fattore di prova pari a 0.8.

Così facendo il NSE della nuova simulazione è diminuito fino ad un valore di 0.386. Sebbene la simulazione sembri aver ottenuto dei risultati insoddisfacenti, in realtà ha permesso di alzare il picco di piena fino ad un valore paragonabile al valore reale misurato.

Il risultato della simulazione (Simulazione 4) è illustrato in Figura 3.21.

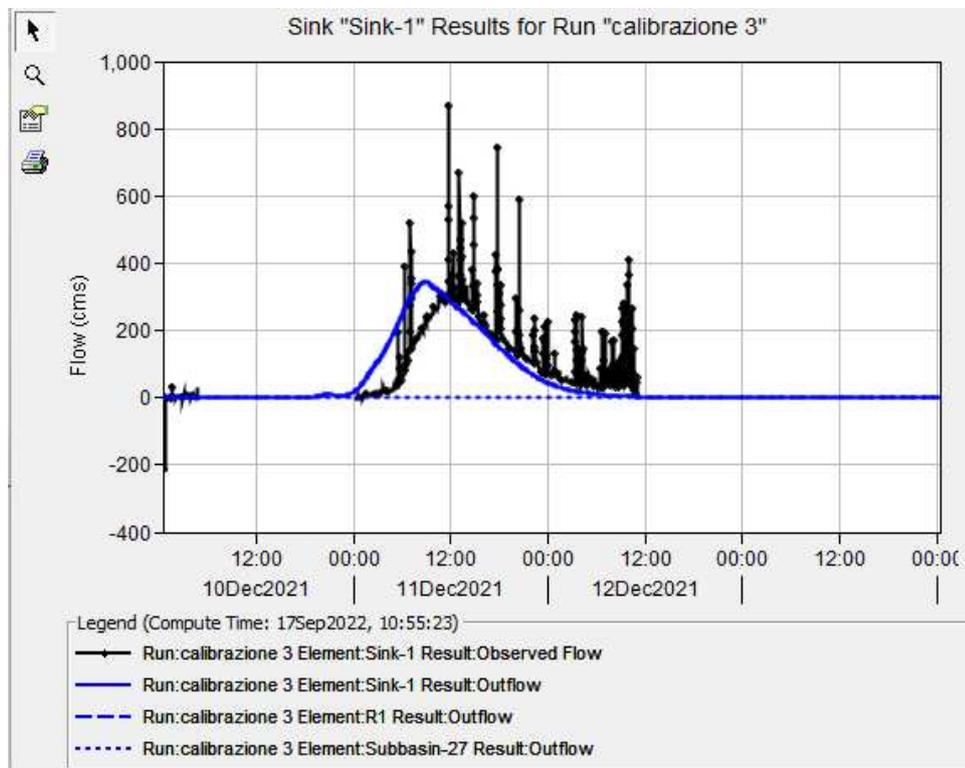


Figura 3.21 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, NSE = 0.386

Al notevole miglioramento della risposta del modello in termini di picco di piena, tuttavia, si associa un forte anticipo dell'arrivo della piena simulata rispetto a quella osservata: l'onda di piena simulata (linea blu) giunge infatti circa sei ore prima di quella reale (Figura 3.21).

Per tentare di migliorare la coincidenza dei tempi di arrivo della piena, e di conseguenza il valore del NSE, è stato ulteriormente incrementato il valore di *lag* da 12 a 17 minuti. Di seguito, nelle Figure 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25, è riportata una serie di simulazioni (Simulazioni 5,6,7 e 8) caratterizzate dall'aumento del parametro con conseguenti miglioramenti del NSE.

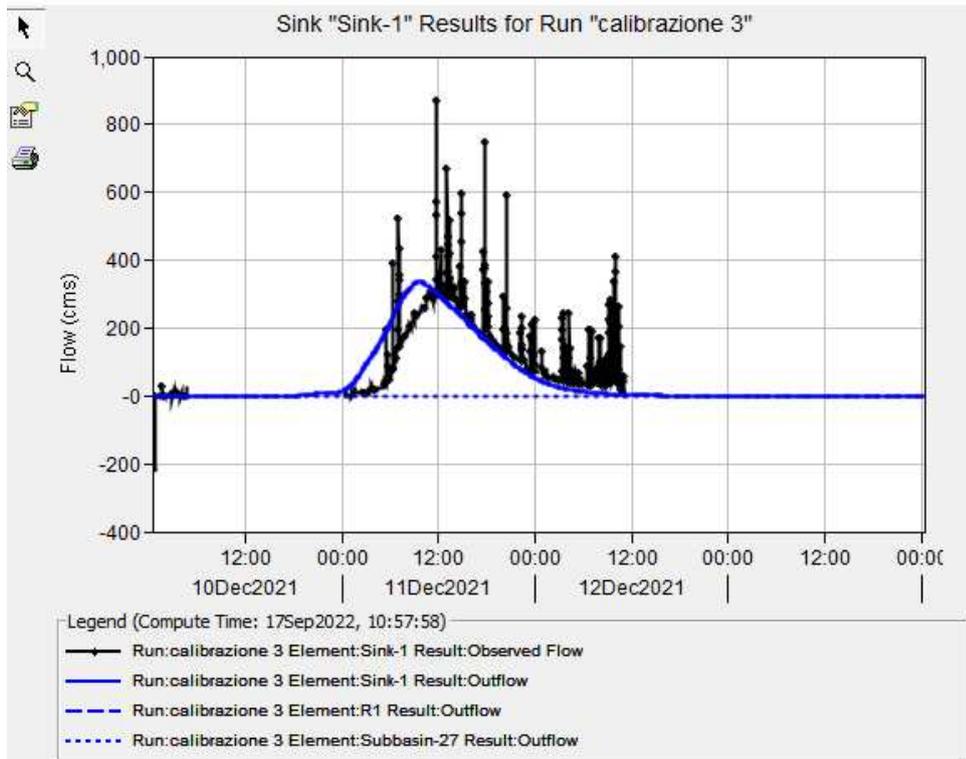


Figura 3.22 - SIMULAZIONE 5: calibrazione con lag pari a 12 minuti, NSE = 0495

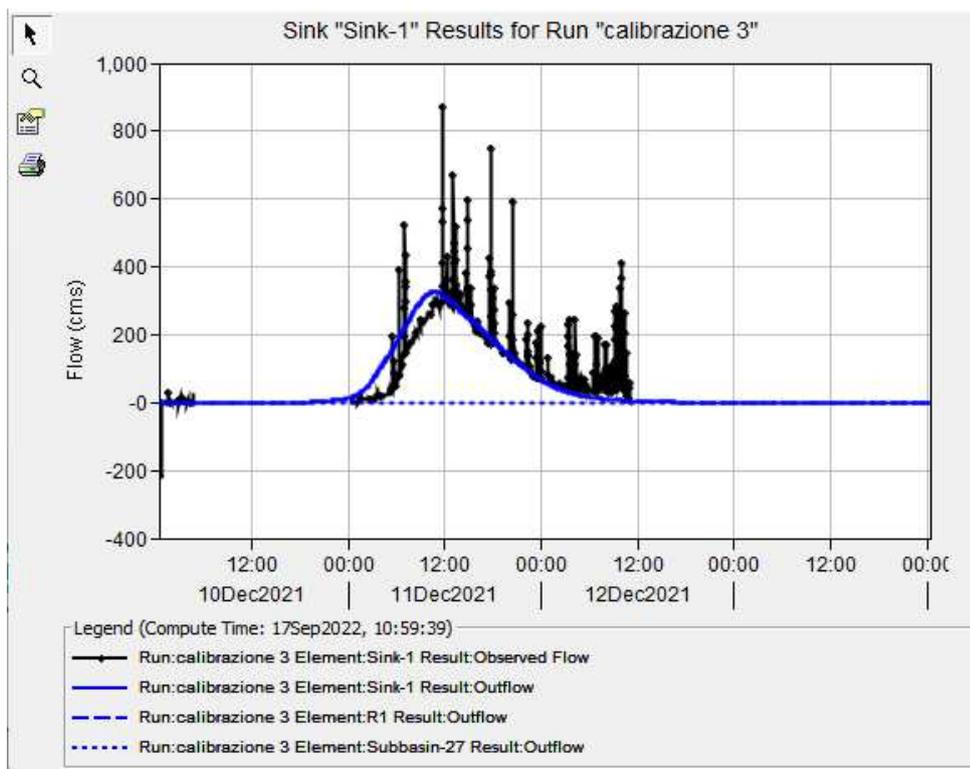


Figura 3.23 - SIMULAZIONE 6: calibrazione con lag pari a 15 minuti, NSE = 0.616

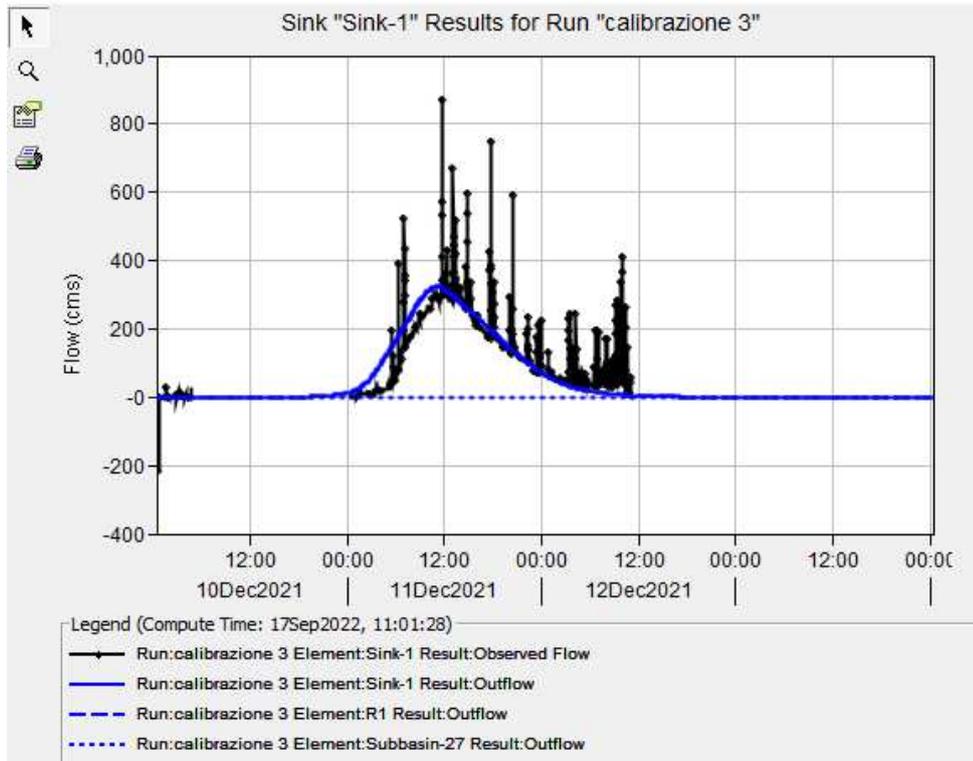


Figura 3.24 - SIMULAZIONE 7: calibrazione con lag pari a 16 minuti, NSE = 0.647

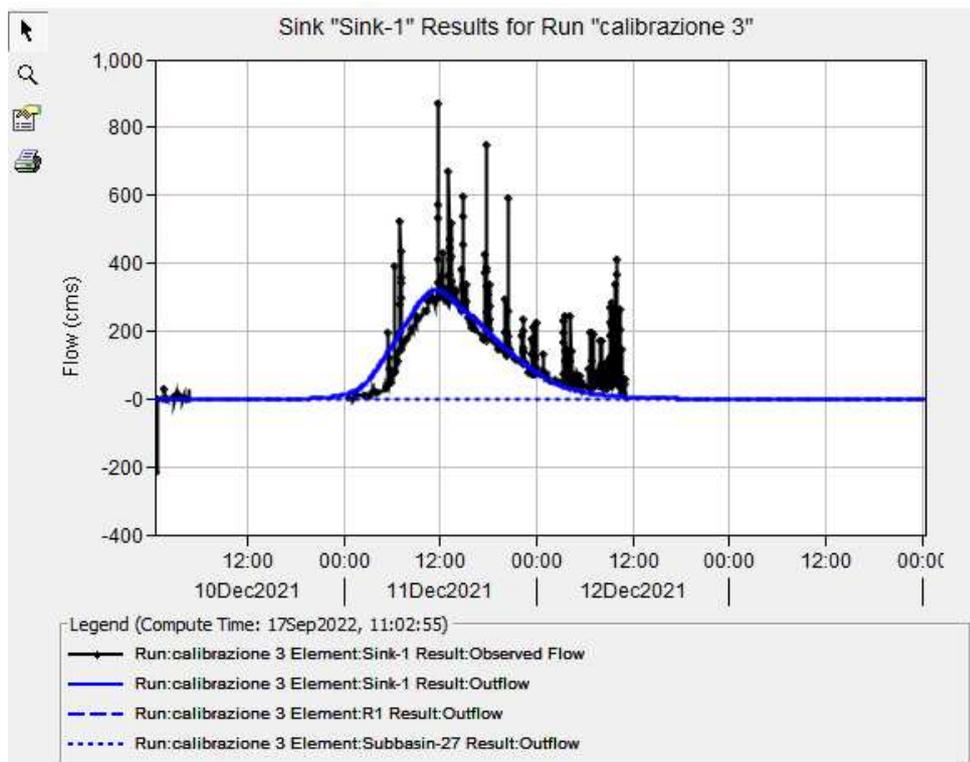


Figura 3.25 - SIMULAZIONE 8: calibrazione con lag pari a 17 minuti, NSE = 0.671

Queste simulazioni in serie mostrano un notevole aumento della coincidenza tra le due curve sia per quanto concerne i tempi di arrivo dell'onda di piena sia per il tempismo del picco.

Durante il processo di calibrazione è stato ulteriormente incrementato il coefficiente delle acque sotterranee (GW1), difatti il coefficiente collegato al coefficiente di stoccaggio R è stato moltiplicato per un fattore pari a 0.9. Così facendo il NSE della nona simulazione è aumentato fino ad un valore di 0.685. Il risultato della simulazione (Simulazione 9) è mostrato in Figura 3.26.

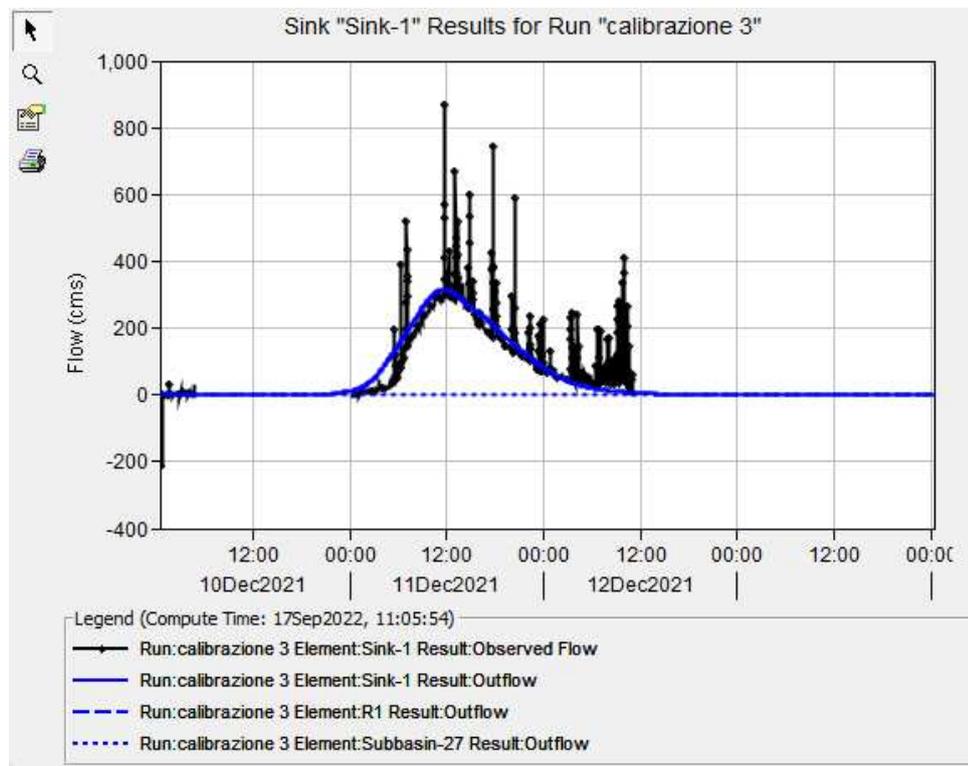


Figura 3.26 - SIMULAZIONE 9: calibrazione, NSE = 0.685

Nel tentativo di migliorare ulteriormente la performance del modello, è stato aumentato di nuovo il valore di lag fino a 20 minuti. In questo modo il NSE della decima, nonché ultima, simulazione è aumentato fino ad un valore di 0.707. Il risultato dell'ultima simulazione (Simulazione 10) è mostrato in Figura 3.27.

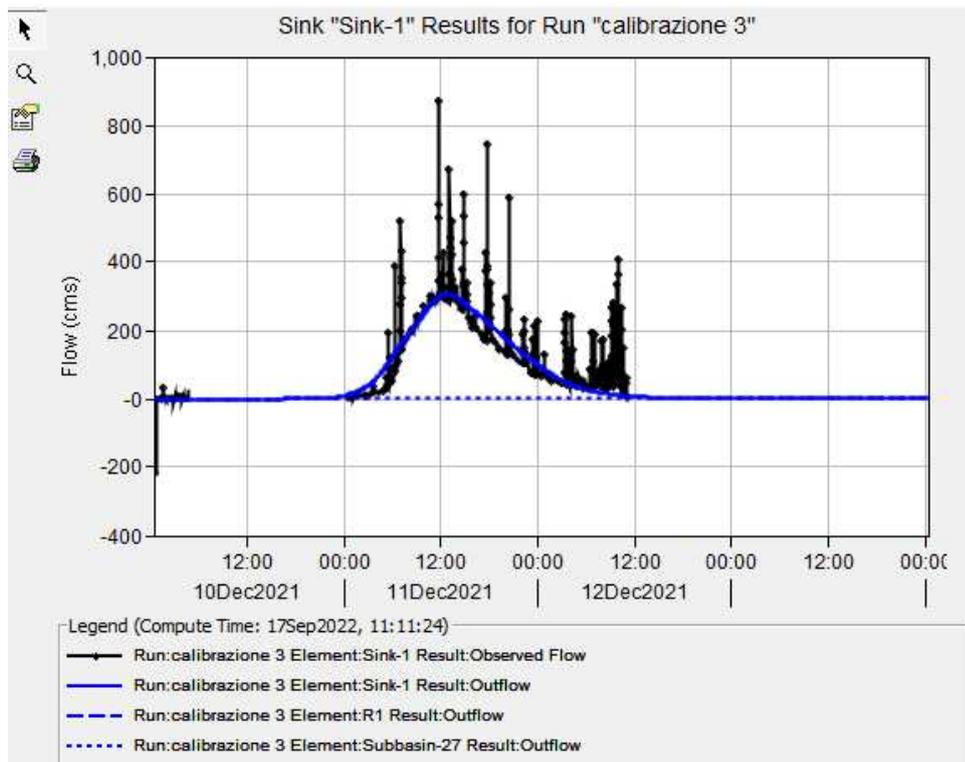


Figura 3.27 - SIMULAZIONE 10: calibrazione finale con lag pari a 20 minuti, NSE = 0.707

Ne consegue che l'abilità predittiva del modello idrologico, al termine di questa calibrazione, risulta buona essendo il NSE è pari a 0.707. In Figura 3.28 è riportata la tabella riassuntiva della calibrazione dell'evento.

| Project: Modellazione10 | | Simulation Run: calibrazione 3 | |
|---|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Sink: Sink-1 | | | |
| Start of Run: | 10Dec2021, 00:26 | Basin Model: | Misa - CALIBRAZIONE 3 |
| End of Run: | 14Dec2021, 00:24 | Meteorologic Model: | Met 1 |
| Compute Time: | DATA CHANGED, RECOMPUTE | Control Specifications: | Dic 2021 |
| Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3 | | | |
| Computed Results | | | |
| Peak Discharge: | 303.9 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 11Dec2021, 13:04 |
| Volume: | 43.82 (MM) | | |
| Observed Flow Gage Ponte Garibaldi | | | |
| Peak Discharge: | 870.1 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 11Dec2021, 11:40 |
| Volume: | 45.37 (MM) | | |
| RMSE Std Dev: | 0.5 | Nash-Sutcliffe: | 0.707 |
| Percent Bias: | -4.46 % | | |

Figura 3.28 - Tabella riassuntiva della calibrazione sull'evento del 2021

Mediante l'inserimento dei dati di portata "ripuliti" (discussi nella sezione 3.5.3 - Analisi dell'evento del 2021, dati mostrati in blu nella Figura 3.15) la calibrazione è risultata notevolmente migliorata (Figura 3.29), di fatto il parametro NSE è incrementato ed ha raggiunto un valore pari a 0.918, definendo in questo modo un'ottima abilità predittiva del modello (Figura 3.30).

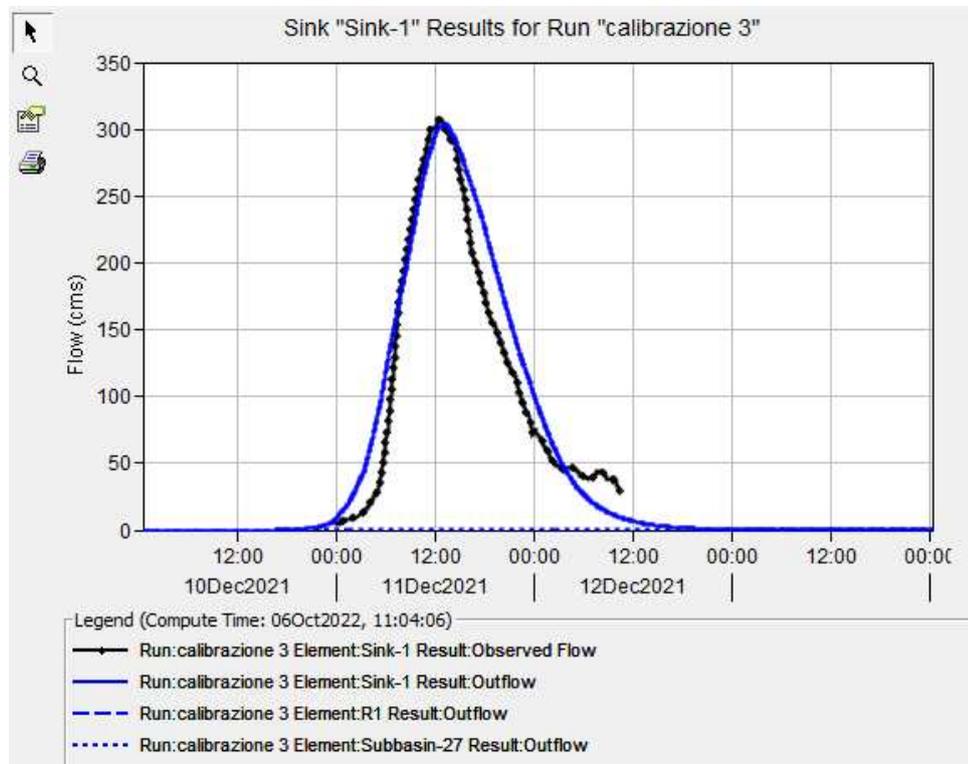


Figura 3.29 - Calibrazione finale, NSE = 0.918

| Project: Modellazione10 | | Simulation Run: calibrazione 3 | |
|---|---------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Sink: Sink-1 | | | |
| Start of Run: | 10Dec2021, 00:26 | Basin Model: | Misa - CALIBRAZIONE 3 |
| End of Run: | 14Dec2021, 00:24 | Meteorologic Model: | Met 1 |
| Compute Time: | 06Oct2022, 11:04:06 | Control Specifications: | Dic 2021 |
| Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3 | | | |
| Computed Results | | | |
| Peak Discharge: | 303.9 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 11Dec2021, 13:04 |
| Volume: | 43.82 (MM) | | |
| Observed Flow Gage Ponte Garibaldi | | | |
| Peak Discharge: | 308.7 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 11Dec2021, 12:36 |
| Volume: | 38.89 (MM) | | |
| RMSE Std Dev: | 0.3 | Nash-Sutcliffe: | 0.918 |
| Percent Bias: | 11.35 % | | |

Figura 3.30 - Tabella riassuntiva della calibrazione sull'evento del 2021, effettuata con i dati di portata "ripuliti"

3.6.2 Calibrazione del modello all'evento del 2014

Di seguito sono riportati dei passaggi riassuntivi che sono stati eseguiti con lo scopo di calibrare il modello di bacino all'evento di piena del 2014.

Per la calibrazione sono stati presi in considerazione gli elementi di collegamento ricadenti all'interno dei sottobacini in cui sono presenti i sensori di portata di Corinaldo (R11), Bettolelle (R6) e Serra De' Conti (R23). Tutti e tre gli idrogrammi (illustrati nella sezione 2.2 – Analisi delle portate, nelle Figure 2.7, 2.8 e 2.9) osservati sono stati utilizzati per la calibrazione del modello all'evento del 2014.

I risultati della prima simulazione (Simulazione 1), eseguita senza alcuna pregressa calibrazione, sono mostrati nelle Figure 3.31, 3.32 e 3.33.

Le visibili divergenze tra le curve dei dati misurati (in nero) e quelle dei dati simulati (in blu) potrebbero essere dovute all'eccezionale intensità dell'evento preso in analisi e/o all'indisponibilità di dati, che è stata colmata ricavando le portate da una scala di deflusso approssimata.

Come si può notare dalla Figura 3.31, l'idrogramma relativo al sensore di Corinaldo evidenzia una forte sovrastima della portata. Infatti, la scala di deflusso valida dal gennaio 2011 al dicembre 2014 (riportata nella sezione 3.4.5 – Analisi dell'evento del 2014, in Tabella 3.2) risulta valida per il calcolo delle portate per tiranti idrici superiori a 4.2 m. Le portate a Corinaldo sono invece state stimate con la medesima formula anche con tiranti idrici superiori a 4.2 m. Da questo ne deriva una possibile forte sovrastima delle portate reali: di fatto la curva nera rappresentate i dati osservati raggiunge un picco di circa 500 m³/s, mentre le portate modellate dalla Simulazione 1 si fermano a circa 200 m³/s.

L'idrogramma relativo al sensore di Bettolelle (Figura 3.32) mostra inoltre una discrepanza principalmente causata da un possibile ritardo, la curva simulata risulta in ritardo di circa 3 ore rispetto alla curva delle portate osservate.

L'idrogramma relativo al sensore di Serra De' Conti (Figura 3.33) presenta invece una sovrastima dei dati di portata simulati rispetto a quelli osservati.

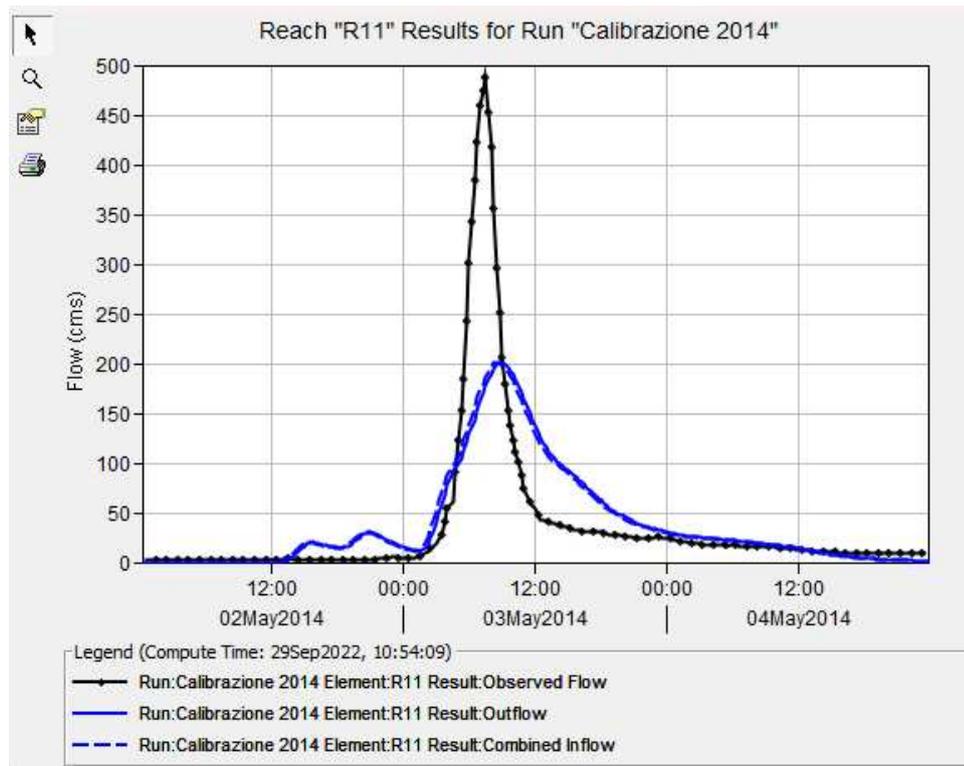


Figura 3.31 – SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Corinaldo

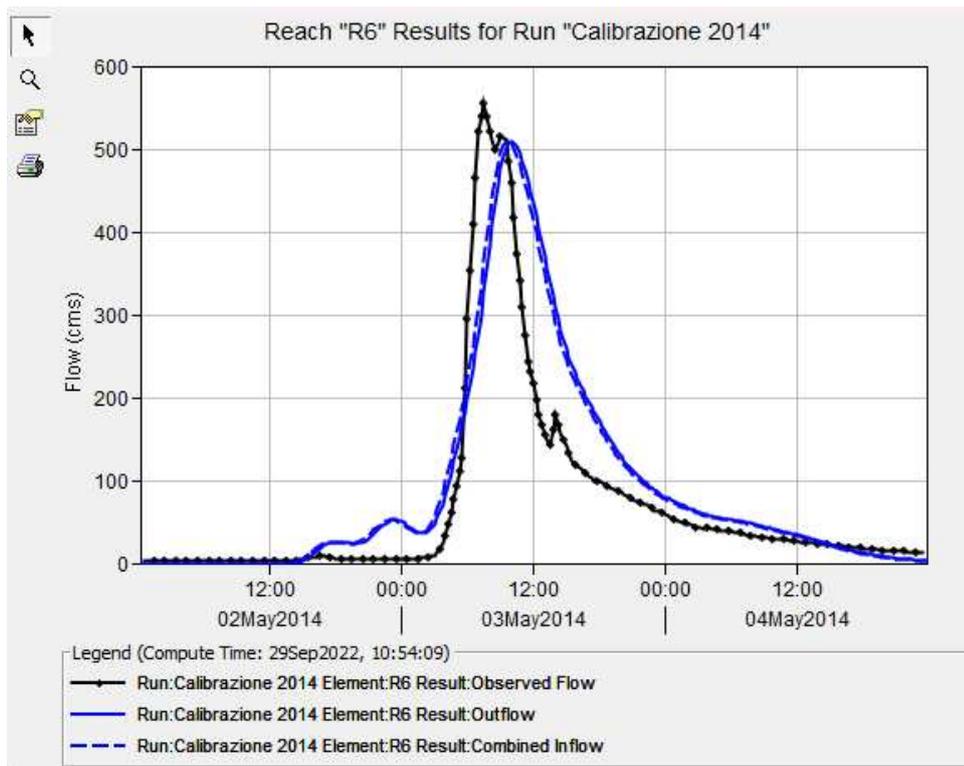


Figura 3.32 – SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Bettolle

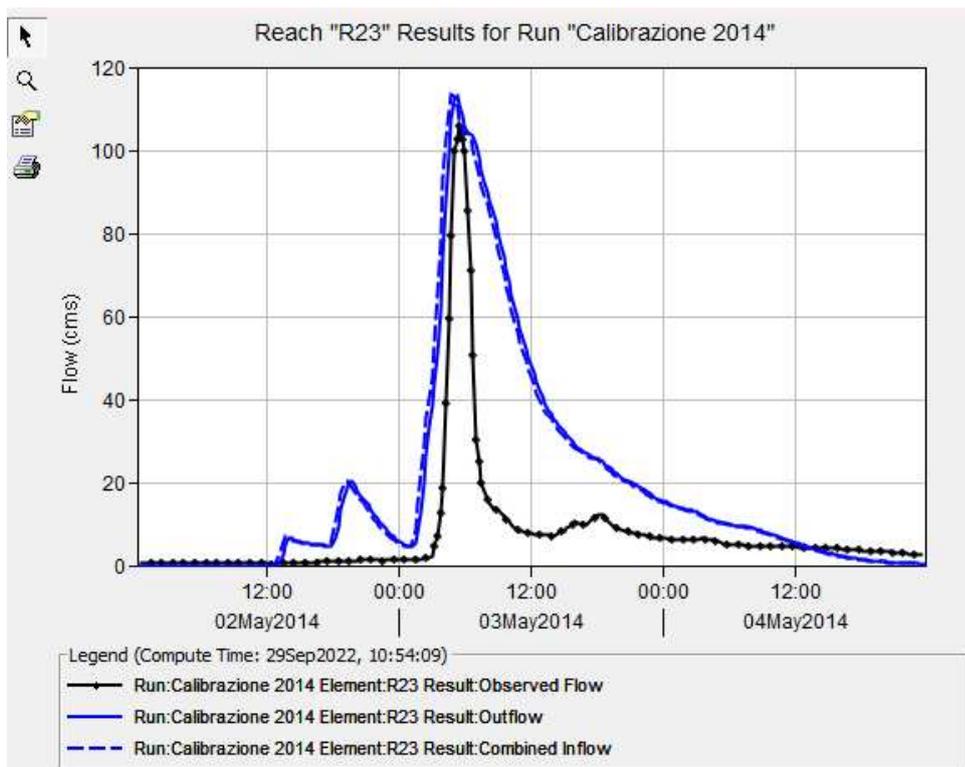


Figura 3.33 – SIMULAZIONE 1: idrogramma iniziale per l'evento del 2014, Serra De' Conti

Per la seconda simulazione (Simulazione 2) è stato modificato il coefficiente delle acque sotterranee (GW1), parametro che tende a spostare il tempo del flusso di picco per l'idrogramma del flusso di base. Il parametro è stato moltiplicato per un fattore costante pari a 0.6, dunque diminuito. La variazione del coefficiente ha portato al miglioramento dell'abilità predittiva del modello per i sensori di Corinaldo (Figura 3.34) e di Bettollelle (Figura 3.35), causando però un conseguente aumento della sovrastima delle portate in corrispondenza del sensore di Serra De' Conti (Figura 3.36).

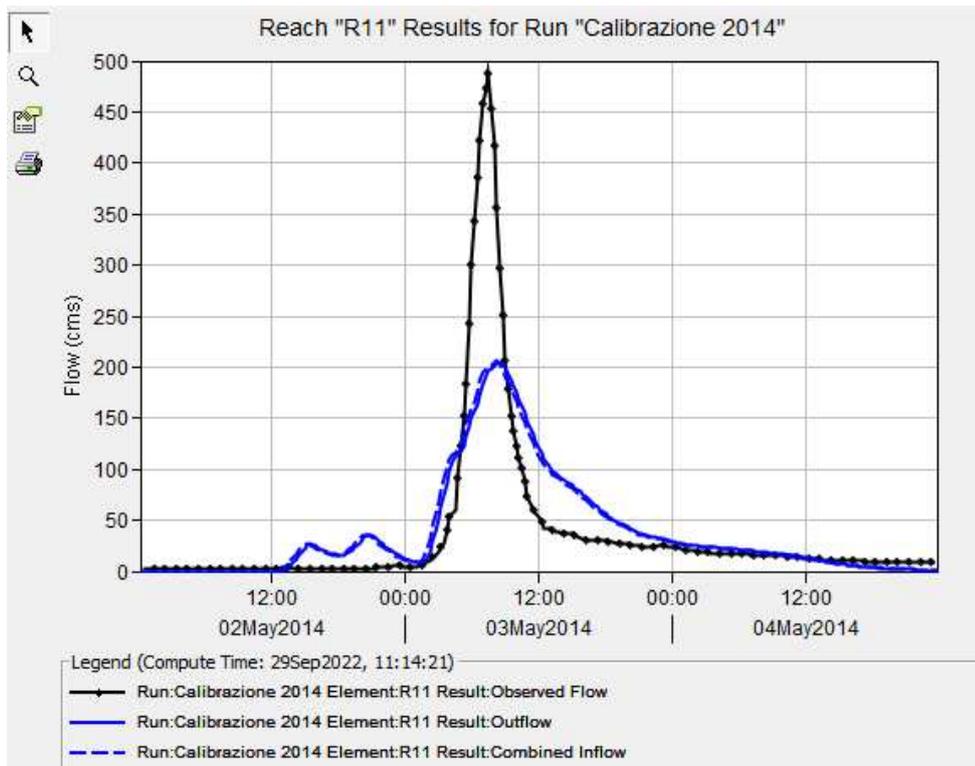


Figura 3.34 – SIMULAZIONE 2: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.627

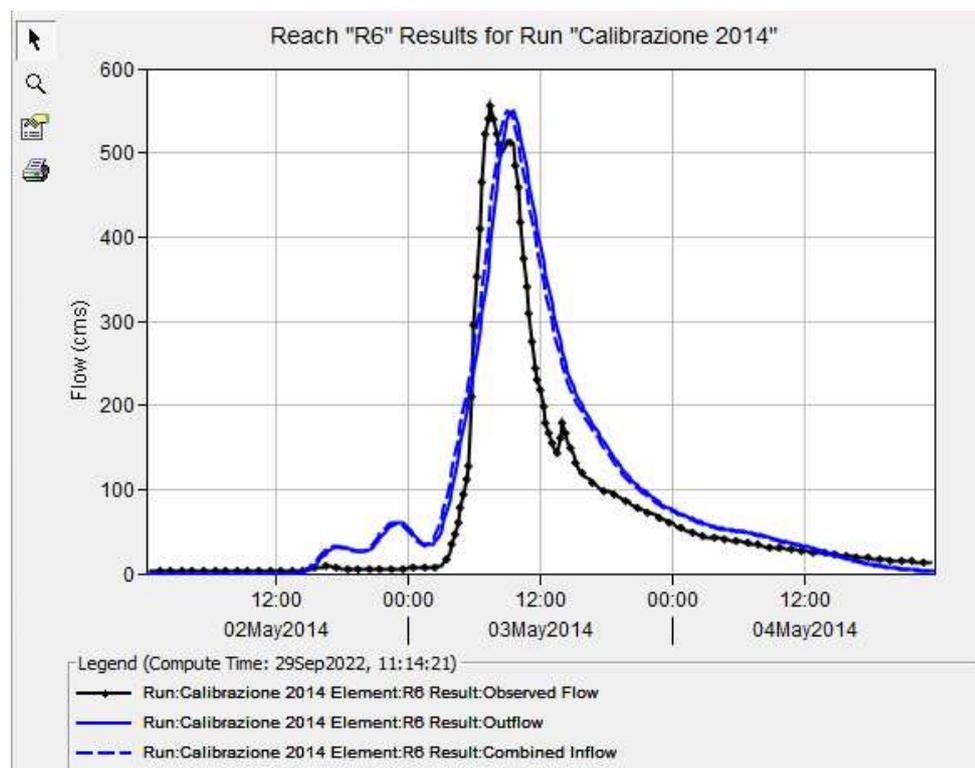


Figura 3.35 – SIMULAZIONE 2: calibrazione, Bettolle, NSE = 0.816

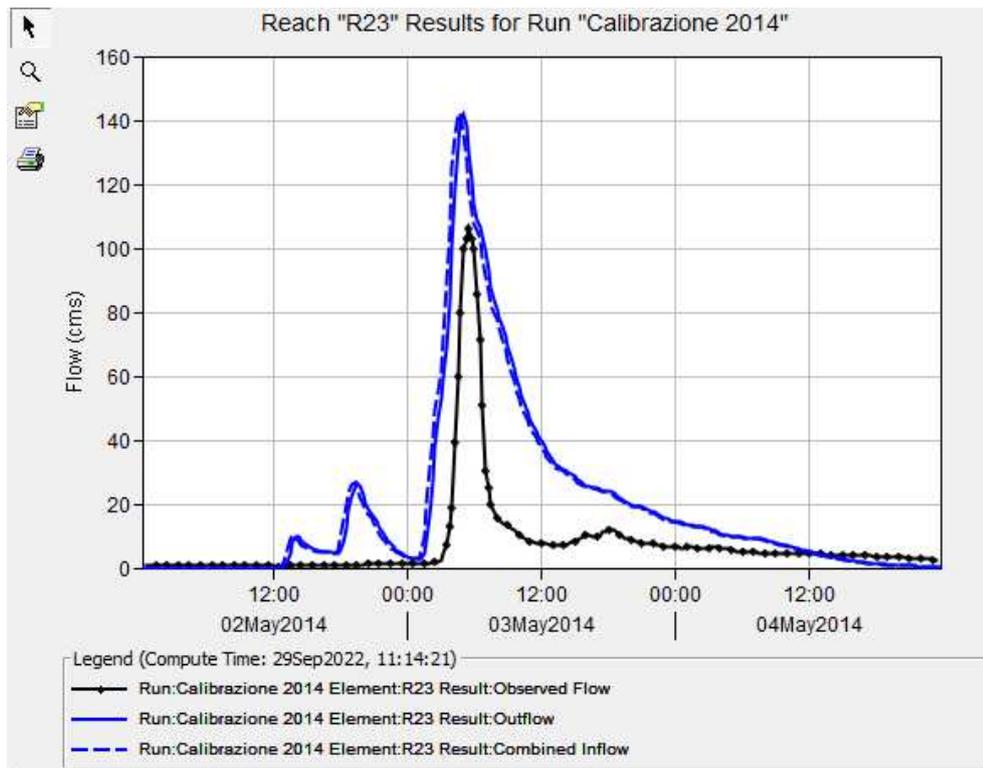


Figura 3.36 - SIMULAZIONE 2: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = - 0.745

Il secondo parametro modificato è stato il tempo di corrivazione T_c , parametro volto al perfezionamento delle tempistiche di simulazione, in quanto interviene su ritardi o anticipi del modello simulato. Il parametro T_c è stato aumentato di un fattore costante pari a 1.5, portando così a un anticipo degli idrogrammi simulati.

Contemporaneamente alla modifica del tempo di corrivazione è stato variato anche il coefficiente di stoccaggio R , che è stato moltiplicato per 2. Con l'aumento del valore del coefficiente di stoccaggio la forma dell'idrogramma subisce un lieve attenuamento; dunque, il picco di piena viene ridotto rispetto alla condizione precedente e la forma dell'idrogramma tende ad essere appiattita.

Le modifiche sopra citate sono evidenti nei risultati della terza simulazione (Simulazione 3) mostrati nelle Figure 3.37, 3.38 e 3.39.

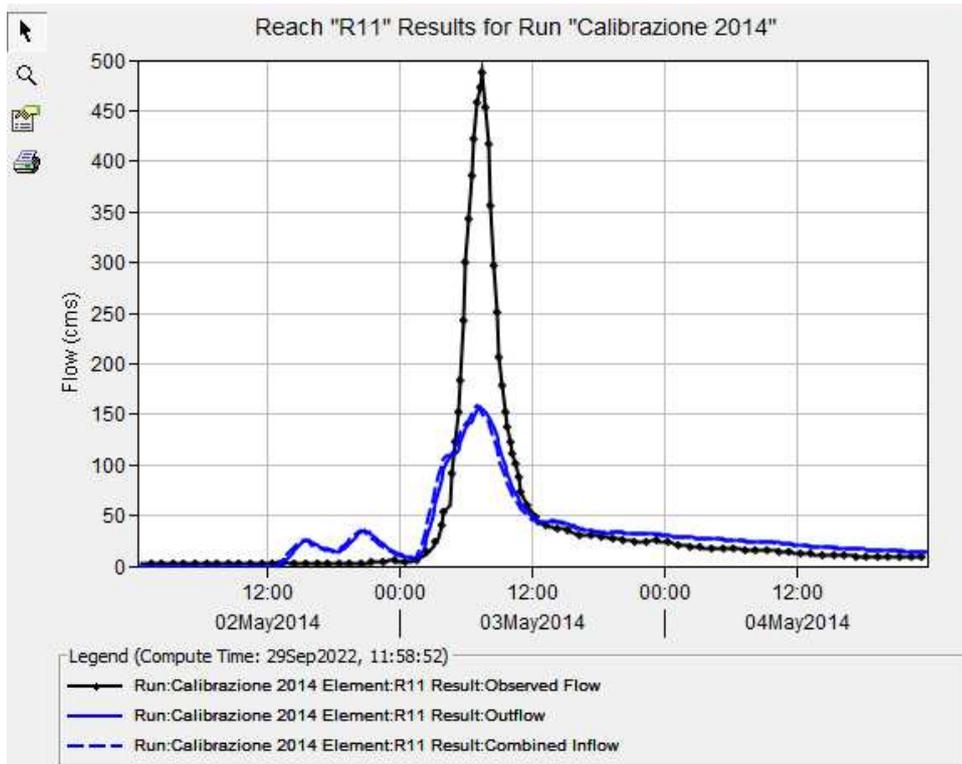


Figura 3.37 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.575

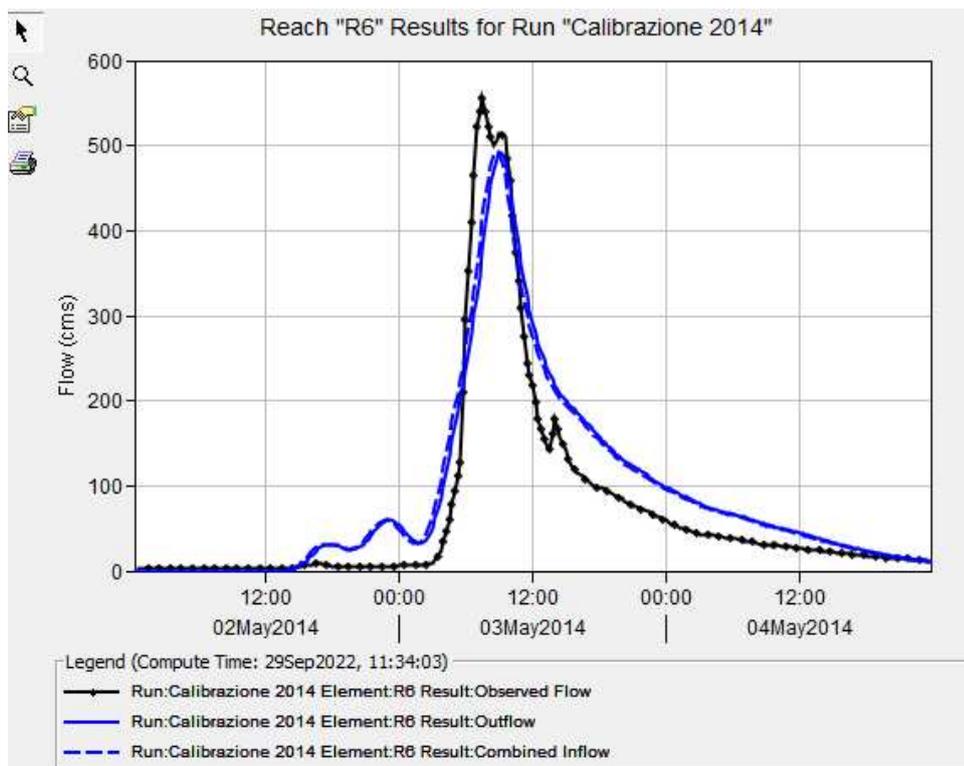


Figura 3.38 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Bettollele, NSE = 0.872

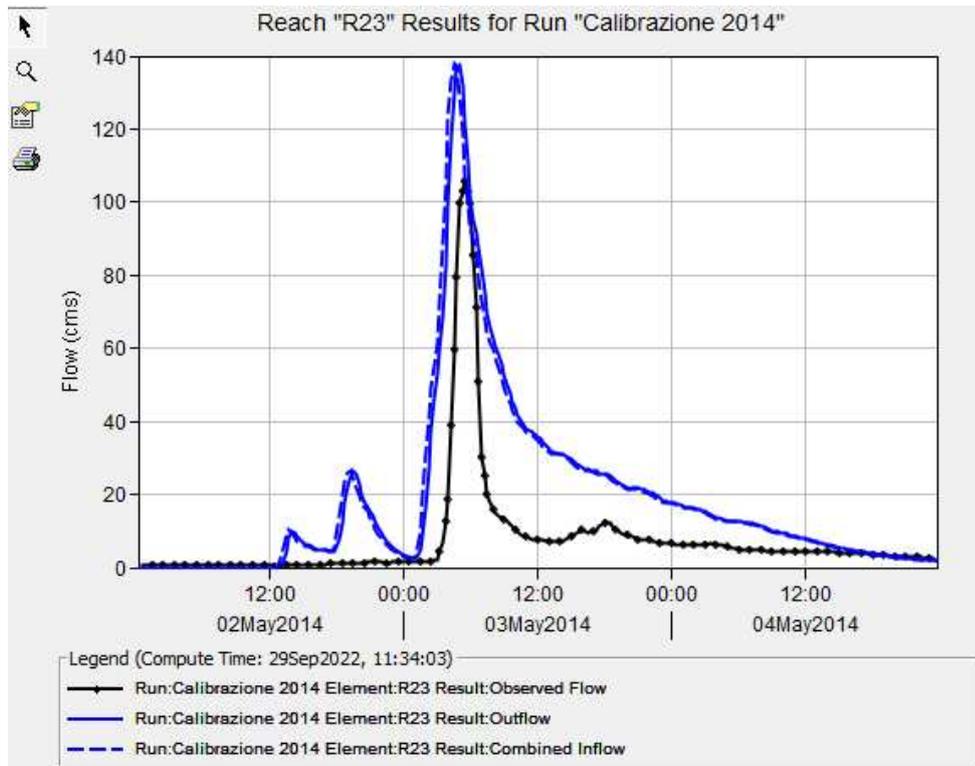


Figura 3.39 - SIMULAZIONE 3: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = - 0.346

Sfruttando ancora una volta la metrica di NSE per stabilire l'abilità predittiva del modello si registra una precisione non soddisfacente per il sensore in corrispondenza di Serra De' Conti.

Per cercare di aumentare il valore di NSE di tutto il modello, e in particolare nella zona relativa a Serra De' Conti, è risultato utile aumentare notevolmente il coefficiente di stoccaggio R. Infatti, moltiplicando il coefficiente di stoccaggio di ogni sottobacino per un fattore costante pari a 10 la calibrazione è stata perfezionata sebbene ancora non sufficientemente accurata.

I risultati della quarta ed ultima simulazione (Simulazione 4) sono mostrati nelle sottostanti Figure 3.40, 3.41 e 3.42.

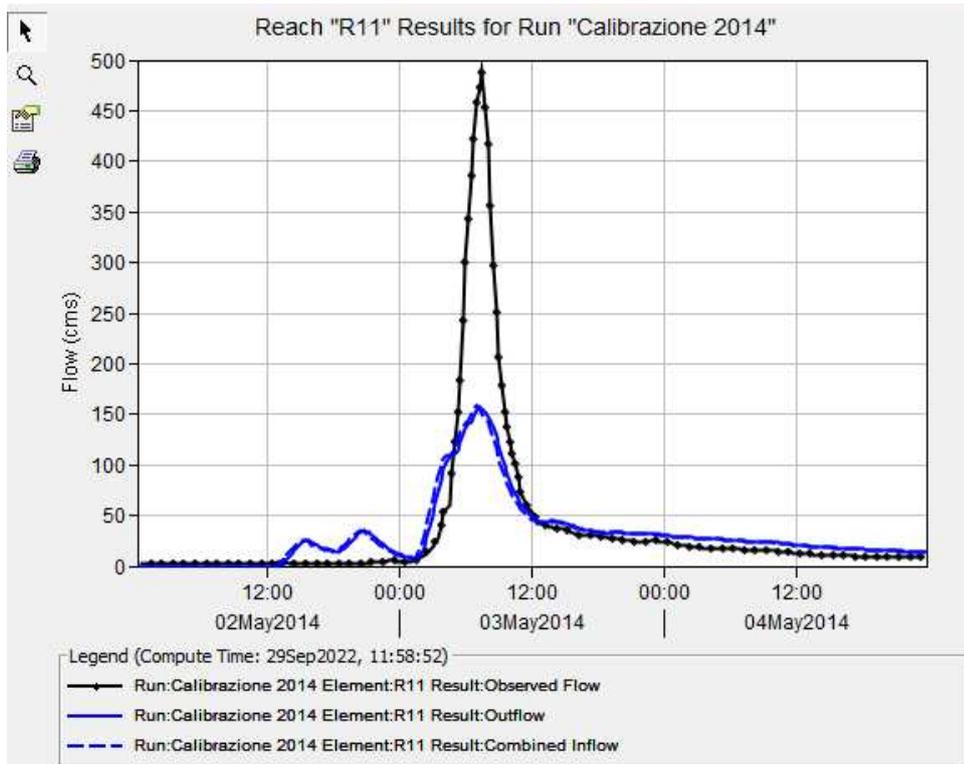


Figura 3.40 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Corinaldo, NSE = 0.652

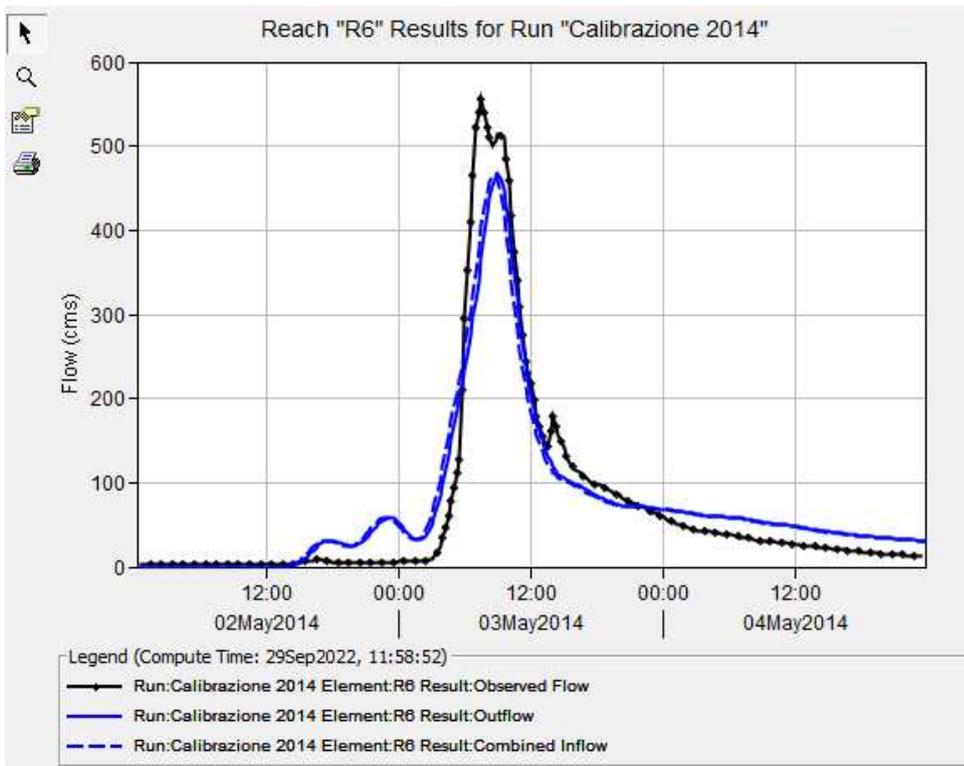


Figura 3.41 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Bettolle, NSE = 0.908

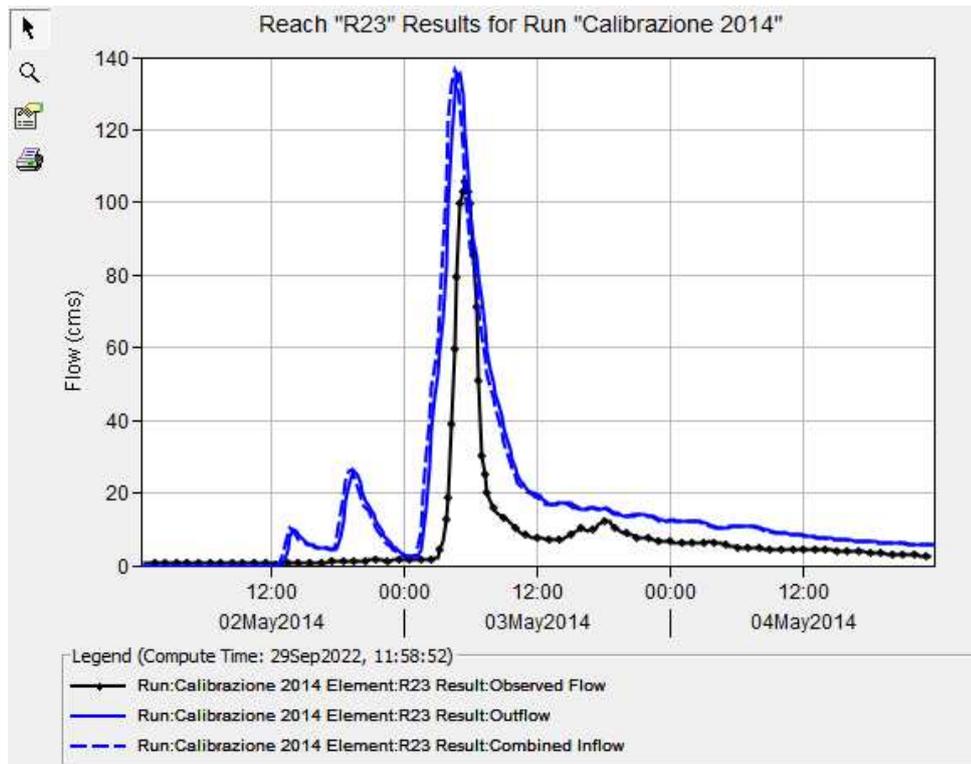


Figura 3.42 - SIMULAZIONE 4: calibrazione, Serra De' Conti, NSE = 0.105

È evidente come durante il processo di calibrazione la modifica di uno specifico parametro abbia influenzato positivamente o negativamente la calibrazione di un sensore piuttosto che di un altro. Infatti, la difficoltà del processo è stata quella di mantenere dei valori di NSE accettabili per tutti e tre gli idrogrammi considerati.

Sono di seguito riportate le tabelle riassuntive delle tre calibrazioni nelle Figure 3.43, 3.44 e 3.45.

Ne consegue che l'abilità predittiva del modello idrologico risulta buona in corrispondenza del sensore di Corinaldo essendo il NSE è pari a 0.652 ($0.65 < NSE \leq 0.75$), molto buona in corrispondenza del sensore di Bettolle in cui il NSE è pari a 0.908 ($0.75 < NSE \leq 1$), e insoddisfacente in corrispondenza del sensore di Serra De' Conti poiché il NSE è pari a 0.105 ($NSE \leq 0.50$).

| Project: Modellazione10 | | Simulation Run: Calibrazione 2014 | |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Reach: R6 | | | |
| Start of Run: 02May2014, 00:15 | Basin Model: Calibrazione 2014 | | |
| End of Run: 04May2014, 23:45 | Meteorologic Model: Met 1 | | |
| Compute Time:29Sep2022, 11:58:52 | Control Specifications:May 2014 | | |
| Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3 | | | |
| Computed Results | | | |
| Peak Inflow: 466.6 (M3/S) | Date/Time of Peak Inflow | 03May2014, 08:45 | |
| Peak Discharge:466.2 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 09:00 | |
| Inflow Volume: 56.81 (MM) | Discharge Volume: | 56.70 (MM) | |
| Observed Flow Gage Bettollele | | | |
| Peak Discharge:555.9 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 07:30 | |
| Volume: 53.38 (MM) | Nash-Sutcliffe: | 0.908 | |
| RMSE Std Dev: 0.3 | | | |
| Percent Bias: 6.11 % | | | |

Figura 3.43 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Corinaldo

| Project: Modellazione10 | | Simulation Run: Calibrazione 2014 | |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Reach: R11 | | | |
| Start of Run: 02May2014, 00:15 | Basin Model: Calibrazione 2014 | | |
| End of Run: 04May2014, 23:45 | Meteorologic Model: Met 1 | | |
| Compute Time:29Sep2022, 11:58:52 | Control Specifications:May 2014 | | |
| Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3 | | | |
| Computed Results | | | |
| Peak Inflow: 158.0 (M3/S) | Date/Time of Peak Inflow | 03May2014, 07:00 | |
| Peak Discharge:157.3 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 07:15 | |
| Inflow Volume: 66.40 (MM) | Discharge Volume: | 66.26 (MM) | |
| Observed Flow Gage Corinaldo | | | |
| Peak Discharge:488.3 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 07:30 | |
| Volume: 77.64 (MM) | Nash-Sutcliffe: | 0.562 | |
| RMSE Std Dev: 0.7 | | | |
| Percent Bias: -14.77 % | | | |

Figura 3.44 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Bettollele

| Project: Modellazione10 | | Simulation Run: Calibrazione 2014 | |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Reach: R23 | | | |
| Start of Run: 02May2014, 00:15 | Basin Model: Calibrazione 2014 | | |
| End of Run: 04May2014, 23:45 | Meteorologic Model: Met 1 | | |
| Compute Time:29Sep2022, 11:58:52 | Control Specifications:May 2014 | | |
| Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3 | | | |
| Computed Results | | | |
| Peak Inflow: 136.7 (M3/S) | Date/Time of Peak Inflow | 03May2014, 04:30 | |
| Peak Discharge:135.8 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 05:00 | |
| Inflow Volume: 56.13 (MM) | Discharge Volume: | 56.03 (MM) | |
| Observed Flow Gage Serra De conti | | | |
| Peak Discharge:105.8 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: | 03May2014, 05:30 | |
| Volume: 26.82 (MM) | Nash-Sutcliffe: | 0.105 | |
| RMSE Std Dev: 0.9 | | | |
| Percent Bias: 108.64 % | | | |

Figura 3.45 - Tabella riassuntiva della calibrazione, Serra De' Conti

4 Discussione

La calibrazione del modello è stata effettuata mediante la modifica dei parametri fisici inseriti all'interno di HEC-HMS. Nel processo di calibrazione è importante assicurarsi che i parametri modificati abbiano un senso fisico, la modifica deve essere sì fatta seguendo un processo iterativo, ma garantendo variazioni ragionevoli che non distorcano il bacino idrografico creato. Ad esempio, modificare un parametro come l'impermeabilità del terreno in maniera impropria può aumentare il volume che defluisce sul bacino, creando però un bacino che non corrisponde alla realtà e non rispecchia più l'urbanizzazione del territorio.

Nello specifico, durante la calibrazione effettuata in questo lavoro sono stati modificati parametri come il tempo di corrvazione T_c (*Time of concentration*), il coefficiente di stoccaggio R (*Storage Coefficient*) e il coefficiente delle acque sotterranee GW (*Groundwater Coefficient*). Il processo è stato effettuato in maniera critica considerando le effettive conseguenze che le modifiche di questi parametri avrebbero potuto apportare al bacino interessato. La principale modifica degli idrogrammi ha riguardato in particolar modo la tempistica delle simulazioni e il volume di picco verificatosi durante l'evento di piena.

La modifica del tempo di corrvazione T_c influenza il tempismo della simulazione, in quanto variare il parametro significa manipolare i tempi di arrivo dell'onda di picco. Concettualmente, un incremento del T_c implica un aumento del tempo necessario affinché l'acqua arrivi al punto di uscita del bacino corrispondente. Al fine della calibrazione del presente modello agli eventi considerati, il tempo di corrvazione è stato aumentato (rispetto al valore di default) sia per la calibrazione dell'evento del 2021, sia per quella del 2014: questa necessità potrebbe essere legata ad una mancanza di informazioni riguardanti l'uso del suolo o ad errori nella descrizione della pendenza dei bacini, in quanto pendenze globalmente maggiori conducono a tempi di corrvazione minori.

Un intervento sul coefficiente di stoccaggio R modifica la forma della curva di piena: durante il processo di calibrazione dell'evento del 2014 questo parametro è stato notevolmente incrementato rispetto alla condizione inizialmente ipotizzata. Essendo il valore del coefficiente ricavato dal tempo di corrvazione, la richiesta di un aumento del parametro potrebbe essere dovuto ad una sottostima del tempo necessario all'acqua caduta nel punto idraulicamente più a monte del bacino per raggiungere la sezione di uscita.

La modifica del coefficiente delle acque sotterranee GW tende a modificare il volume di deflusso durante l'onda di piena e, ancora una volta, a modificarne le tempistiche. In particolare, una diminuzione del coefficiente determina un ridimensionamento della quantità di acqua di deflusso con conseguente anticipo nei tempi di arrivo dell'onda dovuto all'aumento del tempo richiesto per lo smaltimento di tutto il deflusso dal bacino. Al contrario, un aumento del

parametro è caratterizzato da un incremento delle portate di deflusso con conseguente abbassamento del picco e ritardo nelle tempistiche.

Per l'analisi dei risultati delle calibrazioni sono stati confrontati per ciascun evento sia i volumi defluiti ottenuti dal modello con i volumi defluiti reali, sia i valori dei picchi di piena modellati con i valori dei picchi di piena registrati realmente. Dallo studio effettuato si osserva come per l'evento del 2021 ci sia una buona corrispondenza tra i volumi defluiti relativi alle portate misurate e quelli relativi alle portate modellate. Il modello in questo caso restituisce un'ottima approssimazione dell'onda di piena osservata a Ponte Garibaldi a Senigallia, in effetti la forma dell'idrogramma e il valore delle portate sono molto prossimi ai dati reali misurati dal sensore River gauge. Per l'evento del 2014, invece, la modellazione ha portato a dei risultati non del tutto soddisfacenti, rendendo dunque necessario un approfondimento delle cause che li hanno determinati. La modellazione di questo evento è stata fatta prendendo in considerazione tre diversi idrogrammi: nello specifico quelli di Bettolle e Corinaldo hanno portato a dei risultati accettabili, al contrario quello di Serra De' Conti ha prodotto dei risultati insoddisfacenti. La discordanza tra il volume piovuto e quello defluito misurato, riscontrabile in particolar modo in corrispondenza del sensore posizionato a Serra De' Conti, è stata imputata al fatto che i dati di precipitazione sono stati estrapolati dalle scale di deflusso regolari nonché dall'eccezionale intensità dell'evento meteorologico.

La disponibilità di dati reali misurati mediante stazioni di controllo permette di ottenere delle modellazioni idrologiche molto accurate e verosimili, come quella ottenuta per l'evento del 2021. Al contrario l'estrapolazione dei dati da una semplice scala di deflusso non consente di ricreare dei modelli sicuri che riproducano delle situazioni reali. Per poter creare un sistema di monitoraggio sicuro del territorio è necessario poter garantire una disponibilità continua di dati provenienti da misurazioni reali, per questo è fondamentale promuovere il dispiegamento di nuove stazioni di misura da disporre su tutto il territorio, in particolar modo in quelle zone a rischio idraulico elevato che hanno bisogno di maggiore controllo e prevenzione.

5 Conclusioni

Le inondazioni causate da eventi temporaleschi sono una delle principali preoccupazioni in molte regioni d'Italia. Il clima estremo degli ultimi anni ha enfatizzato la necessità di costruire dei modelli affidabili per controllare le alluvioni e per poter prevedere eventi estremamente intensi.

Con l'aumento delle temperature medie globali la probabilità che eventi drastici si verificano cresce esponenzialmente, questo rende ancora più urgente la previsione di eventi meteorologici acuti, dei livelli di inondazione e dei possibili danni che ne derivano.

Con l'avvento dei sistemi informativi geografici (GIS), dei radar, delle stime delle precipitazioni basate su strumentazioni di nuova generazione e dei modelli digitali ad alta risoluzione (DEM), la modellazione idrologica è migliorata apprezzabilmente negli ultimi anni. Esistono tuttavia dei problemi che limitano l'accuratezza delle previsioni, difficoltà legate agli errori associati alla misurazione delle precipitazioni o alla frequente scarsa disponibilità di dati. La qualità di un modello non è solamente legata ad una corretta modellazione matematica delle equazioni, ma anche ad un uso critico e consapevole dei dati forniti.

Nonostante i progressi nella ricerca le inondazioni continuano ad affliggere molte aree d'Italia, comprese regioni come le Marche. Nel 2014 un grande evento di precipitazione ha causato estese inondazioni che hanno travolto la città di Senigallia e dintorni, l'evento ha causato quattro morti e circa 180 milioni di euro di danni. A dimostrazione del fatto che eventi del genere si stanno presentando sempre più frequentemente nel 2022 c'è stata un'altra inondazione nella città di Senigallia che ha causato ancora una volta morti e feriti, e milioni di euro di danni.

Il presente lavoro ha consentito di sviluppare un modello idrologico per il bacino idrografico del fiume Misa in grado di simulare lo sviluppo di eventi di piena. Per l'evento del 2021 è stata ottenuta un'ottima corrispondenza tra i dati simulati e quelli realmente misurati; invece, l'evento del 2014 ha riportato delle criticità legate principalmente all'intensità dell'evento temporalesco e alla mancanza di dati diretti di portata.

Le criticità evidenziate in questo lavoro mostrano che non è possibile immaginare di realizzare un modello che vada bene in generale, ma è necessario arricchirlo e personalizzarlo in funzione del territorio che è chiamato a riprodurre. La conoscenza del territorio e la possibilità di reperire dati *in situ* con un adeguato livello di precisione e continuità nel tempo sono i primi passi per una corretta modellazione idrologica.

6 Riferimenti

- Calibrate a Basin Model to Event 1.* (s.d.). Tratto da HEC-HMS:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/calibrating-a-simple-basin-model/calibrate-a-basin-model-to-event-1>
- Clark Unit Hydrograph Model.* (s.d.). Tratto da HEC-HMS:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/surface-runoff/clark-unit-hydrograph-model>
- Clark, W. C. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *PNAS*.
- Engineers, U. A. (s.d.). *Hydrologic Modeling System Manual*. Tratto da Manuale HEC-HMS: https://users.auth.gr/vmarios/courses/DPMS/HEC-HMS/HEC-HMS%20User%27s%20Manual-v41-20210316_023441.pdf
- ESRI . (s.d.). Tratto da <https://www.esri.com/en-us/home>
- Estimating Time of Concentration & Storage Coefficient.* (s.d.). Tratto da
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/estimating-clark-unit-hydrograph-parameters/estimating-time-of-concentration-storage-coefficient>
- Ferretti, D. G. (2014). *Rapporto preliminare di evento 2 - 4 maggio 2014*. Tratto da http://scaloni.it/popinga/wp-content/uploads/2014/06/Rapporto_Evento_20140502.pdf
- G. Santoni, G. M. (2021). *Misa Amaro - Piogge intense, inondazioni e alluvioni storiche a Senigallia*. Senigallia.
- HEC-HMS. (s.d.). Tratto da www.hec.usace.army.mil:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs>
- Introduction to the Channel Routing Tutorials.* (s.d.). Tratto da HEC-HMS:
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/applying-reach-routing-methods-within-hec-hms/introduction-to-the-channel-routing-tutorials>
- ISPRA. (s.d.). Tratto da <https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/acque-interne-e-marino-costiere-1/progetti-conclusi/progetto-annali/gli-annali-idrologici>
- Mappa interattiva Contratto di fiume Misa-Nevola.* (s.d.). Tratto da barl.it:
<https://tinyurl.com/2p8v9x5x>
- Marche, P. C. (2022, settembre). *regione.marche.it*. Tratto da <https://www.regione.marche.it/News-ed-Eventi/Post/87166/Pubblicato-il-rapporto-evento-della-Protezione-civile-relativo-all-alluvione-Si-%C3%A8-trattato-di-un-evento-millenario>
- Martini, D. E. (2018). *Contratto di fiume per i territori del bacino idrografico del fiume Misa e Nevola*. Senigallia.

- P. Willems, K. A.-N. (2012). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Elsevier*.
- Protezione Civile, S. (2018). *Piano di Emergenza della Protezione Civile*. Tratto da https://www.protezionecivileenigallia.it/images/download/piano_emergenza/piano_idrogeologico/Rischio_Idrogeologico_idraulico.pdf
- Regione Marche. (s.d.). *Cartografia e informazioni territoriali*. Tratto da <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica-Genio-Civile/Cartografia-e-informazioni-territoriali/Repertorio#DTM>
- Regione Marche. (s.d.). *Database dell'idrografia regioane 1:10000 (reticolo e bacini idrografici)*. Tratto da www.regione.marche.it: https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica-Genio-Civile/Cartografia-e-informazioni-territoriali/Repertorio#1106_Idrografia-regionale-1:10000
- Ruwa s.r.l.* (s.d.). Tratto da <http://www.ruwa.it/site/software-hec#hec-hms>
- SIRMIP online*. (s.d.). Tratto da Protezione Civile Marche: <http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.sol?lang=it>
- (s.d.). *Validazione Strumenti MORSE - River gauge*.
- Vari. (2016). *Assetto di progetto media e bassa valle del fiume Misa*. Tratto da [regione.marche.it](http://www.regione.marche.it): https://www.regione.marche.it/Portals/0/Paesaggio_Territorio_Urbanistica/AdB/PAIMarche/DelComIst/allegati/del160325_67_ElaboratoA.pdf