

POLITECNICO DI MILANO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile,
indirizzo idraulica
Scuola di Ingegneria Civile e Ambientale



Calibrazione del modello idrologico distribuito FEST per il bacino del fiume Tanaro

Relatore:

Prof. Giovanni Ravazzani

Elaborato di laurea di:

Fabio Monza

Matr.898567

Anno accademico 2021/2022

Ringraziamenti

Al termine di questo interessante lavoro di tesi vorrei fare alcuni ringraziamenti.

Prima di tutto doverosamente e in maniera molto sentita al professor Giovanni Ravazzani, per l'impegno, la cura e l'attenzione dedicatami in questo periodo: oltre all'indubbia professionalità riguardo agli argomenti affrontati e al metodo di lavoro ho trovato grandissima attenzione e disponibilità anche per l'aspetto umano dello studio e della stesura dell'elaborato, qualità per nulla scontate.

Ringrazio gli enti ARPA Piemonte, Regione Piemonte, Regione Liguria e ADBPO che hanno raccolto, salvato e condiviso i dati, direttamente con me o tramite l'elaborato di Elena.

Ringrazio tantissimo i miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di studiare e portare a termine questo percorso, nonostante i miei ritmi biblici per giungere alla tanto agognata conclusione. Con le mie sorelle mi hanno guidato, spronato e corretto quando è stato necessario, rispettando le mie scelte eppure indicandomi la direzione.

Sono circondato da tanti cari amici, che mi hanno incoraggiato e sostenuto in ogni momento. Davide e Marta, sempre vicini e guida sicura per lo studio e per la vita; Teo, Sere, Cate e Gabri, capaci sempre di destreggiarsi abilmente tra un sostegno in una giornata no, una chiacchierata seria o un gioco in scatola demente; i miei colleghi di università, a cui ho dato parecchio fastidio in ogni momento possibile ma che credo di aver anche fatto divertire un pochino, con i quali ho potuto affrontare il Poli in ottima compagnia: Sofi, Gugli, Luca, Fede, da voi ho imparato molto e se ce l'ho fatta è anche grazie a voi.

E infine un enorme bacio a Chiara, che ha avuto la sventura di incontrarmi e la testardaggine di rimanermi vicino, la pazienza di attendere con grande fiducia nelle mie capacità e una smisurata indulgenza per le mie mancanze. Sono molto fortunato.

Abstract

Le onde di piena fluviale provocate da intense precipitazioni in questi ultimi anni hanno sempre più frequentemente un impatto distruttivo sul nostro territorio. Non è possibile prevedere in maniera deterministica una precipitazione, ma tramite degli opportuni modelli idrologici è possibile valutare come una precipitazione si trasforma in deflusso.

Il modello FEST è un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi automatizzato, fisicamente basato, a eventi e spazialmente distribuito. Risolve l'equazione del bilancio di massa per ciascuna porzione di terreno modellata. Riceve in input le mappe raster dei parametri fisici, idrologici e idraulici necessari alle equazioni del modello, e i valori delle forzanti meteorologiche raccolti puntualmente dalle stazioni di misura che vengono poi interpolati su tutta l'area di studio.

La calibrazione è l'operazione più delicata nella preparazione del software per l'effettivo utilizzo pratico, procedura che permette al modello di rispondere alle sollecitazioni meteorologiche in maniera conforme al reale territorio modellato. Dopo aver analizzato i risultati ottenuti con una calibrazione a parametri regionalizzati svolta da Corso Elena nel suo lavoro di tesi (Corso 2018) si è quindi valutato un approccio globale, mantenendo gli stessi dati di input. In questo lavoro inoltre la calibrazione è stata effettuata applicando al simulatore due diversi modelli di infiltrazione, Philip e Curve Number, per un periodo di tre anni: dal 01/01/2012 al 01/01/2015.

I risultati dell'analisi dimostrano che, per quanto in ogni singola sezione di controllo l'adattamento simulazioni-osservazioni non sia sempre ottimale, il modello risponde bene a scala di bacino sia in termini di adattamento delle simulazioni, sia per la stima della portata di picco.

Ulteriori approfondimenti sono necessari per raffinare l'individuazione dei parametri correttivi ottimali, oltre che migliorare la precisione delle simulazioni.

English abstract

Fluvial floods due heavy precipitation events are happening more often over urbanized territories. While it's not possible to predict precipitations in a deterministic way, within some hydrological models is possible to pattern the precipitation-runoff transformation in a optimal way. FEST model is a Flash flood, Event based, Spatially distributed, rainfall-runoff Transformation model. It solves the mass balance equation for each portion of the terrain modeled. As input are required meteorological data as temperature, wind and precipitation values collected in measurement stations, and raster maps containing distributed values of physical, hydraulic and hydrological parameters for the modelling equations.

Calibration is the most sensitive operation while adapting the software model to a practical purpose: that's the procedure which let the model to correctly simulate the terrain response to meteorological solicitations. Corso Elena performed a calibration with regional parameters in her thesis (Corso 2018), so now a global approach is performed keeping the same data input. Also, two different infiltration models are investigated, Philip's and Curve Number, both for a three year time span: from 01/01/2012 to 01/01/2015.

Despite for each single control station the simulation-observation fitting is not always good, the model reply well the basin behaviour in the macroscopic scale, both for discharge and peak fitting.

More in-depth studies must be done to obtain more accurate corrective parameters and a better adaption of simulations.

Sommario

Ringraziamenti	2
Abstract	3
English abstract	4
Sommario	5
Indice delle tabelle	8
Indice delle figure	9
1 Introduzione	12
2 Inquadramento	15
2.1 Caratteristiche morfologiche.....	16
2.1.1 Stura di Demonte	18
2.1.2 Bormida	19
2.1.3 Belbo.....	21
2.2 Caratteristiche litologiche	22
2.3 Copertura del suolo.....	25
2.4 Caratteristiche climatiche	26
2.4.1 Precipitazioni	26
2.4.2 Temperatura.....	29
2.5 Regime idrologico.....	30
2.5.1 Tanaro	30
2.5.2 Stura di Demonte	32
2.5.3 Bormida	33
2.5.4 Belbo.....	34
2.6 Sfruttamento delle acque	34
2.6.1 Prelievi industriali.....	35
2.6.2 Prelievi irrigui	35
2.6.3 Prelievi idropotabili	36
2.6.4 Impianti idroelettrici	36

3	Dati disponibili.....	38
3.1	Dati meteorologici.....	38
3.2	Dati di portata	38
3.3	Mappe dei parametri	39
3.3.1	DEM.....	40
3.3.2	Altri parametri.....	41
4	Modello idrologico	43
4.1	FEST	43
4.2	Input	44
4.3	Bilancio di massa	45
4.4	Processi fisici	46
4.4.1	Dinamica della neve	47
4.4.2	Dinamica dell'infiltrazione.....	49
4.4.3	Evapotraspirazione.....	52
4.4.4	Propagazione dei deflussi.....	54
5	Calibrazione.....	57
5.1	Scelta delle sezioni	57
5.1.1	Appartenenza al bacino.....	57
5.1.2	Consistenza dei dati	57
5.1.3	Effetti dell'antropizzazione	58
5.1.4	Instabilità delle misure	59
5.1.5	Presenza di eventi registrati.....	60
5.2	Scelta degli intervalli temporali.....	62
5.3	Modifica dei parametri.....	72
5.3.1	Errore di portata al colmo	73
5.3.2	RMSE	74
5.3.3	Nash-Sutcliffe	74
6	Risultati.....	75

6.1	Philip.....	75
6.2	CN.....	78
7	Conclusioni	84
8	Bibliografia e sitografia.....	85
9	Appendice	88
9.1	Parametri e mappe GIS	88
9.2	Grafici	92
9.2.1	Alba.....	93
9.2.2	Asti.....	95
9.2.3	Casal Cermelli	97
9.2.4	Castelnuovo.....	101
9.2.5	Farigliano	103
9.2.6	Frabosa Soprana.....	105
9.2.7	Masio	107
9.2.8	Mondovì	109
9.2.9	Montecastello	111
9.2.10	Ponte di Nava	115
9.2.11	Rastello.....	117
9.2.12	San Damiano	119
9.3	Codice.....	122
9.3.1	Importare e plottare osservazioni.....	122
9.3.2	Importare e adattare simulazioni.....	123
9.3.3	Importare e confrontare simulazioni intere.....	123
9.3.4	Confrontare simulazioni per ogni sezione in ogni evento, metodo Philip	126
9.3.5	Plottare e salvare grafici, per ciascun evento di ogni sezione	129

Indice delle tabelle

Tabella 1 Parametri del bacino del Tanaro	15
Tabella 2 Parametri del bacino dello Stura di Demonte	19
Tabella 3 Parametri del bacino della Bormida	21
Tabella 4 Parametri del bacino del Belbo	22
Tabella 5 Precipitazioni medie mensili sulla regione Piemonte.....	28
Tabella 6 Temperature massime e minime medie mensili della regione Piemonte.....	29
Tabella 7 Principali invasi regolati appartenenti al bacino del fiume Tanaro	37
Tabella 8 Classi di AMC.....	51
Tabella 9 Stazioni di misura della portata nel bacino del Tanaro	61
Tabella 10 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Casal Cermelli	64
Tabella 11 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Montecastello.....	65
Tabella 12 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Castelnuovo	66
Tabella 13 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Masio	67
Tabella 14 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Asti.....	67
Tabella 15 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di San Damiano.....	68
Tabella 16 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Alba.....	69
Tabella 17 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Farigliano	70
Tabella 18 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Mondovì	70
Tabella 19 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Rastello	71
Tabella 20 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Frabosa Soprana	71
Tabella 21 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Ponte di Nava	72
Tabella 22 Parametri delle simulazioni relative al modello di infiltrazione di Philip con rispettivi indicatori statistici globali	75
Tabella 23 Parametri delle simulazioni relative al modello di infiltrazione del Curve Number con rispettivi indicatori statistici globali	78

Indice delle figure

Figura 1 Fiume Tanaro e bacino idrografico.....	16
Figura 2 Fiume Tanaro e principali affluenti	18
Figura 3 Fiume Stura di Demonte e relativo bacino.....	19
Figura 4 Fiume Bormida e relativo bacino	20
Figura 5 Fiume Belbo e relativo bacino.....	22
Figura 6 Mappa litologica dell'area di interesse	24
Figura 7 Legenda della mappa litologica.....	24
Figura 8 Utilizzo del suolo	26
Figura 9 Distribuzione pluviometrica media nel periodo 1971-2000	28
Figura 10 Temperatura media annuale nel periodo 1971-2000.....	30
Figura 11 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Garessio	31
Figura 12 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Farigliano	31
Figura 13 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Montecastello.....	32
Figura 14 Portate medie mensili del fiume Stura di Demonte alla stazione di misura di Fossano.....	33
Figura 15 Portate medie mensili del fiume Bormida alla stazione di misura di Cassine.....	33
Figura 16 Portate medie mensili del fiume Belbo alla stazione di misura di Castelnuovo	34
Figura 17 Sbarramenti di gestione nazionale e regionale presenti sul bacino del Tanaro	35
Figura 18 Bacino del Tanaro e stazioni idrometriche di misura della portata	39
Figura 19 DEM del bacino del Tanaro	40
Figura 20 Raster di "accumulation", il numero di celle contribuenti alla portata di ciascun punto	41
Figura 21 Mappa dell'indice di frazione vegetale f_v	42
Figura 22 Mappa del CN sul bacino del Tanaro.....	42
Figura 23 Schema di funzionamento del modello FEST	44
Figura 24 Schema del ciclo idrologico	47
Figura 25 Portata nella stazione di S. Bartolomeo, sul fiume Pesio.....	58
Figura 26 Portata nella stazione di Gaiola, sul fiume Stura di Demonte	59
Figura 27 Zoom temporale della serie di portata nella stazione di Gaiola, sul fiume Stura di Demonte	59
Figura 28 Portata nella stazione di Rocchetta, sul fiume Belbo.....	60
Figura 29 Zoom temporale della serie di portata nella stazione di Rocchetta, sul fiume Belbo	60
Figura 30 Portata nella sezione di S. Damiano, sul fiume Bobore	63
Figura 31 Portata nella sezione di Farigliano, sul fiume Tanaro	63
Figura 32 Portata osservata e simulata per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro	76

Figura 33 Portata osservata e simulata per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro	77
Figura 34 Portata osservata e simulata per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia.....	77
Figura 35 Portata osservata e simulata per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro	78
Figura 36 Portata osservata e simulata per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro	79
Figura 37 Portata osservata e simulata per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro	80
Figura 38 Portata osservata e simulata per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia.....	80
Figura 39 Portata osservata e simulata per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro	81
Figura 40 Portate osservata e simulate per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro	81
Figura 41 Portate osservata e simulate per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro	82
Figura 42 Portate osservata e simulate per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia.....	82
Figura 43 Portate osservata e simulate per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro	83
Figura 44 Maschera del bacino del Tanaro	88
Figura 45 Fiume Tanaro e affluenti principali	88
Figura 46 Mappa de "accumulation" del bacino.....	89
Figura 47 Mappa dell'esposizione del bacino	89
Figura 48 Mappa del CN sul bacino.....	90
Figura 49 DEM del bacino	90
Figura 50 Mappa della frazione vegetale sul bacino.....	91
Figura 51 Mappa della permeabilità k del bacino.....	91
Figura 52 Mappa della pendenza del versante del bacino.....	92
Figura 53 Mappa con la profondità del punto di appassimento sul bacino.....	92
Figura 54 Sezione di Alba sul Tanaro, eventi da 1 a 8	93
Figura 55 Sezione di Alba sul Tanaro, eventi da 9 a 16	94
Figura 56 Sezione di Asti sul Tanaro, eventi da 1 a 8	95

Figura 57 Sezione di Asti sul Tanaro, eventi da 9 a 11	96
Figura 58 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 1 a 4.....	97
Figura 59 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 5 a 12.....	98
Figura 60 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 13 a 20.....	99
Figura 61 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 21 a 26.....	100
Figura 62 Sezione di Castelnuovo sul Belbo, eventi da 1 a 8	101
Figura 63 Sezione di Castelnuovo sul Belbo, eventi da 9 a 15	102
Figura 64 Sezione di Farigliano sul Tanaro, eventi da 1 a 8	103
Figura 65 Sezione di Farigliano sul Tanaro, eventi da 9 a 15	104
Figura 66 Sezione di Frabosa Soprana sul Corsaglia, eventi da 1 a 8.....	105
Figura 67 Sezione di Frabosa Soprana sul Corsaglia, eventi da 9 a 11.....	106
Figura 68 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi da 1 a 4	107
Figura 69 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi da 5 a 12	108
Figura 70 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi 13 e 14	108
Figura 71 Sezione di Mondovì sull'Ellero, eventi da 1 a 6.....	109
Figura 72 Sezione di Mondovì sull'Ellero, eventi da 7 a 11	110
Figura 73 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 1 a 8.....	111
Figura 74 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 9 a 16.....	112
Figura 75 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 17 a 24.....	113
Figura 76 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 25 a 28.....	114
Figura 77 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi da 1 a 4.....	115
Figura 78 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi da 5 a 12.....	116
Figura 79 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi 13 e 14	116
Figura 80 Sezione di Rastello sull'Ellero, eventi da 1 a 6.....	117
Figura 81 Sezione di Rastello sull'Ellero, eventi da 7 a 10.....	118
Figura 82 Sezione di San Damiano sul Bobore, eventi da 1 a 4	119
Figura 83 Sezione di San Damiano sul Bobore, eventi da 5 a 12	120
Figura 84 Sezione di San Damiano sul Bobore, eventi da 13 a 19	121

1 Introduzione

La gestione degli eventi di piena sta assumendo un'importanza sempre più rilevante sul territorio nazionale, soprattutto dove presenta caratteristiche di elevata urbanizzazione: le zone antropizzate vicino ai corsi fluviali portano un maggior numero di risorse ad essere esposte ad un possibile danno e al tempo stesso diminuiscono la capacità di un ambiente altrimenti naturale di smorzare gli effetti delle inondazioni (D. Rabuffetti, G. Ravazzani e S. Barbero, et al. 2009). L'istituto ISPRA pubblica annualmente report riguardo a popolazione, superficie e beni immobili soggetti a rischio idrogeologico per ogni fascia di rischio (ISPRA s.d.), mentre l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del CNR riporta costantemente danni e vittime causate da frane ed inondazioni (IRPI s.d.).

Per poter prevenire, controllare e gestire gli effetti di una piena è necessario disporre di alcuni dati che possano caratterizzare l'evento, valori numerici che quantifichino le condizioni idrauliche. I principali parametri considerati sono la portata al colmo, il volume di piena e il tempo di picco. L'importanza di tali variabili è ampiamente riconosciuta in letteratura (Saharia, et al. 2017).

La portata al colmo di una piena è un dato fondamentale da confrontare con la portata smaltibile per determinare in quali punti un'insufficienza idraulica richieda di intervenire con opere per la riduzione del rischio. Tramite una rete di stazioni di misura posta su tutto il reticolo idrografico nazionale è possibile raccogliere i valori di acqua transitante nelle varie sezioni praticamente in tempo reale: tali dati sono raccolti e conservati con una frequenza dipendente dalla regione proprietaria e gestore della stazione. Nel caso di questo lavoro sono disponibili due valori ogni ora.

Mentre la portata al colmo è necessaria per stimare il massimo livello dell'acqua nelle diverse sezioni critiche, il volume di piena è da prendere in considerazione per diversi motivi: in primo luogo, se si volesse trattenerne o accumulare in un bacino anche solo parzialmente l'onda di piena, tale dato è fondamentale per il dimensionamento delle opere (Montaldo, Mancini e Rosso 2004). In secondo luogo sarebbe possibile prevedere il volume di acqua eventualmente fuoriuscito dall'alveo fluviale da alcuni punti individuati e studiati, la sua diffusione nel territorio circostante e quindi stimare l'estensione dei danni conseguenti: il volume di piena è quindi un dato necessario per questa stima (Ravazzani, Mancini e Meroni 2009). Il valore del volume di piena non è conoscibile istantaneamente: è necessario integrare i valori di portata nel tempo, e ottenerlo a fine evento.

Il tempo di picco infine serve a caratterizzare l'evento temporalmente. Risulta utile nella gestione dell'evento per far corrispondere le adeguate misure di prevenzione con le giuste tempistiche. Oltre che stimare il tempo che intercorre tra il picco di precipitazione e il massimo di portata nell'alveo si può anche avere una buona indicazione della durata dell'evento, di smaltimento del volume

precipitato e successivamente raccolto dal bacino. Il tempo di picco è ricavabile dalle serie dei valori delle portate, con l'unica problematica di distinguere i massimi locali dal massimo assoluto della serie, valore denominato portata di picco dell'evento.

Conoscere a posteriori questi valori caratterizzanti ogni evento è possibile e relativamente semplice dove siano disponibili misure di portata. L'intento dell'applicazione di un modello idrologico è utilizzare le conoscenze maturate dall'analisi di eventi trascorsi per poter stimare il comportamento del bacino in risposta ad eventi futuri, o di ricostruire valori di portata dove non siano disponibili misure. Dopo le opportune calibrazioni e validazioni, il modello dovrebbe essere in grado di simulare correttamente un evento di piena, avendo fornito come input dei dati di precipitazione misurati o ipotizzati. La precisione e l'affidabilità del modello dipendono da diversi parametri che possono essere modificati e calibrati ciascuno nel proprio range di variabilità: l'obiettivo in questo lavoro di tesi è stato calibrarne alcuni per valutare la risposta e l'adattamento del modello. I valori di portata e di precipitazione sul territorio italiano sono disponibili tramite i geoportali delle regioni: parte dei dati meteorologici sono stati inseriti in un modello idrologico FEST-WB e i risultati di portata ottenuti dalle simulazioni sono stati poi confrontati con i valori registrati nelle diverse sezioni di misura lungo i corsi d'acqua. L'adattamento delle simulazioni ai dati reali è stato valutato tramite degli indici numerici statistici.

Il modello FEST è un modello idrologico fisicamente basato a parametri distribuiti, impostato sulla risoluzione delle equazioni di bilancio di massa sul bacino di interesse. I parametri richiesti in ingresso sono numerosi: forzanti meteorologiche, quota del terreno, copertura e utilizzo del suolo, composizione e profondità del terreno. Ciascuno di questi parametri serve a costruire un modello digitale del terreno analizzato, che viene suddiviso in aree quadrate di lato da 500 metri. Sono quindi necessarie delle mappe contenenti questi parametri su tutta l'area di interesse da caricare in input. In ciascuna delle celle in cui è suddiviso il territorio il software risolve le equazioni di bilancio valutando infiltrazione, evapotraspirazione, fusione nivale, deflusso sub-superficiale e runoff superficiale.

Per questo lavoro di tesi il modello FEST-WB è stato applicato al fiume Tanaro per due motivi: è un'area ben monitorata, sia per quanto riguarda i pluviometri che per i misuratori di portata lungo le aste fluviali ed è una porzione di territorio discretamente urbanizzata e di notevole estensione, fattori che la espongono a fenomeni di inondazione e danneggiamento dovuti a eventi intensi. Poter quindi prevenire o gestire tali situazioni di emergenza comporta un notevole vantaggio economico e di sicurezza.

Questo lavoro prosegue quanto già svolto da Elena Angela Maria Corso nel suo elaborato di tesi *“STIME DI PRECIPITAZIONE DA SATELLITE DELLA COSTELLAZIONE GPM PER LA MODELLAZIONE IDROLOGICA DEL BACINO DEL TANARO”* (Corso 2018), portando un affinamento del processo di calibrazione del modello FEST, indagando diversi modelli di infiltrazione e applicando coefficienti correttivi globali e non più regionalizzati.

2 Inquadramento

Si effettua una descrizione generale del bacino del fiume Tanaro, presentando le principali caratteristiche fisiche, morfologiche, idrogeologiche e climatiche, oltre che l'utilizzo del suolo nell'area di interesse. Data l'importanza dei suoi affluenti in termini di portata, verranno descritte le caratteristiche anche dei bacini di Belbo, Bormida, e Stura di Demonte.

Il fiume Tanaro è uno dei principali affluenti del Po dal lato destro. Il suo bacino insiste su buona parte del Piemonte meridionale e la parte settentrionale della Liguria: comprende la quasi totalità della provincia di Asti, e una discreta porzione delle province di Cuneo e Alessandria, oltre che parte di quelle di Genova, Imperia e Savona. Il limite meridionale corrisponde alla linea spartiacque delle Alpi Marittime e dell'Appennino Ligure; verso Ovest si estende fino al confine francese nella valle del fiume Stura di Demonte, il cui bacino delimita tutto il confine occidentale dell'area contribuente al Tanaro. Sul lato orientale invece è il torrente Orba l'ultimo affluente, che si immette nel Tanaro molto a valle, dopo la città di Alessandria. Infine verso Nord il limite è il bacino di Bobore e Triversa nell'Astesana.

In tabella 1 sono riportati alcuni parametri idrologici e morfologici utili a caratterizzare il bacino, mentre in figura 1 è raffigurato il bacino proiettato su un'immagine satellitare della regione di interesse.

Caratteristiche del bacino	
Portata media [m ³ /s]	116.1
Lunghezza asta principale [km]	238
Area del bacino [km ²]	8080
Pendenza media [%]	11.54
Altitudine minima [m s.l.m.]	76
Altitudine massima [m s.l.m.]	3197
CN medio	66.2

Tabella 1 Parametri del bacino del Tanaro



Figura 1 Fiume Tanaro e bacino idrografico

Il regime idrologico dipende fortemente dal comportamento dei differenti affluenti: questi sono molto diversificati e con diverse esposizioni, scorrendo in vallate distanti tra loro e quindi soggette a regimi di precipitazione più vari.

2.1 Caratteristiche morfologiche

Il fiume Tanaro nasce nei pressi del comune piemontese di Ormea, al confine con la regione Liguria, dalla confluenza di due torrenti: il Tanarello e il Negrone. Il primo ha la sua sorgente nei pressi del monte Saccarello (2200 m s.l.m.) al confine con la Francia e scorre per una dozzina di chilometri in direzione Nord-est; mentre il secondo ha origine da Cima Missun (2356 m) poco più a Nord sempre al confine francese e ha un percorso diretto verso Est, fino appunto alla confluenza.

Scorre quindi verso Est, fungendo da confine tra Piemonte e Liguria fino al paese di Ponte di Nava, dove svolta verso Nord addentrandosi nel territorio piemontese. Ha un carattere montano, abbastanza veloce in una valle stretta, e una portata media annuale di circa $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Riceve l'acqua da numerosi torrenti e ruscelli mentre procede verso Nord-Nord-Est, bagnando i comuni di Garessio e

Bagnasco. Giunto a Ceva si immette da destra il Cevetta, la pendenza si riduce e quindi l'alveo perde le caratteristiche montane per divenire più lento e meandriforme.

Procede ora verso Nord-Ovest, nel complesso collinare delle Langhe, a tratti scavandosi la via di uscita tra i piccoli rilievi. Riceve da sinistra i diversi contributi di Corsaglia, Ellero, Pesio e Mondalavia. I prelievi di acqua ai fini irrigui, industriali e idroelettrici sono continui e consistenti, a tratti riducendo la portata, quasi azzerandola. Giunge poi a Cherasco con una portata media di $40 \text{ m}^3/\text{s}$ dove confluisce lo Stura di Demonte: è il suo secondo maggiore tributario e la sua portata raddoppia; da questo punto l'aspetto del fiume cambia ulteriormente: si riduce notevolmente la pendenza entrando nel tratto pianeggiante, muovendosi con meandri ampi e bracci secondari.

Si muove verso Nord-Est, affiancando Alba e poi Asti. In questo tratto riceve il contributo di numerosi ruscelli e fiumi di ridotta portata che drenano il territorio delle langhe e del Monferrato, come Bobore, Valmanera, Versa, Talloria, Cherasca. Devia quindi verso Est in direzione di Alessandria con una portata media annuale di circa $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ricevendo prima il Belbo e infine la Bormida. Quest'ultima è il maggiore innesto di portata, raccogliendo praticamente tutto il contributo appenninico del bacino.

Sempre in direzione Nord-Est percorre gli ultimi chilometri tra Montecastello, Rivarone e infine Bassignana, dove si immette nel fiume Po. In questo punto, l'asta principale del Tanaro (partendo dalle sorgenti del Negrone) è lunga 290 km, superando di gran lunga i 230 km del fiume Po. Anche altri fiumi come Dora Baltea, Pellice, Varaita sono più lunghi del fiume padano, ma queste informazioni non erano note ai geografi e cartografi dell'antichità, e per non modificare tutti i toponimi della valle padana si è mantenuta la nominazione storica.

La portata media annuale alla confluenza con il Po è di $116 \text{ m}^3/\text{s}$, paragonabile a quella dell'Oglio e inferiore solo ad Adda e Ticino. Questi fiumi sono però tutti di origine alpina, quindi con caratteristiche e alimentazione differente.

Ora si descrivono brevemente i principali tributari che sono Belbo, Bormida e Stura di Demonte rappresentati in figura 2, i quali contribuiscono in maniera sostanziale alla portata, alle caratteristiche e al regime del Tanaro stesso.



Figura 2 Fiume Tanaro e principali affluenti

2.1.1 Stura di Demonte

Nasce nei pressi del Colle della Maddalena vicino al confine Italo-Francese nel comune di Argentera. Scorre verso Sud-Est in direzione di Vinadio, passando in una valle stretta dalle caratteristiche alpine (la valle dello Stura divide le Alpi Marittime dalle Cozie). Devia poi verso Nord-Est in direzione di Cuneo, sempre in una valle alpina ma di caratteristiche più dolci. Nei pressi di Borgo San Dalmazzo la valle si apre e quindi lo Stura assume caratteristiche di fiume di pianura: rallenta e si allarga.

Con un andamento meandriforme precede verso Nord-Est per una cinquantina di chilometri, bagnando Cuneo e Fossano prima di immettersi nel Tanaro presso Cherasco. Con una portata media annuale di $35 \text{ m}^3/\text{s}$ costituisce il secondo contributo al Tanaro in termini di portata.

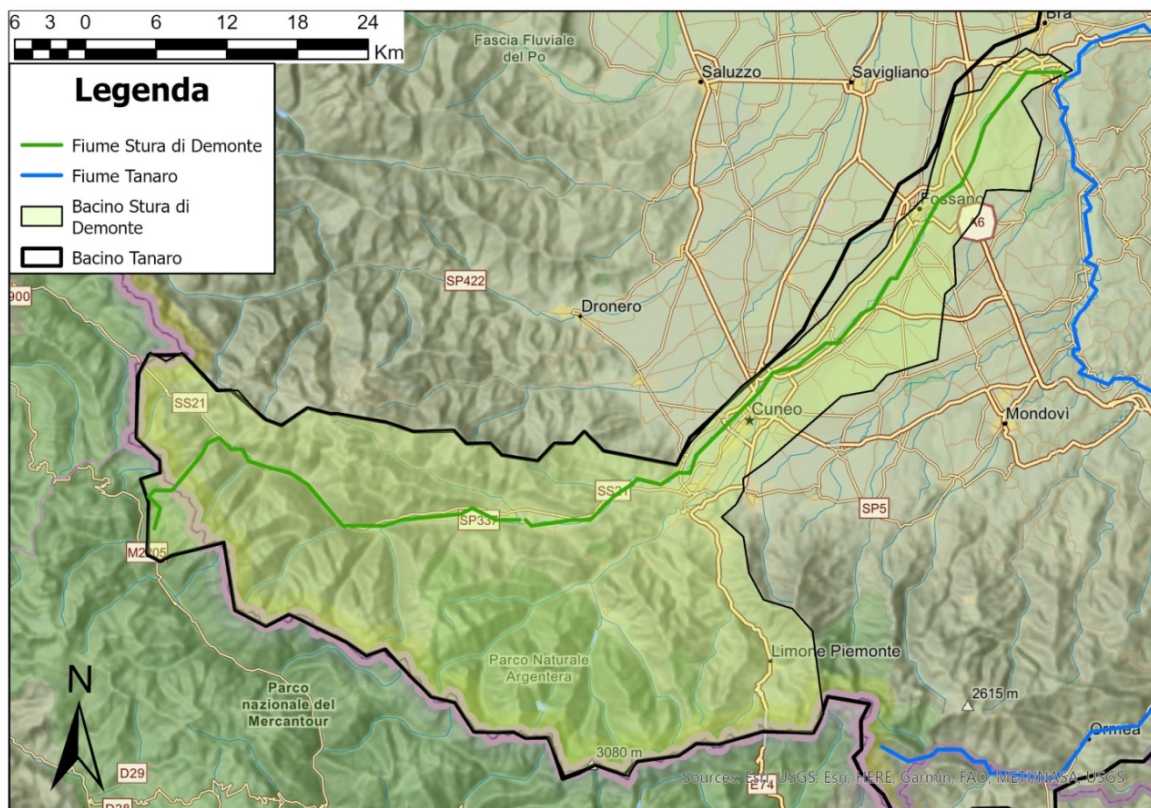


Figura 3 Fiume Stura di Demonte e relativo bacino

Caratteristiche del bacino	
Portata media [m ³ /s]	35.8
Lunghezza asta principale [km]	112
Area del bacino [km ²]	1472
Pendenza media [%]	21.662
Altitudine minima [m s.l.m.]	269
Altitudine massima [m s.l.m.]	3197
CN medio	58.8

Tabella 2 Parametri del bacino dello Stura di Demonte

2.1.2 Bormida

È il principale affluente di destra del Tanaro, confluenza che però avviene a pochi chilometri dall'immissione del fiume nel Po, quindi il suo contributo di portata influenza solo il tratto finale del corso d'acqua principale. Ha un bacino molto esteso che insiste su parte delle Alpi Liguri e

dell'Appennino Ligure, ed è il risultato della confluenza di diversi corsi d'acqua tutti di notevole importanza locale: Bormida di Millesimo, Bormida di Spigno, Erro e Orba.

L'asta principale è la Bormida di Millesimo, che ha origine in Liguria dalla Rocca Barbena, a circa 800 m s.l.m. Da qui scende verso Nord, incontrando lungo la sua stretta valle diversi comuni prima in Liguria (come Millesimo e Cengio) e poi in Piemonte: Saliceto, Cortemilia. Qui la valle si allarga, sono i piedi delle Langhe, e il fiume scorre verso Nord-Est fino a giungere a Bistagno dove riceve da destra le acque del Bormida di Spigno, che aumentano la sua portata media annua da $9 \text{ m}^3/\text{s}$ a circa $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Questo suo importante affluente raccoglie le acque della zona di transizione dalla catena alpina a quella appenninica, e a sua volta ha origine dalla congiunzione di due torrenti abbastanza consistenti: la Bormida di Pallare e la Bormida di Mallare. Entrambi questi corsi d'acqua hanno origine dalla zona del Pian dei Corsi, e confluiscono nei pressi di Cairo Montenotte, e da qui scorre verso Nord in una valle dalle caratteristiche montane fino a Bistagno.

Dopo la convergenza delle due Bormide il fiume prosegue verso Nord-Est bagnando Aquì Terme, Cassine, Sezzadio, aggira Alessandria da Sud Est e poi si immette nel Tanaro. In questo tratto molto più pianeggiante riceve i contributi importanti di Erro ($4,5 \text{ m}^3/\text{s}$) e Orba ($15 \text{ m}^3/\text{s}$), oltre che di numerosi torrentelli minori, aggiungendo infine al Tanaro una portata di circa $44 \text{ m}^3/\text{s}$ annui.

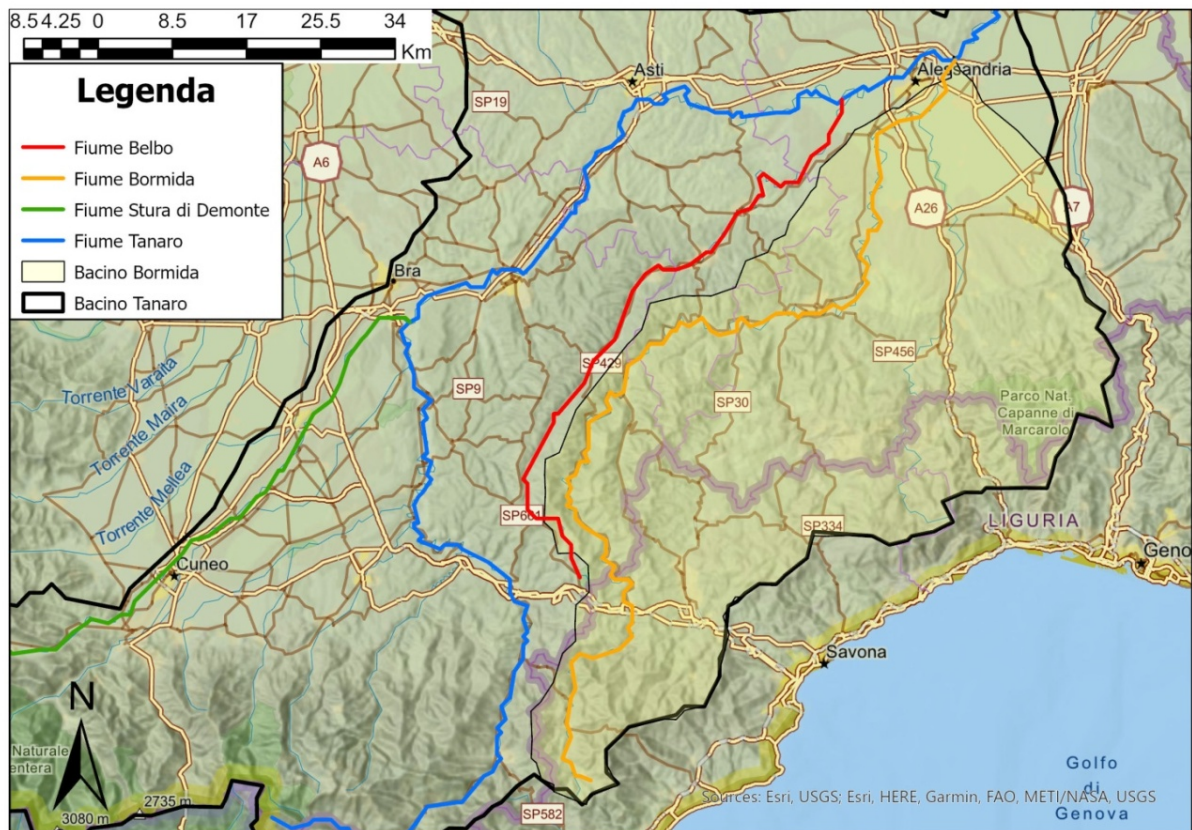


Figura 4 Fiume Bormida e relativo bacino

Caratteristiche del bacino	
Portata media [m ³ /s]	44.2
Lunghezza asta principale [km]	153
Area del bacino [km ²]	2663
Pendenza media [%]	10.009
Altitudine minima [m s.l.m.]	82
Altitudine massima [m s.l.m.]	1381
CN medio	67.6

Tabella 3 Parametri del bacino della Bormida

2.1.3 Belbo

Si sviluppa nella zona compresa tra il Tanaro di medio corso e il bacino della Bormida. La superficie del suo bacino è modesta, in quanto prevalentemente composto dall'unica valle quasi rettilinea del fiume Belbo: non ci sono grandi contributi di torrenti importanti, perché la vicinanza con lo spartiacque li fa deviare verso Tanaro e Bormida.

Nasce sul confine tra Piemonte e Liguria nei pressi di Montezemolo, e si incassa in una valle stretta e profonda diretta verso Nord-Ovest. Piega poi a Nord-Est, attraversando alcuni comuni; giunto a Cravanzana la valle aumenta di pendenza, è quindi il corso si fa più accidentato: sono presenti notevoli calanchi da erosione. Prosegue poi in un tratto più morbido fino a Canelli, che attraversa canalizzato. Infine prosegue nel tratto di pianura che lo separa dal Tanaro con un percorso più meandriforme, lambendo Nizza Monferrato, Castelnuovo Belbo e infine Oviglio. Il suo contributo medio annuo è modesto, di circa 5 m³/s per via della morfologia del bacino, nonostante una lunghezza di quasi 100 km.

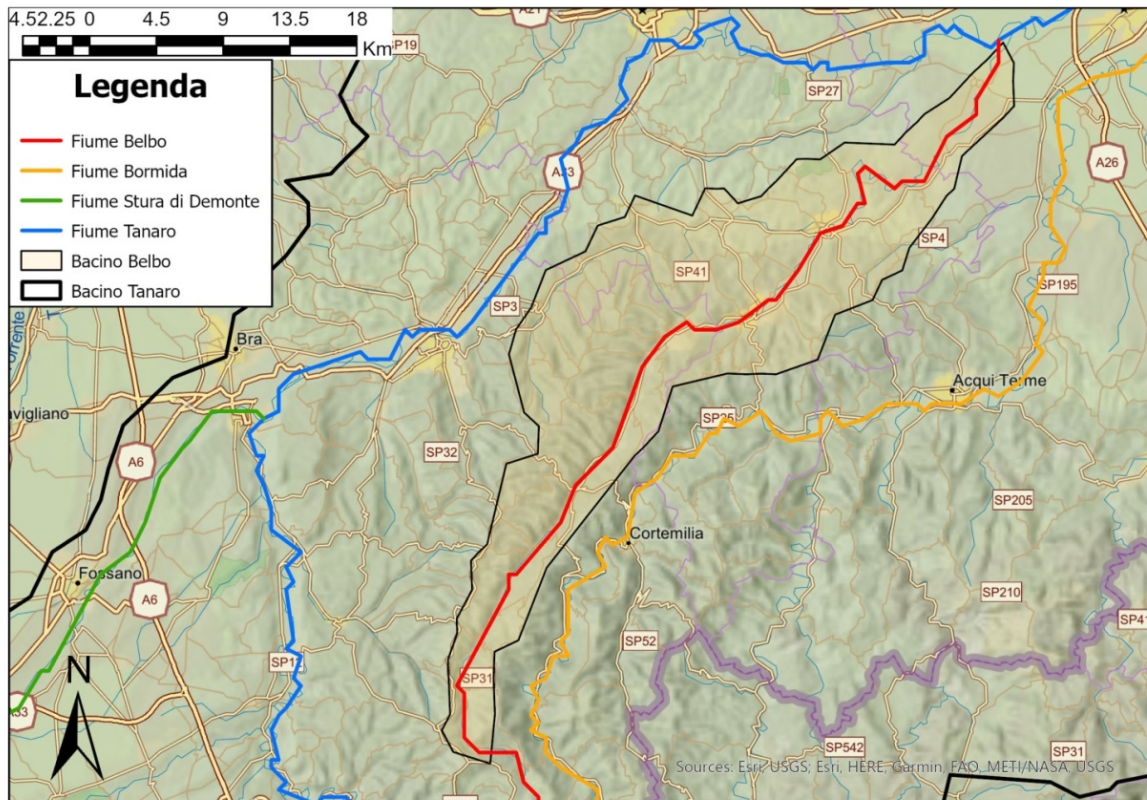


Figura 5 Fiume Belbo e relativo bacino

Caratteristiche del bacino	
Portata media [m ³ /s]	5.1
Lunghezza asta principale [km]	95
Area del bacino [km ²]	469
Pendenza media [%]	9.335
Altitudine minima [m s.l.m.]	116
Altitudine massima [m s.l.m.]	876
CN medio	70.4

Tabella 4 Parametri del bacino del Belbo

2.2 Caratteristiche litologiche

La composizione litologica del suolo risulta essere il principale fattore che determina la permeabilità del terreno, influenzando quindi i processi di infiltrazione superficiale o profonda, saturazione e runoff. Conoscere quindi le caratteristiche del suolo nel bacino di nostro interesse permette di

rendere il modello il più possibile aderente alla realtà, e quindi poter stimare gli eventi di piena in maniera più accurata e realistica. La descrizione può essere fatta solo qualitativamente, a livello macroscopico, in quanto la permeabilità può anche essere influenzata localmente da orientazione, discontinuità, spaccature o sottili strati impermeabili che possono variare di molto anche localmente. La valutazione quantitativa avviene quindi per calibrazione.

Le informazioni generali sono state ricavate dai dati disponibili sui geoportali delle regioni Liguria e Piemonte, che hanno reso disponibili le mappe della litologia superficiale. Si nota come le aree montuose siano costituite da massicci rocciosi, la cui permeabilità molto bassa è caratterizzata dal grado di fratturazione delle rocce; la parte collinare e di pianura invece sono caratterizzate da depositi alluvionali, sabbie, marne e siltiti. La porosità di queste zone è molto variabile, dovuta a composizione, porosità e distribuzione granulometrica. Più nel dettaglio:

- Le Alpi Marittime sono costituite da Gneiss, dolomie e calcari del Mesozoico. Mentre calcari e dolomie possono presentare episodi di erosione e carsismo, che ne aumenta la permeabilità, nel caso dello gneiss tale fenomeno non si sviluppa, mantenendo la permeabilità molto bassa;
- Alpi e Appennini liguri sono formati prevalentemente da rocce metamorfiche e arenarie. Mentre gli scisti e i serpentini sono rocce molto compatte e poco fratturate, le arenarie possono sviluppare più facilmente fratture ed erosione locale. Comunque la permeabilità è bassa o medio-bassa;
- Il Monferrato è costituito principalmente da marne del Miocene, siltiti marnose dell'Oligocene e sabbie medie e fini (note anche come Sabbie di Asti), tutte tipologie di terreno dalla bassa permeabilità. Dove si ha il passaggio del fiume Tanaro sono presenti depositi alluvionali del Quaternario, costituiti da limi, sabbie e ghiaie, la cui porosità localmente varia molto, dipendendo dalla granulometria e dalla disposizione dei depositi;
- La valle dello Stura di Demonte e il territorio delle Langhe sono costituite da depositi alluvionali del Quaternario, le cui porosità dipendono dalla distribuzione granulometrica locale. Generalmente la composizione oscilla tra la ghiaia fine e l'argilla.

Di seguito in *figura 6* la mappa geologica dell'area in esame. Siccome i dati ottenuti dai geoportali delle regioni Piemonte e Liguria sono elaborati in maniera differente, anche la loro rappresentazione risulta non uniforme.

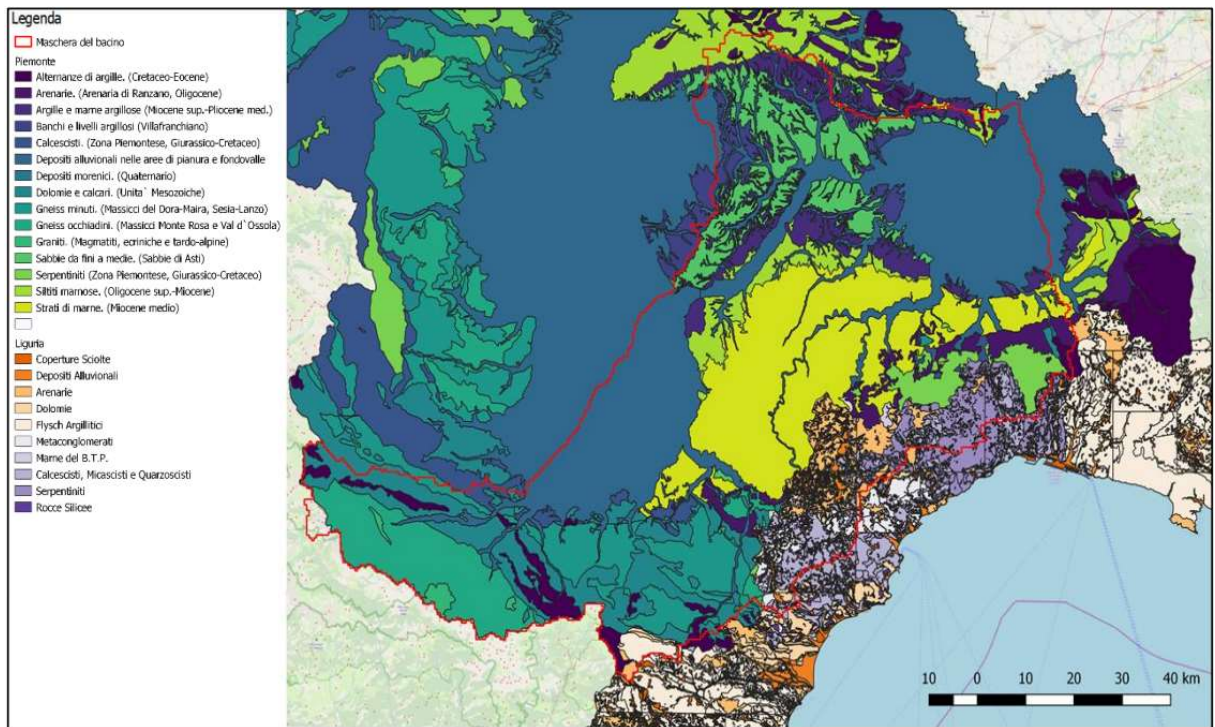


Figura 6 Mappa litologica dell'area di interesse



Figura 7 Legenda della mappa litologica

2.3 Copertura del suolo

Non è sufficiente conoscere la permeabilità di un suolo per poter caratterizzare la sua capacità di trattenere, infiltrare o far defluire l'apporto meteorico: anche ciò che è presente in termini di vegetazione o di costruito influenza il comportamento del terreno. In generale un territorio naturale, specialmente quello ricco di vegetazione, ha un'elevata capacità di ritenzione ed infiltrazione. Al contrario territori fortemente antropizzati sono quasi impermeabili, e trasferiscono la precipitazione quasi totalmente alla rete idrica di raccolta, che a sua volta scarica i propri collettori negli alvei fluviali.

In generale il bacino del Tanaro è relativamente poco urbanizzato. Soprattutto nel tratto montano i centri urbani sono di modeste dimensioni, anche per via della conformazione del paesaggio montano. L'ambiente naturale è quindi molto esteso, con anche la presenza di parchi naturali quali il Parco Naturale dell'Alta Valle Pesio e Tanaro, il Parco Naturale dell'Argentera e la Riserva Naturale delle Sorgenti del Belbo. Più ci si muove verso la pianura e più la vegetazione boschiva viene sostituita dalle coltivazioni antropiche. Aumentano anche di dimensione e quantità le aree urbane. Tuttavia anche le maggiori di esse sono di dimensioni contenute e distanziate tra loro, niente a che vedere rispetto alle aree di Torino o della Brianza. Le maggiori sono Alessandria, Asti, Alba, Bra, Fossano, Cuneo, che raccolgono complessivamente 600 mila abitanti (di cui 400 mila solo ad Alessandria), e non sono neppure presenti grandi complessi industriali o produttivi.

In *figura 8* la mappa dell'uso del suolo ricavato dal piano di tutela delle acque della regione Piemonte (Regione Piemonte 2007).

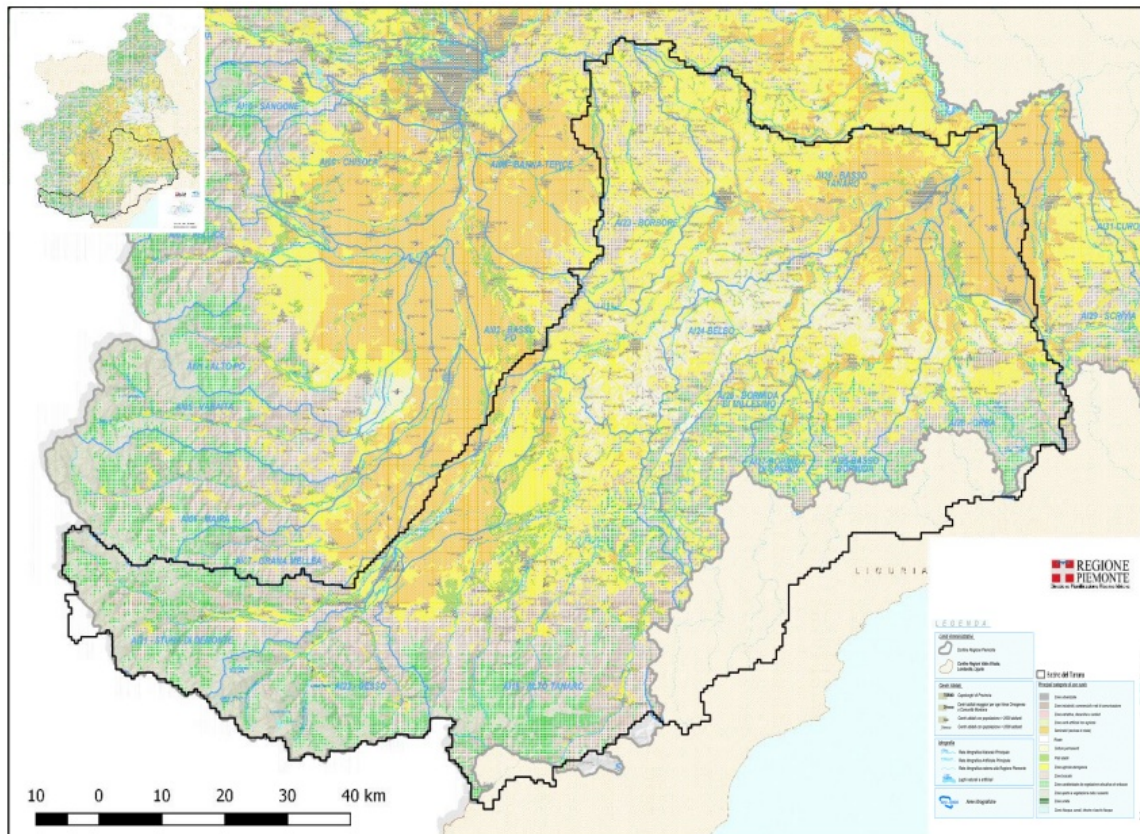


Figura 8 Utilizzo del suolo

2.4 Caratteristiche climatiche

Il clima della regione è fortemente influenzato dall'orografia dell'area del bacino e delle zone circostanti, caratterizzando i comportamenti di temperature e precipitazioni.

La Pianura Padana è delimitata sui tre lati Nord, Ovest e Sud dalle catene montuose alpina e appenninica. Ciò influenza molto il comportamento dell'atmosfera a bassa quota, e di conseguenza i maggiori fenomeni atmosferici. In particolare poi il fiume Tanaro si sviluppa nella parte Sud dell'estremità occidentale della Pianura del Po, caratterizzandosi così di alcuni microclimi locali caratteristici. In particolare, è punto di incontro delle masse d'aria continentali provenienti da Est, dalla Pianura Padana, l'aria umida proveniente dal Mediterraneo a Sud scavalcando le Alpi Liguri e le correnti Nord-Atlantiche da Nord-Ovest che però incontrano l'arco alpino e ne vengono modificate o arrestate. La variazione di latitudine invece è influente, in quanto il bacino ha un'estensione latitudinale modesta, di 2° e 20'.

2.4.1 Precipitazioni

In questa area della nostra Penisola le precipitazioni hanno un andamento prevalentemente bimodale, con due picchi in primavera e autunno e due minimi in estate e in inverno. In base alla

posizione temporale del massimo di precipitazione principale, secondario e del minimo principale, all'interno di questa regione si possono distinguere quattro differenti regimi di precipitazione: uno mediterraneo avente il minimo principale in estate, e tre di tipo continentale caratterizzati dal minimo principale in inverno. Nel dettaglio, si ha:

- ◆ Regime prealpino, del tipo continentale presenta il minimo principale nella stagione invernale, il massimo principale in primavera e il massimo secondario in autunno. Si tratta del regime prevalente in Piemonte, caratterizza il 58% della superficie;
- ◆ Regime subalpino, del tipo continentale con il minimo principale nella stagione invernale, ha il massimo assoluto in autunno e il massimo secondario in primavera. È registrato su circa il 13% della regione piemontese, soprattutto nell'area settentrionale;
- ◆ Regime subcontinentale, del tipo continentale dal minimo principale in inverno e il massimo principale in autunno, presenta il massimo secondario nel periodo estivo. Solo il 5% del Piemonte presenta questo regime pluviometrico;
- ◆ Regime sublitoraneo, dalle caratteristiche mediterranee presenta il minimo principale in estate, il massimo assoluto in autunno e il massimo secondario in primavera. Circa il 25% della regione registra questo tipo di comportamento;

Il bacino in esame risulta quindi caratterizzato da un regime pluviometrico prevalentemente prealpino nelle aree del basso cuneese e del Monferrato, e sublitoraneo nelle Langhe, parte del Monferrato, nella pianura alessandrina e in parte delle Alpi Marittime.

Le precipitazioni non sono distribuite uniformemente su tutta la superficie della regione: soprattutto a causa dell'orografia locale si hanno diverse zone a volumi medi di precipitazione molto differenti. In particolare si osservano precipitazioni maggiori dove si ha il massimo sollevamento di aria umida, implicando maggiori precipitazioni sulle aree di quote intermedie rispetto a quote elevate o basse. Più nel dettaglio:

- ◆ Aree collinari e montane del Nord, corrispondenti alle provincie di Biella e del VCO con i laghi D'Orta e Maggiore: superano i 1500 mm annui, costituendo l'area di maggiore apporto;
- ◆ L'area di confine a Sud-Est, ai confini con Liguria, Emilia Romagna e Lombardia: qui le isoiete seguono con buona approssimazione le isoipse, e le precipitazioni spaziano dal minimo delle zone a ridosso della pianura con 700 mm all'anno ai massimi di oltre 1500 mm nelle aree montuose;
- ◆ Area delle Alpi Marittime sud-occidentale, presenta una terza zona ad elevata piovosità che spazia dai 900 mm/anno della pianura cuneese e delle Langhe agli oltre 1200 mm annui delle zone montuose più elevate;

- ◆ Regione delle Alpi Cozie e Graie, che presentano una precipitazione media tra gli 800 e i 1200 mm all'anno. I valori si riducono man mano che si inoltra nell'arco alpino, procedendo da valle verso monte;
- ◆ Infine la zona meno piovosa, nell'area di pianura tra Alessandria, il basso cuneese, Torino e Vercelli, con medie annuali anche minori di 700 mm.

Aprile risulta comunque il mese più piovoso della regione, mentre dicembre quello con una precipitazione minore. In *tabella 5* un riassunto delle precipitazioni medie mensili divise per fasce di quota. (ARPA Piemonte s.d.)

	Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
inferiori a 500 m	920,8	51,8	66,5	100	108,1	81,3	52,9	73,4	84,6	106,3	92,6	57,3	46
tra 500 m e 1500 m	1094,2	56,1	75,4	118,8	133,4	99,9	65,2	85,6	103	130,3	107,9	65,7	52,9
tra 1500 m e 2500 m	959,4	51,9	65,5	99,4	114,5	89,7	61,1	76,1	87,6	111	90,6	61,3	50,7
superiori a 2500 m	925,3	50,5	62	93,4	112,8	91	64,4	77,9	82,9	101,6	81,9	57,9	48,9

Tabella 5 Precipitazioni medie mensili sulla regione Piemonte

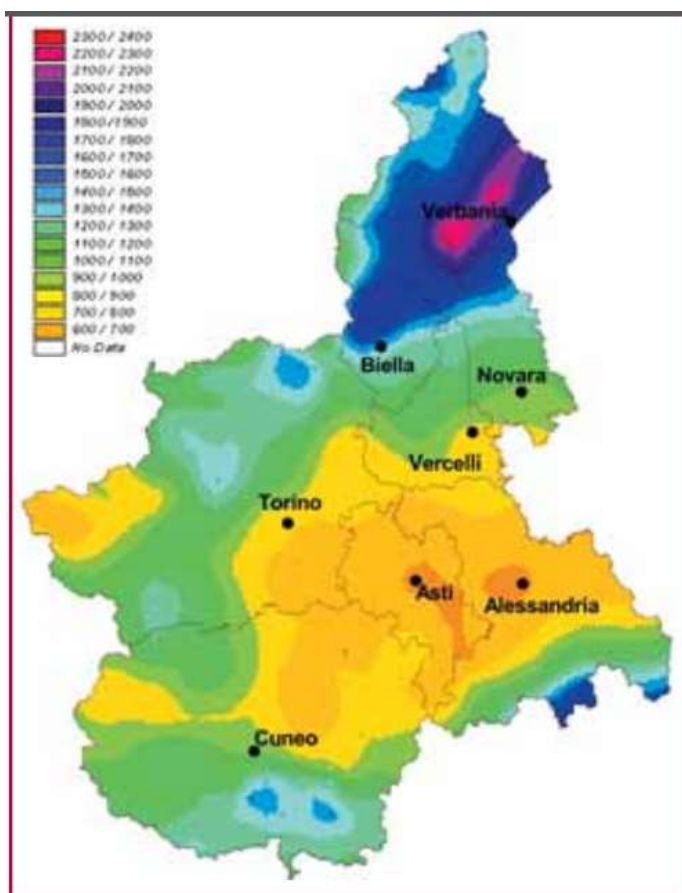


Figura 9 Distribuzione pluviometrica media nel periodo 1971-2000

2.4.2 Temperatura

Le temperature presentano in linea generale una forte escursione stagionale e un andamento decrescente all'aumentare dell'altitudine. L'escursione termica è dovuta principalmente dalla distanza dal mare, che comporta quindi un regime prevalentemente di tipo continentale. A partire dalla media mensile, i valori dipendono dalla posizione e dalla quota: si hanno valori maggiori nella parte della pianura, dove le medie massime di 24°C sono nelle grandi città di Alessandria, Asti, Torino o Novara nei mesi di giugno e luglio, mentre per lo stesso periodo sopra ai 2300 m s.l.m. le medie sono intorno agli 8°C. Allo stesso tempo le minime sono più alte tra i 300 e i 700 metri di quota, mentre a quote inferiori o superiori le temperature scendono di più: se nelle zone di pianura la media in gennaio rimane comunque di 2-3°C, nelle zone montuose scende di alcune unità sotto lo 0°. L'escursione termica giornaliera è maggiore nelle zone a bassa quota rispetto alle quote più elevate, con le medie delle massime e delle minime distanti 12°C sotto i 500 m s.l.m. contro i solo 6°C sopra ai 2000 m. Anche d'inverno le oscillazioni maggiori sono nelle zone a bassa quota, anche se le differenze sono meno marcate.

		Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
inferiori a 500 m	Max	16,9	5,7	8,2	13	16,7	21,4	25,6	28,5	27,5	23,1	17,1	10,5	6,4
	Min	8,2	-0,8	0,5	3,8	7,2	11,8	15,4	17,7	17,2	13,6	9	3,9	0,1
tra 500 m e 1500 m	Max	12,6	3,6	5	8,2	11,4	15,9	20	22,9	22,1	17,9	13	7,4	4,1
	Min	5,2	-2,5	-1,8	0,7	3,7	8	11,4	13,8	13,6	10,2	6,2	1,4	-1,8
tra 1500 m e 2500 m	Max	6,5	-0,9	-0,1	2	4,5	8,9	12,7	15,5	14,9	11,4	7,4	2,5	-0,2
	Min	0,8	-6,2	-6,1	-4,3	-1,8	2,8	6,4	9,1	9	6	2,5	-2,3	-5,2
superiori a 2500 m	Max	0,3	-5,3	-5,5	-4,4	-2,8	1,4	4,8	7,6	7,4	4,9	2,1	-2,2	-4,4
	Min	-3,9	-9,8	-	-9,1	-7,3	-2,8	0,8	3,6	3,6	1,2	-1,8	-6,3	-8,8

10,1

Tabella 6 Temperature massime e minime medie mensili della regione Piemonte

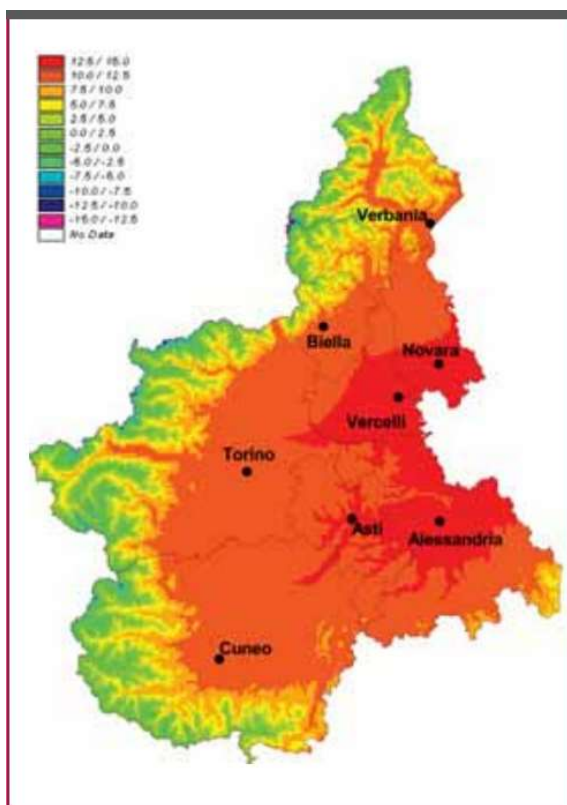


Figura 10 Temperatura media annuale nel periodo 1971-2000

I dati e le analisi dei regimi di precipitazioni e temperature sono forniti dal sito di ARPA Piemonte in collaborazione con il politecnico di Torino (ARPA Piemonte s.d.).

2.5 Regime idrologico

Il regime idrologico del fiume Tanaro è abbastanza complesso: essendo il bacino distribuito sia su aree alpine, sia appenniniche sia di pianura, le caratteristiche risultanti sono una via di mezzo tra i diversi comportamenti. Si osservano i dati di tre stazioni per differenziare il comportamento nell'area montana, intermedia e poi nell'area di pianura del corso d'acqua, e si analizzano inoltre i regimi degli affluenti principali, che determinano in larga misura le caratteristiche del fiume analizzato. I dati sono ottenuti sempre dal geoportale di ARPA Piemonte, che delle sezioni analizzate fornisce raccolte dati dal 1995.

2.5.1 Tanaro

Per valutare il tratto montano del Tanaro si è analizzata la sezione di Garessio. Le caratteristiche sono tipiche dei bacini pedemontani: piene nei mesi primaverili e in tardo autunno, mentre modesti deflussi in inverno e quasi assente nei mesi estivi. Ciò denota quote relativamente basse e una

mancanza di precipitazione nevosa, il suo accumulo invernale e quindi il successivo apporto da fusione nivale in estate.

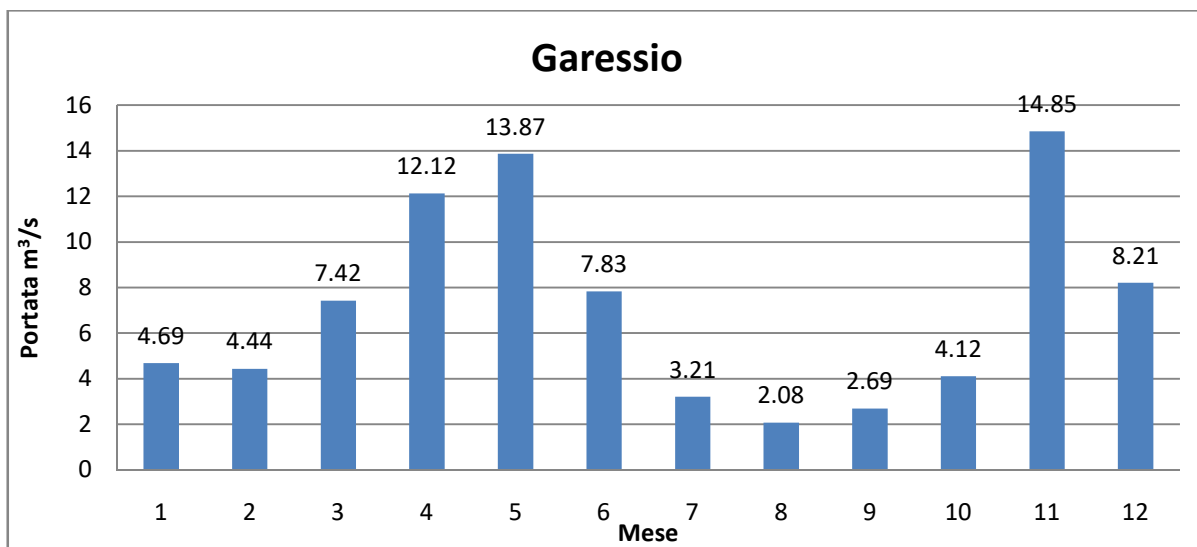


Figura 11 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Garessio

Procedendo verso valle si è poi considerata la sezione di Farigliano, posta a valle delle confluenze di Corsaglia, Ellero e Pesio: questi affluenti sono di minore entità rispetto al Tanaro ma di caratteristiche idrologiche molto simili. Le caratteristiche sono simili al tratto precedente, ma si denotano i picchi di massima primaverile e autunnale meno marcati rispetto al tratto di monte, dovuti ai diversi e nuovi contributi, oltre che un maggiore sfruttamento delle acque primaverili.

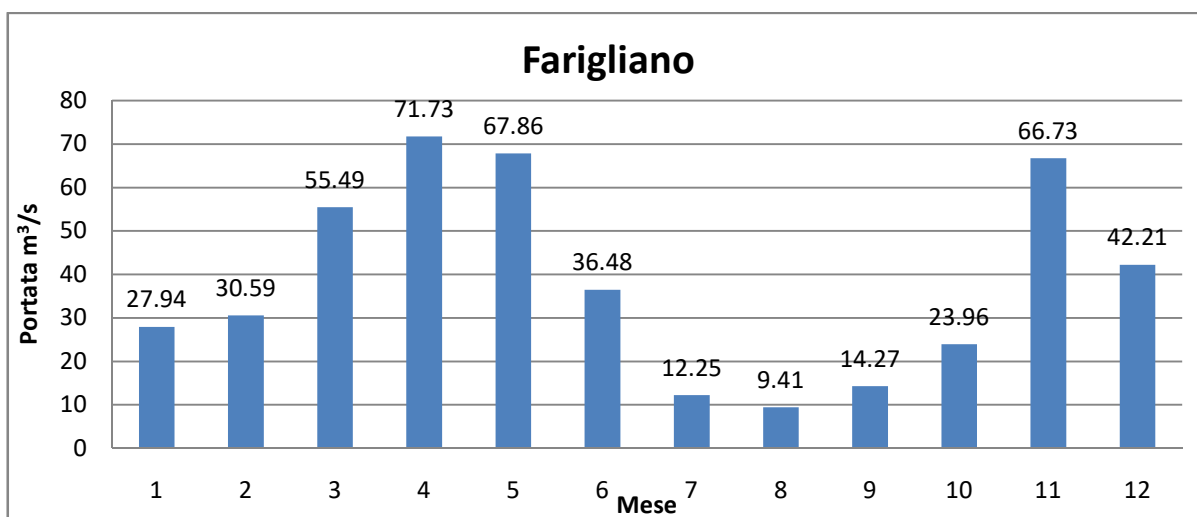


Figura 12 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Farigliano

Infine per il tratto di valle si è presa la sezione di Montecastello, corrispondente al punto di raccolta dati più vicino alla confluenza con il Po disponibile. Sebbene le caratteristiche siano conformi ai tratti più a monte, si nota come i picchi primaverili e autunnali siano in proporzione meno marcati, a testimonianza del differente contributo dei vari affluenti (si immettono Stura di Demonte, Bormida e Belbo) e un maggiore sfruttamento delle acque primaverili per fini irrigui.

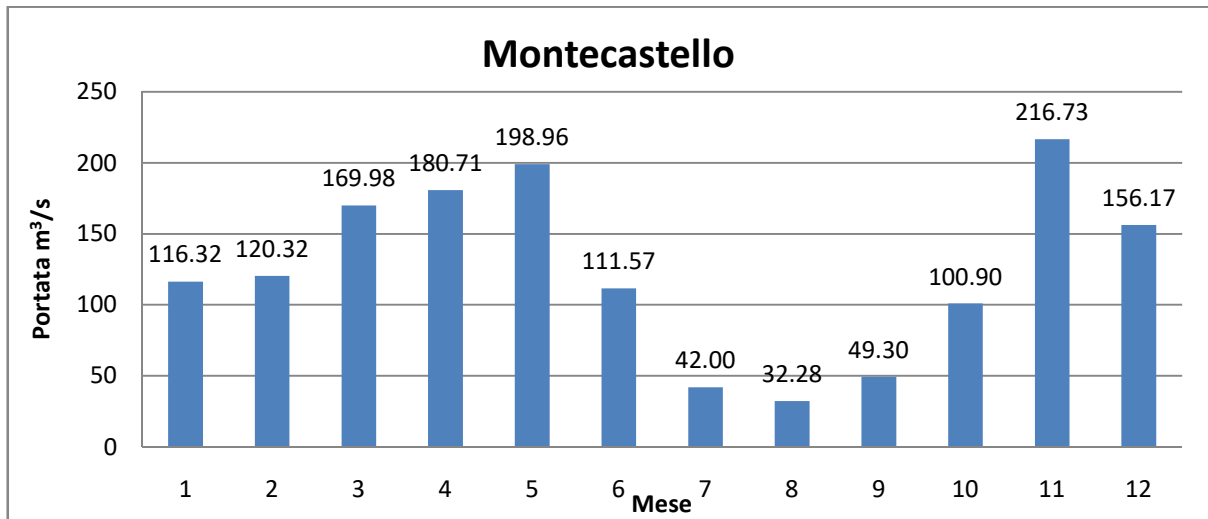


Figura 13 Portate medie mensili del fiume Tanaro alla stazione di misura di Montecastello

2.5.2 Stura di Demonte

Il bacino dello Stura di Demonte è differente da quelli analizzati precedentemente: posto in buona parte nelle Alpi Marittime e protetto dalla loro orografia, risente meno delle precipitazioni primaverili e autunnali. D'altra parte avendo una discreta superficie oltre i 2000 metri di quota presenta un picco di portata primaverile tipico dei bacini alpini, dovuto alla fusione della neve accumulata nei mesi invernali. Infatti il deflusso invernale è decisamente modesto se paragonato ai bacini precedenti, e ciò è dovuto principalmente al fatto che in questo particolare periodo la precipitazione è sotto forma di neve, e quindi non si trasforma istantaneamente in deflusso. Anche il picco autunnale è meno marcato rispetto ai regimi analizzati precedentemente. La sezione osservata è quella di Fossano.

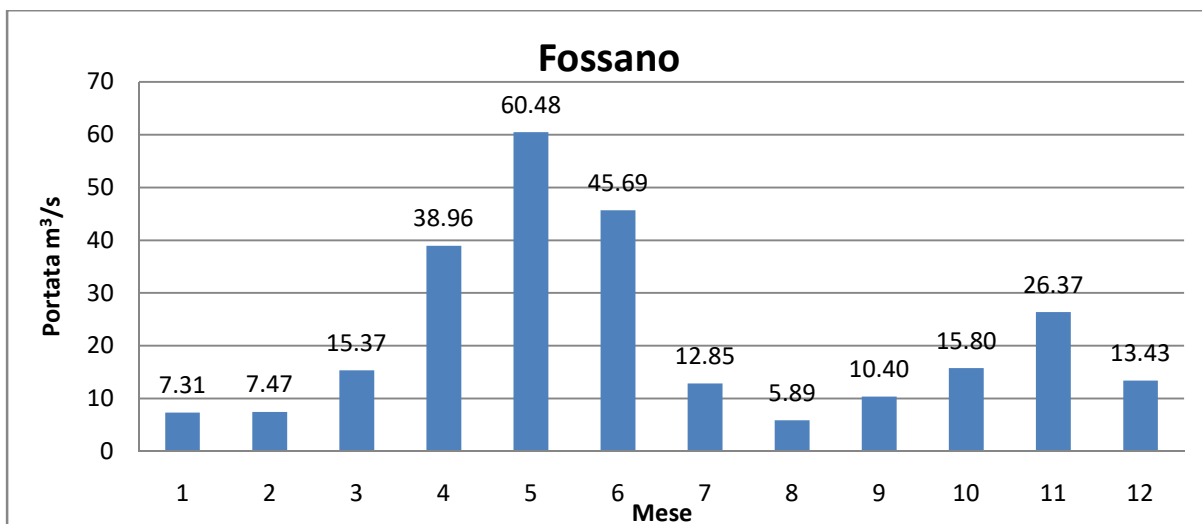


Figura 14 Portate medie mensili del fiume Stura di Demonte alla stazione di misura di Fossano

2.5.3 Bormida

La Bormida presenta caratteristiche tipiche dei bacini appenninici: situato a bassa quota, presenta i due picchi primaverile ed invernale, e il periodo di magra estivo. In inverno le precipitazioni sono principalmente liquide quindi si trasformano direttamente in deflusso e non si accumulano nei nevai. Anche per questo si nota come il picco primaverile sia spostato verso Marzo, dovuto direttamente alle precipitazioni, al contrario di quello dello Stura di Demonte che è a Maggio, dovuto allo scioglimento della neve. La sezione di Cassine, analizzata per questo corso d'acqua, è posta a monte della giunzione con l'Orba, circa 25 km a monte dell'immissione in Tanaro.

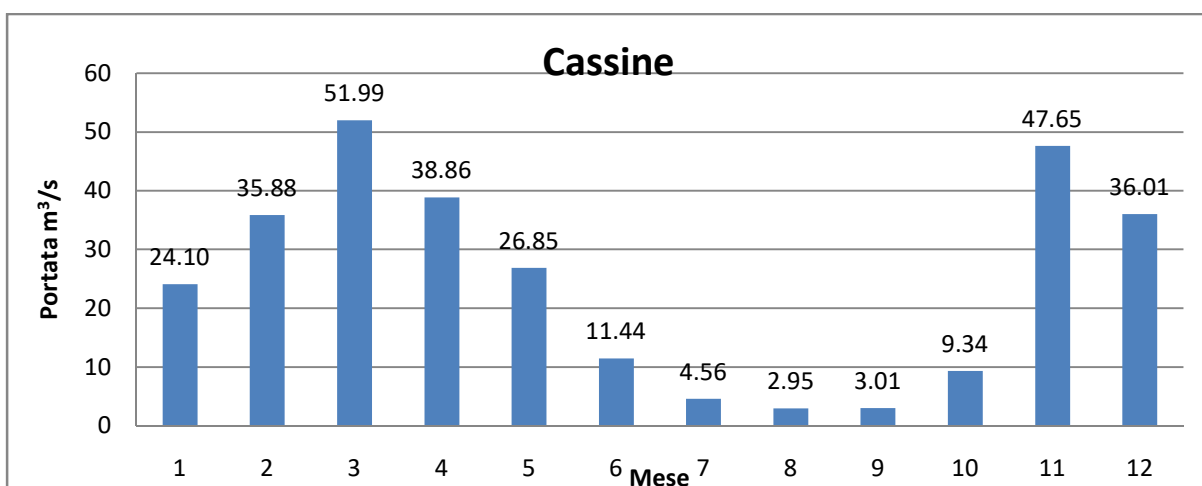


Figura 15 Portate medie mensili del fiume Bormida alla stazione di misura di Cassine

2.5.4 Belbo

Dalle portate estremamente modeste, il Belbo presenta le caratteristiche tipiche dei bacini appenninici: scarsa o nulla influenza della neve, massimi in primavera ed autunno, magra in inverno e quasi assenza d'estate a causa delle scarse precipitazioni.

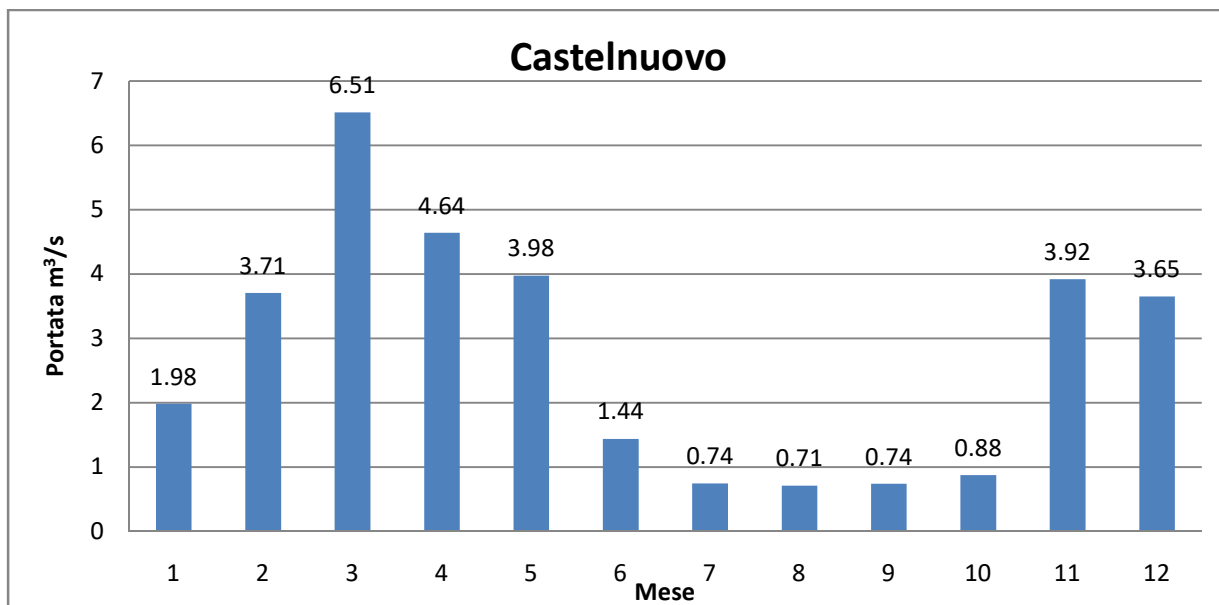


Figura 16 Portate medie mensili del fiume Belbo alla stazione di misura di Castelnuovo

2.6 Sfruttamento delle acque

Il deflusso delle acque superficiali è fortemente influenzato da tutte quelle alterazioni antropiche che limitano, deviano o modificano il processo naturale. Questi interventi possono avere diversi obiettivi: idroelettrici, industriali, irrigui, navigazione o anche idropotabili. La deviazione e/o l'eventuale immagazzinamento di volumi d'acqua può avvenire in alvei e bacini sia naturali che artificiali: falde acquifere, canali di irrigazione, vasche di laminazione, dighe, argini, le possibilità sono molteplici e spesso anche coesistenti. Inoltre la quantità di risorsa idrica interessata dipende dalla posizione, dal periodo dell'anno, dalle condizioni meteorologiche istantanee e stagionali. Ai fini della modellazione del comportamento idraulico del bacino analizzato sarebbe necessario conoscere il dimensionamento e la regolazione di tutte le opere idrauliche presenti sui corpi idrici appartenenti al bacino. Questa conoscenza è disponibile solo in parte: non tutte le concessioni di sfruttamento della risorsa idrica sono pubbliche. Inoltre anche quando lo fossero non è garantito che tali valori vengano rispettati.

Di seguito una descrizione dei tipi di prelievi idrici possibili con la casistica presente sul territorio in esame. Le informazioni sono ricavate dal Piano di Tutela delle Acque della regione Piemonte (R.

Piemonte 2007) e dal catasto sbarramenti del Sistema Informativo Sistema Piemonte (SISP Sistema Informativo Sistema Piemonte s.d.).

In *figura 17* gli sbarramenti presenti sul bacino del fiume Tanaro di qualsiasi funzione.

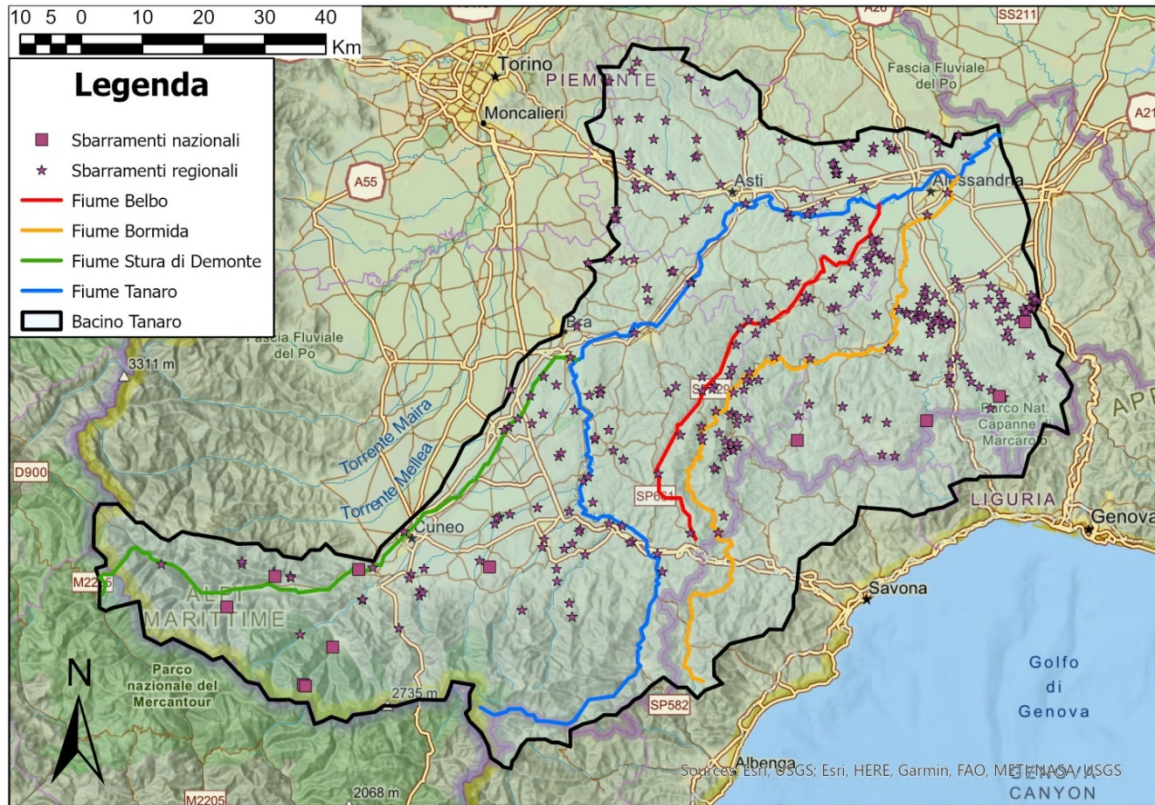


Figura 17 Sbarramenti di gestione nazionale e regionale presenti sul bacino del Tanaro

2.6.1 Prelievi industriali

I prelievi idrici a fini industriali assolvono diverse funzioni all'interno dei processi produttivi e di gestione. Generazione idroelettrica interna ai siti, processi di lavorazione, smaltimento scarti, raffreddamento o altro. Tale prelievo in parte viene restituito al corpo idrico da cui viene prelevato e in parte può risultare perduto, a seconda dell'utilizzo che ne viene fatto. Secondo il Piano di Tutela delle Acque della regione Piemonte, tali prelievi sono continui tutto l'anno per 10 ore al giorno, su 260 giorni lavorativi l'anno.

Sul bacino del Tanaro sono autorizzati prelievi per 5 Mm^3 annui.

2.6.2 Prelievi irrigui

I prelievi irrigui sono costanti e continui per i 180 giorni lavorativi tra aprile e settembre. Sono quelli che inducono il maggiore sbilancio idrico, anche se l'impatto è solo locale. I canali derivatori con cui

viene prelevata l'acqua dal corpo idrico di alimentazione scaricano poi l'acqua in altri corsi d'acqua prossimi all'origine, il volume tuttavia viene ridotto in quanto distribuito sulle coltivazioni.

Nel bacino in considerazione, sono autorizzati prelievi totali per circa 1135 Mm³, soprattutto distribuiti nei sottobacini dello Stura di Demonte, alto e basso Tanaro. In tali zone l'impatto del prelievo è relativamente ridotto, mentre in bacini di piccole dimensioni come Bormida, Gesso e Belbo i modesti prelievi corrispondono ad una cospicua porzione della portata totale.

2.6.3 Prelievi idropotabili

Le portate sottratte ai fini idropotabili sono esigue, tuttavia continue e costanti tutto l'anno. I prelievi nel bacino del Tanaro per questo scopo sono trascurabili ai fini del lavoro svolto: le portate sottratte al bacino alimentano porzioni isolate dalla rete idrica che necessitano di un quantitativo di acqua limitato.

2.6.4 Impianti idroelettrici

Gli impianti idroelettrici sono quelli più influenti per l'analisi sul bacino effettuata in questo lavoro di tesi, e l'effetto dipende soprattutto dal tipo di impianto che caratterizza la centrale idroelettrica: ad acqua fluente o ad invaso.

Per gli impianti ad acqua fluente l'impatto è relativamente minimo, in quanto la portata viene prelevata solo se disponibile e restituita più a valle dopo averne sfruttato il salto piezometrico. L'impatto è soprattutto locale, in quanto in alcuni tratti del corso d'acqua interessato il prelievo può arrivare alla totalità del deflusso, ma poi viene ripristinata la condizione iniziale con la restituzione. Gli impianti ad invaso invece sono quelli più influenti e che saranno presi in esame maggiormente. L'invaso naturale o artificiale viene regolato dall'uomo in base alle necessità di corrente elettrica, e maggiore è la dimensione del bacino e maggiore è l'effetto che può avere. L'impatto non è in termini di volume d'acqua, che non viene consumata o trasferita, ma viene alterato il regime idrologico del corso d'acqua, che non è più naturale. La portata a valle dell'invaso non rispecchierà più direttamente le precipitazioni avvenute sul bacino, ma dipenderà dalle esigenze antropiche. Generalmente si avranno portate minori di quelle naturali di notte, nei fine settimana e nei periodi piovosi sfruttati per accumulare volumi d'acqua da rilasciare durante il giorno per alimentare i fabbisogni industriali.

Si avranno quindi gli effetti di "hydropeaking", ovvero repentine variazioni di portata dovuti alle esigenze elettriche a livello giornaliero o settimanale, ed effetti di laminazione delle piene qualora il bacino non fosse attrezzato a lasciar transitare le piene dovute agli eventi meteorici.

Sul bacino analizzato sono autorizzati i prelievi di circa 9500 Mm³ annui, soprattutto nelle aree di Stura di Demonte, Gesso e Alto Tanaro. Tali volumi non sono sottratti al deflusso, ma solo incanalati e turbinati.

Si procede quindi ad elencare in tabella 7 i maggiori bacini riportati nel PTA che potrebbero influenzare la propagazione del deflusso superficiale.

Principali bacini sul bacino del Tanaro

Denominazione	Tipo	Bacino	Comune	Corpo idrico	Volume (Mm ³)	Uso	Ente gestore
Diga Lavagnina inferiore	A	Bormida	Gorzente	Gorzente	2.58	Idroelettrico	Acquedotto De Ferrari Galliera S.P.A
Diga di Valla	A	Bormida	Spigno Monferrat o	Valla	2.60	Idroelettrico	Interpower S.P.A.
Diga di Bruno	NA	Orba	Bosio	Gorzente	2.99	n.d.	n.d.
Diga di Badana	NA	Bormida	Bosio	n.d.	4.69	Consumo umano - idroelettrico	Acquedotto De Ferrari Galliera S.P.A
Diga Lungo dell'Orba	NA	Orba	Bosio	Rio Lischeo	4.70	n.d.	n.d.
Diga della Piastra	A	Gesso	Entracque	Gesso di Entracque	12.00	Idroelettrico	ENEL produzione S.P.A.
Diga del Chiotas	A	Gesso	Entracque	Bucera	30.00	Idroelettrico	ENEL produzione S.P.A.
Bacino del Rio Freddo	A	Stura di Demonte	Vinadio	Rio Freddo	0.32	Idroelettrico	Greenpower
Diga di Roccasparvera	A	Stura di Demonte	Roccasparvera	Stura di Demonte	1.10	Idroelettrico	Greenpower
Diga della Rovina	NR	Gesso	Entracque	Bucera	1.20	Idroelettrico	ENEL produzione S.P.A.
Diga di Pianfei	A	Pesio	Pianfei	Pesio	0.54	Irriguo	Cons. irriguo Bearlotta Mussi

A=Artificiale, NA=Naturale Artificializzato, NR=Naturale Regolato

Tabella 7 Principali invasi regolati appartenenti al bacino del fiume Tanaro

3 Dati disponibili

In questo capitolo si descrivono i dati necessari da fornire al modello FEST-WB per poter effettuare le simulazioni richieste. Il programma richiede in input le quote altimetriche per poter ricostruire il reticolo idrografico, uso del suolo e copertura della vegetazione per stimare l'infiltrazione, permeabilità superficiale e profonda del terreno, oltre allo spessore del suolo, per modellare il deflusso sub-superficiale e profondo, le forzanti meteorologiche come precipitazione e temperatura e infine le misurazioni di portata per calibrare il modello.

3.1 Dati meteorologici

I dati meteorologici consistono nei valori di precipitazione e temperatura nei pressi della superficie del terreno. Sono raccolte puntualmente da una serie di stazioni strumentate automatiche appartenenti alla rete di monitoraggio di ARPA Piemonte, che le ha distribuite sul territorio con una densità di circa una ogni 100 km². In particolare i dati di temperatura inseriti in input sono stati raccolti da 84 stazioni situate all'interno del bacino, che forniscono 3 valori di temperatura (istantanea, media e massima) ogni mezz'ora. Per quanto riguarda la precipitazione invece, sono 98 i pluviometri e i pluviografi di cui sono state utilizzate le misurazioni, fornite ogni 10 minuti. Queste serie di dati sono disponibili per il periodo necessario utilizzato per la calibrazione del modello, che va dal 01/01/2012 al 01/01/2015.

3.2 Dati di portata

I dati di portata, forniti da ARPA Piemonte, sono costituiti da una serie di misurazioni idrometriche in ciascuna delle 32 sezioni calibrate distribuite lungo il corso del Tanaro e dei suoi principali affluenti. In ciascuna sezione viene registrato automaticamente il livello idrico del corso d'acqua in questione ogni 30 minuti. Tale livello viene poi convertito in una portata tramite una scala delle portate specifica per la sezione in esame. I dati sono disponibili per il periodo analizzato, dal 01/01/2012 al 01/01/2015.

Di tutte le sezioni a disposizione verranno considerate solo quelle appartenenti al bacino e dai dati affidabili: questa selezione sarà esposta nel capitolo inerente alla calibrazione.

In *figura 18* la posizione delle diverse stazioni idrometriche sul bacino del Tanaro. Si rimanda al capitolo 5.1 per la loro descrizione e utilizzo per questo lavoro.

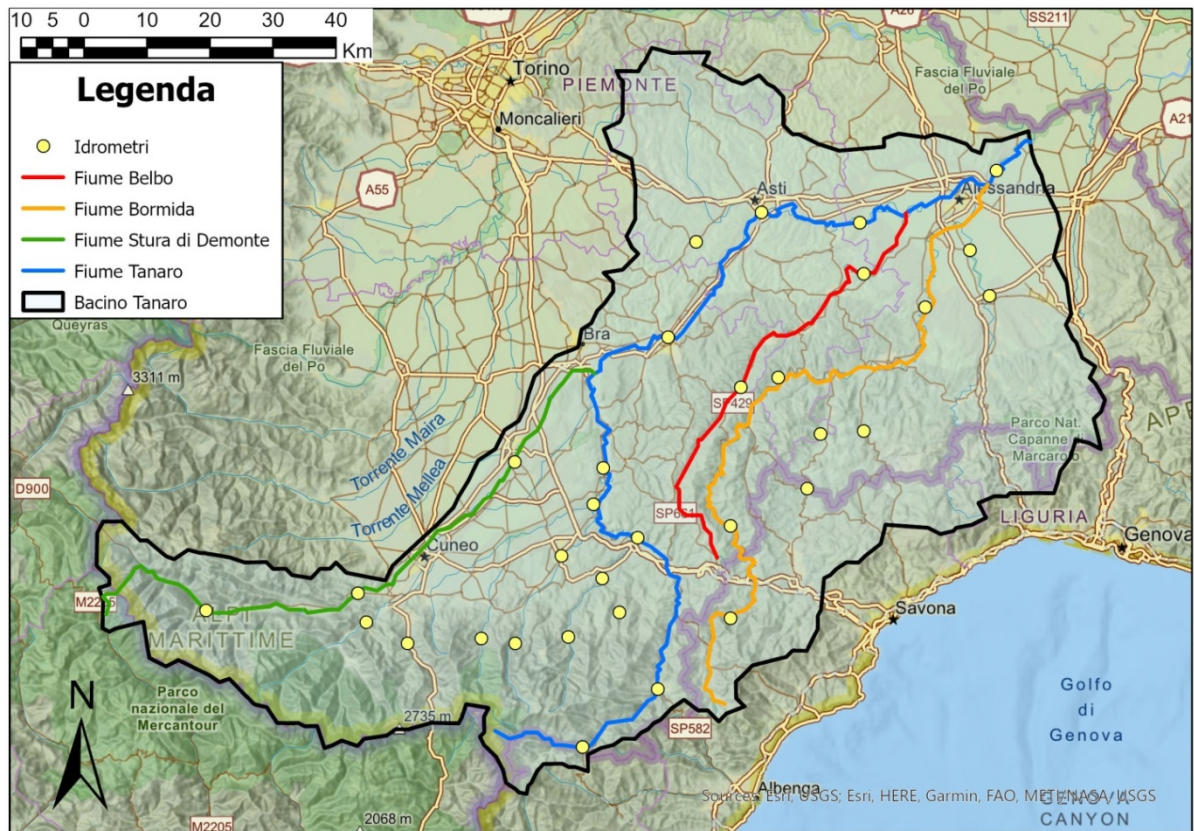


Figura 18 Bacino del Tanaro e stazioni idrometriche di misura della portata

3.3 Mappe dei parametri

Il FEST è un modello idrologico distribuito fisicamente basato e richiede in ingresso, oltre che i valori delle precipitazioni, anche i parametri delle equazioni di bilancio di massa dei diversi processi che avvengono sul bacino e che sono modellizzati dal programma.

Fondamentale per la gestione e la visualizzazione di dati e parametri sono i Sistemi Informativi Geografici (GIS): tali software permettono di visualizzare, analizzare, interrogare ed editare i dati georeferenziati a disposizione. Nel caso svolto, si sono utilizzate delle mappe raster: il territorio del bacino in esame viene suddiviso da una griglia regolare in tante celle quadrate della medesima dimensione. I dati dei parametri disponibili saranno schematizzati e distribuiti sul territorio assegnando il valore alla casella corrispondente della porzione di terreno che rappresenta.

Il modello FEST successivamente, per ciascuna delle celle che compongono il bacino in esame, utilizzerà i parametri inseriti per risolvere le equazioni inserite. Tali equazioni saranno esposte nel capitolo successivo. Ora si procederà a esporre brevemente i principali parametri a disposizione e le loro mappe.

3.3.1 DEM

Acronimo di Digital Elevation Model, consiste nel modello digitale delle quote del terreno. Ciascuna cella della mappa raster contiene quindi la corrispondente quota del terreno nella realtà: data la discretizzazione spaziale del territorio, non è possibile avere il valore continuo della quota in ogni punto, ma solo un valore costante per ciascuna cella. Tale valore è ottenuto dai GIS, che interpolano insiemi di punti noti quotati.

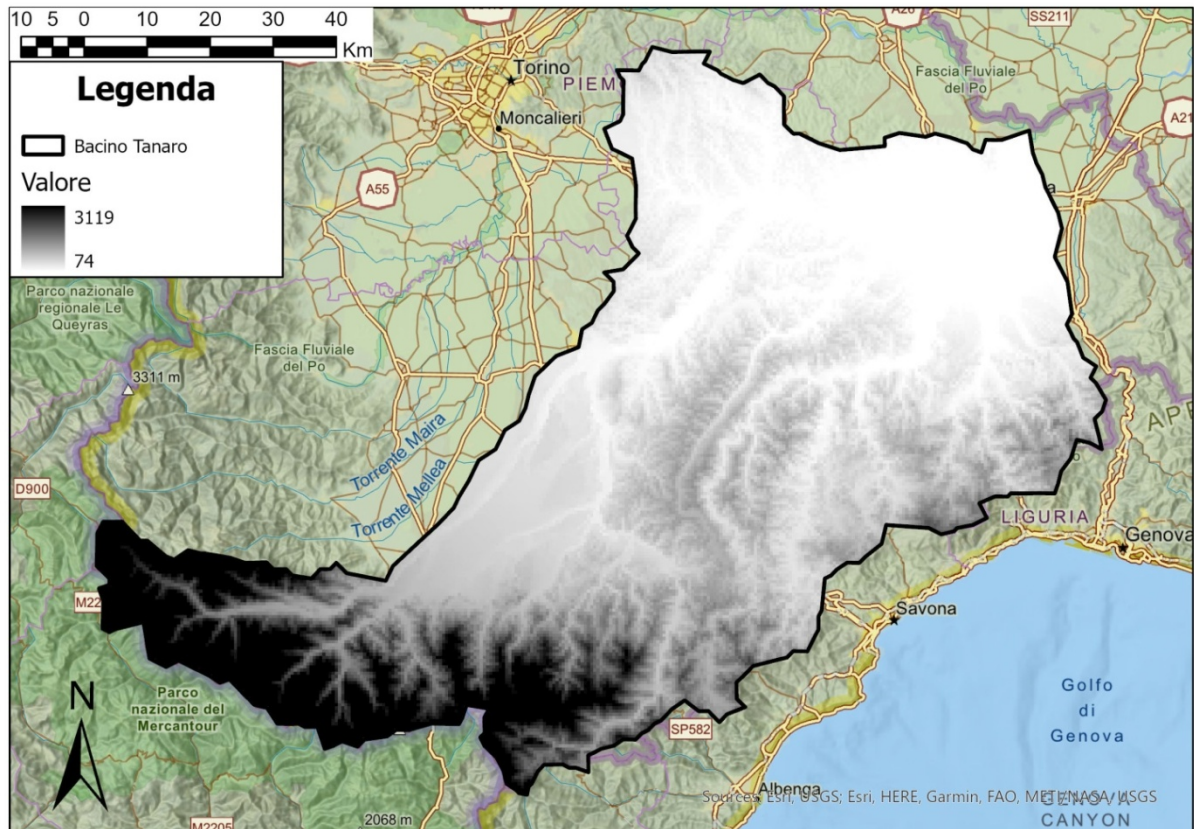


Figura 19 DEM del bacino del Tanaro

Da tale matrice delle quote è possibile ricavare i parametri geomorfologici necessari al modello per il calcolo del deflusso superficiale tramite diversi algoritmi comuni in ambiente GIS. In particolare si ottengono la mappa delle aree contribuenti, ovvero tutte quelle celle poste idraulicamente a monte di una cella selezionata, e che quindi contribuiscono al deflusso della cella considerata; la mappa della direzione dei deflussi, la pendenza e la direzionalità del versante, l'albedo.

In *figura 20* la mappa raster delle aree contribuenti. Il valore è dato in numero di celle, con i valori più elevati rappresentati dai colori più scuri.

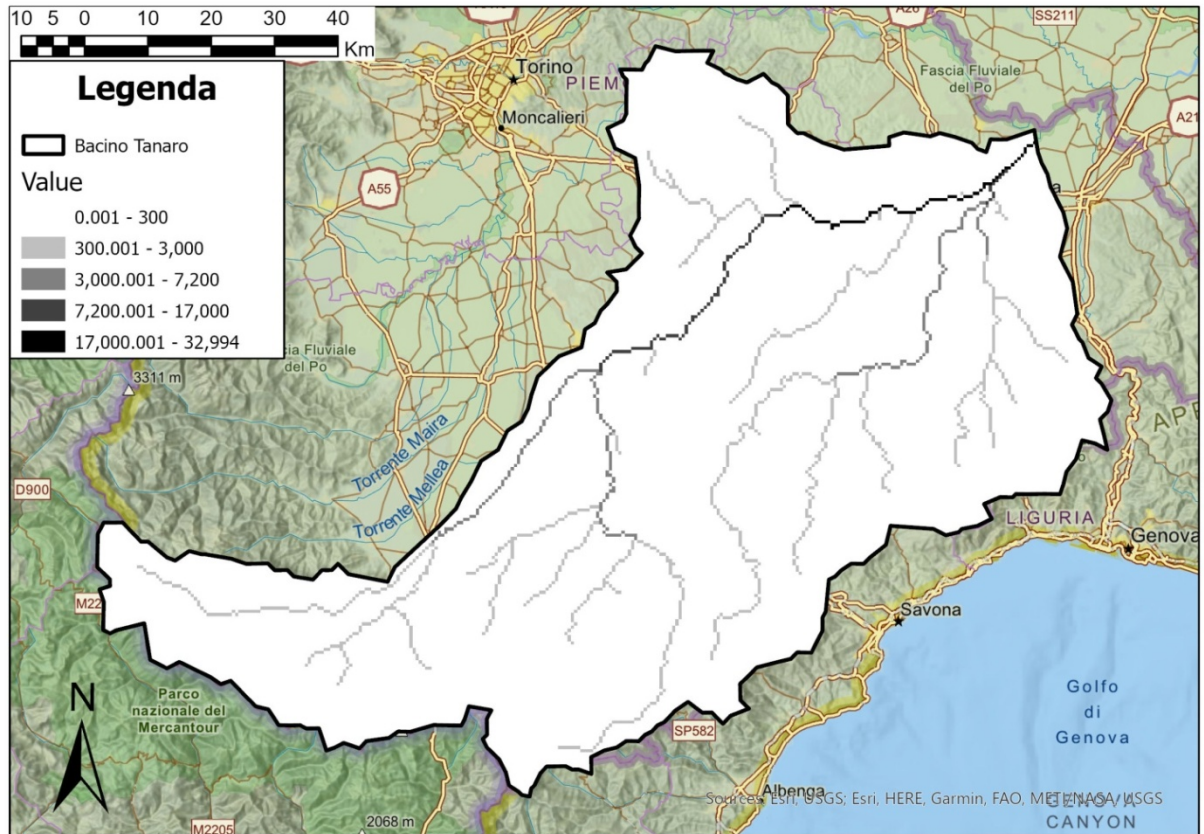


Figura 20 Raster di "accumulation", il numero di celle contribuenti alla portata di ciascun punto

3.3.2 Altri parametri

Ulteriori informazioni sono necessarie per svolgere le operazioni di bilancio di massa. Tali dati sono inseriti tramite ulteriori mappe raster, ciascuna con i valori di uno specifico parametro.

- Curve Number (CN);
- Profondità del suolo (Z);
- Copertura vegetale del suolo (f_v);
- Conduttività idraulica di suolo superficiale saturo (k_{sat}) e suolo profondo (k_{prof});
- Bubbling Pressure, o livello della frangia capillare (b_{press});
- Indice di contenuto idrico volumetrico, residuo e a saturazione (θ_R e θ_S);
- Indice di Brooks & Corey (bc), per la distribuzione della dimensione dei pori;
- Wilting point (w_p);
- Capacità di campo (f_c);

Non tutti questi parametri sono necessari: il loro utilizzo dipende dai differenti modelli utilizzati per valutare infiltrazione, evapotraspirazione e bilancio di massa.

Di seguito, alcuni esempi:

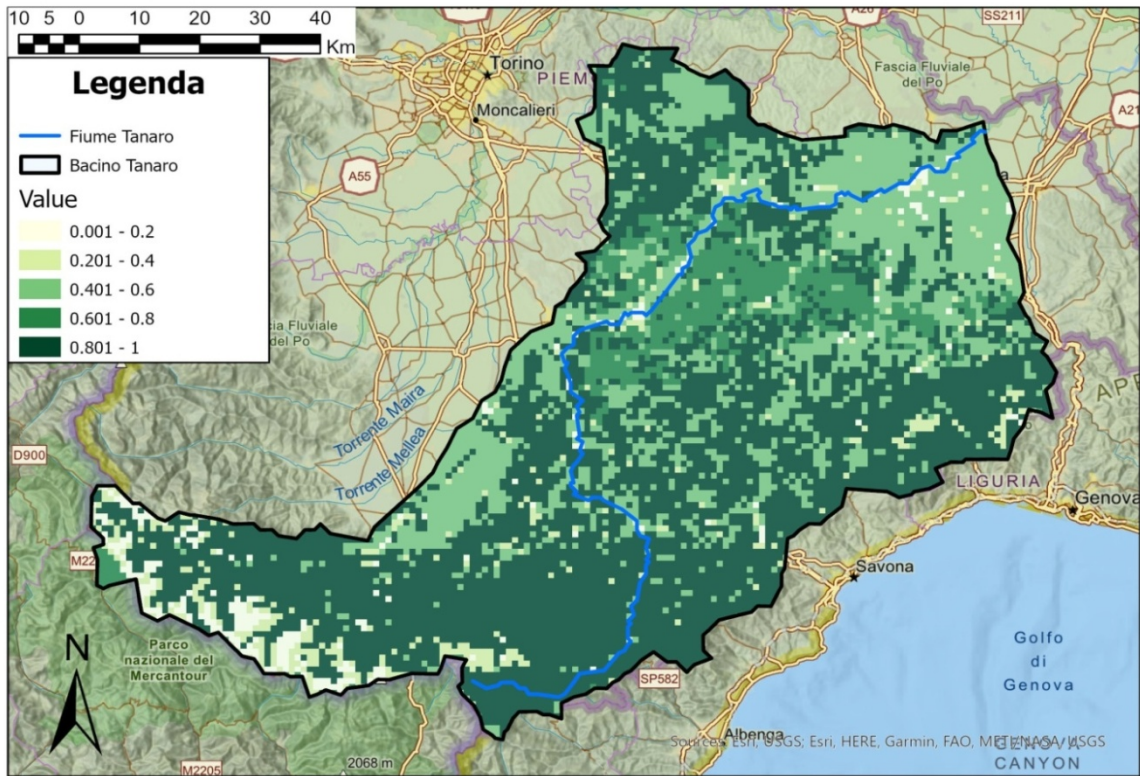


Figura 21 Mappa dell'indice di frazione vegetale f_v

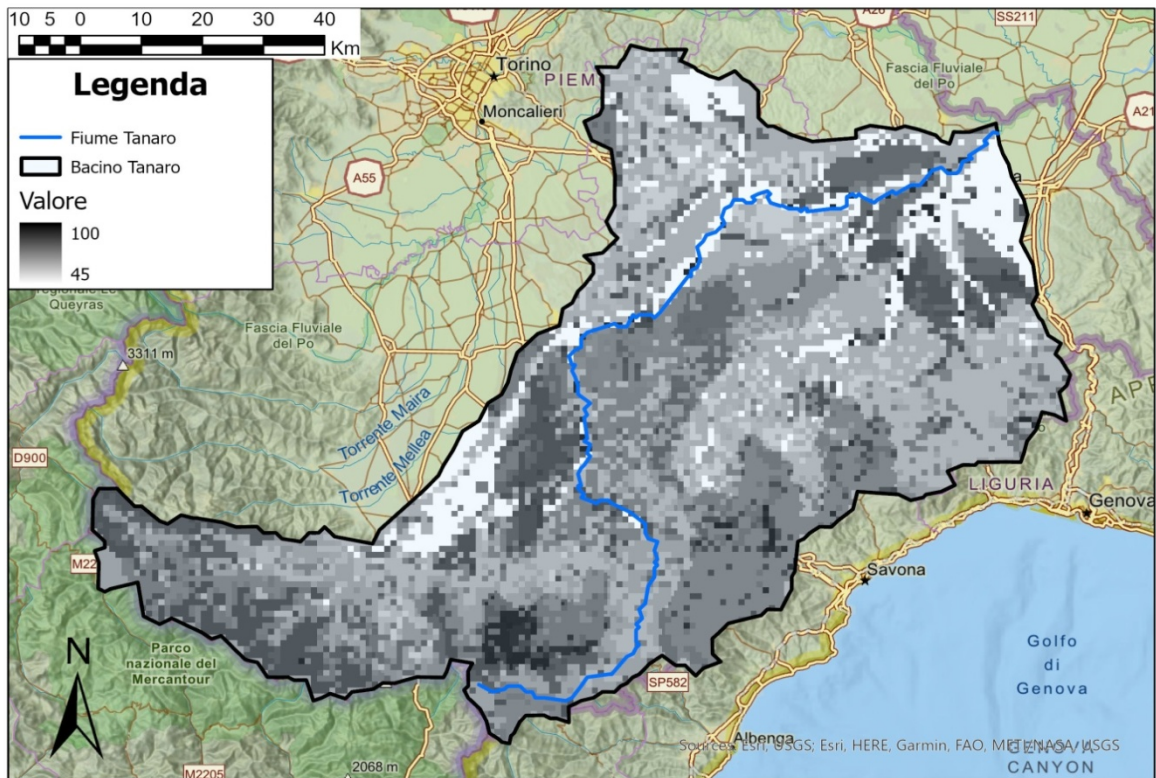


Figura 22 Mappa del CN sul bacino del Tanaro

4 Modello idrologico

4.1 FEST

Il modello idrologico utilizzato per questo lavoro è di tipo FEST-WB (Flash flood, Event based, Spatially distributed, rainfall-runoff Transformation, including Water Balance): si tratta di un modello idrologico dinamico sviluppato presso il Politecnico di Milano basato sulla soluzione dell'equazione di bilancio di massa attraverso la modellazione dei meccanismi di evapotraspirazione, infiltrazione, deflusso superficiale, deflusso profondo e dinamica della neve (Montaldo, Ravazzani e Mancini 2007).

Il modello FEST-WB rientra nella classificazione dei modelli fisicamente basati a parametri distribuiti, perché ricorre alla risoluzione del bilancio della massa e di conseguenza i parametri da calibrare sono delle grandezze fisiche (*fisicamente basato*) e *a parametri distribuiti* in quanto il funzionamento del bacino è riprodotto nelle varie componenti elementari in cui è discretizzato, ovvero le celle elementari che compongono la griglia raster (Ravazzani, Rabuffetti, et al. 2008) (Rabuffetti, et al. 2009).

Queste caratteristiche del modello permettono di calcolare le variabili idrologiche con un'elevata risoluzione spaziale. Per contro il costo computazionale è molto elevato: il numero di parametri da stimare è pari al numero di parametri che descrivono la singola cella, moltiplicato per il numero delle celle. Questo fattore rappresenta la principale limitazione operativa del modello.

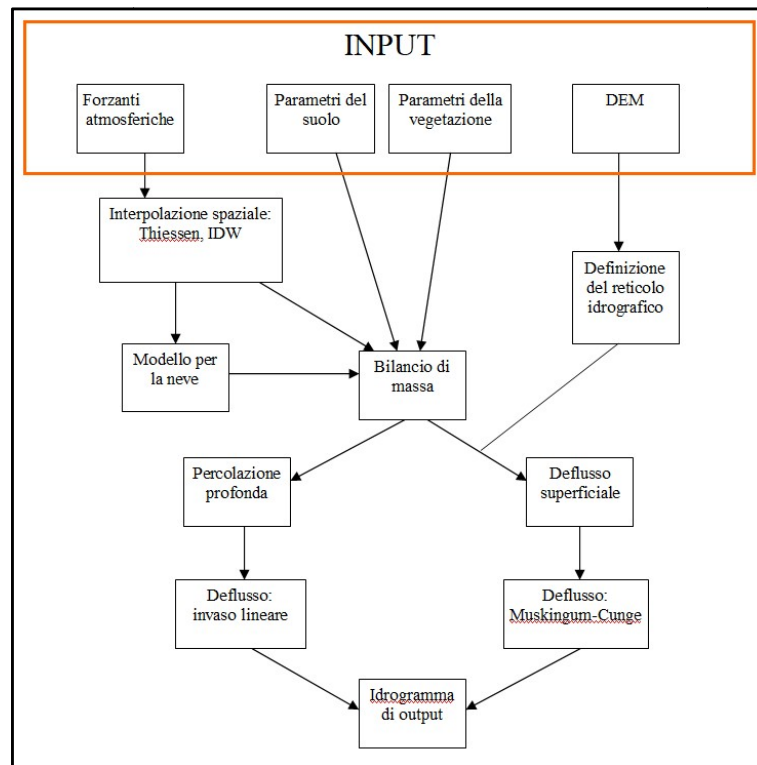


Figura 23 Schema di funzionamento del modello FEST

4.2 Input

Il modello FEST-WB richiede in input una grande quantità di dati: forzanti atmosferiche, uso e tipologia di suolo, copertura vegetale, proprietà idrauliche e altimetriche del terreno per ciascuna cella del raster costituente il bacino (Corbari, Ravazzani e Mancini 2007) (Ravazzani, Rabuffetti, et al. 2008).

I dati meteorologici quali precipitazione, temperatura dell'aria, vento, umidità relativa sono raccolti puntualmente dal sistema di monitoraggio della regione Piemonte. Questi valori puntuali sono poi interpolati su tutto il territorio con metodi di interpolazione geografica, come il metodo dei poligoni di Thiessen o il metodo IDW, Inverse Distance Weighted, ovvero media pesata con l'inverso della distanza. Per quanto riguarda la temperatura, oltre che l'interpolazione spaziale orizzontale viene anche effettuata un'extrapolazione nelle quote, applicando un gradiente verticale della temperatura di $-0.0063^{\circ}\text{C}/\text{m}$, trascurando l'effetto dell'inversione termica.

Dal DEM si ricavano, oltre che le informazioni riguardo alle quote, la direzione del deflusso, le pendenze dei versanti e l'albedo, potendo quindi ricostruire il reticolo idrografico del bacino.

Infine sono necessarie le mappe raster di tutti i parametri già elencati nel paragrafo **3.3.2 Altri parametri**, al fine di avere questi dati disponibili per ogni cella: curve Number (CN); profondità del suolo (Z); copertura vegetale del suolo (f_v); conduttività idraulica di suolo superficiale saturo (k_{sat}) e

suolo profondo (k_{prof}); Bubbling Pressure, o livello della frangia capillare (b_{press}); indice di contenuto idrico volumetrico, residuo e a saturazione (θ_r e θ_s); indice di Brooks & Corey (bc), per la distribuzione della dimensione dei pori; Wilting point (w_p); capacità di campo (f_c).

Non tutti questi parametri sono determinabili con elevata precisione e risoluzione spaziale, e questa incertezza rappresenta un secondo limite al modello FEST-WB. La correzione di alcuni di questi parametri sarà l'obiettivo della calibrazione svolta in questo lavoro.

4.3 Bilancio di massa

Il modello FEST-WB è basato sulla risoluzione dell'equazione del bilancio di massa per un singolo layer fissato (Corbari, Ravazzani e Mancini 2007). Per ogni cella di posizione (i, j) non coperta dalla neve, ad ogni istante temporale t si aggiorna il dato di umidità del terreno θ :

$$\theta_{t+1,i,j} = \theta_{t,i,j} + \frac{I_{t,i,j} - D_{t,i,j} - ET_{t,i,j}}{Z_{i,j}}$$

dove:

- $I_{t,i,j}$ [m/s] rappresenta l'infiltrazione;
- $D_{t,i,j}$ [m/s] è l'acqua persa per drenaggio o percolazione;
- $ET_{t,i,j}$ [m/s] rappresenta l'evapotraspirazione;
- $Z_{t,i,j}$ [m] è lo spessore del layer della cella in questione;

L'umidità del suolo nelle celle ricoperte dalla neve è invece assunta costante nel tempo. (Corbari, Ravazzani e Martinelli, et al. 2009)

Il termine di infiltrazione $I_{t,i,j}$ è valutato dalla seguente formula:

$$I_{t,i,j} = P_{t,i,j} - R_{t,i,j} + D_{unn\ t,i,j}$$

- $P_{t,i,j}$ [m/s] consiste nella precipitazione lorda (comprensiva di pioggia, neve e fusione nivoglaciale);
- $R_{t,i,j}$ [m/s] è invece la pioggia netta, cioè l'acqua persa per ruscellamento;
- $D_{unn\ t,i,j}$ [m/s] infine il ruscellamento Dunniano.

La percolazione $D_{t,i,j}$ [m/s] è ricavata in funzione della permeabilità verticale del terreno saturo k_{sat} [m/s], dell'umidità del suolo $\theta_{t,i,j}$ [-], dell'umidità residua θ_{res} [-], dell'umidità a saturazione θ_{sat} [-] e della curva di ritenzione idrica descritta dall'indice di distribuzione B [-] dei pori di Brooks & Corey:

$$D_{t,i,j} = k_{sat} \left(\frac{\theta_{t,i,j} - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{\frac{2+3B}{B}}$$

Questa formulazione è utilizzata sia per la parte montana che per la parte di pianura del bacino, sebbene i meccanismi nelle due aree siano differenti: nella zona montana, lungo i versanti delle valli, la profondità del terreno è limitata. L'acqua che percola raggiunge subito il sottosuolo impermeabile, forma uno strato saturo e dà origine ad un deflusso profondo. Nella zona pianeggiante invece l'acqua che percola continua a scendere in profondità finché non incontra la falda, fungendo quindi da termine di ricarica per essa. In entrambi i casi però la percolazione dipende dagli stessi fattori, quindi la relazione scritta è la stessa in tutto il bacino.

4.4 Processi fisici

Nel bilancio della massa compaiono termini di portate che non sono dei dati noti come ad esempio la precipitazione o la temperatura (anche se ottenuti per interpolazione): molti elementi dipendono da fenomeni fisici noti per quanto riguarda il processo fisico che avviene, ma meno per quanto riguarda la corretta traduzione matematica nelle diverse condizioni. Per ciascuno di tali processi quindi è necessario scrivere uno o più modelli per poter inserire analiticamente l'effetto di ciascun fenomeno sul bilancio della massa nello specifico punto di analisi. Questi processi schematizzati in *figura 24* sono in particolare dinamica della neve, infiltrazione, evapotraspirazione, deflusso superficiale e deflusso profondo.



Figura 24 Schema del ciclo idrologico

4.4.1 Dinamica della neve

Nei bacini alpini, o in generale montani in base a quota e latitudine, il regime di portata non è condizionato direttamente solo dalle precipitazioni e dalle caratteristiche del suolo, ma anche da eventuale accumulo e fusione di neve e ghiaccio. In alcune condizioni tali fenomeni traslano nel tempo la trasformazione delle precipitazioni in deflussi superficiali. In inverno infatti le precipitazioni sono principalmente sotto forma di neve, che si accumula sul terreno; nella successiva stagione di fusione poi la neve diviene un importante contributo alla portata dei fiumi che compongono i bacini alimentati da nevai e ghiacciai (Corbari, Ravazzani e Mancini 2007).

Siccome il bacino del fiume Tanaro è per l'80% della superficie in ambito montano, rappresentare correttamente la dinamica della neve risulta fondamentale per stimare correttamente le portate nei corsi d'acqua.

In generale la neve accumulata inizia a fondere a partire dagli strati superficiali, dove gli scambi energetici sono più intensi direttamente a contatto con l'atmosfera e l'irraggiamento solare. Inizialmente la neve è in grado di immagazzinare acqua all'interno della sua porosità fino ad un valore soglia, chiamato *capacità di ritenzione* (Bras 1989), che solitamente è pari a circa il 6% dello

SWE.

Successivamente l'acqua scorre verso il basso percolando all'interno del manto nevoso, apportando calore agli strati sottostanti e favorendo anche la loro fusione. La percolazione dipende dalle caratteristiche del manto nevoso: porosità, densità, interconnessione dei pori. Inoltre la propagazione dell'acqua verso il basso non è uniformemente distribuita sulla superficie del nevaio, ma si formano con il tempo dei canali preferenziali di flusso verticali, attraverso i quali il liquido si propaga più rapidamente che non nel resto del manto nevoso. Questi canali in genere occupano meno del 50% del volume complessivo del nevaio. Quando l'acqua di fusione giunge infine alla base del manto, si accumula formando un sottile strato saturo in cui l'acqua scorre verso valle seguendo il versante. A volte le condizioni idrauliche del suolo sono tali da permettere l'infiltrazione dell'acqua di fusione, ripartendo quindi il deflusso in superficiale e sotterraneo.

Questo blocco del modello FEST tramite i dati di precipitazione e di temperatura, in primo luogo determina se la precipitazione giunge sotto forma di acqua o di neve. Qualora sia presente precipitazione nevosa, la trasforma nell'equivalente idrico della neve (SWE, Snow Water Equivalent). Valuta poi se, quando e quanto la neve si fonde, percola all'interno del nevaio e poi si trasforma in deflusso superficiale. Si ipotizza che il terreno sottostante la neve sia ghiacciato, così da escludere dalla modellazione il meccanismo dell'infiltrazione del terreno coperto dalla coltre nevosa (Corbari, Ravazzani e Martinelli, et al. 2009).

I processi da modellare sono quindi due: accumulo della neve e fusione.

4.4.1.1 Accumulo della neve

In primo luogo è necessario ricostruire la quota parte di precipitazione giunta sotto forma di neve e la rimanente in pioggia: in alta montagna i pluviometri sono riscaldati, e questo non permette la distinzione tra precipitazione liquida e solida, sommando i contributi delle due fasi di un evento. La partizione quindi della precipitazione lorda P [mm] tra liquida P_l [mm] e solida P_s [mm] viene effettuata tramite la legge esposta da Tarboton (Tarboton, Chowdury e Jackson 1995):

$$P_l = \alpha_p P$$

$$P_s = (1 - \alpha_p) * P$$

Il coefficiente α_p , fattore di separazione dello stato solido-liquido, dipende dalla temperatura dell'aria:

$$\alpha_p = \begin{cases} 0 & \text{se } T_{atm} < T_{inf} \\ \frac{T_{atm} - T_{inf}}{T_{sup} - T_{inf}} & \text{se } T_{inf} \leq T_{atm} \leq T_{sup} \\ 1 & \text{se } T_{sup} < T_{atm} \end{cases}$$

Dove T_{inf} è la temperatura al di sotto della quale si ha solo precipitazione solida, mentre T_{sup} è la temperatura sopra la quale si ha solo precipitazione liquida. Con questa formulazione, nell'intervallo di presenza mista dei due stati, la ripartizione segue linearmente la temperatura. I due valori soglia di temperatura devono essere calibrati (Corbari, Ravazzani e Mancini 2007).

4.4.1.2 Fusione della neve

Il modello della fusione della neve è basato sul concetto dei gradi-giorno (Martinec e Rango 1960). I gradi-giorno sono il prodotto cumulato tra un tempo di riferimento e la differenza tra la temperatura media del periodo di riferimento con una temperatura soglia prefissata. Un grado-giorno equivale ad una giornata intera con temperatura media 1°C superiore alla soglia. Il tasso di fusione nivale M_{snow} [m/s] prodotto nell'unità di tempo è quindi proporzionale alla differenza tra la temperatura media giornaliera $T_{m,atm}$ ($^{\circ}\text{C}$) e la temperatura soglia $T_{m,snow}$ ($^{\circ}\text{C}$).

$$M_{snow} = \begin{cases} C_{m,snow} * (T_{m,atm} - T_{m,snow}) & \text{se } T_{m,snow} < T_{m,atm} \\ 0 & \text{se } T_{m,snow} \geq T_{m,atm} \end{cases}$$

La temperatura soglia consiste nella temperatura sopra alla quale la neve comincia a sciogliersi (solitamente 0°C), mentre $C_{m,snow}$ [m/ $^{\circ}\text{C}$ s] è un coefficiente empirico di proporzionalità che tiene conto delle condizioni geografiche, meteorologiche e delle proprietà del manto nevoso (Corbari, Ravazzani e Martinelli, et al. 2009).

Ovviamente, M_{snow} rappresenta il tasso di fusione nivale potenziale. Avviene solamente se tale quantitativo di neve è effettivamente disponibile sul terreno. Altrimenti si fonde solamente quello presente.

4.4.2 Dinamica dell'infiltrazione

L'infiltrazione è un fenomeno importante da modellizzare, in quanto divide la portata di precipitazione nelle due componenti di runoff superficiale e infiltrazione sotterranea. Nel modello FEST-WB sono implementati diversi modelli di infiltrazione: ora verranno esposti i due utilizzati in questo lavoro di tesi.

4.4.2.1 Philip

Philip (Philip 1969) sviluppò una soluzione dell'equazione di Richards alle differenze parziali non lineari. Tale soluzione permette di descrivere le componenti idrologiche verticali e orizzontali

all'interno del suolo. Una versione semplificata di questa soluzione potrebbe essere applicata per un suolo omogeneo profondo, con un contenuto d'acqua iniziale in condizioni statiche.

L'infiltrazione cumulata espressa dall'equazione di Philip è approssimata con la seguente equazione:

$$F(t) = St^{1/2} + Kt$$

K [m/s] consiste nella conduttività idraulica del suolo; S [m/s^{0.5}] invece è un parametro chiamato sorptivity, e indica la capacità di un mezzo poroso di assorbire un liquido tramite capillarità, e dipende dalla dimensione dei pori e dalle forze di interazione solido-liquido.

Il tasso di infiltrazione si ottiene come derivata nel tempo dell'infiltrazione cumulata:

$$F(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K$$

4.4.2.2 CN

Il Soil Conservation Service degli Stati Uniti d'America ha elaborato il metodo del Curve Number (CN) denominato SCS-CN (U.S.D.A. SCS 1956), che poi è stato adattato per simulazioni continue da diversi autori (Ravazzani, Mancini, et al. 2007). Questo metodo permette il calcolo del massimo potenziale di ritenzione S in ogni istante dt di una simulazione.

La relazione classica è formulata per mezzo di un modello a parametri concentrati, che rappresenta il bacino come un elemento unico. In input sono quindi richiesti un solo valore di precipitazione e alcuni parametri idrologici. Il fattore S [mm] di ritenzione è ottenuto tramite il parametro adimensionale CN (Curve Number):

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Il numero CN è un parametro empirico che dipende dall'uso del suolo, e può assumere valori compresi tra 0 e 100. Al valore minimo, che porta ad una S molto grande se non idealmente infinita, corrisponde un terreno infinitamente permeabile dove non si ha deflusso superficiale: la capacità di ritenzione del terreno è in grado di accogliere integralmente la precipitazione. Il valore di CN massimo invece si ha su terreni perfettamente impermeabili, S diviene nulla e quindi la precipitazione viene trasformata in deflusso superficiale senza alimentare infiltrazione sotterranea.

Oltre alla copertura del suolo, anche la sua umidità ad inizio evento riveste un ruolo importante nella dinamica dell'infiltrazione: un suolo già umido sarà meno propenso ad accogliere nuova acqua, al contrario di un terreno asciutto se non secco. Per tenere in considerazione anche questo aspetto si fa riferimento quindi alla precipitazione nei 5 giorni precedenti l'evento in questione, portando a 3

diverse classi di CN divise secondo AMC (Antecedent Moisture Condition: I, II, III) e in funzione della stagione di crescita della vegetazione che vive sul terreno analizzato.

La suddivisione è schematizzata in tabella 8:

Precipitazione [mm] nei 5 giorni precedenti l'evento		
Classe di AMC	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	<13	<36
II	13-28	36-54
III	>28	>54

Tabella 8 Classi di AMC

La classe I corrisponde ad un terreno secco, la II ad uno mediamente umido e la III ad uno molto umido se non addirittura saturo. I valori del parametro CN si riferiscono ad una condizione iniziale standard dell'evento, cioè in classe AMC_{II} . Per condizioni iniziali differenti, si applicano le seguenti formule (Moisello 1998):

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}}$$

dove CN_I e CN_{III} si riferiscono rispettivamente alle classi AMC_I e AMC_{III} . Risultano quindi $CN_I < CN_{II} < CN_{III}$, e tramite la formulazione classica si ottengono $S_I > S_{II} > S_{III}$.

Quando il processo di evapotraspirazione assume un ruolo importante nelle dinamiche di umidità del suolo, una definizione di tre sole classi di umidità dipendenti unicamente dalle precipitazioni dei cinque giorni precedenti non è sufficientemente accurata (Ravazzani, Mancini, et al. 2007). Il modello è stato quindi implementato nel FEST-WB con delle modifiche, per renderlo efficace e adatto al calcolo a parametri distribuiti. Si fa quindi riferimento all'umidità del terreno θ nell'istante di inizio di un evento. Che è aggiornata in ogni istante di tempo. A partire dalla mappa del CN_{II} a disposizione, il modello calcola per ogni cella CN_I , e da questo S_I . Poi tramite il valore di umidità ricava il grado di saturazione del suolo (ε_t) ad ogni istante con la formula:

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$$

con θ_{sat} e θ_{res} corrispondenti a umidità a saturazione e umidità residua. Ad ogni step di calcolo si ricava quindi il parametro S_t :

$$S_t = S_I(1 - \varepsilon_t)$$

Con questa formulazione quindi la capacità di ritenzione S_t varia linearmente con il grado di saturazione. Aniché avere tre soli valori di S corrispondenti alle tre classi di umidità, si ricavano valori che variano con continuità nell'intervallo $[0 - S_I]$. Il limite inferiore si riferisce a un terreno completamente saturo, mentre il limite superiore corrisponde al valore massimo di ritenzione (S_I), associato al valore CN_f quando $\theta = \theta_{res}$.

Con il metodo SCS-CN modificato a parametri distribuiti è possibile dunque ricavare la frazione di pioggia lorda che non si infila causando il deflusso superficiale. Si definiscono le perdite iniziali I_a di precipitazione dovute all'intercettazione della vegetazione e all'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno:

$$I_a = 0.2S$$

Sono direttamente proporzionali al massimo potenziale di ritenzione, a meno di un coefficiente 0.2 determinato sulla base di alcune analisi sperimentali condotte dal Soil Conservation Service. Il calcolo della portata di ruscellamento superficiale segue la seguente legge:

$$R = 0 \quad \text{se } P \leq I_a$$

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{se } P > I_a$$

dove P rappresenta il valore cumulato nel tempo di precipitazione piovosa.

4.4.3 Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione è l'insieme di due fenomeni simili, ma parzialmente distinguibili: evaporazione e traspirazione.

L'evaporazione è quel processo l'acqua presente in stato liquido compie passando in vapore acqueo. Si sposta quindi dalla superficie in cui è, corpi d'acqua, mezzi porosi saturi o insaturi, all'aria e all'atmosfera. L'energia necessaria per il passaggio di stato giunge dalla temperatura dell'ambiente circostante e dall'irraggiamento solare. I parametri climatici da considerare sono diversi: oltre alle già citate temperatura esterna e irraggiamento, sono rilevanti anche temperatura del terreno, umidità dell'aria e velocità del vento. Quando l'acqua passa in stato di vapore, si trasferisce nello strato d'aria prossimo al terreno finché non giunge alla condizione di vapore saturo, e a quel punto il trasferimento si interrompe. Maggiore è l'umidità dell'aria e meno margine è disponibile per accogliere ulteriore vapore proveniente dall'evaporazione. Il vento riveste dunque un ruolo fondamentale permettendo il ricircolo dell'aria altrimenti stagnante, sostituendo l'aria in prossimità

dei corpi da cui evapora l'acqua con altra generalmente più secca. L'evaporazione dipende anche dalla disponibilità di acqua, specialmente se si tratta di un suolo: se l'acqua è presente in quantità sufficiente, allora il fenomeno dipende solo dalle forzanti climatiche esterne, altrimenti diviene un fattore limitante, rallentando o arrestando il processo.

La traspirazione invece consiste nell'evaporazione dell'acqua contenuta nei tessuti vegetali (Bras 1989). Come l'evaporazione, dipende dalle caratteristiche atmosferiche (temperatura, irraggiamento, umidità dell'aria, vento) ma anche da proprietà fisiologiche delle piante, la loro capacità di trattenere o meno l'umidità al loro interno, o la capacità del suolo di condurre acqua alle radici per alimentarle (wilting point).

Sono presenti in letteratura diverse formulazioni per modellare matematicamente l'evapotraspirazione. Nel modello FEST-WB si usa una relazione empirica che lega l'evapotraspirazione potenziale a quella effettiva (Corbari, Ravazzani e Mancini 2007).

L'evaporazione potenziale ET_p rappresenta la quantità d'acqua evaporata da un terreno avente disponibilità illimitata a certe condizioni atmosferiche (Priestley e Taylor 1972). Si tratta quindi di un valore teorico massimo: l'evapotraspirazione effettiva ET assumerà valori compresi tra 0 e ET_p in base alla disponibilità. La formulazione matematica è la seguente (Hargreaves e Samani 1985):

$$ET_p = 0.0023R_a(T_m + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

dove T_m , T_{max} , e T_{min} sono le temperature media giornaliera, massima e minima dell'aria per il giorno in questione, mentre il termine R_a [mm/giorno] è la radiazione solare extraterrestre per il sito e giorno di interesse, ricavabile da una formula che tiene conto di latitudine, giorno dell'anno e ora.

Per ogni step temporale e cella del bacino è quindi possibile calcolare l'evapotraspirazione effettiva come frazione di quella potenziale secondo un'equazione empirica (Montaldo, et al. 2001):

$$ET = E_s + T_s$$

$$E_s = \alpha(\theta)ET_p(1 - f_v)$$

$$T_s = \beta(\theta)ET_p f_v$$

con:

- E_s rappresenta l'evaporazione effettiva;
- T_s rappresenta la traspirazione effettiva;
- f_v è la frazione vegetale;
- $(1-f_v)$ la porzione di suolo nudo;

- $\alpha = 0.082\theta + 9.173\theta^2 - 9.185\theta^3$;
- $\beta = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_t - \theta_w}$;
- θ umidità del terreno;

4.4.4 Propagazione dei deflussi

Il deflusso sotterraneo, alimentato dalle acque infiltrate modellate precedentemente, viene propagato sul bacino in esame con il metodo dell'invaso lineare. Il deflusso superficiale invece, costituito dalle acque di ruscellamento superficiale e di fusione nivale, può essere ricavato dalla risoluzione di un sistema di equazioni del tipo:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(t) - O(t) = \frac{dW(t)}{dt} \\ W(t) = W \left[I(t), O(t), \frac{dI(t)}{dt}, \frac{dO(t)}{dt}, \frac{d^2I(t)}{dt^2}, \frac{d^2O(t)}{dt^2}, \dots \right] \end{array} \right.$$

La prima equazione è il bilancio di massa: variazione di volume nel tempo in un tronco d'alveo è pari alla differenza tra la portata entrante I e la portata uscente O dal tratto in questione. Questa equazione viene discretizzata con incremento temporale di Δt :

$$\frac{I_{t+\Delta t} + I_t}{2} - \frac{O_{t+\Delta t} + O_t}{2} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

La seconda equazione del sistema invece lega il volume invasato nei vari tronchi fluviali con i flussi entranti e uscenti e le loro derivate nel tempo. A seconda della maniera in cui questa relazione è implementata si hanno diversi metodi. Nel modello FEST-WB è implementato il metodo Muskingum-Cunge-Todini (Todini 2007), una correzione del metodo Muskingum-Cunge.

- Metodo Muskingum (McCarthy 1939):

La formulazione originale del metodo Muskingum calcola il volume immagazzinato nel tronco fluviale in analisi a partire dai deflussi in ingresso e in uscita:

$$W(t) = kO + k\varepsilon(I - O) = k[\varepsilon I + (1 - \varepsilon)O]$$

con I e O [m^3/s] le portate entranti e uscenti; k [ore] il coefficiente di immagazzinamento ed ε [-] un coefficiente che funge da peso, ripartitore tra flussi in ingresso e uscita.

Noti i coefficienti k ed ε , la relazione di Muskingum discretizzata su un intervallo di Δt diviene:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t$$

Con:

$$C_1 = \frac{-2k\varepsilon + \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{2k\varepsilon + \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2k(1 - \varepsilon) - \Delta t}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta t}$$

Il metodo assume i coefficienti k ed ε costanti nel tempo. Sono ricavati tramite una procedura di taratura iterativa, e sono indipendenti dalle caratteristiche del corso d'acqua.

- Metodo Muskingum-Cunge (Cunge 2001):

Cunge estese il metodo Muskingum introducendo dei parametri variabili nel tempo, i cui valori possono essere determinati in funzione di una portata di riferimento. La formulazione di questo approccio a parametri variabili deriva dalla constatazione che il metodo Muskingum originale può essere interpretato come un'approssimazione del primo ordine di un modello di propagazione diffusivo. Quindi imponendo la diffusione reale uguale a quella numerica, è possibile ricavarne i parametri:

$$k = \frac{\Delta x}{c}; \varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q_{ref}}{icB\Delta x} \right)$$

dove Δx (m) è la distanza tra due sezioni adiacenti, c (m/s) è la celerità cinematica, Q_{ref} (m^3/s) è una portata di riferimento, B (m) è la larghezza della sezione all'altezza del pelo libero e i è la pendenza del fondo del canale. Il metodo Muskingum-Cunge è ampiamente utilizzato perché caratterizzato da una formulazione semplice e dalla necessità di pochi dati. Diversi autori hanno notato incongruenze in questa modifica, e ciò ha portato alla formulazione del modello aggiornato da Todini (Todini 2007)

- Metodo Muskingum-Cunge-Todini (Todini 2007):

Todini, analizzando le formulazioni dei due metodi sopracitati, introdusse delle correzioni per ovviare alle incongruenze dell'approccio di Cunge. Il problema dell'inconsistenza della massa è dovuto al fatto che i parametri k ed ε introdotti da Cunge sono variabili tra il tronco fluviale di interesse e il successivo, ma non tra le due sezioni di chiusura dello stesso tratto fluviale. Per risolvere questa criticità, quindi, introdusse due nuovi parametri $[k]$ ed $[\varepsilon]$ variabili istante per istante. La relazione di Muskingum-Cunge-Todini è la seguente:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t$$

dove però si hanno:

$$C_1 = \frac{-2[k\varepsilon]_{t+\Delta t} + \Delta t}{2[k(1 - \varepsilon)]_{t+\Delta t} + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{2[k\varepsilon]_t + \Delta t}{2[k(1 - \varepsilon)]_t + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2[k(1 - \varepsilon)]_t - \Delta t}{2[k(1 - \varepsilon)]_{t+\Delta t} + \Delta t}$$

Il problema dell'inconsistenza dello stato stazionario è riconducibile a una stima errata del parametro k . Considerando lo stato stazionario e ricordando la definizione di portata $Q = Av$, è possibile calcolare i volumi immagazzinati nel tronco fluviale come segue:

$$S = A\Delta x = Q v \Delta x = k^* Q$$

k^* rappresenta il parametro dello stato stazionario, e può essere interpretato come il tempo impiegato da una particella d'acqua per attraversare il tratto di canale. È diverso dalla celerità cinematica: $k = \Delta x c \neq \Delta x v = k^*$.

Per risolvere l'inconsistenza quindi è sufficiente considerare il parametro k^* al posto di k . Per diretta conseguenza, il dominio di ε è ampliato ai numeri negativi, senza che ciò comporti l'insorgere di instabilità numeriche o inaccurately nei risultati (Szél e Csaba 2000).

In conclusione, lo schema di risoluzione con il metodo Muskingum-Cunge resta valido, con il vantaggio di poter estendere il campo di applicazione anche ad alvei di pianura.

5 Calibrazione

Il lavoro principale di questo elaborato consiste nel riuscire ad adattare i valori ottenuti con le simulazioni del FEST ai reali valori di portata misurati dalle stazioni automatiche poste lungo i corsi d'acqua. In primo luogo è necessario individuare quali siano le sezioni di misura effettivamente significative per questo lavoro; poi si individuano gli intervalli temporali da prendere in considerazione; successivamente si procede a modificare alcuni dei parametri nelle equazioni che regolano il modello per ottenere la maggior coerenza possibile tra simulazioni e registrazioni. Si usano infine degli indicatori numerici per valutare la coerenza dei risultati.

5.1 Scelta delle sezioni

Non tutte delle più di 100 sezioni di misura della portata a disposizione sono utili o adatte a questo lavoro di modellazione e calibrazione per diversi motivi. Si procederà quindi a controllare, analizzare e scegliere le sezioni significative che verranno poi prese in considerazione nelle analisi dei risultati, secondo i criteri esposti più nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

5.1.1 Appartenenza al bacino

In primo luogo si sono esclusi tutti i dati di portata non appartenenti al bacino del Tanaro: fornirebbero dei valori reali ma non comparabili con i risultati delle simulazioni, in quanto il modello è costruito per la risposta idrologica di tale area, e il territorio circostante non è correttamente implementato. Anche i dati di precipitazione non sono completi per l'area che circonda il bacino in questione. Si sono mantenute le sezioni di misura sia dell'asta principale del fiume Tanaro che quelle presenti dei suoi principali affluenti: Bormida, Erro, Orba, Belbo, Stura. Si è quindi giunti ad una lista di 32 sezioni potenzialmente utilizzabili. Tale risultato è stato ottenuto sovrapponendo la posizione geografica delle stazioni di misurazione con il bacino del fiume Tanaro ottenuto tramite il software GIS ArcMap.

5.1.2 Consistenza dei dati

Poi è stato necessario valutare, nelle diverse serie di dati, quelle che comprendano serie temporali sufficientemente ampie da risultare attendibili e significative. Una serie di dati interrotta, oltre che non poter essere confrontata con le simulazioni elaborate dal modello, può anche indicare un malfunzionamento fisico o elettronico della stazione di misura, rendendola poco affidabile. Generalmente tali stazioni, dopo l'accensione o l'installazione, richiedono un periodo di calibrazione. Stazioni quindi nuove, o con interruzioni continue, non dispongono di un tempo sufficientemente lungo di affinamento per poter fare affidamento sui dati forniti. Per questo motivo sono quindi state escluse le stazioni di Carrù e San Bartolomeo del Pesio, e quella di Cassine sul Bormida.

Si porta ad esempio in [figura 25](#) la registrazione di S. Bartolomeo sul Pesio, nella quale mancano i dati di tutto il 2013:

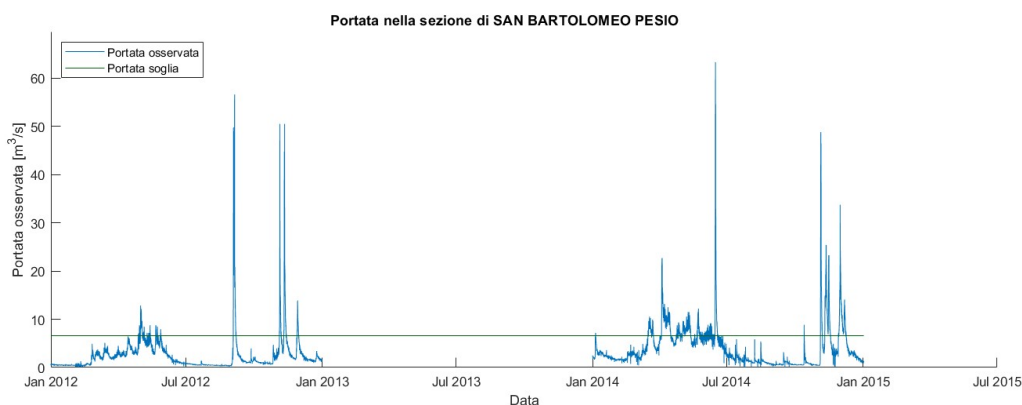


Figura 25 Portata nella stazione di S. Bartolomeo, sul fiume Pesio

5.1.3 Effetti dell'antropizzazione

Lungo il corso del fiume Tanaro e dei suoi affluenti sono presenti diversi sbarramenti che influenzano l'andamento giornaliero, stagionale o annuale della portata. Siccome l'intento di questo lavoro riguarda la previsione e il comportamento degli eventi di piena nel bacino, occorre considerare che alcuni tipi di sfruttamento delle acque influenzano tanto, poco o per nulla la risposta del bacino a tali eventi. Ad esempio il prelievo ai fini irrigui di pochi metri cubi tramite sbarramento a luce fissa non ha effetto sull'idrogramma di piena, mentre uno sbarramento ai fini idroelettrici può rallentare e laminare l'onda di piena. Il bilancio idrico viene comunque rispettato, e ai fini della protezione del territorio questi effetti sono a favore di sicurezza. Tuttavia non conoscendo la regolazione degli invasi idroelettrici non è possibile inserire tale comportamento nel modello di simulazione, e ciò comporta un'inevitabile discrepanza tra le portate simulate e quelle misurate dalle stazioni lungo i corsi d'acqua. Per questi motivi si sono escluse le stazioni di misura di Gaiola, Vinadio e Fossano sullo Stura di Demonte, Castelnuovo del Belbo, Cartosio per l'Erro, Mombaldone, Cessole, Piana Crixia, Murialdo e Camerana sul Bormida, Garessio e Piantorre per il Tanaro e infine Andonno sul Gesso.

Nelle [figure 26 e 27](#) è mostrata la portata registrata nella stazione di Gaiola, prima su 3 anni e poi effettuando uno zoom su alcuni giorni: si evidenzia l'andamento ripetitivo della portata dovuto ad una regolazione artificiale:

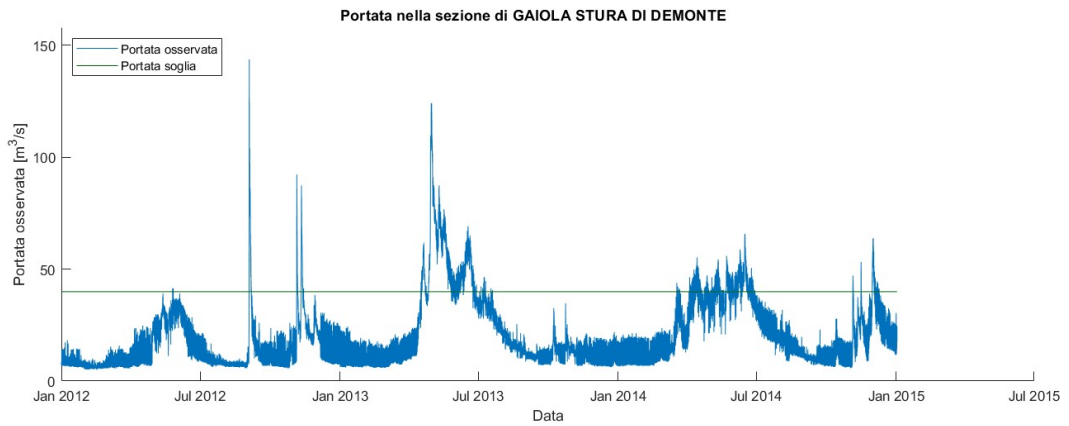


Figura 26 Portata nella stazione di Gaiola, sul fiume Stura di Demonte

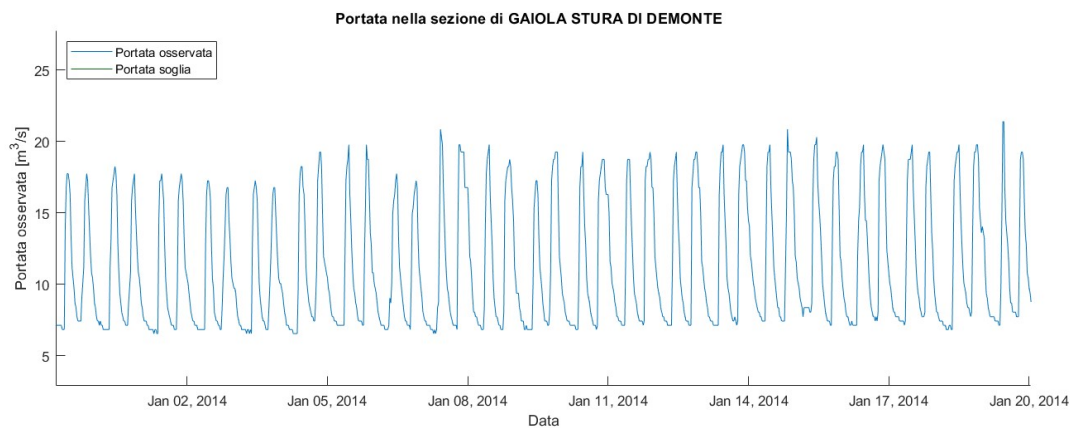


Figura 27 Zoom temporale della serie di portata nella stazione di Gaiola, sul fiume Stura di Demonte

5.1.4 Instabilità delle misure

La sensibilità degli strumenti di misura è un fattore determinante per la qualità dei dati ottenuti dalle misurazioni. Soprattutto su fiumi di piccola portata, la variabilità locale e istantanea del flusso unita alla sensibilità degli strumenti di misura rendono i dati di difficile utilizzo. Anche una scala delle portate di taratura recente o con bassa risoluzione possono essere causa di questo effetto. Per questo le seguenti sezioni sono state escluse: Monasterolo sul Casotto, Robilante sul Vermenagna, Rocchetta sul Belbo, Torre Mondovì sull'Ellero e Basaluzzo sull'Orba.

Nelle *figure 28 e 29* l'esempio della stazione di Rocchetta sul Belbo, con uno zoom temporale che evidenzia il fenomeno.

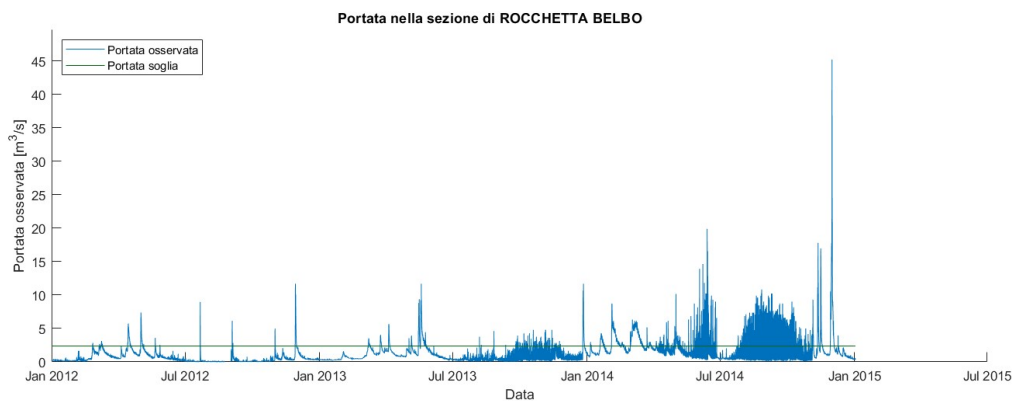


Figura 28 Portata nella stazione di Rocchetta, sul fiume Belbo

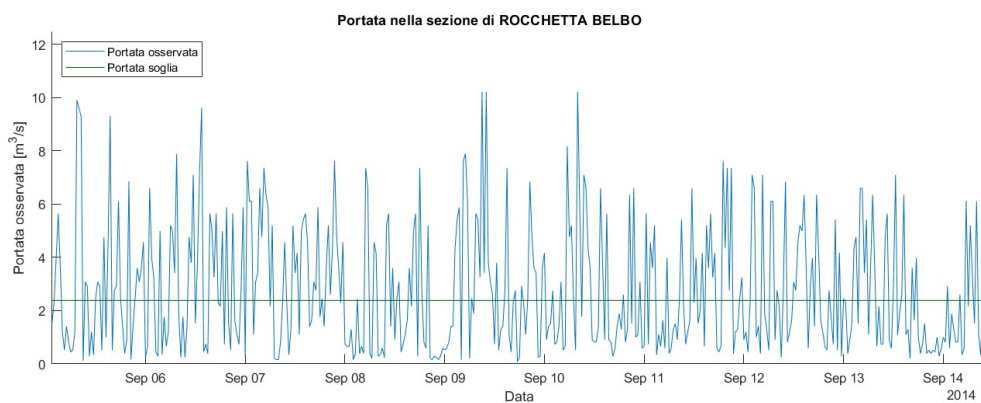


Figura 29 Zoom temporale della serie di portata nella stazione di Rocchetta, sul fiume Belbo

5.1.5 Presenza di eventi registrati

Infine è anche possibile che il bacino risponda in maniera differente rispetto al previsto per motivi che non si sono riusciti a inquadrare precedentemente. Così si è anche svolto un rapido confronto tra la precipitazione caduta su una determinata area del bacino e la portata effettivamente transitata nelle sezioni di chiusura. Le cause di queste incongruenze potrebbero essere bacini locali, infiltrazione localizzata, prelievi o laminazioni non ancora assodate tuttavia effettive ed efficaci.

Per molte delle sezioni inadeguate spesso sono presenti contemporaneamente più cause di esclusione, magari in forma meno corposa. Tuttavia la concomitanza di fattori svantaggiosi peggiora l'affidabilità globale della sezione in questione, che conviene quindi escludere. Le sezioni quindi rimanenti dopo questo lavoro di scrematura sono 11: Asti, Masio, Montecastello, Alba, Farigliano e Ponte di Nava sul Tanaro, Mondovì e Rastello sull'Ellero, Frabosa Soprana sul Corsaglia, Casal Cermelli sull'Orba e San Damiano sul Bobore.

In tabella 9 un riassunto delle stazioni di misura della portata:

Stazione	Codice	Adeguate
MONASTEROLO_CASOTTO	4127900	No
ASTI_TANARO	5005900	Sì
CARRU'_PESIO	4043700	No
ROBILANTE_VERMENAGNA	4185900	No
GAIOLA_STURA_DI_DEMONTE	4079900	No
CASTELNUOVO_BELBO	5029900	No
CARTOSIO_ERRO	6036900	No
MONDOVI'_ELLERO	4130700	Sì
MASIO_TANARO	6091900	Sì
ROCCHETTA_BELBO	4193900	No
TORRE_MONDOVI'_CORSAGLIA	4210900	No
CASSINE_BORMIDA	6043900	No
FRABOSA_SOPRANA_CORSAGLIA	4134900	Sì
VINADIO_STURA_DI_DEMONTE	4248903	No
CASAL_CERMELLI_ORBA	6037900	Sì
MONTECASTELLO_TANARO	6105700	Sì
ALBA_TANARO	4003900	Sì
FARIGLIANO_TANARO	4086900	Sì
MOMBALDONE_BORMIDA	5064700	No
RASTELLO_ELLERO	4190902	Sì
CESSOLE_BORMIDA	5037700	No
PIANA_CRIXIA_BORMIDA	9048900	No
FOSSANO_STURA_DI_DEMONTE	4089901	No
MURIALDO_BORMIDA_DI_MILLESIMO	9040900	No
CAMERANA_BORMIDA	4035700	No
PONTE_DI_NAVA_TANARO	4155901	Sì
BASALUZZO_ORBA	6012700	No
GARESSIO_TANARO	4095900	No
PIANTORRE_TANARO	4108900	No
ANDONNO_GESSO	4233901	No
SAN_DAMIANO_BORBORE	5097900	Sì
SAN_BARTOLOMEO_PESIO	4068901	No

Tabella 9 Stazioni di misura della portata nel bacino del Tanaro

5.2 Scelta degli intervalli temporali

Per ciascuna sezione destinata alla calibrazione si osservano poi le serie di portate e si determinano i periodi temporali su cui effettuare la calibrazione: è molto difficile riuscire a far combaciare perfettamente simulazione e misurazioni su tutto il periodo analizzato, quindi si sceglie di concentrarsi sui periodi di eventi particolarmente intensi. In questa maniera si avrà un comportamento del modello adatto a simulare eventi di piena estremi, che è lo scopo del modello, a discapito dell'adattamento in periodi con poche precipitazioni che però non mettono idraulicamente in crisi il bacino idrografico. L'ideale è ottenere una decina di eventi per ciascuna sezione, su cui effettuare poi il confronto con le misurazioni di portata reale.

Vista la distribuzione spaziale delle stazioni di misura, e il posizionamento in bacini e tronchi fluviali differenti, c'è da aspettarsi che gli intervalli temporali siano simili ma non identici per le diverse sezioni, in quanto le precipitazioni non sono uniformi su tutto il bacino e il tempo di corrivazione, o di trasformazione dell'afflusso in deflusso, è minore per bacini piccoli e maggiore per bacini più grandi, in base alla superficie contribuente alla portata misurata in ogni sezione.

Un primo approccio è stato valutare per ciascuna sezione la portata media sui 3 anni di simulazioni disponibili: sarebbero stati considerati come eventi tutti quei periodi aventi portata maggiore di tale valore. In questa maniera però sarebbero risultati un numero molto elevato di eventi e non tutti significativi: la portata media risulta molto bassa come soglia, quindi oltre che avere alcuni eventi dalla portata molto piccola si presentano periodi lunghi anche diversi mesi in cui la portata è sempre maggiore della soglia, a causa delle frequenti precipitazioni anche di lieve e media intensità, come nel periodo autunnale. Si è quindi alzata la soglia a 2 volte la portata media, e ciò ha comportato una scrematura degli eventi con alcune variabilità:

- per sezioni che chiudono superfici piccole, e generalmente montane, la portata è fortemente influenzata dalla precipitazione locale quindi in corrispondenza di eventi meteorici si hanno dei picchi di portata uscente, mentre in assenza di precipitazione il deflusso diminuisce drasticamente fino a quasi scomparire. Con questo comportamento, nelle stazioni di questo tipo si hanno una grande quantità di eventi brevi e intensi intervallati da lunghi periodi di magra e secca. In queste sezioni si sono selezionati solo i maggiori tra gli eventi che superano la nuova soglia;

Un esempio in *figura 30*:

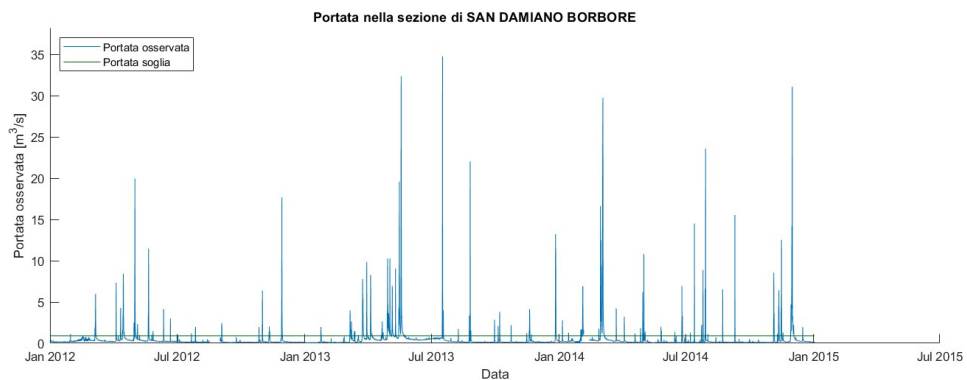


Figura 30 Portata nella sezione di S. Damiano, sul fiume Borbore

- per sezioni che chiudono superfici molto grandi, quindi generalmente di valle, la portata è il contributo di una grande porzione di territorio. Eventi intensi ma locali hanno un'influenza minore rispetto a eventi meno intensi ma molto più ampi, se non addirittura sull'interezza del bacino. La soglia di 2 volte la portata media rischia di essere un valore troppo alto da raggiungere, quindi alcune sezioni risulterebbero erroneamente senza eventi. Si sono quindi considerati eventi anche periodi con una portata di picco inferiore a tale soglia.

Un esempio in *figura 31*:

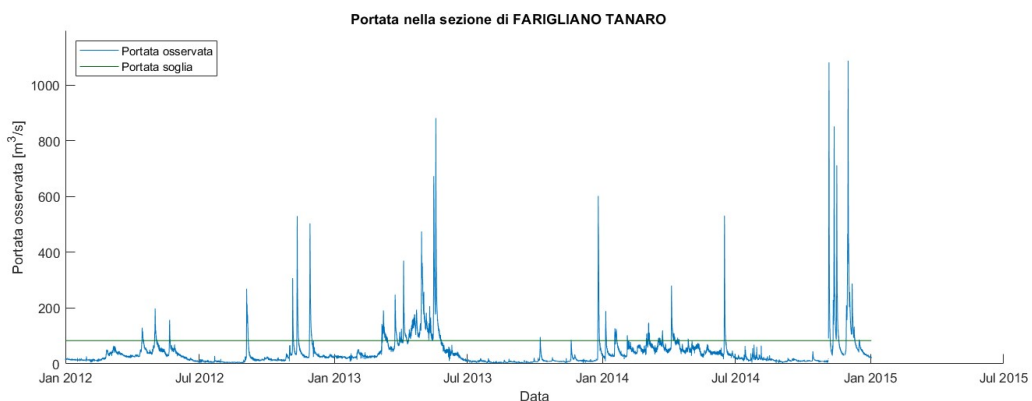


Figura 31 Portata nella sezione di Farigliano, sul fiume Tanaro

Per tutte le sezioni inoltre si sono esclusi i primi sei mesi di simulazione poiché corrispondono al periodo di inizializzazione delle variabili di stato del modello.

Nelle tabelle seguenti, per ciascuna sezione si riportano gli intervalli temporali considerati come eventi. Gli eventi meteorici non iniziano né si concludono esattamente assieme agli intervalli

considerati, che sono stati presi di dimensioni maggiori per avere la certezza di contenere gli eventi interamente, almeno per la fase significativa dell'onda di piena.

Sezione di Casal Cermelli, fiume Orba			
Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	31/10/2012, 03:30	04/11/2012, 07:30	14600 – 14800
Evento 2	04/11/2012, 07:30	08/11/2012, 11:30	14800 – 15000
Evento 3	10/11/2012, 13:30	16/11/2012, 19:30	15100 – 15400
Evento 4	26/11/2012, 04:30	05/12/2012, 13:30	15850 – 16300
Evento 5	25/12/2012, 08:30	30/12/2012, 13:30	17250 – 17500
Evento 6	05/03/2013, 03:00	17/03/2013, 15:00	20600 – 21200
Evento 7	23/03/2013, 21:00	29/03/2013, 02:00	21500 – 21750
Evento 8	30/03/2013, 03:00	04/04/2013, 08:00	21800 – 22050
Evento 9	04/04/2013, 08:00	11/04/2013, 15:00	22050 - 22400
Evento 10	11/04/2013, 15:00	15/04/2013, 19:00	22400 – 22600
Evento 11	16/05/2013, 00:00	25/05/2013, 09:00	24050 – 24500
Evento 12	03/01/2014, 06:30	11/01/2014, 14:30	35200 – 35600
Evento 13	15/01/2014, 18:30	28/01/2014, 06:30	35800 – 36400
Evento 14	01/02/2014, 10:30	18/02/2014, 02:30	36600 – 37400
Evento 15	27/02/2014, 11:30	10/03/2014, 22:30	37850 – 38400
Evento 16	21/03/2014, 08:30	27/03/2014, 14:30	38900 – 39200
Evento 17	29/04/2014, 22:30	14/05/2014, 12:30	40800 – 41500
Evento 18	05/07/2014, 14:30	13/07/2014, 22:30	44000 – 44400
Evento 19	19/08/2014, 04:30	22/08/2014, 22:30	46140 – 46320
Evento 20	23/08/2014, 08:30	25/08/2014, 10:30	46340 – 46440
Evento 21	10/10/2014, 11:30	12/10/2014, 21:00	48650 – 48765
Evento 22	04/11/2014, 11:30	08/11/2014, 15:30	49850 – 50050
Evento 23	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 24	25/11/2014, 07:30	27/11/2014, 09:30	50850 – 50950
Evento 25	27/11/2014, 09:30	04/12/2014, 16:30	50950 – 51300
Evento 26	15/12/2014, 02:30	19/12/2014, 06:30	51800 – 52000

Tabella 10 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Casal Cermelli

Sezione di Montecastello, fiume Tanaro

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	03/09/2012, 20:30	14/09/2012, 06:30	11850 – 12350
Evento 2	31/10/2012, 03:30	03/11/2012, 06:30	14600 – 14750
Evento 3	04/11/2012, 17:30	08/11/2012, 11:30	14820 – 15000
Evento 4	10/11/2012, 13:30	15/11/2012, 18:30	15100 – 15350
Evento 5	26/11/2012, 04:30	04/12/2012, 12:30	15850 – 16250
Evento 6	03/03/2013, 01:00	19/03/2013, 17:00	20500 – 21300
Evento 7	23/03/2013, 21:00	03/04/2013, 07:00	21500 – 22000
Evento 8	03/04/2013, 07:00	13/04/2013, 17:00	22000 – 22500
Evento 9	28/04/2013, 07:00	04/05/2013, 13:00	23200 – 23500
Evento 10	16/05/2013, 00:00	18/05/2013, 17:00	24050 – 24180
Evento 11	18/05/2013, 17:00	22/05/2013, 01:00	24180 – 24340
Evento 12	29/09/2013, 11:00	03/10/2013, 15:00	30600 – 30800
Evento 13	22/10/2013, 09:00	26/10/2013, 13:00	31700 – 31900
Evento 14	23/12/2013, 21:00	01/01/2014, 04:30	34700 – 35100
Evento 15	03/01/2014, 06:30	11/01/2014, 14:30	35200 – 35600
Evento 16	15/01/2014, 18:30	26/01/2014, 04:30	35800 – 36300
Evento 17	01/02/2014, 10:30	13/02/2014, 22:30	36600 – 37200
Evento 18	28/02/2014, 12:30	02/04/2014, 20:30	37900 – 39500
Evento 19	02/04/2014, 20:30	23/04/2014, 16:30	39500 – 40500
Evento 20	14/06/2014, 18:30	25/06/2014, 04:30	43000 – 43500
Evento 21	05/07/2014, 14:30	16/07/2014, 00:30	44000 – 44500
Evento 22	16/08/2014, 06:30	26/08/2014, 16:30	46000 – 46500
Evento 23	10/10/2014, 16:30	12/10/2014, 23:30	48660 – 48770
Evento 24	12/10/2014, 23:30	14/10/2014, 10:30	48770 – 48840
Evento 25	04/11/2014, 11:30	07/11/2014, 14:30	49850 – 50000
Evento 26	10/11/2014, 17:30	14/11/2014, 21:30	50150 – 50350
Evento 27	14/11/2014, 21:30	18/11/2014, 00:30	50350 – 50500
Evento 28	28/11/2014, 10:30	05/12/2014, 17:30	51000 – 51350

Tabella 11 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Montecastello

Sezione di Castelnuovo, fiume Belbo

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	05/03/2013, 03:00	15/03/2013, 13:00	20600 – 21100
Evento 2	23/03/2013, 21:00	30/03/2013, 03:00	21500 – 21800
Evento 3	30/03/2013, 03:00	04/04/2013, 08:00	21800 – 22050
Evento 4	04/04/2013, 08:00	10/04/2013, 14:00	22050 – 22350
Evento 5	04/05/2013, 13:00	10/05/2013, 19:00	23500 – 23800
Evento 6	14/05/2013, 23:00	25/05/2013, 09:00	24000 – 24500
Evento 7	25/08/2013, 01:00	29/08/2013, 05:00	28900 – 29100
Evento 8	23/12/2013, 21:00	03/01/2014, 06:30	34700 – 35200
Evento 9	01/02/2014, 10:30	16/02/2014, 00:30	36600 – 37300
Evento 10	28/02/2014, 12:30	03/03/2014, 15:30	37900 – 38050
Evento 11	03/03/2014, 15:30	10/03/2014, 22:30	38050 – 38400
Evento 12	29/04/2014, 22:30	02/05/2014, 00:30	40800 – 40900
Evento 13	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 14	14/11/2014, 21:30	20/11/2014, 02:30	50350 – 50600
Evento 15	27/11/2014, 09:30	08/12/2014, 20:30	50950 – 51500

Tabella 12 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Castelnuovo

Sezione di Masio, fiume Tanaro

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	02/09/2012, 19:30	06/09/2012, 23:30	11800 – 12000
Evento 2	04/11/2012, 07:30	09/11/2012, 12:30	14800 – 15050
Evento 3	09/11/2012, 12:30	18/11/2012, 21:30	15050 – 15500
Evento 4	27/11/2012, 05:30	05/12/2012, 13:30	15900 – 16300
Evento 5	21/03/2013, 19:00	30/03/2013, 03:00	21400 – 21800
Evento 6	03/04/2013, 07:00	09/04/2013, 13:00	22000 – 22300
Evento 7	28/04/2013, 07:00	08/05/2013, 17:00	23200 – 23700
Evento 8	14/05/2013, 23:00	27/05/2013, 11:00	24000 – 24600
Evento 9	23/12/2013, 21:00	03/01/2014, 06:30	34700 – 35200
Evento 10	26/02/2014, 10:30	10/03/2014, 22:30	37800 – 38400
Evento 11	04/11/2014, 11:30	09/11/2014, 16:30	49850 – 50100
Evento 12	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 13	14/11/2014, 21:30	22/11/2014, 04:30	50350 – 50700
Evento 14	28/11/2014, 10:30	13/12/2014, 00:30	51000 – 51700

Tabella 13 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Masio

Sezione di Asti, fiume Tanaro

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	04/11/2012, 07:30	10/11/2012, 13:30	14800 – 15100
Evento 2	10/11/2012, 13:30	15/11/2012, 18:30	15100 – 15350
Evento 3	27/11/2012, 05:30	03/12/2012, 11:30	15900 – 16200
Evento 4	28/04/2013, 07:00	04/05/2013, 13:00	23200 – 23500
Evento 5	14/05/2013, 23:00	23/05/2013, 07:00	24000 – 24400
Evento 6	23/12/2013, 21:00	03/01/2014, 06:30	34700 – 35200
Evento 7	14/06/2014, 18:30	21/06/2014, 00:30	43000 – 43300
Evento 8	03/11/2014, 10:30	09/11/2014, 16:30	49800 – 50100
Evento 9	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 10	14/11/2014, 21:30	20/11/2014, 02:30	50350 – 50600
Evento 11	28/11/2014, 10:30	05/12/2014, 17:30	51000 – 51350

Tabella 14 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Asti

Sezione di San Damiano, fiume Borbore

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	26/11/2012, 04:30	03/12/2012, 11:30	15850 – 16200
Evento 2	22/01/2013, 11:00	26/01/2013, 15:00	18600 – 18800
Evento 3	21/03/2013, 19:00	30/03/2013, 03:00	21400 – 21800
Evento 4	30/03/2013, 03:00	04/04/2013, 08:00	21800 – 22050
Evento 5	04/04/2013, 08:00	11/04/2013, 15:00	22050 – 22400
Evento 6	14/05/2013, 23:00	25/05/2013, 09:00	24000 – 24500
Evento 7	16/07/2013, 11:00	22/07/2013, 17:00	27000 – 27300
Evento 8	22/08/2013, 23:00	31/08/2013, 07:00	28800 - 29200
Evento 9	24/12/2013, 22:00	30/12/2013, 03:00	34750 – 35000
Evento 10	28/02/2014, 12:30	07/03/2014, 19:30	37900 – 38250
Evento 11	29/04/2014, 22:30	06/05/2014, 04:30	40800 – 41100
Evento 12	25/06/2014, 04:30	29/06/2014, 08:30	43500 – 43700
Evento 13	12/07/2014, 21:30	16/07/2014, 00:30	44350 – 44500
Evento 14	25/07/2014, 09:30	27/07/2014, 11:30	44950 – 45050
Evento 15	28/07/2014, 12:30	31/07/2014, 15:30	45100 – 45250
Evento 16	08/09/2014, 04:30	12/09/2014, 08:30	47100 – 47300
Evento 17	03/11/2014, 10:30	07/11/2014, 14:30	49800 – 50000
Evento 18	13/11/2014, 20:30	18/11/2014, 00:30	50300 – 50500
Evento 19	27/11/2014, 09:30	04/12/2014, 16:30	50950 – 51300

Tabella 15 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di San Damiano

Sezione di Alba, fiume Tanaro

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	02/09/2012, 19:30	09/09/2012, 01:30	11800 – 12100
Evento 2	04/11/2012, 07:30	10/11/2012, 13:30	14800 – 15100
Evento 3	10/11/2012, 13:30	16/11/2012, 19:30	15100 – 15400
Evento 4	27/11/2012, 05:30	05/12/2012, 13:30	15900 – 16300
Evento 5	21/03/2013, 19:00	30/03/2013, 03:00	21400 – 21800
Evento 6	04/04/2013, 08:00	09/04/2013, 13:00	22050 – 22300
Evento 7	28/04/2013, 07:00	04/05/2013, 13:00	23200 – 23500
Evento 8	14/05/2013, 23:00	18/05/2013, 07:00	24000 – 24160
Evento 9	18/05/2013, 07:00	21/05/2013, 05:00	24160 – 24300
Evento 10	23/12/2013, 21:00	30/12/2013, 03:00	34700 – 35000
Evento 11	04/01/2014, 07:30	09/01/2014, 12:30	35250 – 35500
Evento 12	14/06/2014, 18:30	21/06/2014, 00:30	43000 – 43300
Evento 13	04/11/2014, 11:30	08/11/2014, 15:30	49850 – 50050
Evento 14	10/11/2014, 17:30	14/11/2014, 21:30	50150 – 50350
Evento 15	14/11/2014, 21:30	20/11/2014, 02:30	50350 – 50600
Evento 16	28/11/2014, 10:30	08/12/2014, 20:30	51000 – 51500

Tabella 16 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Alba

Sezione di Farigliano, fiume Tanaro

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	02/11/2012, 05:30	10/11/2012, 13:30	14700 – 15100
Evento 2	10/11/2012, 13:30	18/11/2012, 21:30	15100 – 15500
Evento 3	25/11/2012, 03:30	05/12/2012, 13:30	15800 – 16300
Evento 4	03/03/2013, 01:00	21/03/2013, 19:00	20500 – 21400
Evento 5	21/03/2013, 19:00	30/03/2013, 03:00	21400 – 21800
Evento 6	03/04/2013, 07:00	11/04/2013, 15:00	22000 – 22400
Evento 7	26/04/2013, 05:00	06/05/2013, 15:00	23100 – 23600
Evento 8	14/05/2013, 23:00	18/05/2013, 02:00	24000 – 24150
Evento 9	18/05/2013, 02:00	22/05/2013, 06:00	24150 – 24350
Evento 10	24/12/2013, 22:00	30/12/2013, 03:00	34750 – 35000
Evento 11	14/06/2014, 23:30	17/06/2014, 21:30	43010 – 43150
Evento 12	03/11/2014, 10:30	07/11/2014, 14:30	49800 – 50000
Evento 13	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 14	14/11/2014, 21:30	19/11/2014, 01:30	50350 – 50550
Evento 15	28/11/2014, 10:30	04/12/2014, 16:30	51000 – 51300

Tabella 17 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Farigliano

Sezione di Mondovì, fiume Ellero

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	02/09/2012, 19:30	06/09/2012, 23:30	11800 – 12000
Evento 2	09/11/2012, 12:30	13/11/2012, 16:30	15050 – 15250
Evento 3	27/11/2012, 05:30	01/12/2012, 09:30	15900 – 16100
Evento 4	28/04/2013, 07:00	02/05/2013, 11:00	23200 – 23400
Evento 5	14/05/2013, 23:00	18/05/2013, 02:00	24000 – 24150
Evento 6	18/05/2013, 02:00	21/05/2013, 05:00	24150 – 24300
Evento 7	14/06/2014, 18:30	18/06/2014, 22:30	43000 – 43200
Evento 8	03/11/2014, 10:30	07/11/2014, 14:30	49800 – 50000
Evento 9	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 10	14/11/2014, 21:30	18/11/2014, 00:30	50350 – 50500
Evento 11	28/11/2014, 10:30	05/12/2014, 17:30	51000 – 51350

Tabella 18 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Mondovì

Sezione di Rastello, fiume Ellero

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	31/08/2012, 17:30	09/09/2012, 01:30	11700 – 12100
Evento 2	02/11/2012, 05:30	09/11/2012, 12:30	14700 – 15050
Evento 3	09/11/2012, 12:30	16/11/2012, 19:30	15050 – 15400
Evento 4	11/04/2013, 15:00	06/05/2013, 15:00	22400 – 23600
Evento 5	05/10/2013, 17:00	11/10/2013, 23:00	30900 – 31200
Evento 6	14/06/2014, 18:30	18/06/2014, 22:30	43000 – 43200
Evento 7	03/11/2014, 10:30	08/11/2014, 15:30	49800 – 50050
Evento 8	08/11/2014, 15:30	14/11/2014, 21:30	50050 – 50350
Evento 9	14/11/2014, 21:30	16/11/2014, 23:30	50350 – 50450
Evento 10	28/11/2014, 10:30	05/12/2014, 17:30	51000 – 51350

Tabella 19 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Rastello

Sezione di Frabosa Soprana, fiume Corsaglia

Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	31/08/2012, 17:30	09/09/2012, 01:30	11700 – 12100
Evento 2	02/11/2012, 05:30	09/11/2012, 12:30	14700 – 15050
Evento 3	09/11/2012, 12:30	14/11/2012, 17:30	15050 – 15300
Evento 4	26/04/2013, 05:00	06/05/2013, 15:00	23100 – 23600
Evento 5	18/05/2013, 02:00	21/05/2013, 05:00	24150 – 24300
Evento 6	23/12/2013, 21:00	28/12/2013, 01:00	34700 – 34900
Evento 7	03/04/2014, 21:30	07/04/2014, 00:30	39550 – 39700
Evento 8	14/06/2014, 18:30	18/06/2014, 22:30	43000 – 43200
Evento 9	03/11/2014, 10:30	07/11/2014, 14:30	49800 – 50000
Evento 10	09/11/2014, 16:30	14/11/2014, 21:30	50100 – 50350
Evento 11	14/11/2014, 21:30	18/11/2014, 00:30	50350 – 50500

Tabella 20 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Frabosa Soprana

Sezione di Ponte di Nava, fiume Tanaro			
Evento	Inizio	Fine	Istanti temporali
Evento 1	02/11/2012, 05:30	08/11/2012, 11:30	14700 – 15000
Evento 2	09/11/2012, 12:30	14/11/2012, 17:30	15050 – 15300
Evento 3	26/11/2012, 04:30	02/12/2012, 10:30	15850 – 16150
Evento 4	07/03/2013, 05:00	13/03/2013, 11:00	20700 – 21000
Evento 5	26/04/2013, 05:00	04/05/2013, 13:00	23100 – 23500
Evento 6	14/05/2013, 23:00	18/05/2013, 02:00	24000 – 24150
Evento 7	18/05/2013, 02:00	21/05/2013, 05:00	24150 – 24300
Evento 8	23/12/2013, 21:00	28/12/2013, 01:00	34700 – 34900
Evento 9	04/01/2014, 07:30	07/01/2014, 10:30	35250 – 35400
Evento 10	03/11/2014, 10:30	07/11/2014, 14:30	49800 – 50000
Evento 11	09/11/2014, 16:30	11/11/2014, 08:30	50100 – 50180
Evento 12	11/11/2014, 08:30	13/11/2014, 20:30	50180 – 50300
Evento 13	13/11/2014, 20:30	18/11/2014, 00:30	50300 – 50500
Evento 14	27/11/2014, 09:30	04/12/2014, 16:30	50950 – 51300

Tabella 21 Intervalli temporali estratti come eventi, della stazione di misura di Ponte di Nava

5.3 Modifica dei parametri

La taratura è stata effettuata seguendo la procedura “trial and error” (Ravazzani, Rabuffetti, et al. 2008): i parametri vengono modificati per tentativi basandosi sul confronto grafico e statistico tra gli ideogrammi simulati e registrati. Questo tipo di procedura porta ad identificare una soluzione non univoca, in quanto più combinazioni di parametri possono ottimizzare la soluzione.

Si sono mantenuti i valori del coefficiente di scabrezza di Strickler in base a quanto già elaborato nella tesi di Corso Elena (Corso 2018):

- $k_s = 2$ per le celle di versante;
- $k_s = 10$ per le celle costituenti il reticolo, indipendentemente dall'ordine dei rami del reticolo idrografico;

Per mantenere le corrispondenze con i dati reali inseriti nel modello, a ciascun parametro è associato un intervallo di variabilità entro il quale può variare. Eccedere tale intervallo, per quanto matematicamente possibile, fa discostare il modello dalle caratteristiche di essere fisicamente

basato. Pertanto raggiunti gli estremi di tali intervalli, non si sono modificati ulteriormente i parametri.

I parametri che sono stati modificati sono i seguenti:

- Permeabilità a saturazione k_{sat} (m/s) che rappresenta la permeabilità verticale di infiltrazione del suolo. Aumentando la permeabilità risulta maggiore la quantità di acqua che si infila nel terreno a discapito del ruscellamento superficiale. Incrementando questo parametro generalmente si ha una riduzione della portata fluviale e un allungamento del periodo di restituzione. L'intervallo di variabilità è di un fattore moltiplicativo [0.01-100];
- La permeabilità del sottosuolo k_{prof} (m/s), che indica la permeabilità orizzontale del terreno in profondità. Al crescere di questo parametro aumenta la velocità dell'acqua nel sottosuolo, accelerando il trasferimento del deflusso alle sezioni di chiusura. Data l'elevata incertezza di questo parametro, è stato modificato con un fattore moltiplicativo fino a 6 ordini di grandezza [10^{-6} - 10^6];
- La profondità del suolo Z (m), è direttamente proporzionale al volume d'acqua immagazzinabile nel terreno. Aumentando lo spessore del suolo, maggiore quantità d'acqua sarà necessaria per portarlo a saturazione diminuendo quindi ruscellamento e portata in uscita. Questo parametro è stato modificato con un fattore moltiplicativo compreso in [0.5 – 2];
- Il Curve Number del bacino CN [-], correlato alla capacità di infiltrazione del terreno. Maggiore è il suo valore e meno il terreno è in grado di far infiltrare l'acqua, aumentando quindi il ruscellamento. Il range del CN è [0 – 100], le modifiche per la calibrazione sono state apportate con un parametro additivo nel range [-10 – 10]. Più frequentemente si giunge al limite superiore, è necessario controllare che il numero CN non esca dal suo intervallo di validità;

Il confronto degli idrogrammi registrati e simulati è stato effettuato con l'ausilio di strumenti grafici e statistici, al fine di confrontare forma e valori delle due curve di portata.

5.3.1 Errore di portata al colmo

Differenza tra i valori di portata massima simulata e osservata, rapportata al massimo di piena osservata. Può essere sia dotato di segno che in valore assoluto: su di un singolo evento per una sezione non ci sono differenze tra le due versioni, mentre quando si prendono in considerazione più e venti e più sezioni tali valori differiscono.

$$Err_{Q,c} = \frac{Q_{c,SIM} - Q_{c,OSS}}{Q_{c,OSS}} * 100 \quad [\%]$$

$$Err_{Q,c,ass} = \left| \frac{Q_{c,SIM} - Q_{c,OSS}}{Q_{c,OSS}} \right| * 100 \quad [-]$$

L'errore è considerato accettabile se è compreso nel range [-20% - 20%]

5.3.2 RMSE

Root Mean Square Error, assume valori tra 0 e infinito. Rappresenta la radice dello scarto quadratico tra i valori istantanei simulati ed osservati. È indice delle differenze temporali tra le due curve e dell'accuratezza dell'adattamento. Anche in presenza di differenze minime cresce molto di valore.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{t,OSS} - Q_{t,SIM})^2}$$

Con t che corrisponde all'istante temporale, dall'inizio all'ultimo che è n .

5.3.3 Nash-Sutcliffe

Assume i valori tra meno infinito e 1, è un indice di performance del modello. Se il valore tende a 1, l'idrogramma simulato riproduce fedelmente i valori osservati; se il valore tende a 0 la serie simulata è accurata quanto la media della serie osservata; invece è tanto più negativo quanto più c'è discrepanza tra simulazione e osservazione. Si discosta molto rapidamente dall'ottimo anche per differenze molto piccole.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{i,OSS} - Q_{SIM})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{i,OSS} - \overline{Q_{OSS}})^2}$$

6 Risultati

Si sono effettuate simulazioni con due diversi modelli di infiltrazione precedentemente descritti nel **paragrafo 4.4.2** per valutare l'efficacia del metodo in diversi casi.

Dato che il metodo consiste in un'ottimizzazione globale, i diversi indici statistici utilizzati per valutare le simulazioni sono stati prima calcolati per ciascun evento di precipitazione, poi se ne è calcolata la media aritmetica. Ciascuna simulazione è quindi giudicata in base a 4 indicatori statistici globali, ciascuno calcolato come media dello stesso indicatore per ciascun evento per ciascuna stazione di misura. Si è poi indicata la simulazione che in maniera migliore modella il bacino, selezionata in base agli indicatori statistici.

Data la natura globale dell'ottimizzazione dei parametri, è difficile riscontrare una simulazione che ricalchi perfettamente i dati delle osservazioni. Tuttavia il risultato è quello del migliore adattamento medio.

6.1 Philip

Si sono eseguite 9 simulazioni applicando il modello di infiltrazione di Philip: la prima è stata effettuata lasciando tutti i parametri invariati rispetto a ciò che è stato fornito tramite le mappe raster. In quelle successive si è proceduto a variare un fattore moltiplicativo alla volta, per modificare un parametro solo ad ogni simulazione.

In *tabella 22* si riportano quindi i valori dei parametri moltiplicativi per ciascuna simulazione, e i relativi indicatori statistici ottenuti.

Sim.	K	K _{prof}	Z	Err _Q	Err _{Q,Ass}	RMSE	E _{NS}
	Scale Factor						
Sim0	1	1	1	-28.36	68.76	1920.99	-1.35
Sim1	0.01	1	1	47.50	82.50	1665.75	-2.65
Sim2	0.01	100000	1	71.72	84.08	1608.51	-3.77
Sim3	0.01	100000	2	60.04	78.82	1504.52	-2.96
Sim4	0.1	100000	2	53.58	72.93	1371.58	-2.86
Sim5	1	100000	2	15.06	53.63	1225.10	-2.50
Sim6	1	1000000	2	264.28	269.97	6902.50	-133.36
Sim7	1.5	100000	2	3.70	52.53	1239.31	-2.63
Sim8	0.5	100000	2	32.06	60.10	1233.85	-2.50

Tabella 22 Parametri delle simulazioni relative al modello di infiltrazione di Philip con rispettivi indicatori statistici globali

La migliore simulazione tra quelle effettuate risulta quella denominata "sim7", in quanto minimizza l'errore sulla portata di picco e l'RMSE, indici che sono stati preferiti al non ottimale indice di Nash-Sutcliffe.

I parametri sono stati modificati nella seguente maniera:

- La permeabilità k del suolo è stata aumentata moltiplicandola per un fattore 1.5. Ciò ha comportato un aumento della quantità d'acqua infiltrata nel terreno;
- La permeabilità profonda del suolo k_{prof} è stata aumentata moltiplicandola per un fattore 100000. Questo ha aumentato la velocità del deflusso sotterraneo e quindi una restituzione a valle più rapida dell'acqua infiltrata nel sottosuolo;
- La profondità del suolo Z è stata aumentata moltiplicandola per un fattore 2. In questa maniera si è aumentato il volume disponibile per l'acqua nel sottosuolo prima di giungere a completa saturazione;

Ora si mostrano alcuni grafici per mostrare i risultati ottenuti:

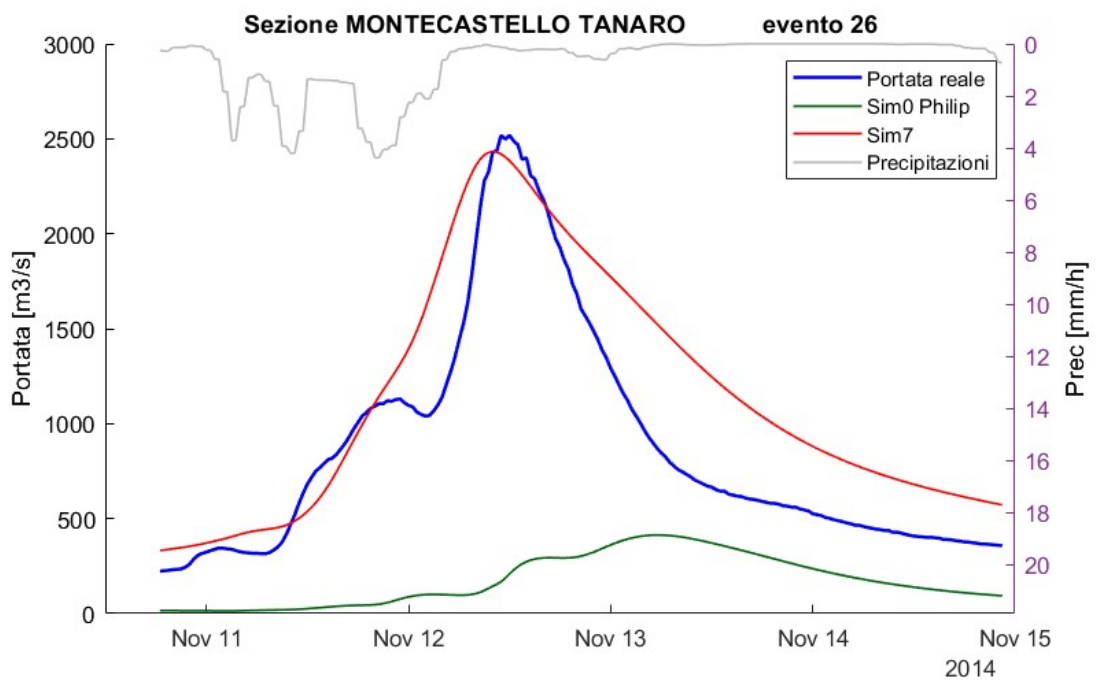


Figura 32 Portata osservata e simulata per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro

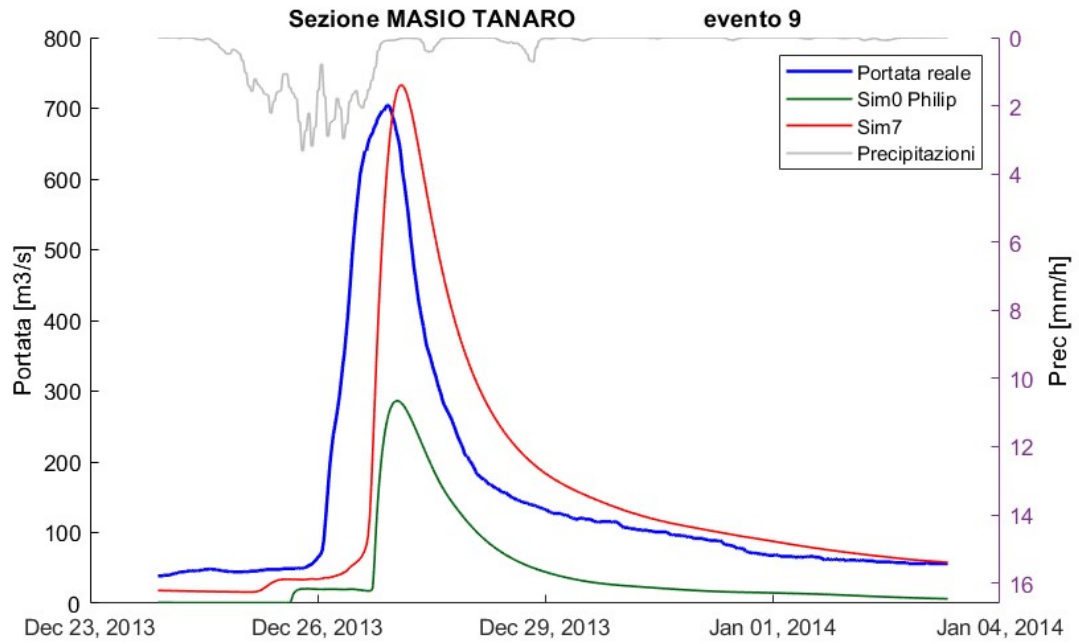


Figura 33 Portata osservata e simulata per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro

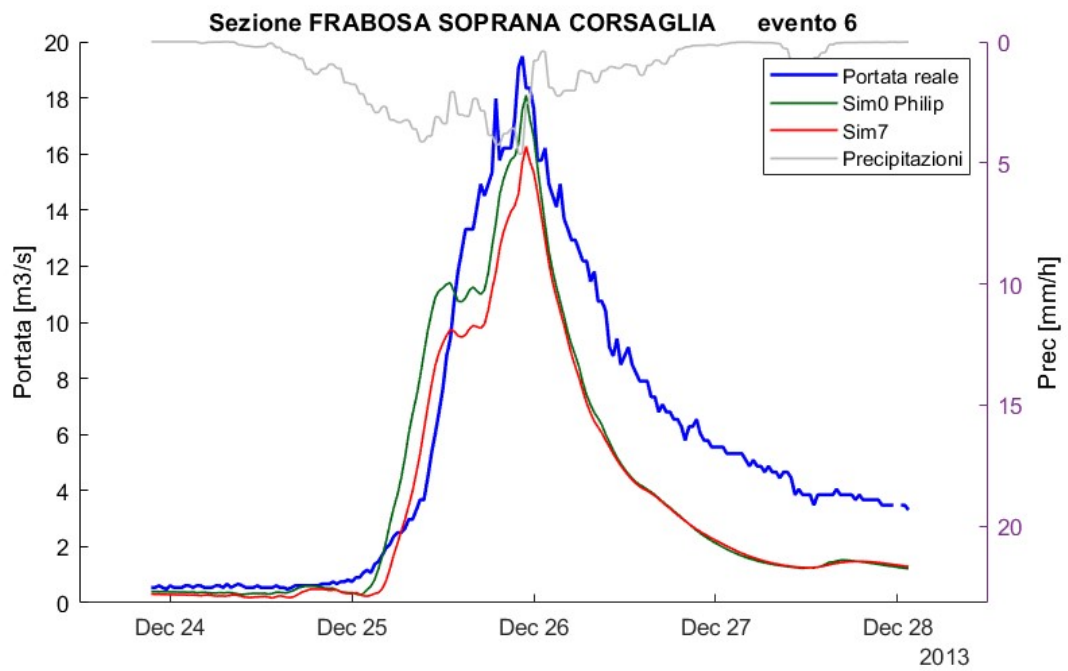


Figura 34 Portata osservata e simulata per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia

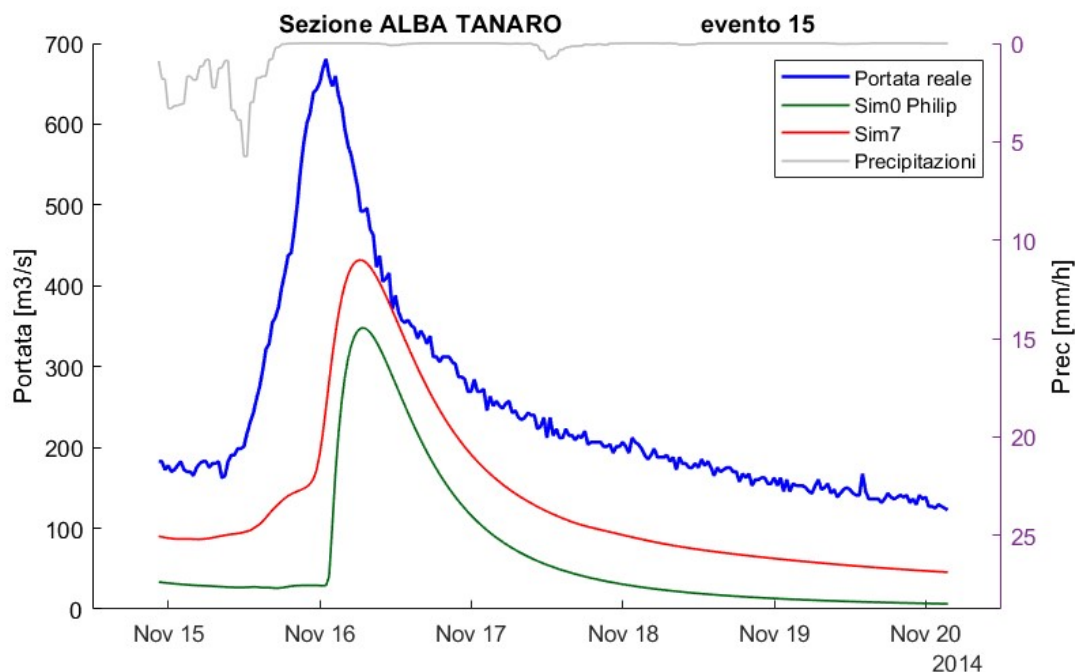


Figura 35 Portata osservata e simulata per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro

6.2 CN

Successivamente si sono eseguite 8 simulazioni applicando il modello di infiltrazione del Curve Number: la prima è stata effettuata lasciando tutti i parametri invariati rispetto a ciò che è stato fornito tramite le mappe raster. In quelle successive si è proceduto a variare un fattore moltiplicativo o additivo alla volta, per modificare un parametro solo ad ogni simulazione.

In *tabella 23* si riportano i valori dei parametri modificatori per ciascuna simulazione, e i relativi indicatori statistici ottenuti.

Sim.	K	K _{prof}	Z	CN	Err _Q	Err _{Q,Ass}	RMSE	E _{NS}
	Scale Factor			Off-set factor				
Sim0CN	1	1	1	0	0.46	66.21	1660.05	-1.31
Sim1CN	1	10000	1	0	6.42	62.26	1569.84	-1.18
Sim2CN	1	100000	1	0	61.80	78.63	1431.25	-4.99
Sim3CN	0.1	100000	1	0	62.01	78.38	1438.00	-3.65
Sim4CN	0.1	10000	1	0	24.99	71.61	1484.56	-1.57
Sim5CN	0.1	10000	2	0	13.69	66.37	1475.01	-1.27
Sim6CN	0.1	10000	2	-5	9.56	65.14	1462.87	-1.18
Sim7CN	0.1	10000	2	-10	6.11	64.16	1458.14	-1.12

Tabella 23 Parametri delle simulazioni relative al modello di infiltrazione del Curve Number con rispettivi indicatori statistici globali

La migliore simulazione tra quelle effettuate risulta quella denominata "*sim0*", cioè quella in cui non sono effettuate correzioni ai diversi parametri. Questa simulazione tra tutte minimizza l'errore sulla portata di picco, mantiene un valore contenuto dell'indice di Nash-Sutcliffe . Il valore risultante dell'indice RMSE non è ottimizzato, tuttavia la differenza rispetto al migliore è del 13%, accettabile visto l'ottimo risultato sugli altri indici.

Ora si riportano alcuni grafici per mostrare i risultati ottenuti:

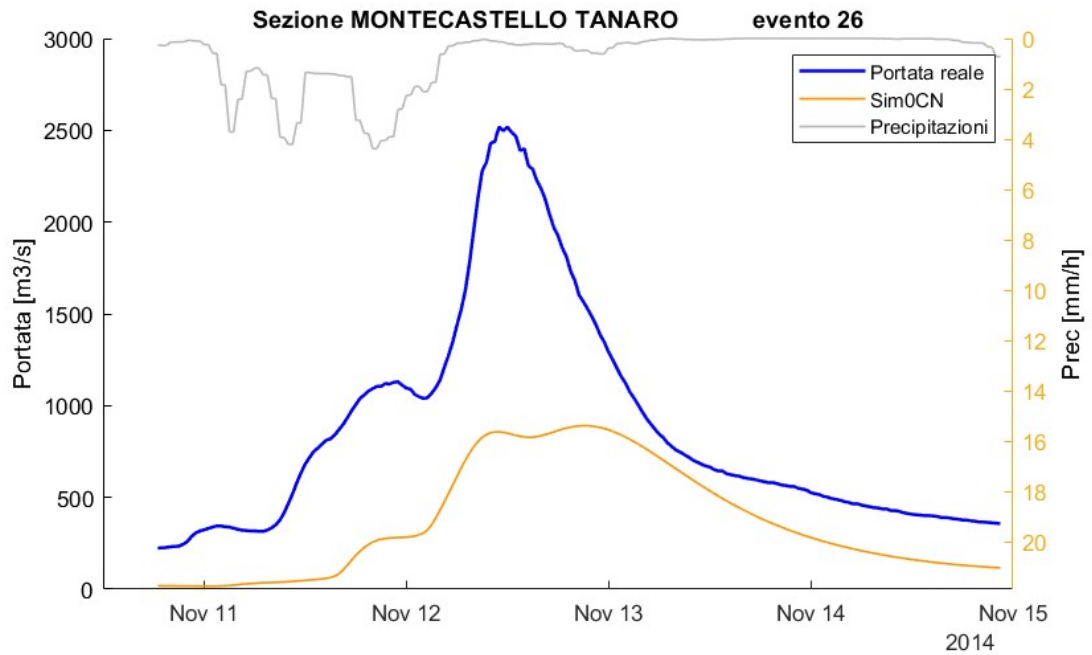


Figura 36 Portata osservata e simulata per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro

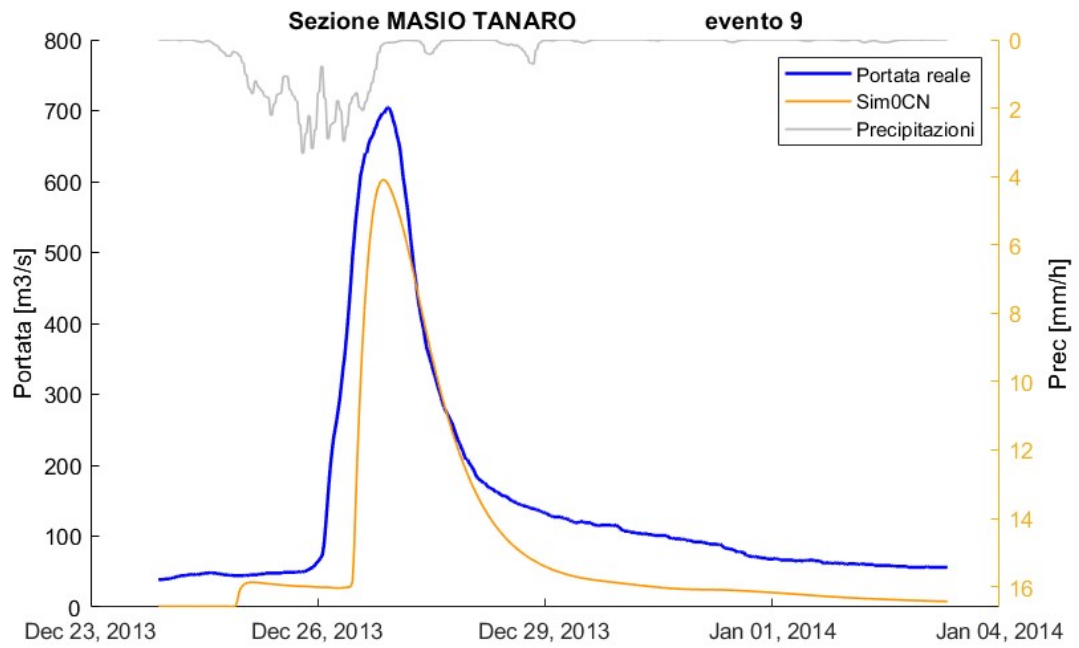


Figura 37 Portata osservata e simulata per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro

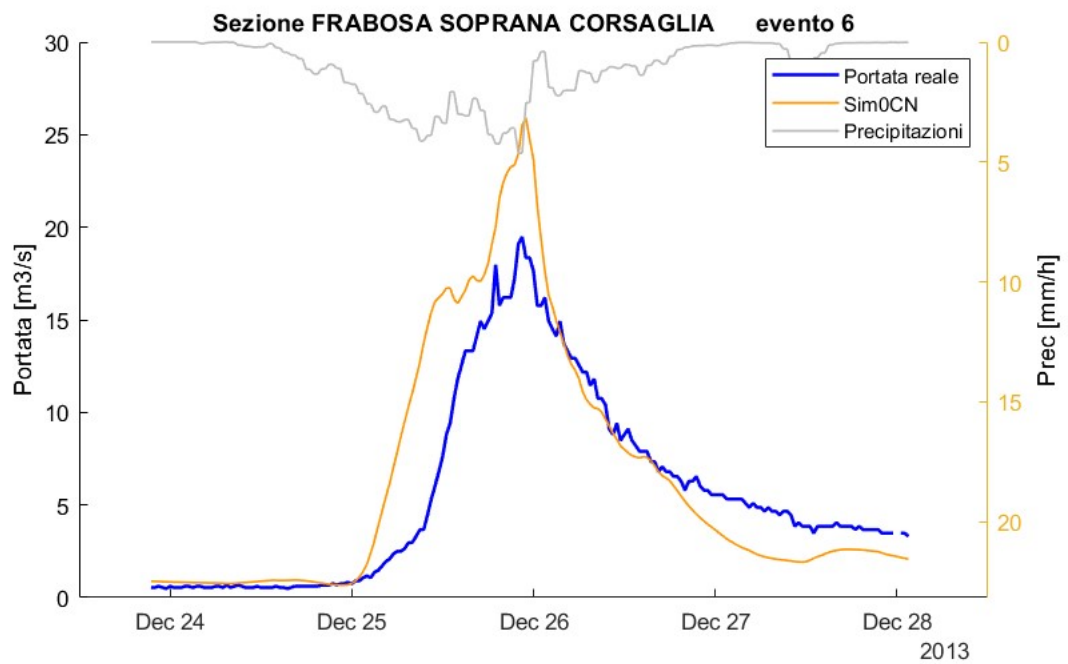


Figura 38 Portata osservata e simulata per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia

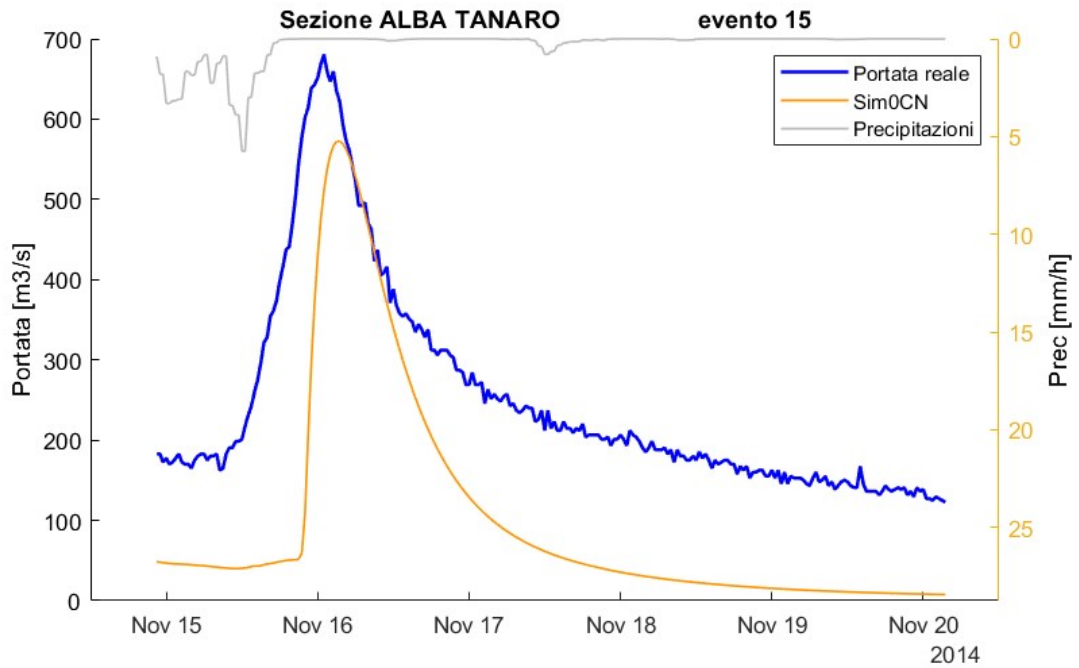


Figura 39 Portata osservata e simulata per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro

Poi si mostrano anche, per lo stesso evento in una determinata sezione, il confronto tra la simulazione ottenuta applicando il modello di infiltrazione di Philips e il modello del Curve Number.

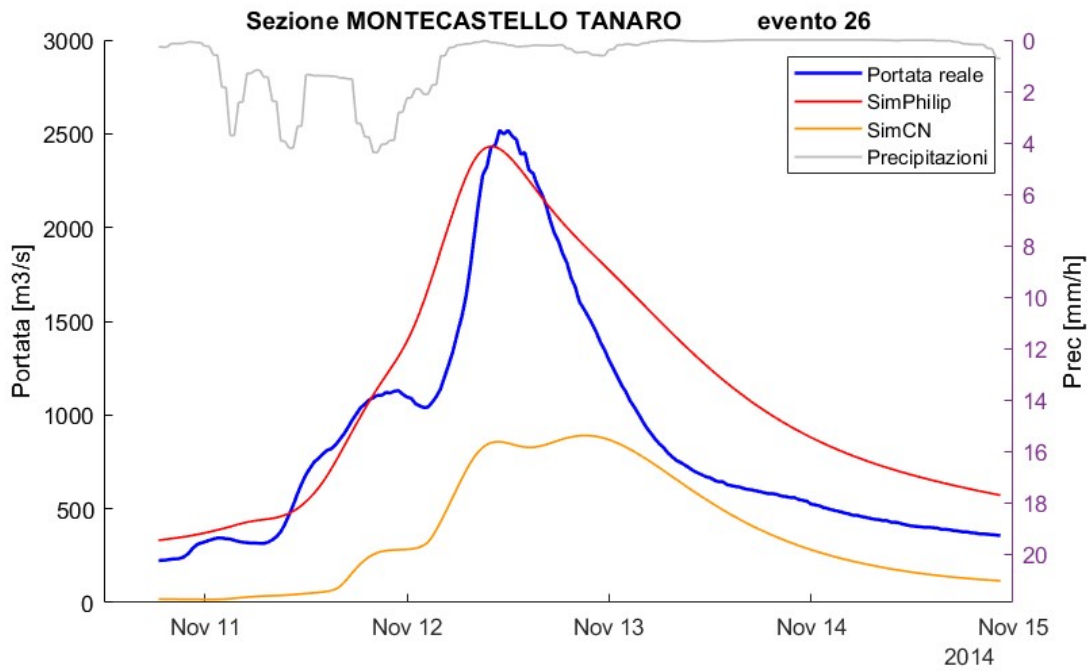


Figura 40 Portate osservate e simulate per l'evento 26 della stazione di misura di Montecastello, sul fiume Tanaro

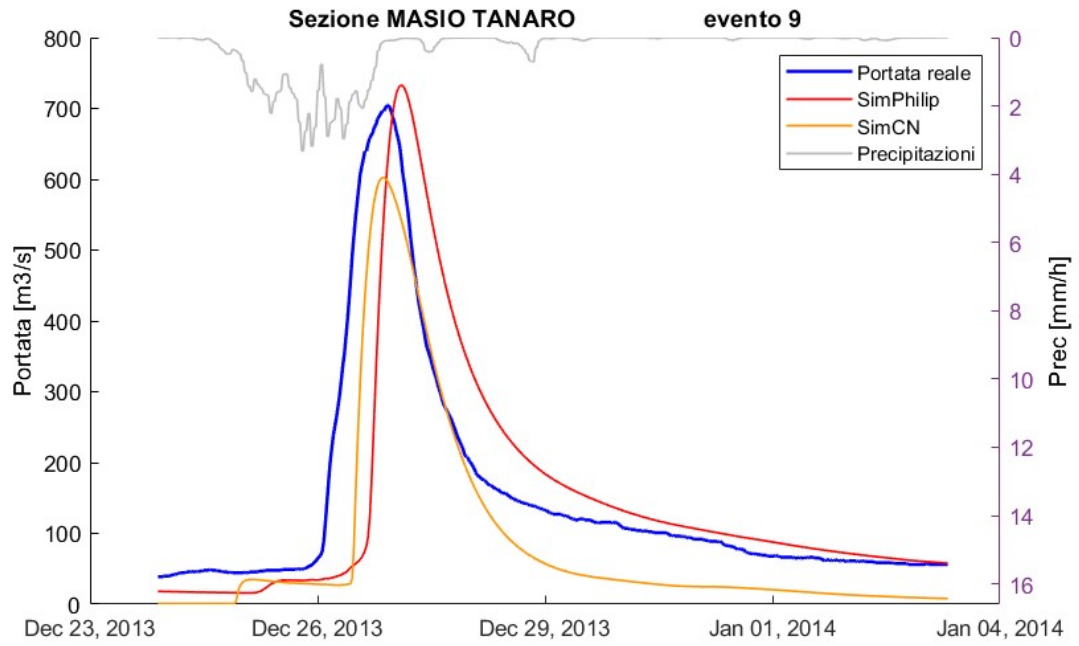


Figura 41 Portate osservata e simulate per l'evento 9 della stazione di misura di Masio, sul fiume Tanaro

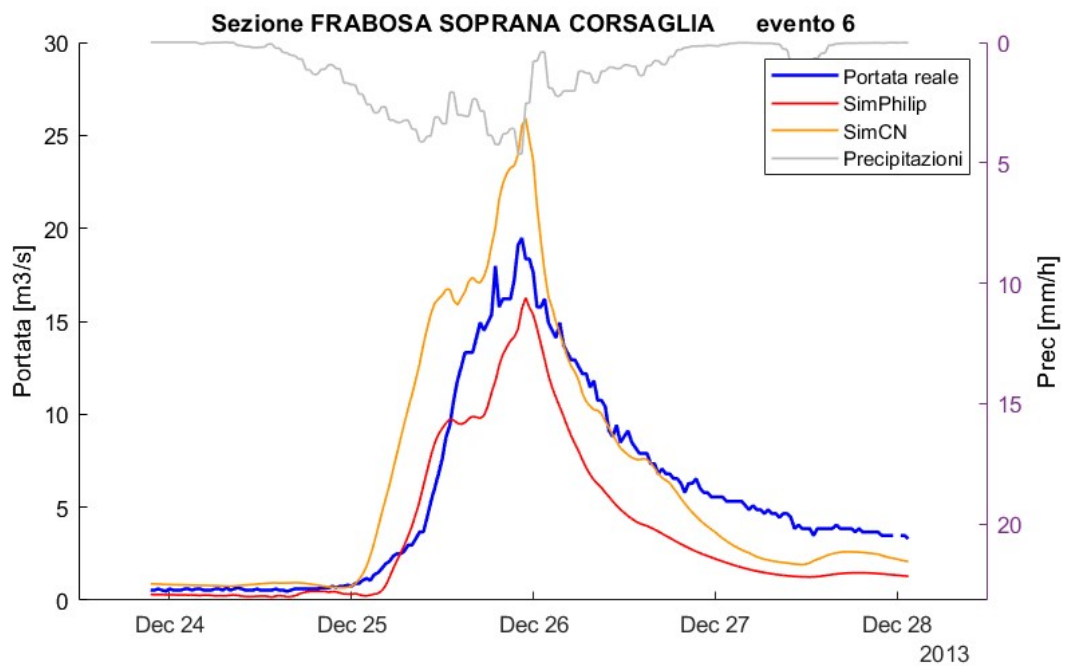


Figura 42 Portate osservata e simulate per l'evento 6 della stazione di misura di Frabosa Soprana, sul fiume Corsaglia

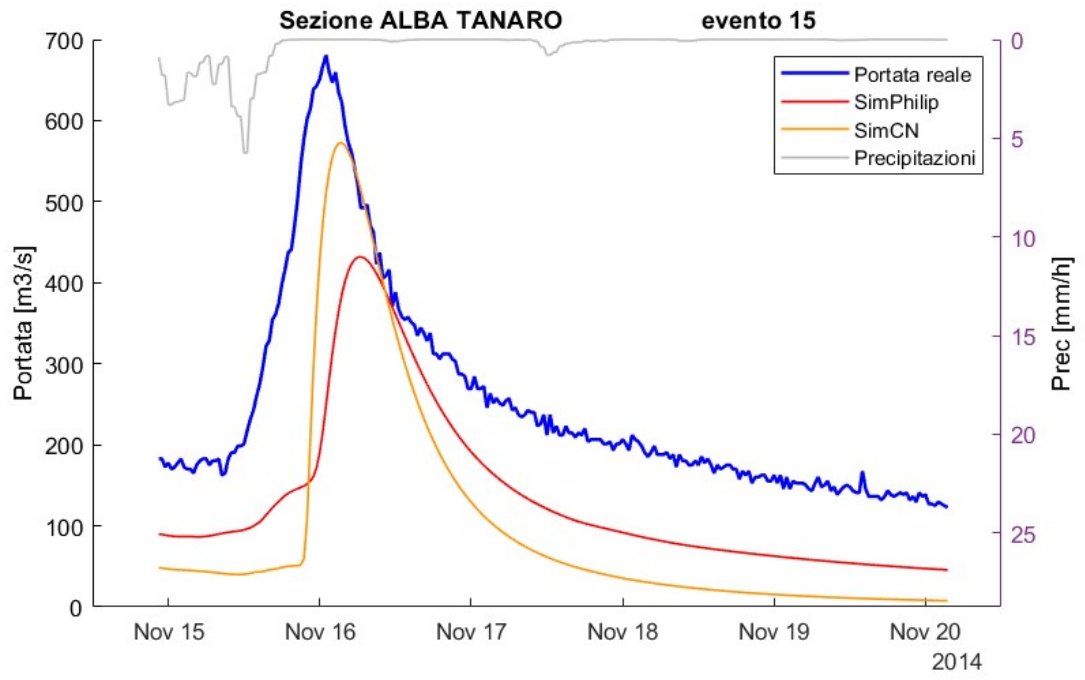


Figura 43 Portate osservata e simulate per l'evento 15 della stazione di misura di Alba, sul fiume Tanaro

7 Conclusioni

Si può notare come, considerando un singolo evento in una particolare sezione, la modifica dei parametri non sempre comporta delle variazioni che migliorano l'adattamento, o non lo migliorano a sufficienza. Addirittura in alcuni casi il risultato si allontana dalle osservazioni. Tuttavia è l'approccio globale della calibrazione a portare a questi comportamenti nelle simulazioni: si ricerca il migliore adattamento globale, non locale. Se in alcuni casi l'errore sul picco dotato di segno risulta contenuto, la media dei valori assoluti dell'errore rimane abbastanza elevata, intorno al 50%.

Rispetto ai risultati ottenuti da Corso Elena (Corso 2018) con correzioni regionalizzate l'adattamento è peggiorato in quanto l'errore sul picco da lei ottenuto risulta sempre contenuto nell'intervallo di accettabilità di $\pm 20\%$. In compenso in questo lavoro il risultato è stato ottenuto più rapidamente: anziché dover eseguire una calibrazione per ciascun sottobacino, se ne sono effettuate in maggior quantità sul bacino intero.

Dal confronto invece dei due metodi di infiltrazione, risulta che il metodo del Curve Number ha portato subito alla migliore soluzione ottenuta, senza necessità di modifica dei parametri; in compenso tramite il metodo di Philip si è giunti a simulazioni che si adattano meglio alle osservazioni.

Studi futuri più approfonditi sono necessari per stimare in maniera migliore i parametri correttivi e il metodo di stima degli stessi. Inoltre la possibilità di poter considerare anche gli invasi regolati, naturali o artificiali, implementando il software con le regolazioni degli impianti idroelettrici o di prelievo, comporterebbe una migliore conoscenza e consapevolezza di ciò che avviene sul bacino, aumentando l'efficienza e l'accuratezza del modello.

8 Bibliografia e sitografia

ARPA Piemonte. <http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2007/pdf-il-piemonte-nel-cambiamento-climatico>.

—. http://www.idrologia.polito.it/web2/open-data/cd_Dati_Regione_Piemonte/50_anni_dati_meteo_Piemonte/clima_ed_indicatori.htm.

Bras, R. L. *Hydrology - An introduction to hydrologic science*. Addison-Wesley, 1989.

Corbari, Chiara, Giovanni Ravazzani, e Marco Mancini. «La simulazione degli afflussi ai laghi alpini ad uso plurimo per la gestione della politica di regolazione.» *Approvvigionamento e distribuzione idrica: esperienze, ricerca e innovazione*. Ferrara, 2007. 65-75.

Corbari, Chiara, Giovanni Ravazzani, J. Martinelli, e Marco Mancini. «Elevation based correction of snow coverage retrieved from satellite images to improve model calibration.» *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009: 639-649.

Corso, Elena A. M. «Stime di precipitazione da satellite della costellazione GPM per la modellazione idrologica del bacino del Tanaro.» *Tesi di laurea magistrale*. A cura di Giovanni Ravazzani. Politecnico di Milano, 2018. 128.

Cunge, J. «Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method – Discussion.» *J. Hydraulics Engineering*, 2001: 239.

Hargreaves, G. H., e Z. A. Samani. «Reference crop evapotranspiration from temperature.» *Applied engineering in agriculture*, 1985.

IRPI. <https://polaris.irpi.cnr.it/cinquanta-anni-di-frane-ed-inondazioni-in-italia-1964-2013/>.

ISPRA. <https://www.isprambiente.gov.it/it>.

Martinec, J., e A. Rango. «The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting.» *IAHS*, 1960.

McCarthy, Gerald T. *The unit hydrograph and flood routing*. 1939.

Moisello, Ugo. *Idrologia tecnica*. La goliardica pavese, 1998.

Montaldo, N., Giovanni Ravazzani, e Marco Mancini. «On the prediction of the Toce alpine basin floods with distributed hydrologic models.» *Hydrological Process*, 2007: 608-621.

Montaldo, Nicola, John D. Albertson, Marco Mancini, e Ger Kiely. «Robust simulation of root zone soil moisture with assimilation of surface soil moisture data.» *Water resources research* 37, n. 12 (2001): 2889-2900.

Montaldo, Nicola, Marco Mancini, e Renzo Rosso. «Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model.» *Hydrological Process*, 05 Febbraio 2004: 545-563.

Philip, J. R. «Theory of infiltration.» *Advances in hydrosciences*, 1969: 215-296.

Priestley, C. H. B., e R. J. Taylor. «On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters.» *Mont. Weather* 100 (1972): 81-92.

Rabuffetti, D., Giovanni Ravazzani, S Barbero, e Marco Mancini. «Operational flood-forecasting in the Piemonte region – development and verification of a fully distributed physically-oriented hydrological model.» *Advances in Geosciences*, 2009: 111-117.

Rabuffetti, D., Giovanni Ravazzani, S. Barbero, e Marco Mancini. «Operational flood-forecasting in the Piemonte region – development.» *Advances in Geosciences*, 2009.

Ravazzani, Giovanni, D. Rabuffetti, Chiara Corbari, e Marco Mancini. «VALIDATION OF FEST-WB, A CONTINUOUS WATER BALANCE.» *31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Perugia, 2008.

Ravazzani, Giovanni, Marco Mancini, e Claudio Meroni. «Design hydrograph and routing scheme for flood mapping in a dense urban area.» *Urban Water Journal*, 22 July 2009: 221-231.

Ravazzani, Giovanni, Marco Mancini, Ilaria Giudici, e Paolo Amadio. «Effects of soil moisture parameterization on a real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds.» *IAHS*, 2007: 407-416.

Regione Piemonte. «Piano di Tutela delle Acque (D.C.R. n. 117-10731 del 13 marzo 2007).» Direzione Pianificazione Risorse Idriche, 2007.

Saharia, Manabendra, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Humberto Vergara, J. Jonathan Gourley, e Yang Hong. «Characterization of floods in the United States.» *Houral of Hydrology*, 6 March 2017: 524-535.

SISP Sistema Informativo Sistema Piemonte. *Catasto Sbarramenti*.

Szél, Sandor, e Gaspar Csaba. «On the negative weighting factors in the Muskingum-Cunge scheme.» *Journal of Hydraulic Research*, 2000: 299-306.

Tarboton, D. G., T. G. Chowdury, e T. H. Jackson. «A spatially distributed energy balance snowmelt model.» *IAHS*, 1995: 141-155.

Todini, E. «A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach.» *Hydrology and Earth System Science*, n. 11 (2007): 1645-1659.

U.S.D.A. SCS. «SCS-CN method.» Cap. 10 in *In hydrology*. Washington D.C., 1956.

9 Appendice

Si riportano ora le mappe raster di tutti i parametri utilizzati dal modello, tutti i grafici di ciascun evento per le diverse sezioni ottenuti e il codice di Matlab utilizzato per elaborare i dati.

9.1 Parametri e mappe GIS



Figura 44 Maschera del bacino del Tanaro



Figura 45 Fiume Tanaro e affluenti principali

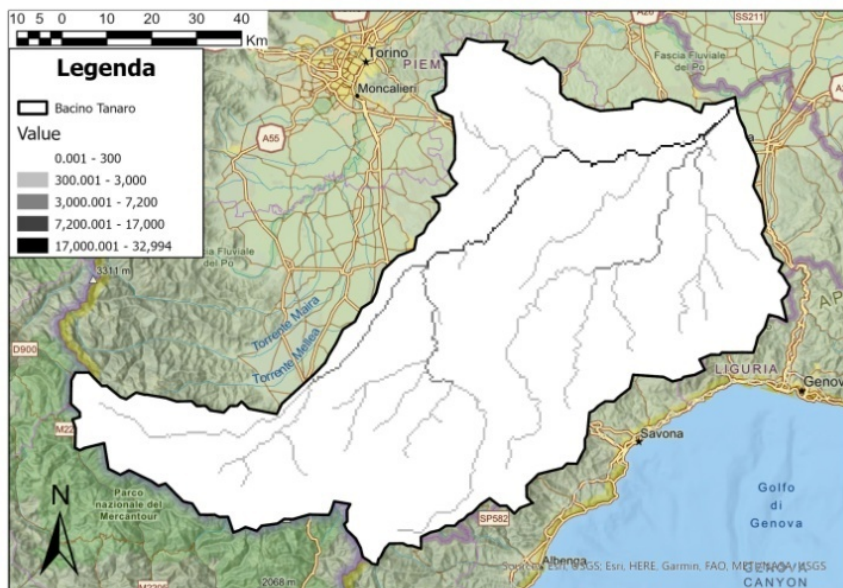


Figura 46 Mappa de "accumulation" del bacino



Figura 47 Mappa dell'esposizione del bacino

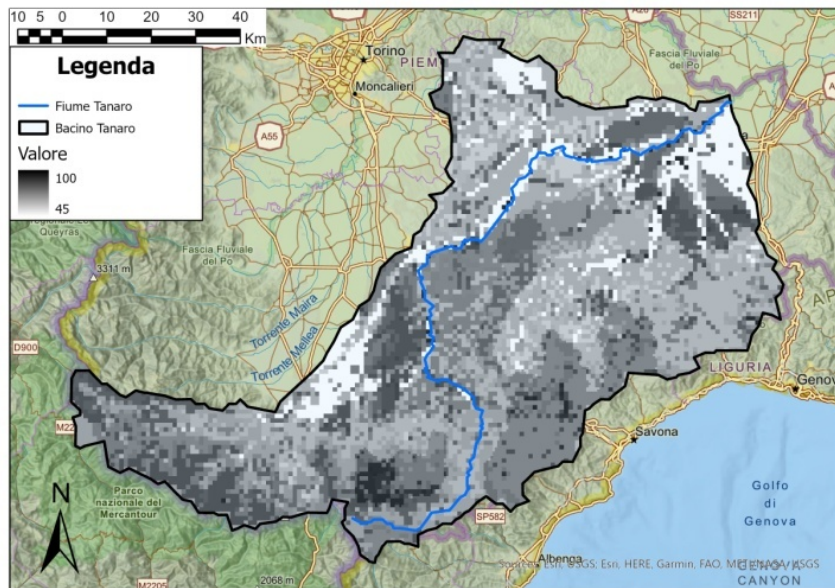


Figura 48 Mappa del CN sul bacino

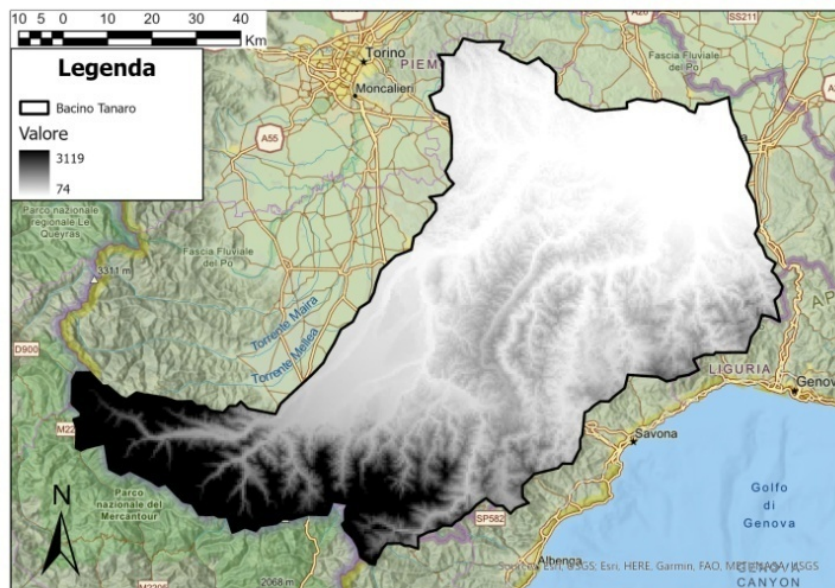


Figura 49 DEM del bacino

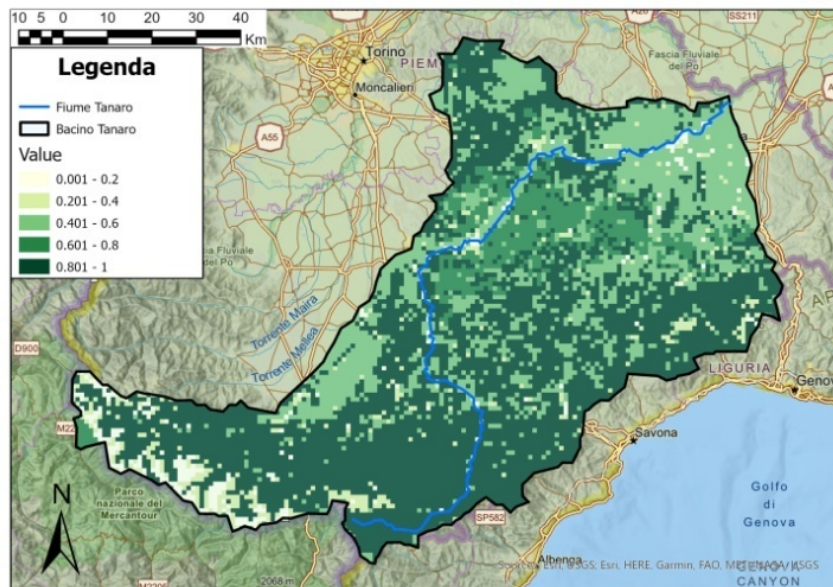


Figura 50 Mappa della frazione vegetale sul bacino

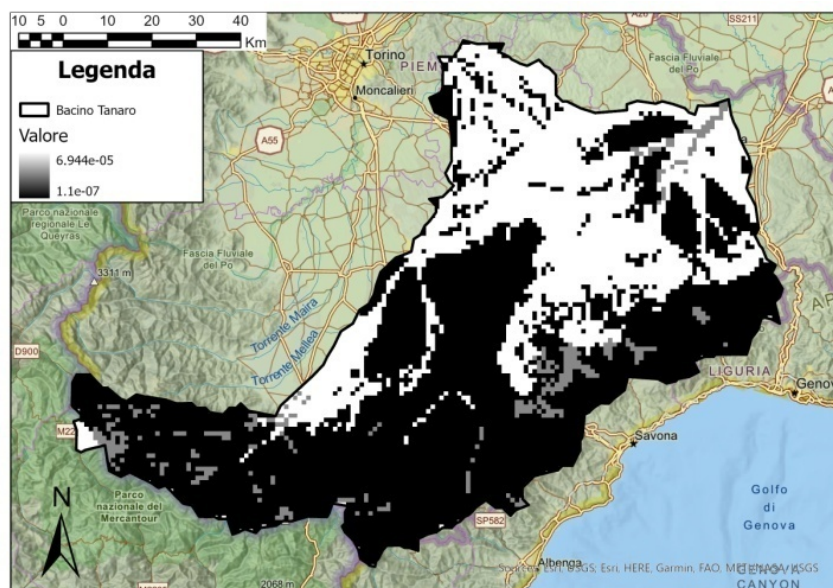


Figura 51 Mappa della permeabilità k del bacino

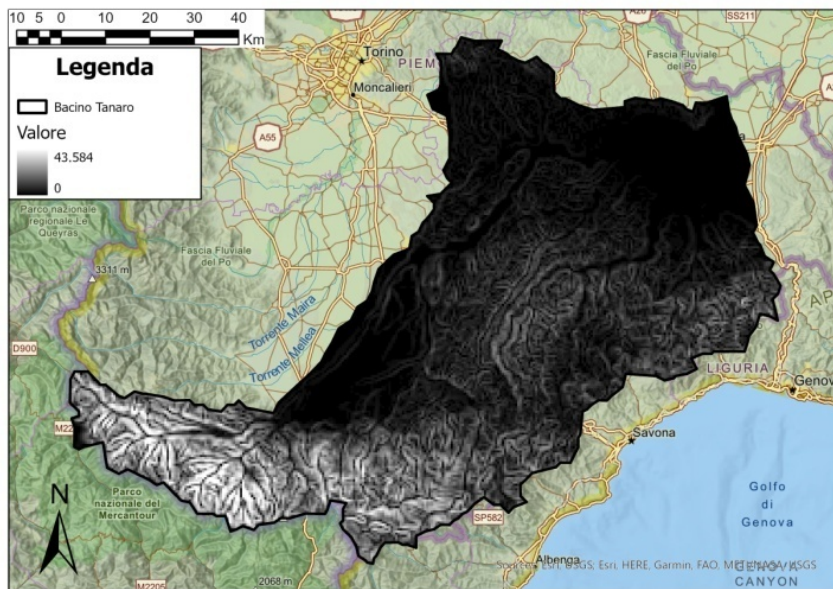


Figura 52 Mappa della pendenza del versante del bacino

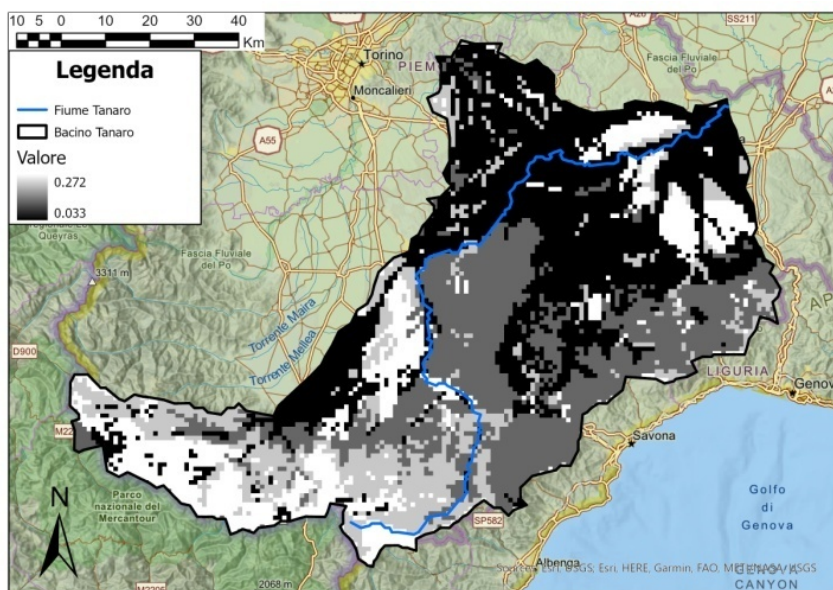


Figura 53 Mappa con la profondità del punto di appassimento sul bacino

9.2 Grafici

Per ciascuna sezione, si riportano i grafici delle portate osservate confrontate con le simulazioni effettuate con entrambi i metodi di infiltrazione.

9.2.1 Alba

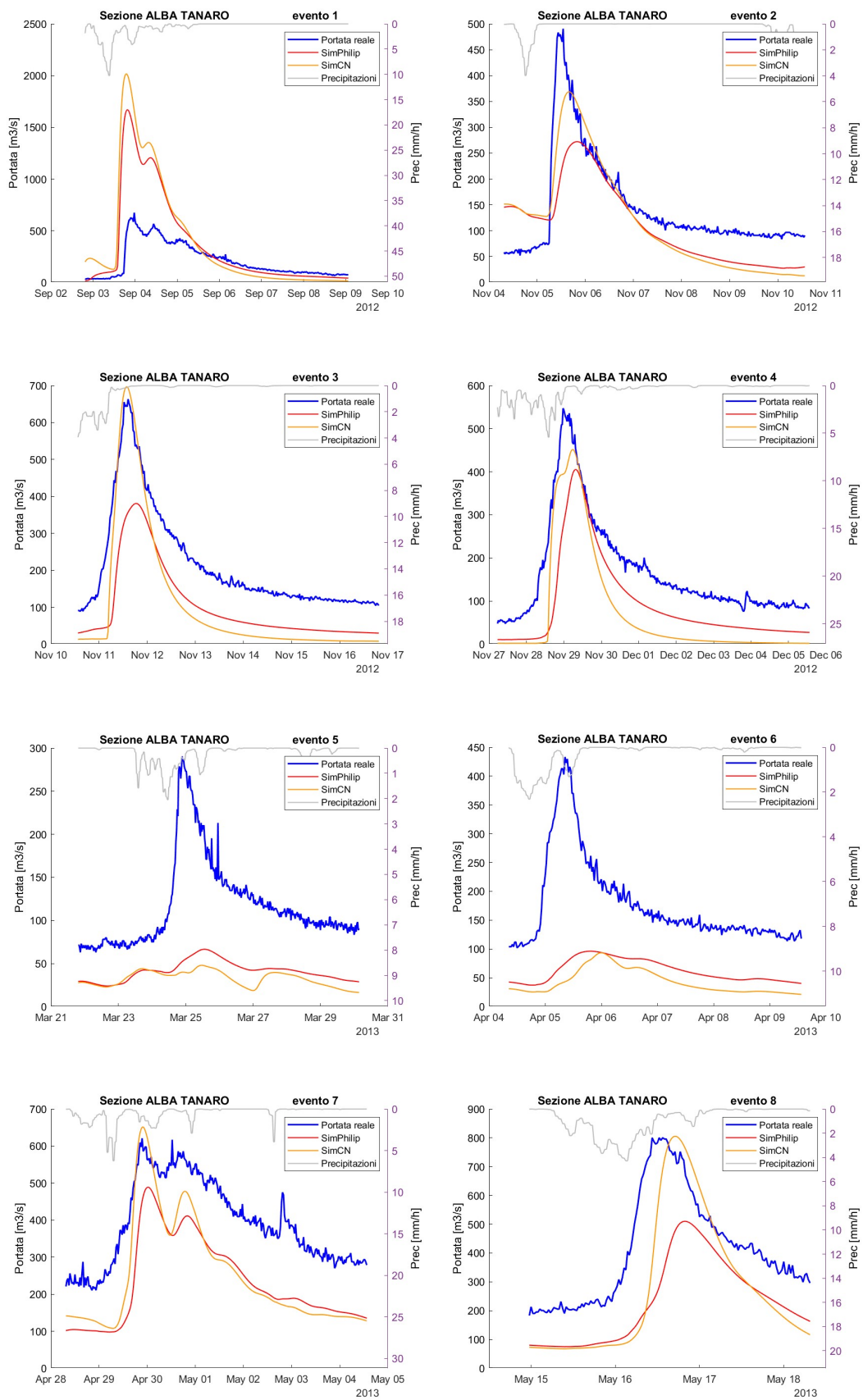


Figura 54 Sezione di Alba sul Tanaro, eventi da 1 a 8

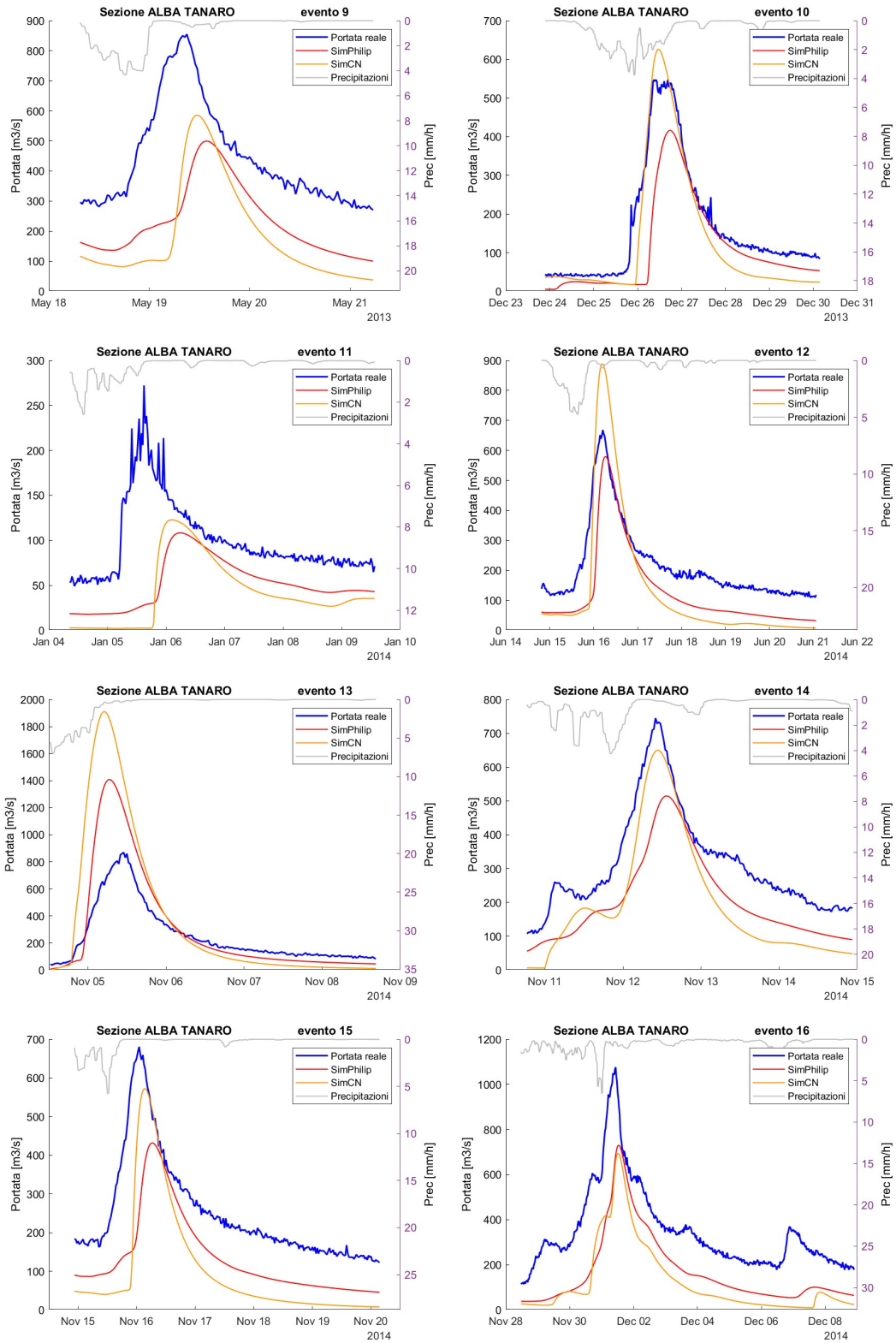


Figura 55 Sezione di Alba sul Tanaro, eventi da 9 a 16

9.2.2 Asti

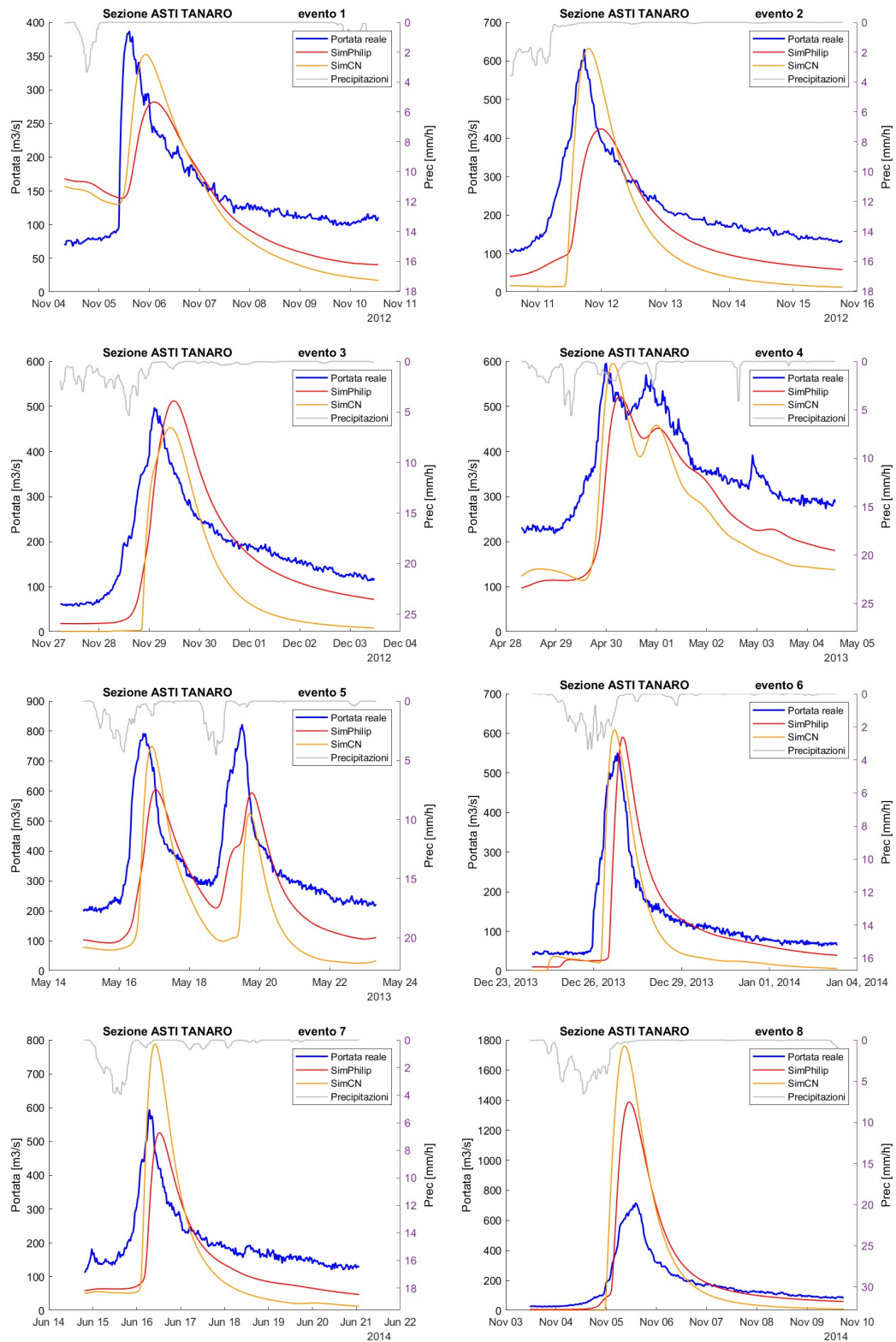


Figura 56 Sezione di Asti sul Tanaro, eventi da 1 a 8

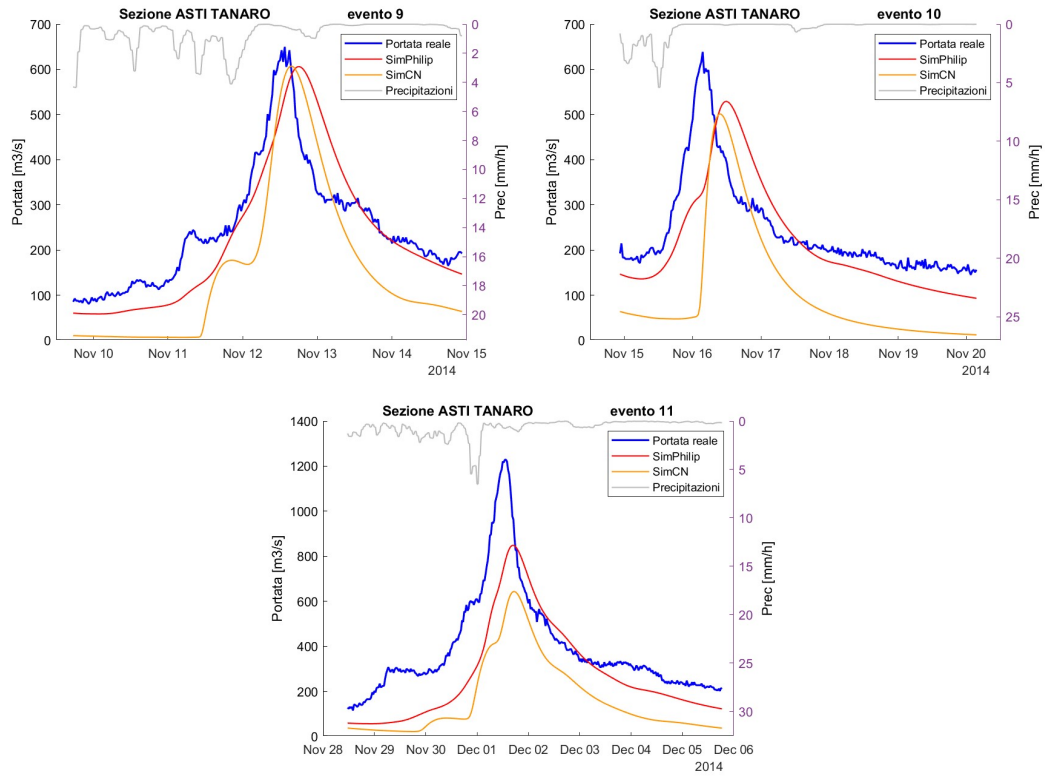


Figura 57 Sezione di Asti sul Tanaro, eventi da 9 a 11

9.2.3 Casal Cermelli

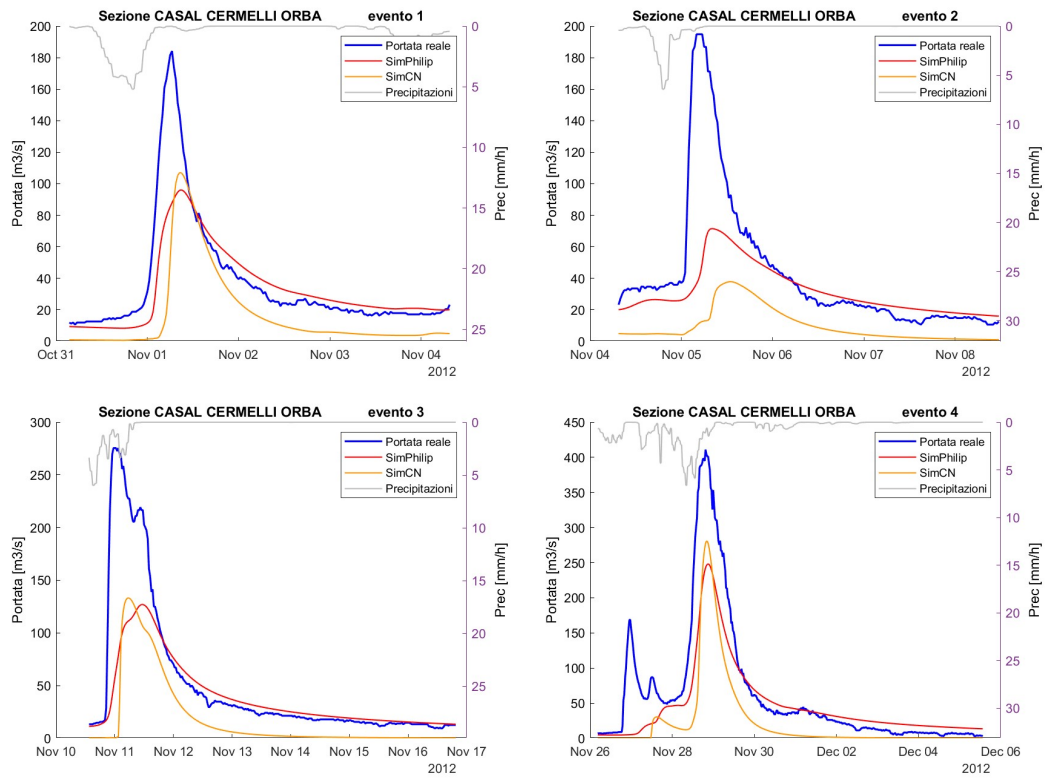
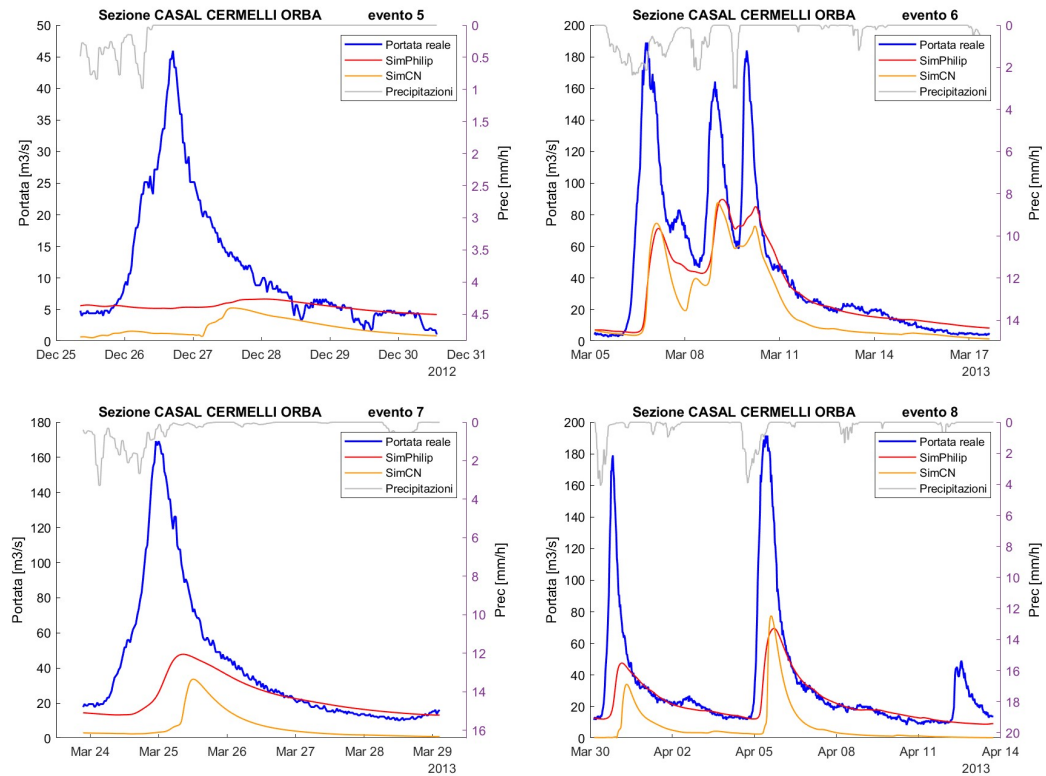


Figura 58 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 1 a 4



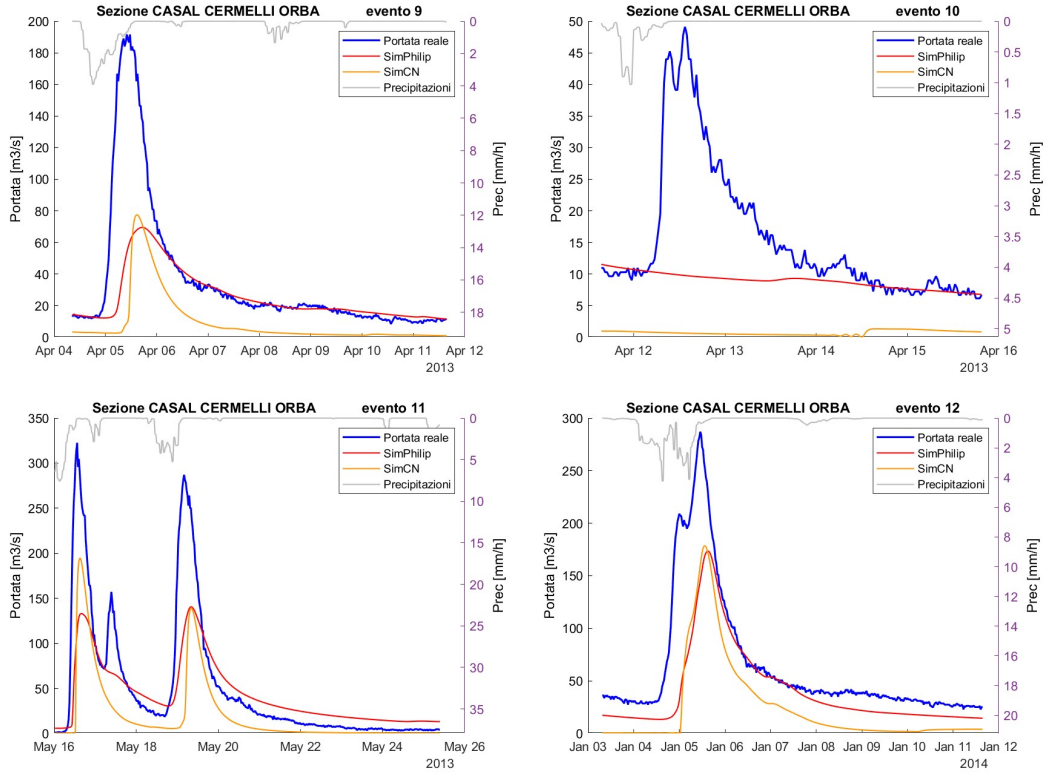
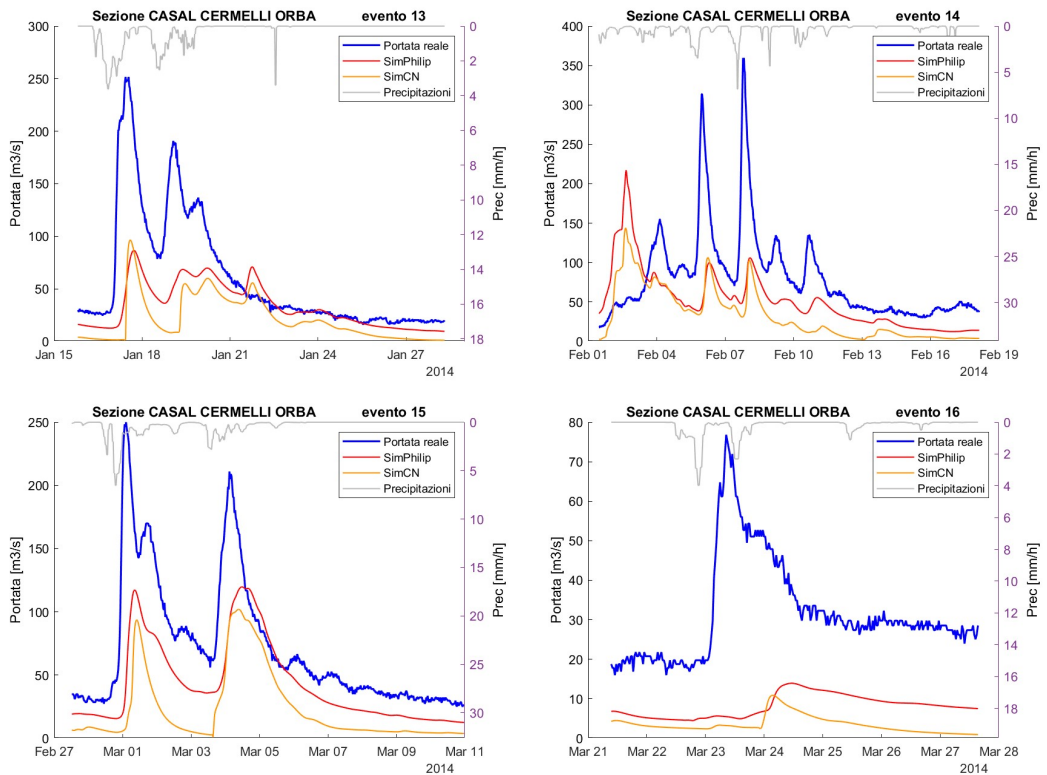


Figura 59 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 5 a 12



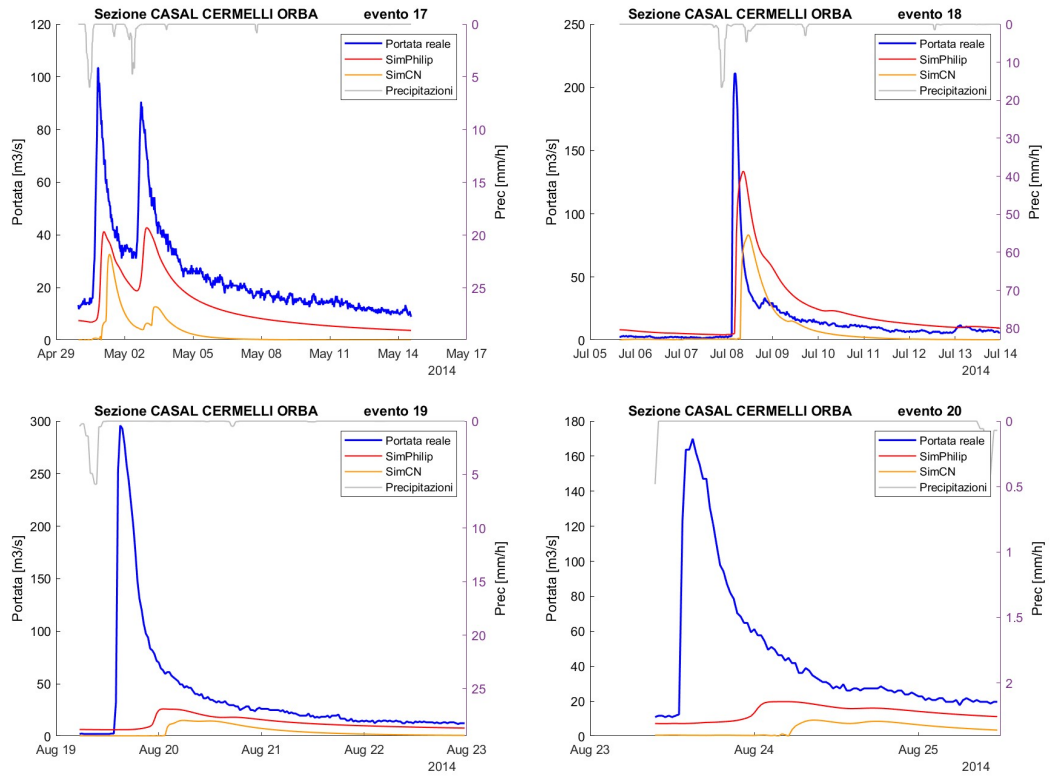


Figura 60 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 13 a 20

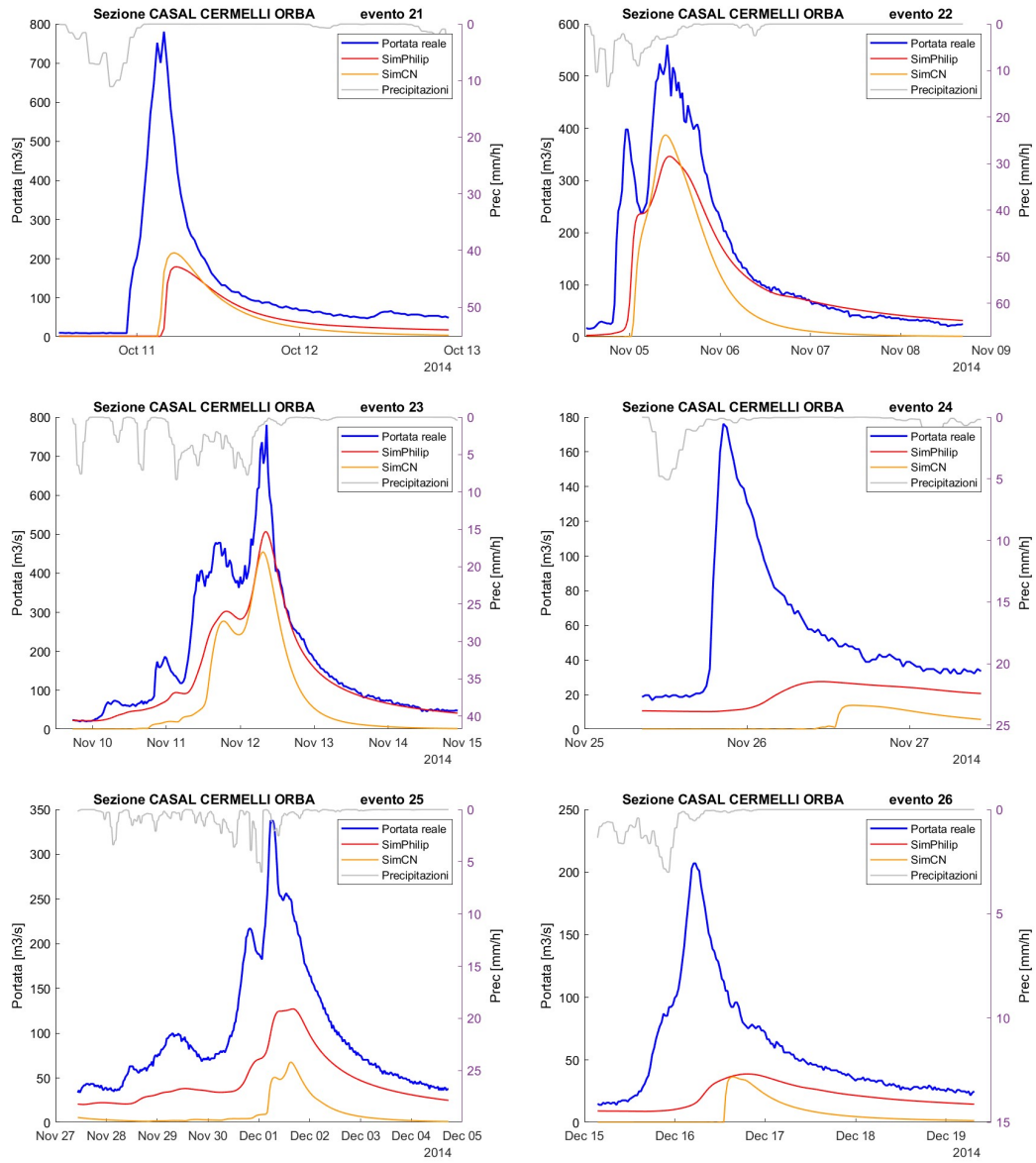


Figura 61 Sezione di Casal Cermelli sull'Orba, eventi da 21 a 26

9.2.4 Castelnuovo

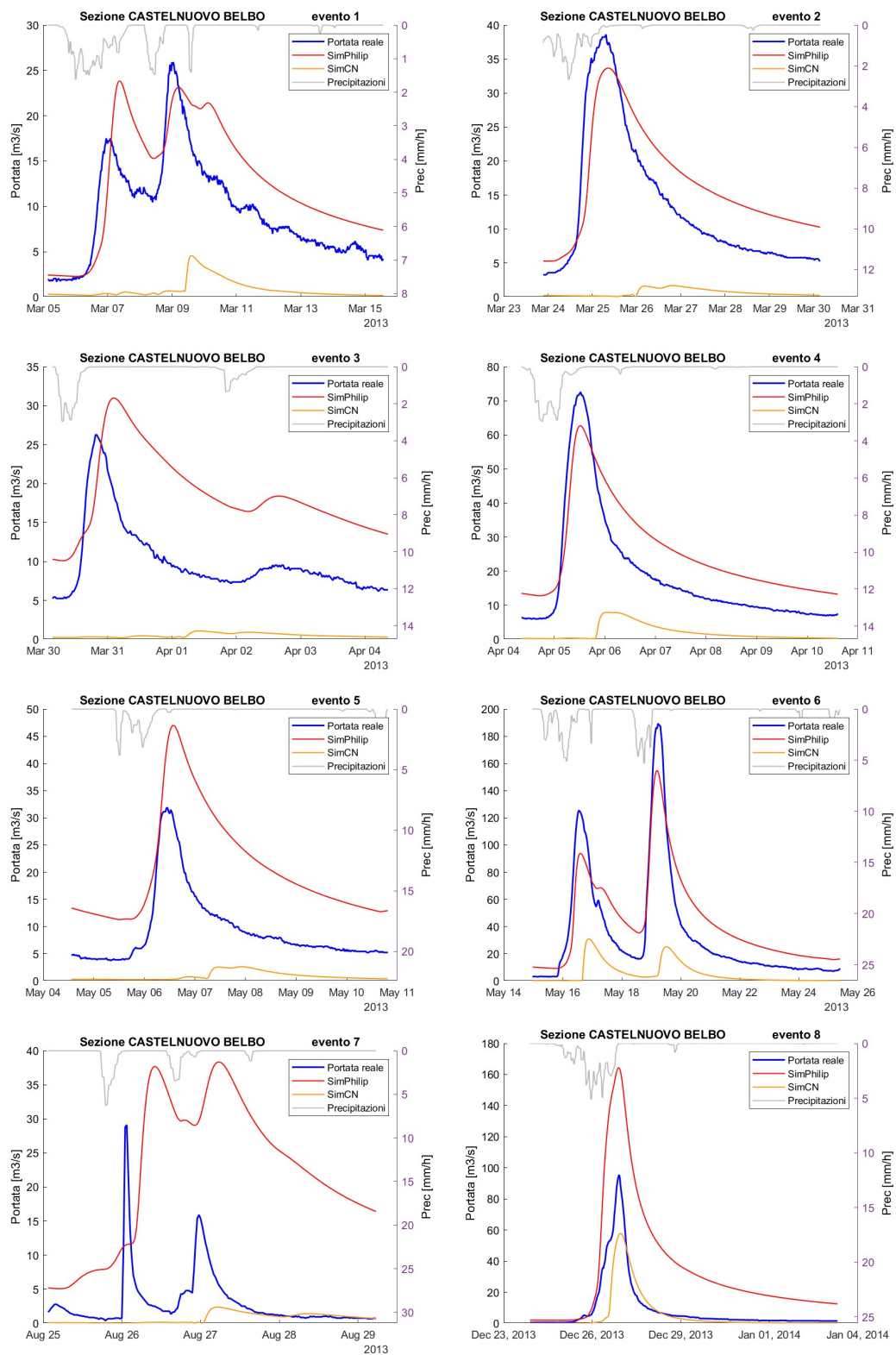


Figura 62 Sezione di Castelnuovo sul Belbo, eventi da 1 a 8

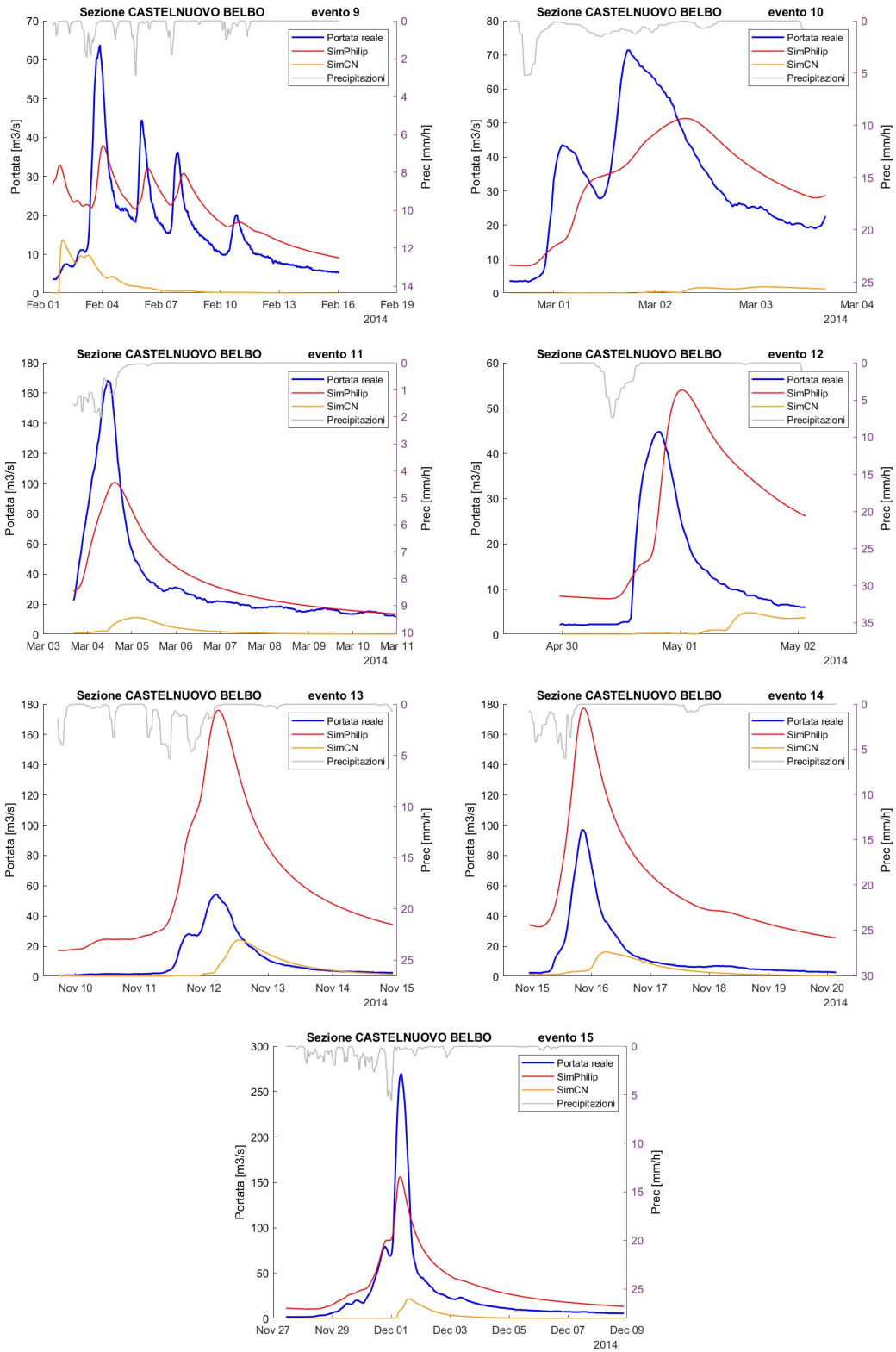


Figura 63 Sezione di Castelnuevo sul Belbo, eventi da 9 a 15

9.2.5 Farigliano

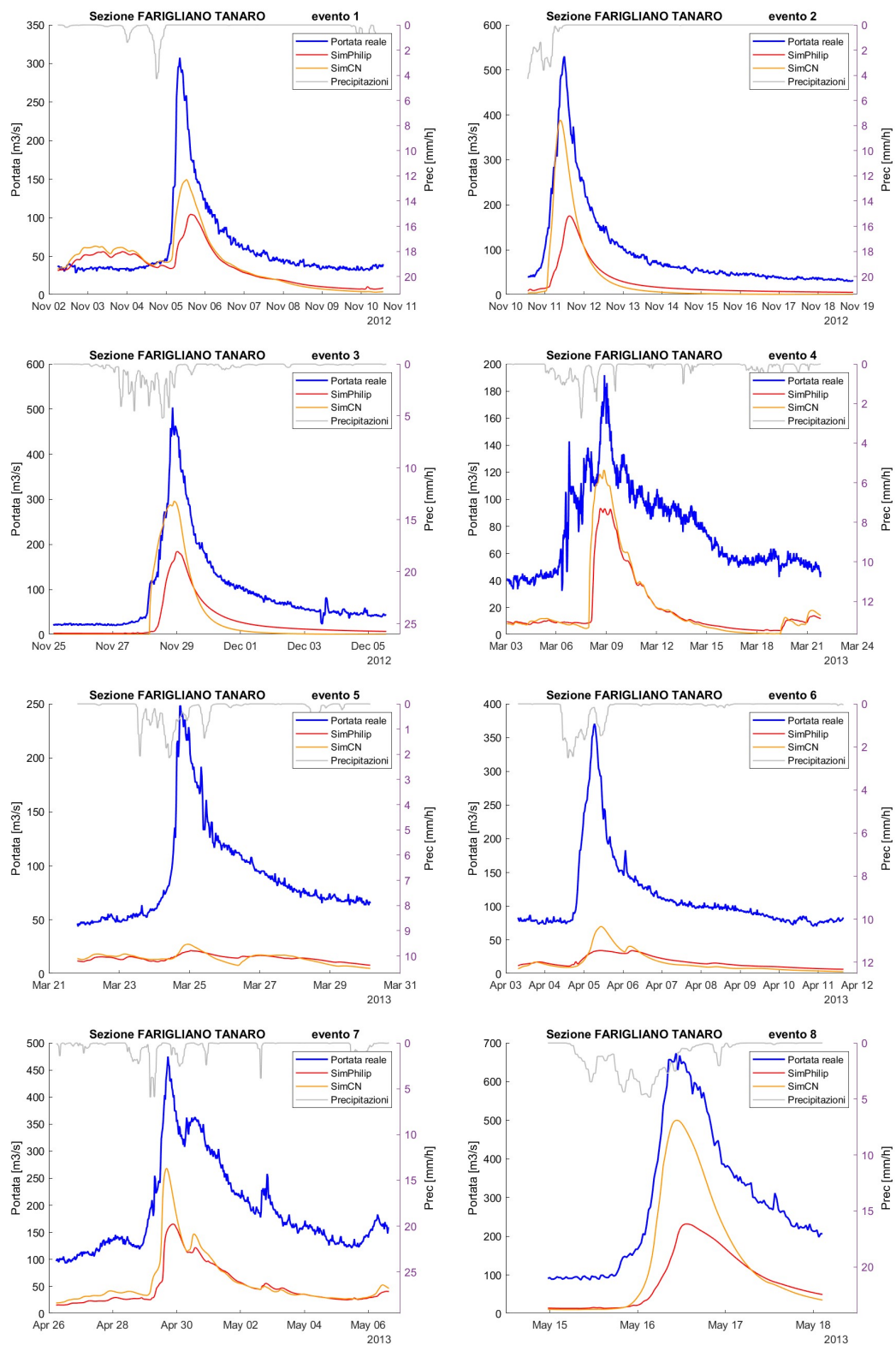


Figura 64 Sezione di Farigliano sul Tanaro, eventi da 1 a 8

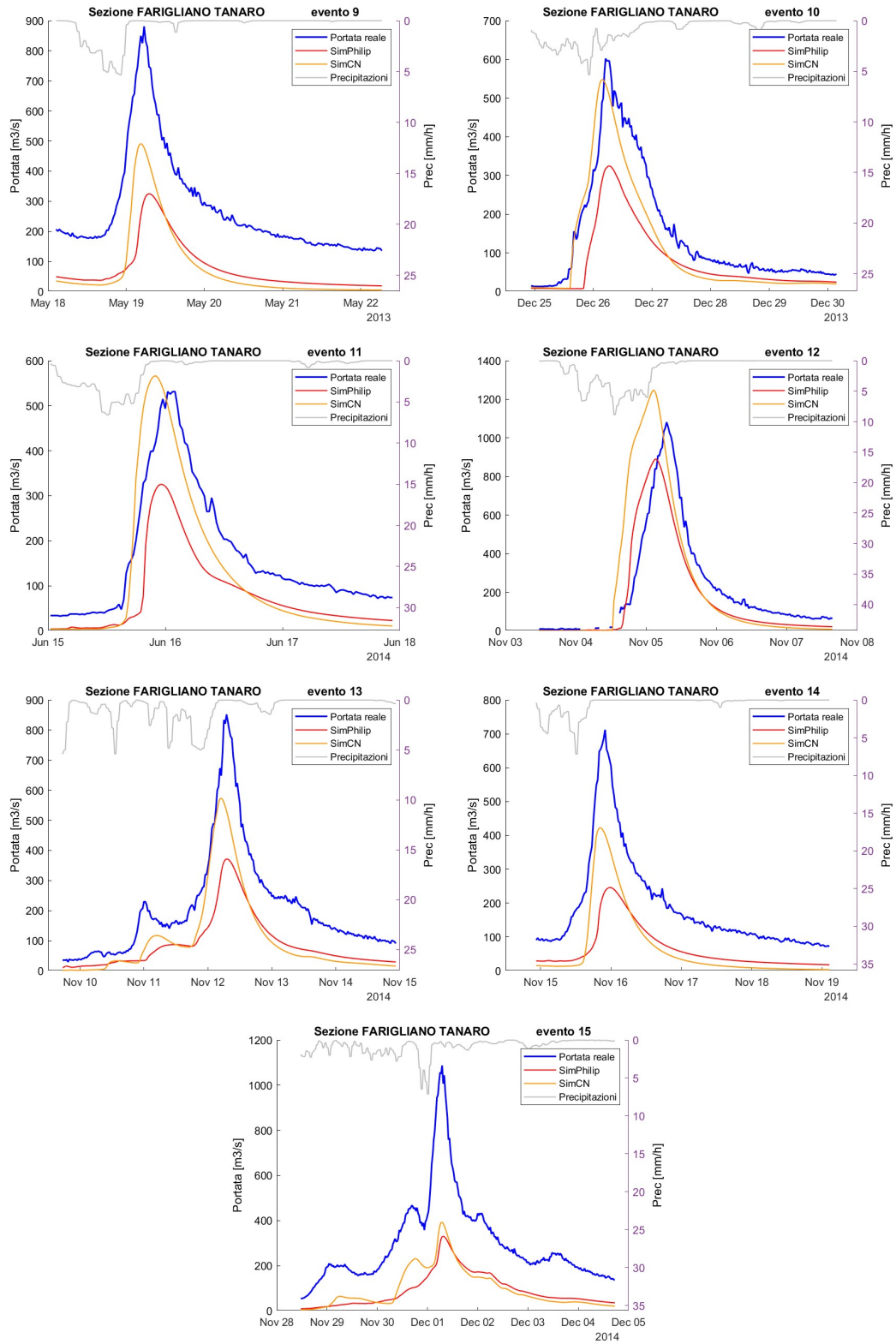


Figura 65 Sezione di Farigliano sul Tanaro, eventi da 9 a 15

9.2.6 Frabosa Soprana

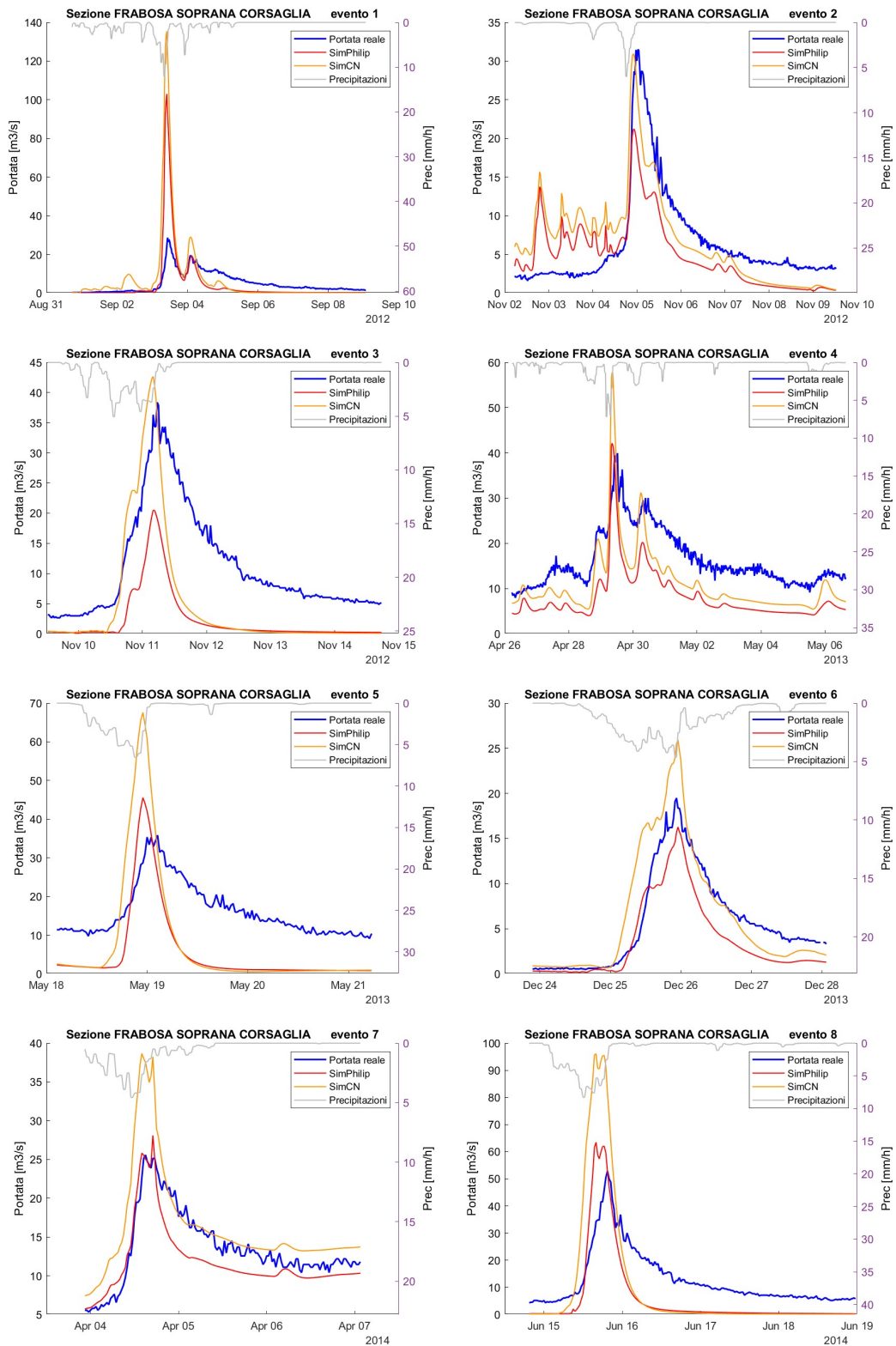


Figura 66 Sezione di Frabosa Soprana sul Corsaglia, eventi da 1 a 8

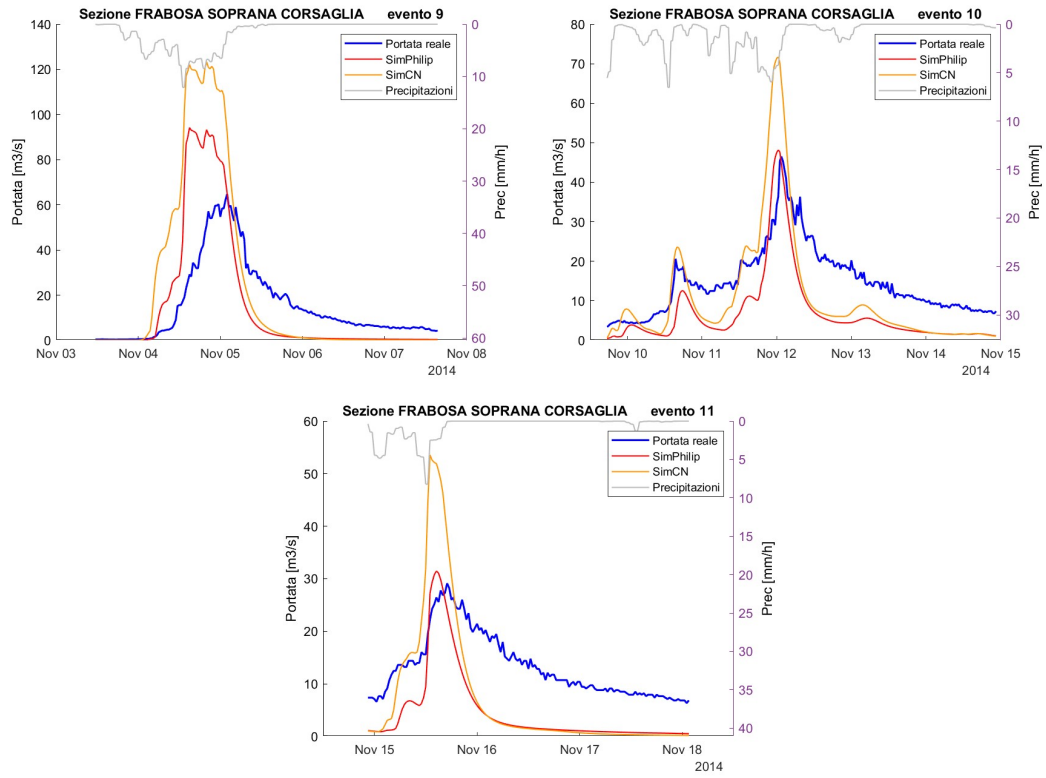


Figura 67 Sezione di Frabosa Soprana sul Corsaglia, eventi da 9 a 11

9.2.7 Masio

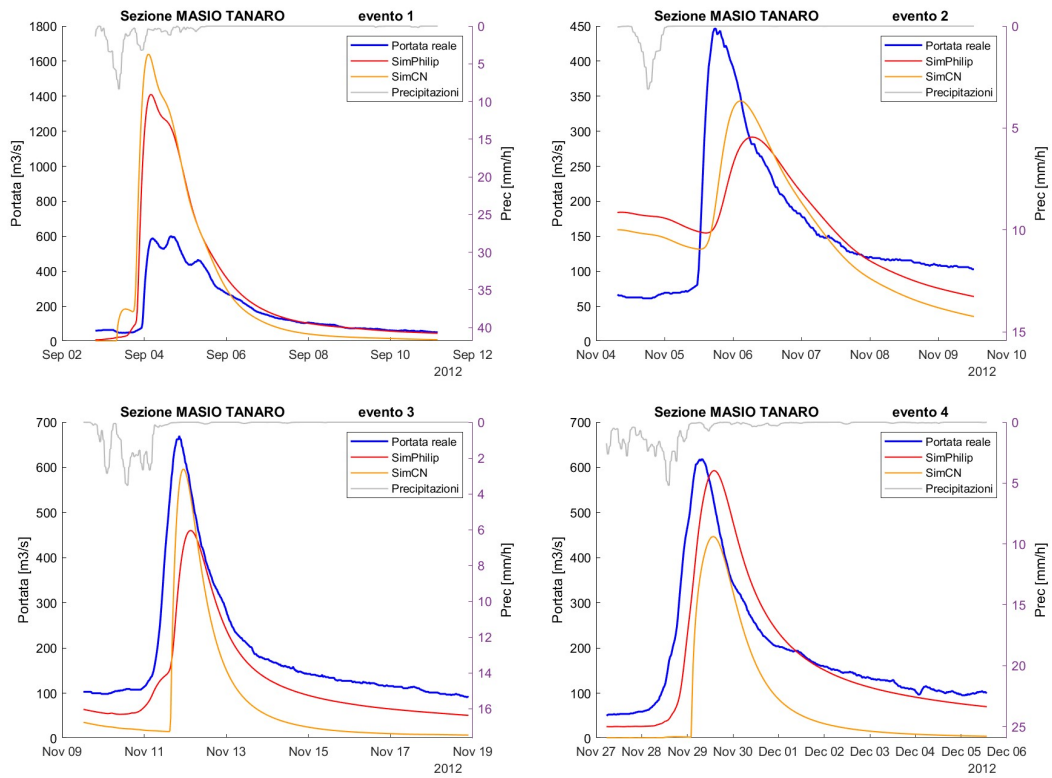
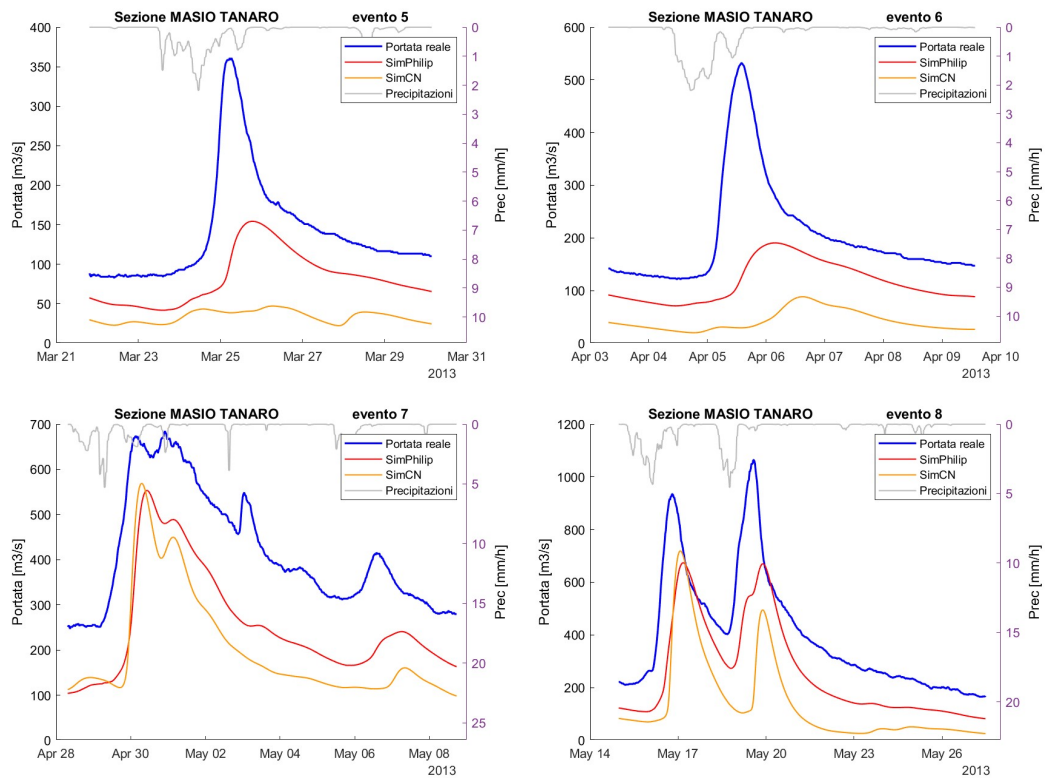


Figura 68 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi da 1 a 4



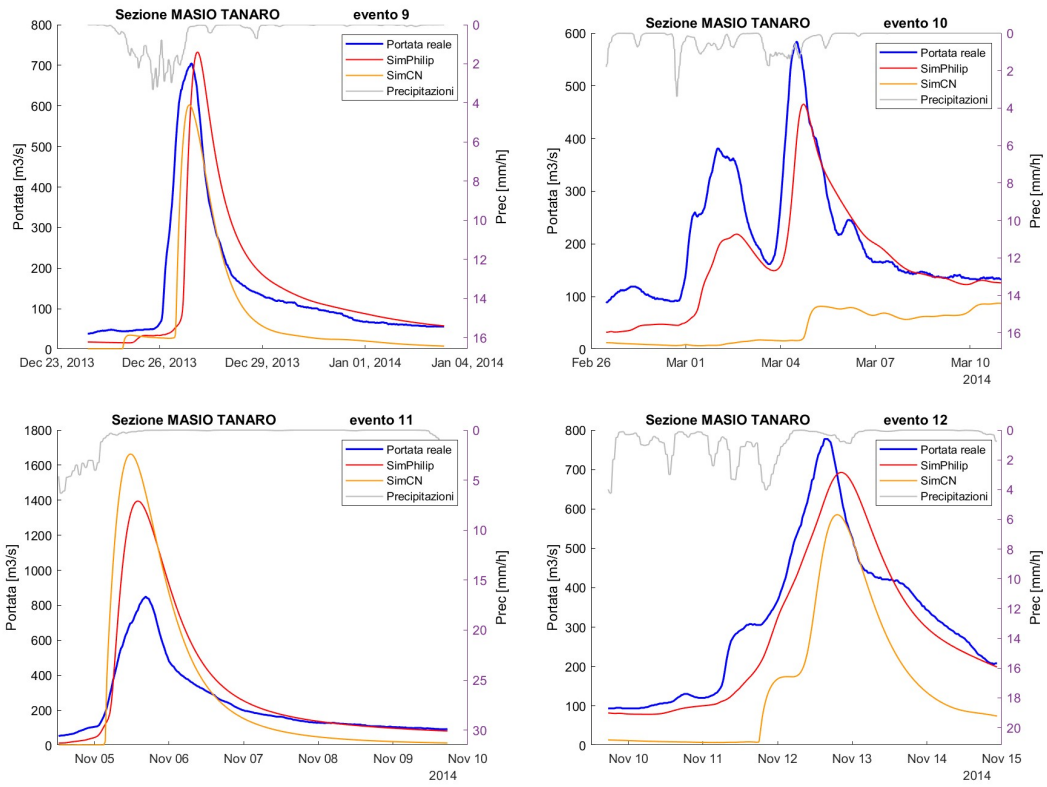


Figura 69 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi da 5 a 12

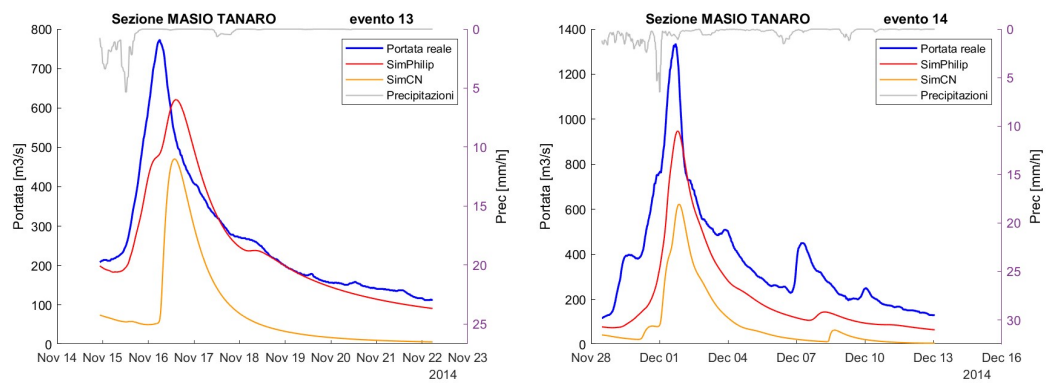


Figura 70 Sezione di Masio sul Tanaro, eventi 13 e 14

9.2.8 Mondovì

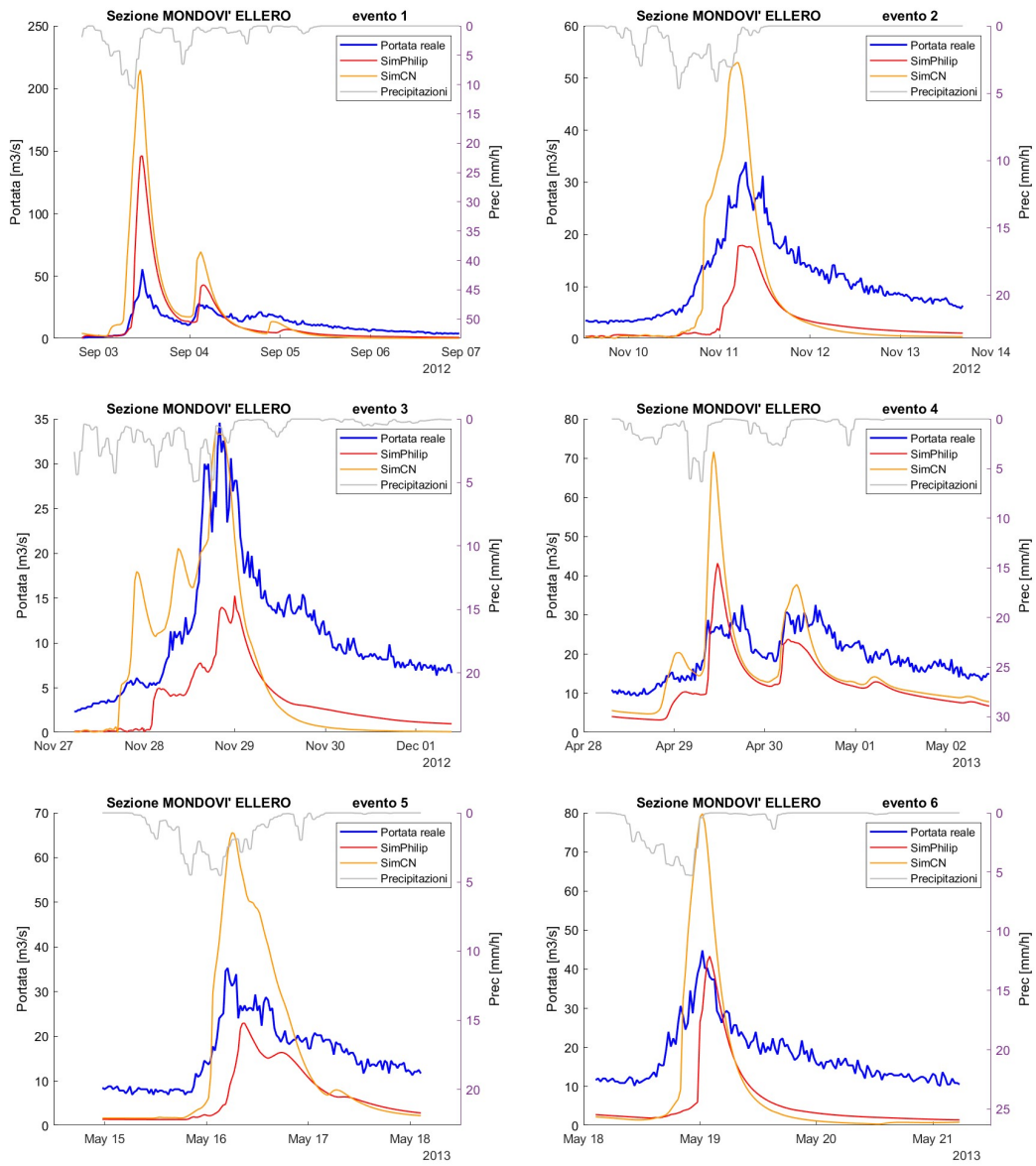


Figura 71 Sezione di Mondovì sull'Ellero, eventi da 1 a 6

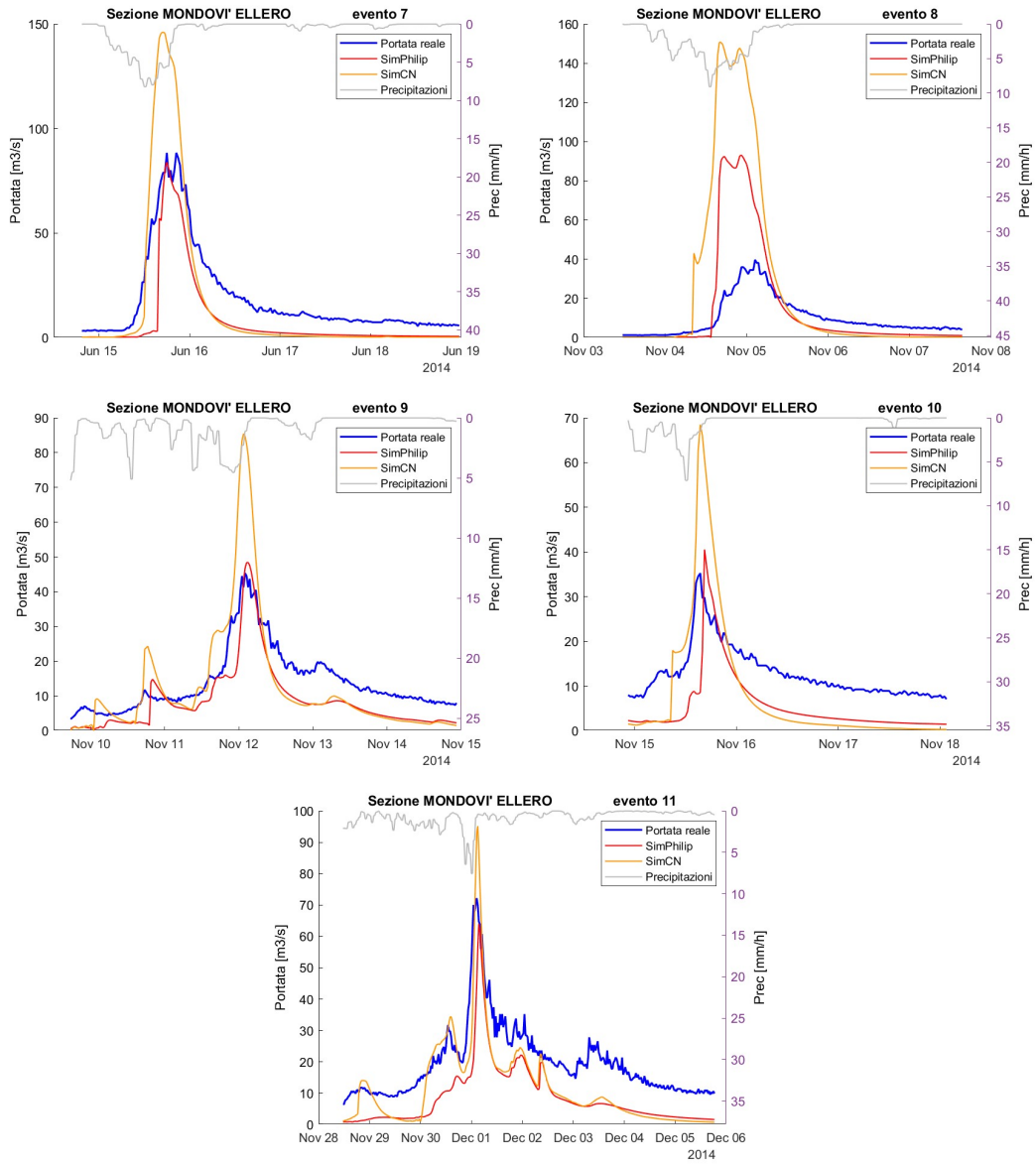


Figura 72 Sezione di Mondovì sull'Ellero, eventi da 7 a 11

9.2.9 Montecastello

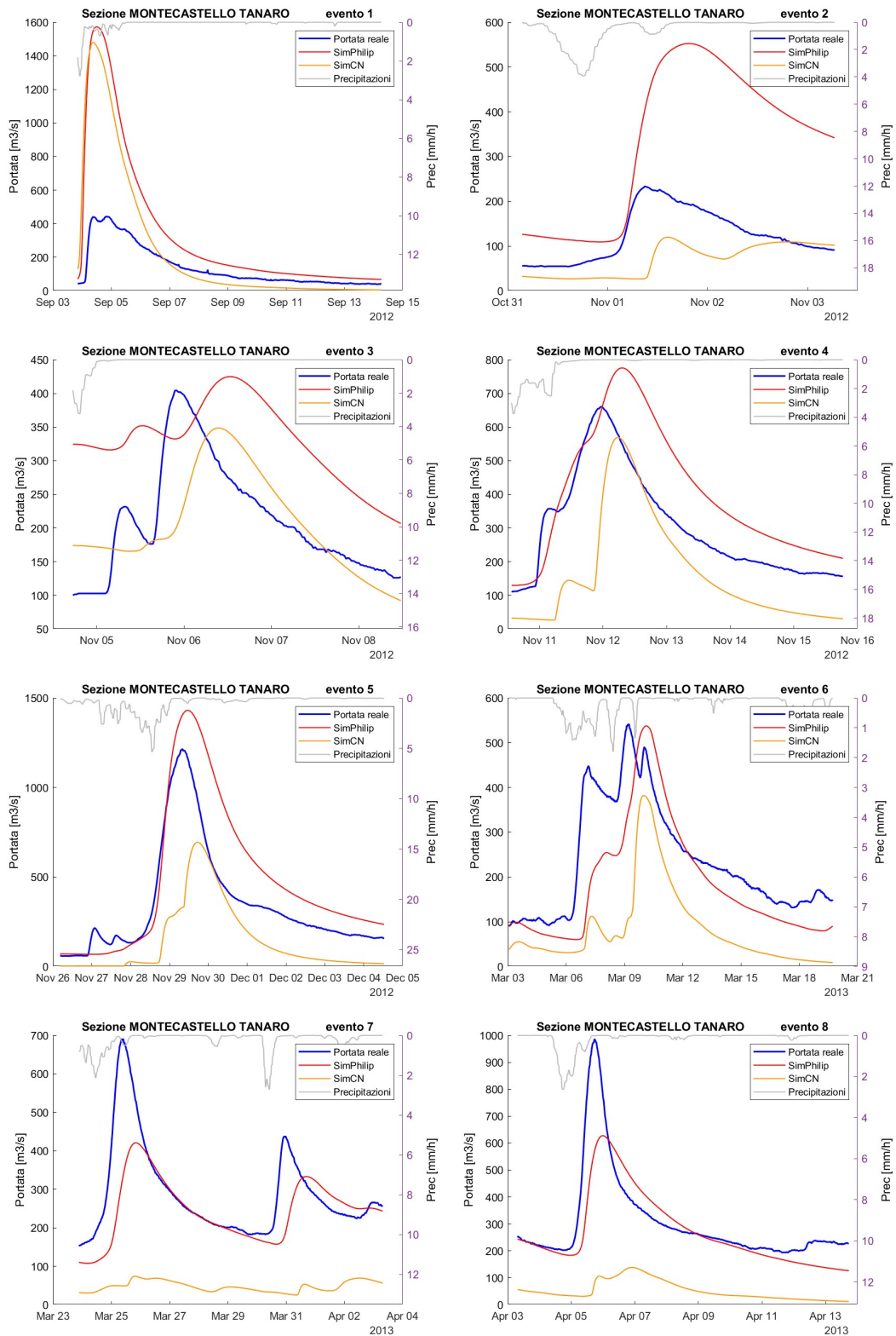


Figura 73 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 1 a 8

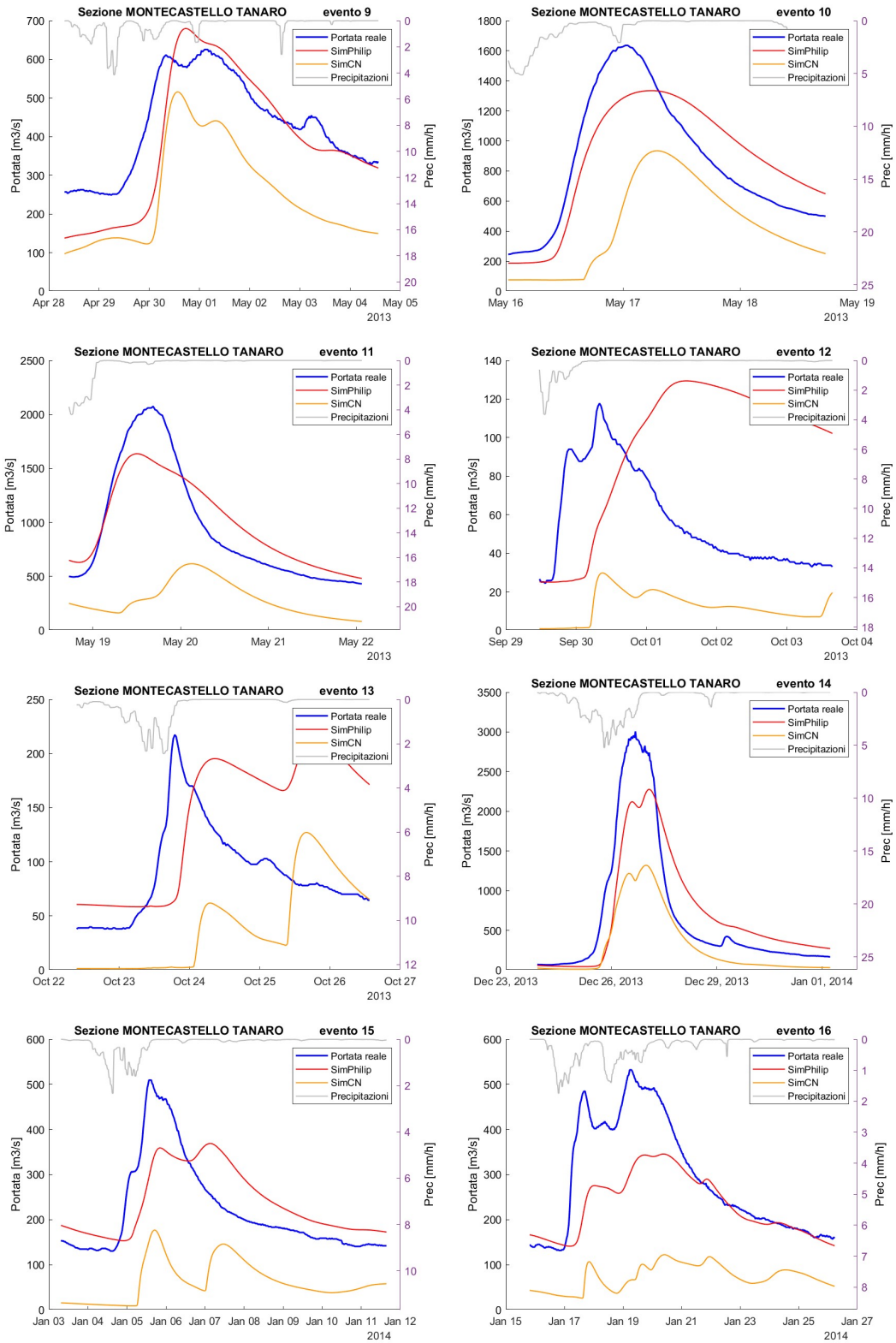


Figura 74 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 9 a 16

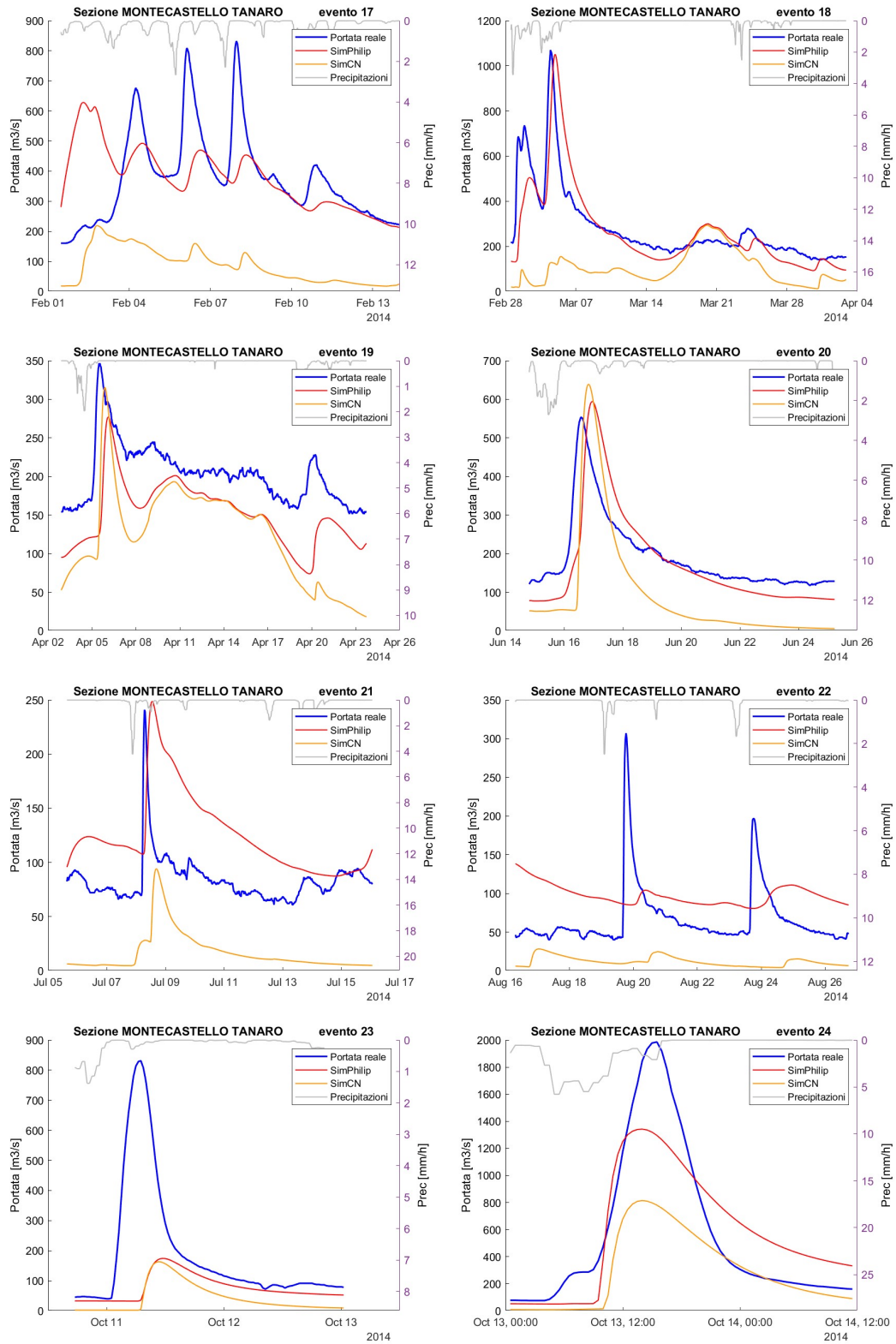


Figura 75 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 17 a 24

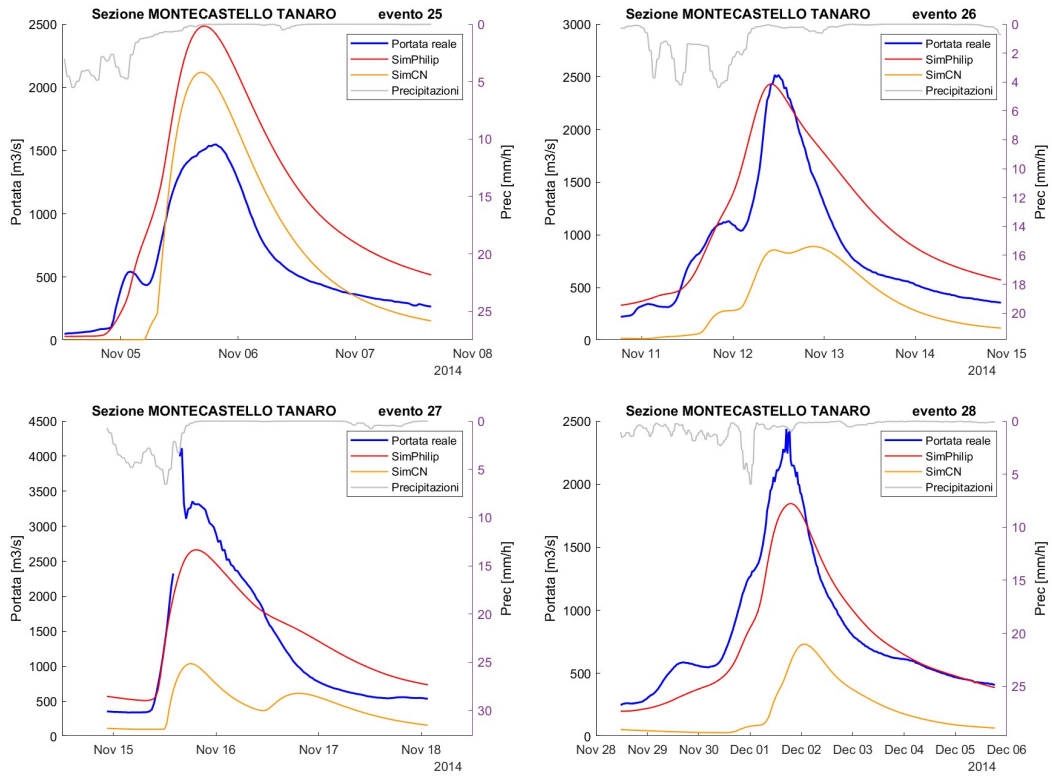


Figura 76 Sezione di Montecastello sul Tanaro, eventi da 25 a 28

9.2.10 Ponte di Nava

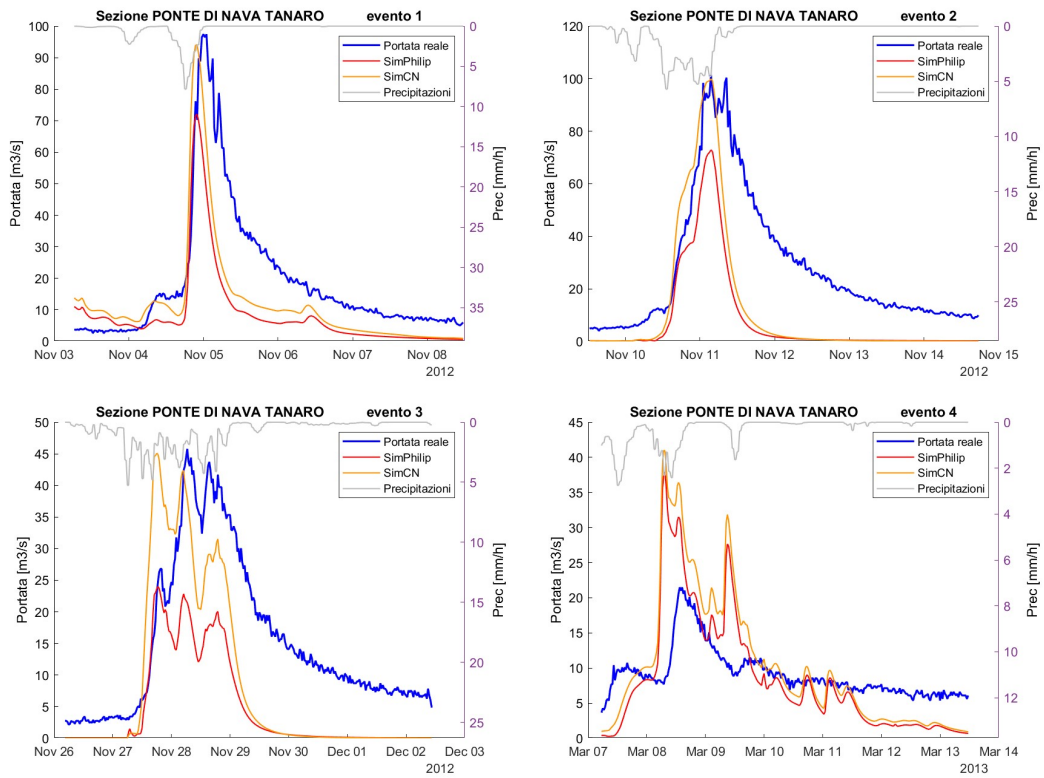
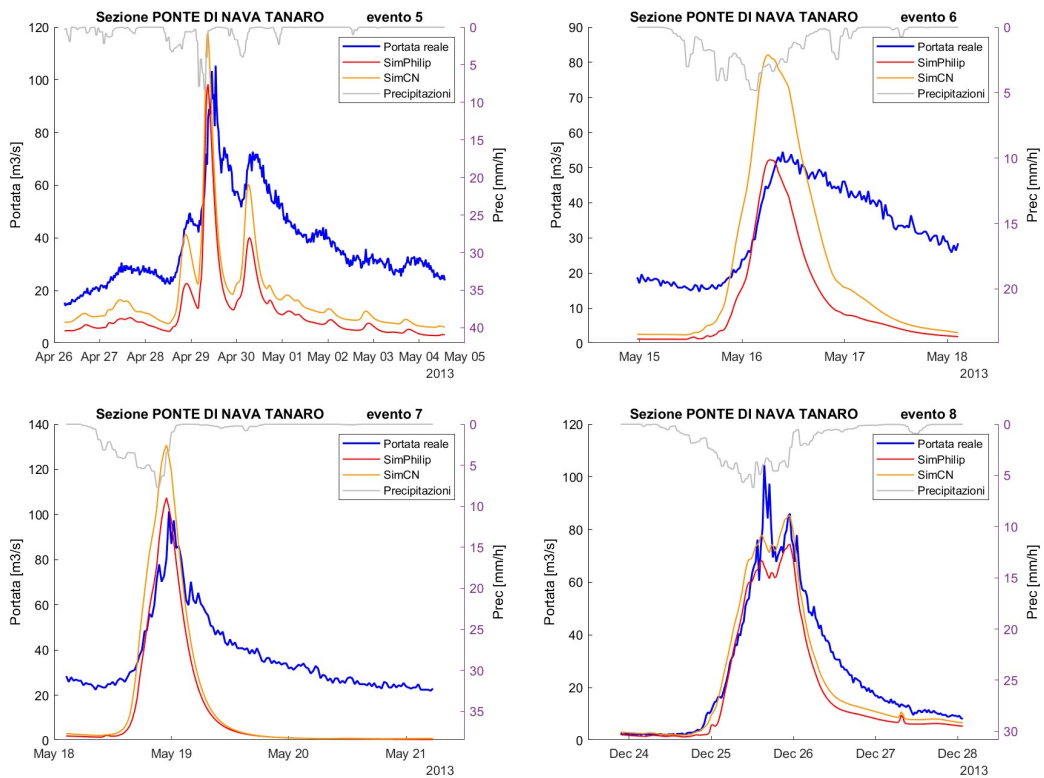


Figura 77 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi da 1 a 4



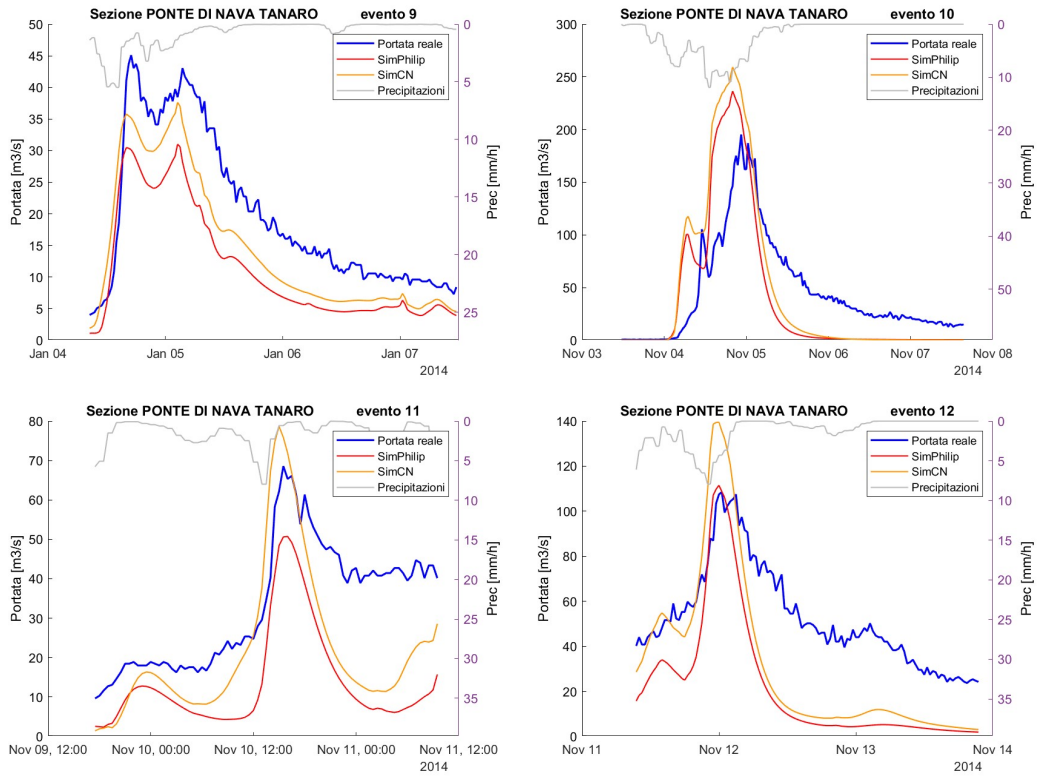


Figura 78 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi da 5 a 12

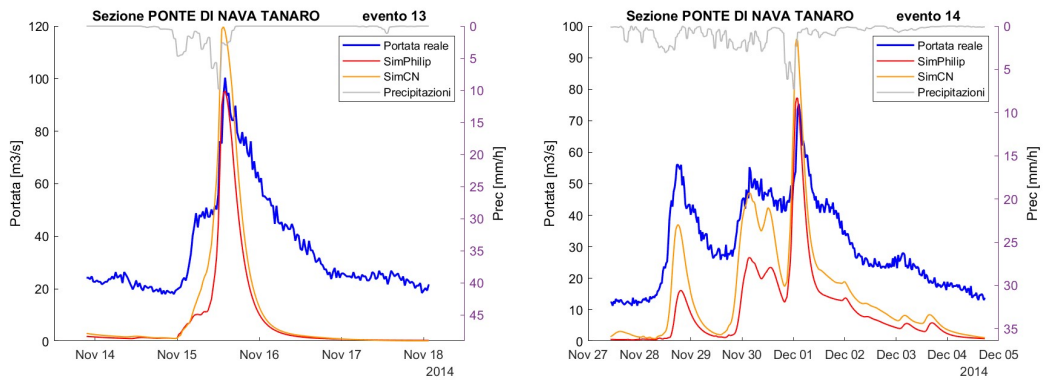


Figura 79 Sezione di Ponte di Nava sul Tanaro, eventi 13 e 14

9.2.11 Rastello

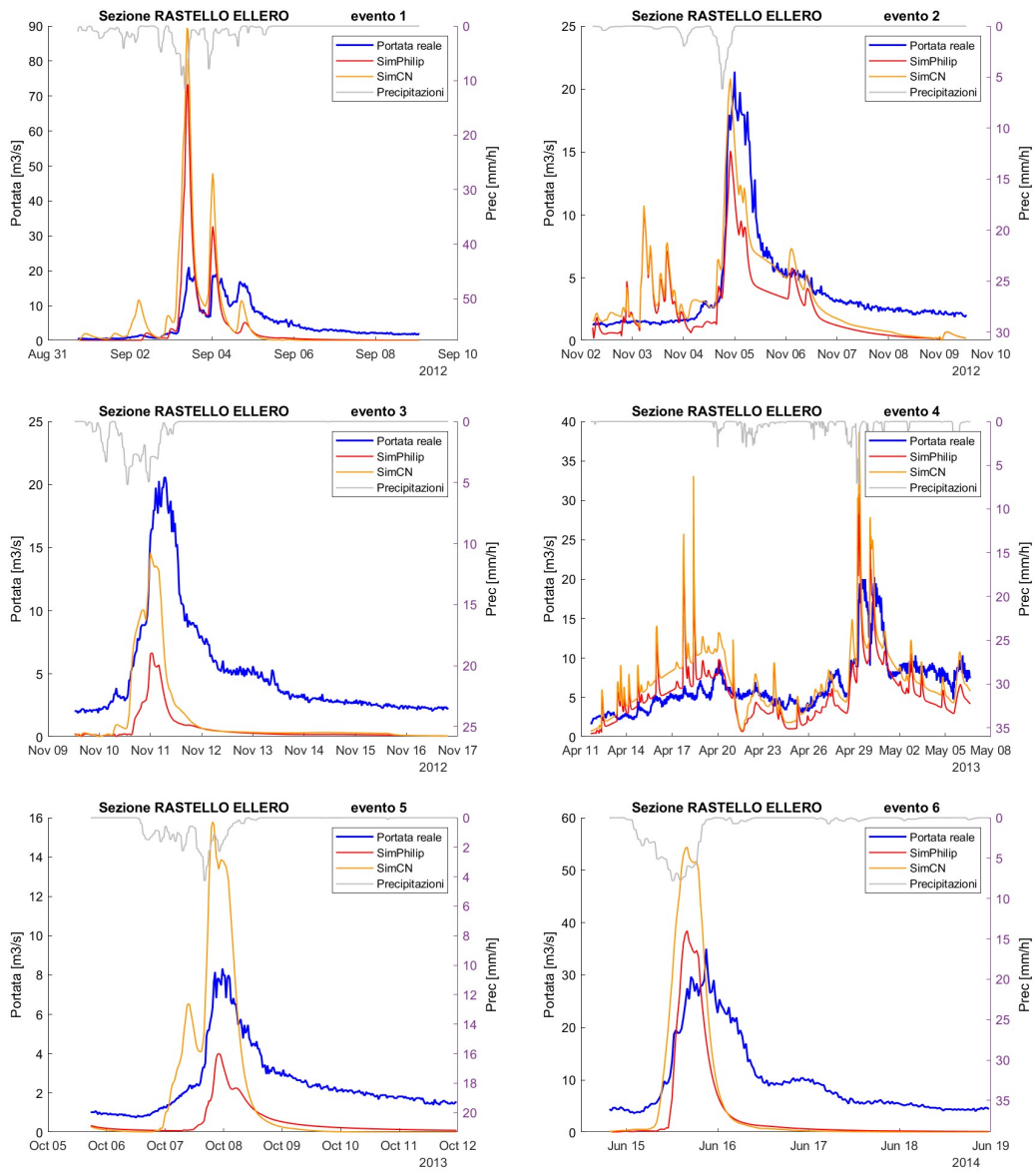


Figura 80 Sezione di Rastello sull'Ellero, eventi da 1 a 6

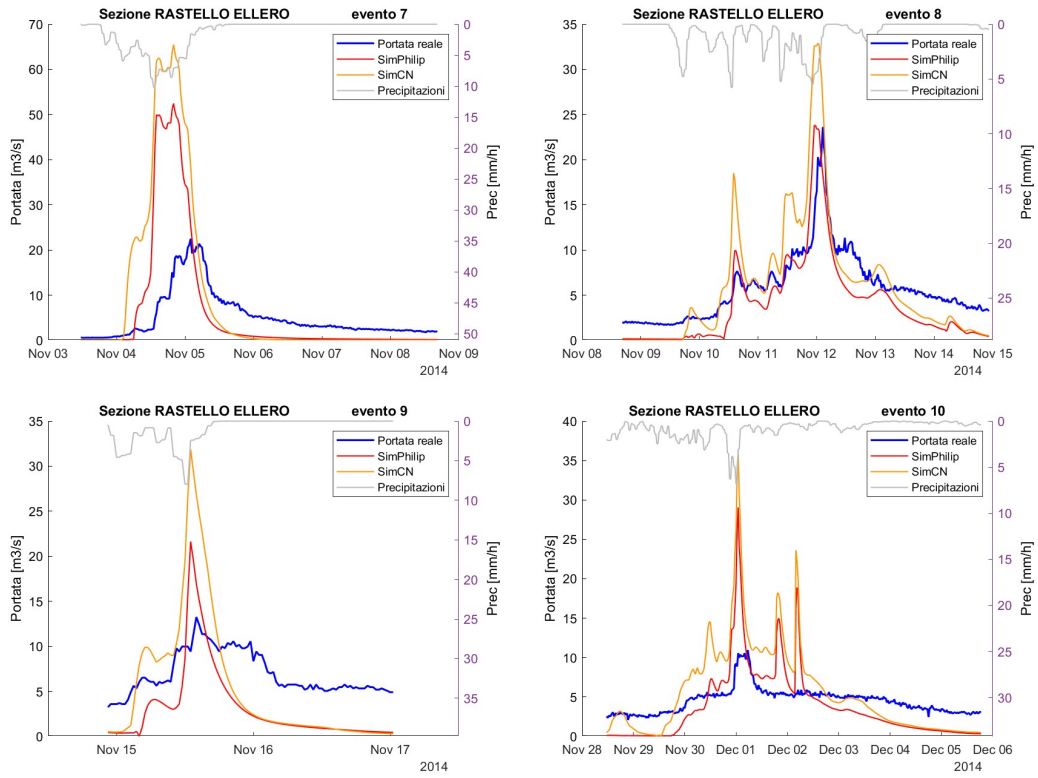


Figura 81 Sezione di Rastello sull'Ellero, eventi da 7 a 10

9.2.12 San Damiano

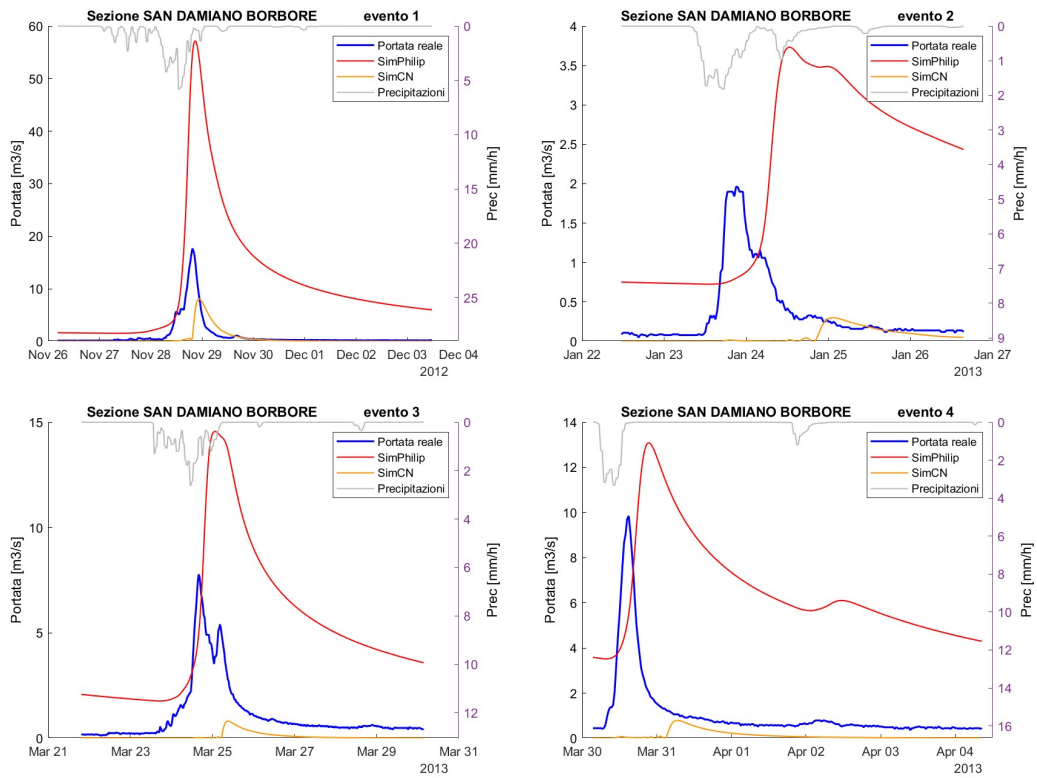
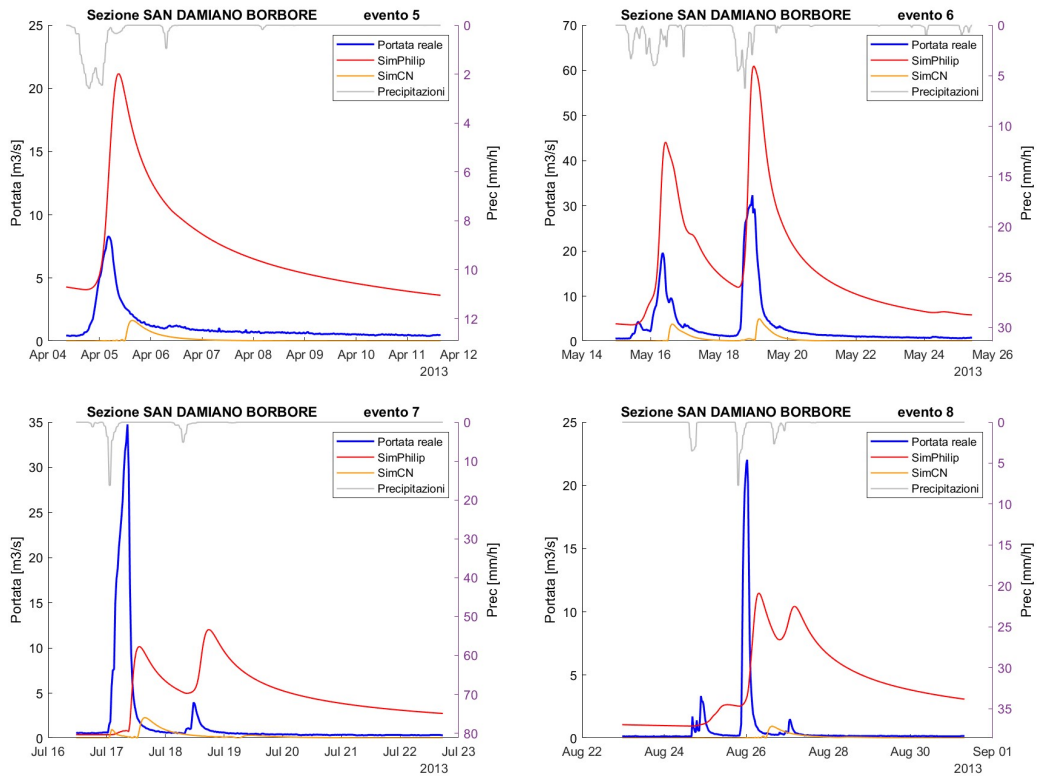


Figura 82 Sezione di San Damiano sul Borbore, eventi da 1 a 4



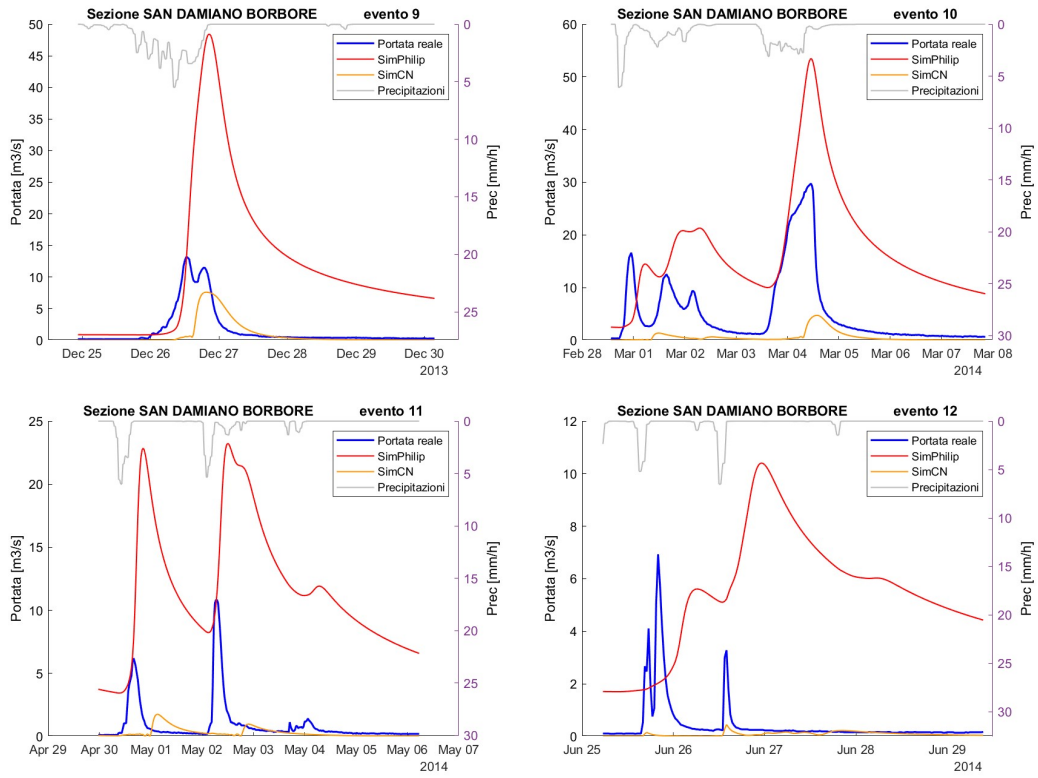
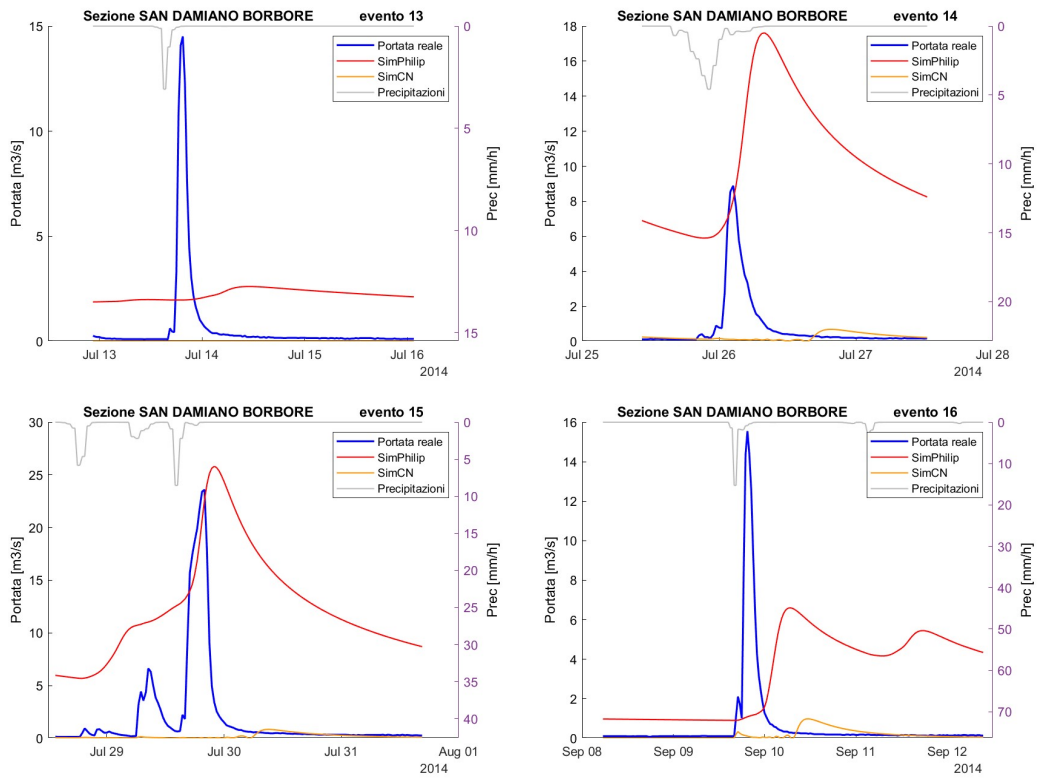


Figura 83 Sezione di San Damiano sul Borbore, eventi da 5 a 12



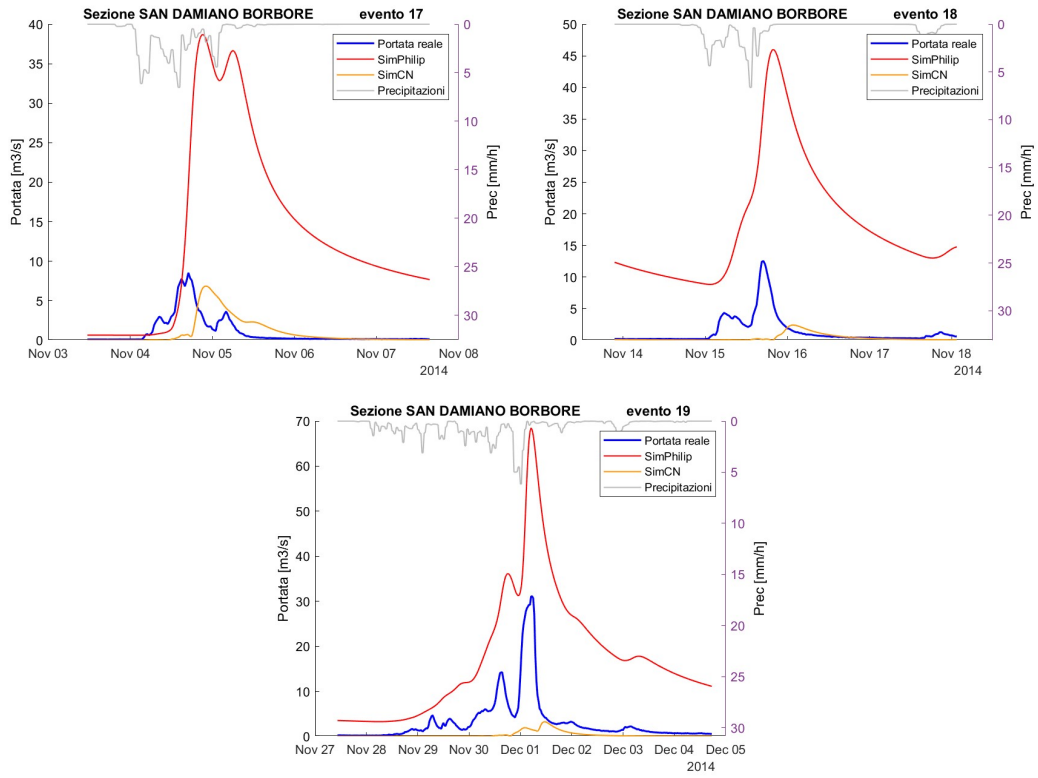


Figura 84 Sezione di San Damiano sul Borbore, eventi da 13 a 19

9.3 Codice

Infine si riporta un estratto del codice Matlab utilizzato per importare, adattare e confrontare simulazioni e osservazioni.

9.3.1 Importare e plottare osservazioni

```
SezioniDiMisura=importdata("Sezioni_di_misura.txt");
SezioniDiMisura.textdata(1,:)=[];
SezioniDiMisura.textdata=string(SezioniDiMisura.textdata);
PortateInt=readmatrix("portate\PortateOK3Anni.txt");
Portate=PortateInt;
Portate(1,:)=[];
Portate(:,1)=[];
Portate(17569,:)=[];
Portate(35090
Nistanti=height(Portate);
NStazioni=width(Portate);
SeqTemporale=1:Nistanti;
for i=1:Nistanti
    for j=1:NStazioni
        if Portate(i,j)==-999.9
            Portate(i,j)=NaN;
        end
    end
end
end
t1=datetime(2012,1,1,0,0,0);
t2=datetime(2015,1,2,0,0,0);
t3=datetime(2014,12,31,23,30,0);
istanti=t1:minutes(30):t2;
istanti0=t1:minutes(30):t3;
SezioniOk=[16 15 6 9 2 31 17 18 8 20 13 26];
for i=1:NStazioni
for j=1:104
    if PortateInt(1,i+1)==SezioniDiMisura.data(j,1)
        k=j;end
end
NEventi=0;
NNan=0;
PortataMedia=mean(Portate(:,i),'omitnan');
Soglia=PortataMedia*2;
for s=1:Nistanti-1
    if Portate(s,i)>Soglia&&Portate(s+1,i)<Soglia
        NEventi=NEventi+1;
    end
end
NNan=sum(isnan(Portate(:,i)));
figure(i)
hold on
plot(istanti,Portate(:,i))
xlabel('Data')
ylabel('Portata osservata [m^3/s]')
titolo=sprintf('Portata nella sezione di %s',
SezioniDiMisura.textdata(k));
title(titolo)
ax=gca;
```

```

ax.YAxis.Limits=[0 max(Portate(:,i))*1.1];
line([t1 t2],[Soglia Soglia], 'color', '#006510');
legend('Portata osservata', 'Portata soglia', 'Location', 'northwest')
hold off
saveas(figure(i), sprintf('Grafici/P_Oss_%d.fig', i));

end

```

9.3.2 Importare e adattare simulazioni

```

Simulazioni=sim7CNpropagazioneesuperficialeQ{:, :};
Appoggio=Simulazioni(:,14);
Simulazioni(:,14)=Simulazioni(:,1);
Simulazioni(:,1)=Simulazioni(:,11);
Simulazioni(:,11)=Simulazioni(:,10);
Simulazioni(:,10)=Simulazioni(:,29);
Simulazioni(:,29)=Appoggio;
Appoggio=Simulazioni(:,5);
Simulazioni(:,5)=Simulazioni(:,2);
Simulazioni(:,2)=Simulazioni(:,17);
Simulazioni(:,17)=Simulazioni(:,16);
Simulazioni(:,16)=Simulazioni(:,19);
Simulazioni(:,19)=Simulazioni(:,23);
Simulazioni(:,23)=Simulazioni(:,3);
Simulazioni(:,3)=Simulazioni(:,32);
Simulazioni(:,32)=Simulazioni(:,6);
Simulazioni(:,6)=Simulazioni(:,30);
Simulazioni(:,30)=Simulazioni(:,4);
Simulazioni(:,4)=Appoggio;
Appoggio=Simulazioni(:,20);
Simulazioni(:,20)=Simulazioni(:,7);
Simulazioni(:,7)=Simulazioni(:,26);
Simulazioni(:,26)=Simulazioni(:,12);
Simulazioni(:,12)=Simulazioni(:,25);
Simulazioni(:,25)=Simulazioni(:,22);
Simulazioni(:,22)=Simulazioni(:,21);
Simulazioni(:,21)=Simulazioni(:,24);
Simulazioni(:,24)=Appoggio;
Appoggio=Simulazioni(:,13);
Simulazioni(:,13)=Simulazioni(:,9);
Simulazioni(:,9)=Simulazioni(:,18);
Simulazioni(:,18)=Simulazioni(:,15);
Simulazioni(:,15)=Simulazioni(:,28);
Simulazioni(:,28)=Appoggio;
writematrix(Simulazioni, 'portate\PortateSimulate7CN.txt');

```

9.3.3 Importare e confrontare simulazioni intere

```

SezioniDiMisura=importdata("Sezioni_di_misura.txt");
SezioniDiMisura.textdata(1,:)=[];
SezioniDiMisura.textdata=string(SezioniDiMisura.textdata);
PortateInt=readmatrix("portate\PortateOK3Anni.txt");
Portate=PortateInt;
Portate(1,:)=[];
Portate(:,1)=[];

```

```

Portate(17569,:)=[];
Portate(35090,:)=[];
PortateSim0=readmatrix('portate\PortateSimulate0.txt');
PortateSim1=readmatrix('portate\PortateSimulate1.txt');
PortateSim2=readmatrix('portate\PortateSimulate2.txt');
PortateSim3=readmatrix('portate\PortateSimulate3.txt');
PortateSim4=readmatrix('portate\PortateSimulate4.txt');
PortateSim5=readmatrix('portate\PortateSimulate5.txt');
PortateSim6=readmatrix('portate\PortateSimulate6.txt');
PortateSim7=readmatrix('portate\PortateSimulate7.txt');
PortateSim8=readmatrix('portate\PortateSimulate8.txt');
PortateSim0CN=readmatrix('portate\PortateSimulate0CN.txt');
PortateSim1CN=readmatrix('portate\PortateSimulate1CN.txt');
PortateSim2CN=readmatrix('portate\PortateSimulate2CN.txt');
PortateSim3CN=readmatrix('portate\PortateSimulate3CN.txt');
PortateSim4CN=readmatrix('portate\PortateSimulate4CN.txt');
PortateSim5CN=readmatrix('portate\PortateSimulate5CN.txt');
PortateSim6CN=readmatrix('portate\PortateSimulate6CN.txt');
PortateSim7CN=readmatrix('portate\PortateSimulate7CN.txt');
PortateSim=PortateSim0;
PortateSim(:, :, 2)=PortateSim1;
PortateSim(:, :, 3)=PortateSim2;
PortateSim(:, :, 4)=PortateSim3;
PortateSim(:, :, 5)=PortateSim4;
PortateSim(:, :, 6)=PortateSim5;
PortateSim(:, :, 7)=PortateSim6;
PortateSim(:, :, 8)=PortateSim7;
PortateSim(:, :, 9)=PortateSim8;
PortateSimCN=PortateSim0CN;
PortateSimCN(:, :, 2)=PortateSim1CN;
PortateSimCN(:, :, 3)=PortateSim2CN;
PortateSimCN(:, :, 4)=PortateSim3CN;
PortateSimCN(:, :, 5)=PortateSim4CN;
PortateSimCN(:, :, 6)=PortateSim5CN;
PortateSimCN(:, :, 7)=PortateSim6CN;
PortateSimCN(:, :, 8)=PortateSim7CN;
NIstanti=height(Portate);
NStazioni=width(Portate);
SeqTemporale=1:NIstanti;
NIstanti0=height(PortateSim0);
NSimulazioni=size(PortateSim,3);
NSimulazioniCN=size(PortateSimCN,3);
SeqTemporale0=1:NIstanti0;
PrecipitazioniOrarie=importdata("Precipitazioni/Precipitazioni.txt");
;
Precipitazioni=zeros(NIstanti0,NStazioni);
for a=1:length(PrecipitazioniOrarie)
    b=2*a-1;
    c=2*a;
    Precipitazioni(b,:)=PrecipitazioniOrarie(a,:);
    Precipitazioni(c,:)=PrecipitazioniOrarie(a,:);
end
RapportoVolumi=zeros(1,NStazioni);
QMedia=zeros(1,NStazioni);
ErrQColmo=zeros(1,NStazioni);
RMSE=zeros(1,NStazioni);

```

```

Nash=zeros(1,NStazioni);
for i=1:Nistanti
    for j=1:NStazioni
        if Portate(i,j)==-999.9
            Portate(i,j)=NaN;
        end
    end
end
end
t1=datetime(2012,1,1,0,0,0);
t2=datetime(2015,1,2,0,0,0);
t3=datetime(2014,12,31,23,30,0);
istanti=t1:minutes(30):t2;
istanti0=t1:minutes(30):t3;
SezioniOk=[16 15 6 9 2 31 17 18 8 20 13 26];
for i=SezioniOk
    for j=1:104
        if PortateInt(1,i+1)==SezioniDiMisura.data(j,1)
            k=j;end
    end
end
NNan=0;
NNan=sum(isnan(Portate(:,i)));
QMedia(i)=mean(Portate(:,i),'omitnan');
figure(i)
hold on
ax=gca;
plot(istanti,Portate(:,i),'LineWidth',1.5)
xlabel('Data')
ylabel('Portata [m3/s]')
titolo=sprintf('Portata nella sezione di %s',
SezioniDiMisura.textdata(k));
title(titolo)
ax.YAxis(1).Limits=[0 max(Portate(:,i))*1.1];
plot(istanti0,PortateSim(:,i,1), 'color', '#006510')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,2), 'color', '#ff00FF')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,3), 'color', '#ff0080')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,4), 'color', '#ff0000')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,5), 'color', '#ff5500')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,6), 'color', '#ff9500')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,7), 'color', '#ffbb00')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,8), 'color', '#ffdd00')
plot(istanti0,PortateSim(:,i,9), 'color', '#ffff00')
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,1), 'color', 'k')
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,2))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,3))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,4))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,5))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,6))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,7))
plot(istanti0,PortateSimCN(:,i,8))
yyaxis right
plot(istanti0,Precipitazioni(:,i),'color', '#bbbbbb')
ax.YDir = 'reverse';
ax.YAxis(2).Limits=[0 max(Precipitazioni(:,i))*5];
ylabel('Precipitazione [mm/h]')
legend({'Portata reale', 'Sim 0', 'Sim 1', 'Sim 2', 'Sim 3', 'Sim
4', 'Sim 5', 'Sim 6', 'Sim7', 'Sim8',

```

```

'Sim0CN', 'Sim1CN', 'Sim2CN', 'Sim3CN', 'Sim4CN', 'Sim5CN', 'Sim6CN', 'Sim7
CN', 'Precipitazioni'}, 'Location', 'northwest')
hold off
saveas (figure(i), sprintf('Grafici/P_OssESim_%d.fig', i));
VolumeReale=sum(Portate(:,i), 'omitnan')*30*60;
VolumeSimulato=sum(PortateSim0(:,i))*30*60;
RapportoVolumi(i)=VolumeSimulato/VolumeReale;
ErrQColmo(i)=(max(PortateSim0(SeqTemporale0,i))-
max(Portate(SeqTemporale0,i)))/max(Portate(SeqTemporale0,i))*100;
ErrQColmoAss(i)=abs(ErrQColmo(i));
RMSE(i)=sqrt(sum((Portate(SeqTemporale0,i)-
PortateSim0(SeqTemporale0,i)).^2, 'omitnan'));
Nash(i)=1-(sum((Portate(SeqTemporale0,i)-
PortateSim0(SeqTemporale0,i)).^2, 'omitnan')/sum((Portate(SeqTemporal
e0,i)-QMedia(i)).^2, 'omitnan'));
Riassunto(i,:)= [SezioniDiMisura.textdata(k)
SezioniDiMisura.data(k,1) QMedia(i) NNaN VolumeReale VolumeSimulato
RapportoVolumi(i) ErrQColmo(i) ErrQColmoAss(i) RMSE(i) Nash(i)];
end
writematrix(Riassunto, 'Riassunto.txt');

```

9.3.4 Confrontare simulazioni per ogni sezione in ogni evento, metodo Philip

```

QMediaEvento=zeros(30, NSTazioni);
ErrQColmoEventi=zeros(30, NSTazioni, NSimulazioni);
ErrQColmoAssEventi=zeros(30, NSTazioni, NSimulazioni);
RMSEEventi=zeros(30, NSTazioni, NSimulazioni);
NashEventi=zeros(30, NSTazioni, NSimulazioni);
IndiciComplessiviParziali=zeros(4, NSTazioni, NSimulazioni);
IndiciComplessivi=zeros(4, NSimulazioni);

i=16; %Montecastello Tanaro
Eventi=[11850 12350; 14600 14750; 14820 15000; 15100 15350; 15850
16250; 20500 21300; 21500 22000; 22000 22500; 23200 23500; 24050
24180; 24180 24340; 30600 30800; 31700 31900; 34700 35100; 35200
35600; 35800 36300; 36600 37200; 37900 39500; 39500 40500; 43000
43500; 44000 44500; 46000 46500; 48660 48770; 48770 48840; 49850
50000; 50150 50350; 50350 50500; 51000 51350];
for j=1:104
    if PortateInt(1,i+1)==SezioniDiMisura.data(j,1)
        k=j;end
end
figure(100+i)
tiledlayout(5,6)
for e=1:height(Eventi)
    nexttile
    TempiEvento=Eventi(e,1):Eventi(e,2);
    hold on
    ax=gca;
    titolo=sprintf('Evento %d', e);
    title(titolo)
    plot(TempiEvento, Portate(TempiEvento,i), 'LineWidth',1.5)
    plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,1), 'color', '#006510')
    plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,2), 'color', '#ff00ff')
    plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,3), 'color', '#ff0080')

```

```

plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,4), 'color', '#ff0000')
plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,5), 'color', '#ff5500')
plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,6), 'color', '#ff9500')
plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,7), 'color', '#ffbb00')
plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,8), 'color', '#ffdd00')
plot(TempiEvento, PortateSim(TempiEvento, i,9), 'color', '#ffff00')
yyaxis right
plot(TempiEvento,Precipitazioni(TempiEvento,i),'color', '#bbbbbb')
ax.YDir = 'reverse';
ax.YAxis(2).Limits=[0 max(Precipitazioni(TempiEvento,i))*5];
ylabel('Prec [mm/h]')
hold off
QMediaEvento(e,i)=mean(Portate(TempiEvento,i),'omitnan');
for s=1:NSimulazioni
    ErrQColmoEventi(e,i,s)=(max(PortateSim(TempiEvento,i,s))-
max(Portate(TempiEvento,i)))/max(Portate(TempiEvento,i))*100;
    ErrQColmoAssEventi(e,i,s)=abs(ErrQColmoEventi(e,i,s));
    RMSEEventi(e,i,s)=sqrt(sum((Portate(TempiEvento,i)-
PortateSim(TempiEvento,i,s)).^2,'omitnan'));
    NashEventi(e,i,s)=1-(sum((Portate(TempiEvento,i)-
PortateSim(TempiEvento,i,s)).^2,'omitnan')/sum((Portate(TempiEvento,
i)-QMediaEvento(e,i)).^2,'omitnan')));
end
end
nexttile
hold on
plot(0,0,'LineWidth',1.5)
plot(0,0, 'color', '#006510')
plot(0,0, 'color', '#ff00ff')
plot(0,0, 'color', '#ff0080')
plot(0,0, 'color', '#ff0000')
plot(0,0, 'color', '#ff5500')
plot(0,0, 'color', '#ff9500')
plot(0,0, 'color', '#ffbb00')
plot(0,0, 'color', '#ffdd00')
plot(0,0, 'color', '#ffff00')
plot(0,0, 'color', '#bbbbbb')
hold off
legend({'Portata reale', 'Sim 0','Sim 1','Sim 2','Sim 3','Sim
4','Sim 5','Sim
6','Sim7','Sim8','Precipitazioni'},'Location','northwest')
lgd = legend;
titolo=sprintf('%s', SezioniDiMisura.textdata(k));
lgd.Title.String = titolo;
lgd.NumColumns = 3;
saveas(figure(100+i),sprintf('Grafici/Montecastello/Phil_Tutti_%d.fi
g',i));
IndiciComplessiviParziali(1,i,:)=sum(ErrQColmoEventi(1:height(Eventi
),i,:))/height(Eventi);
IndiciComplessiviParziali(2,i,:)=sum(ErrQColmoAssEventi(1:height(Eve
nti),i,:))/height(Eventi);
IndiciComplessiviParziali(3,i,:)=sum(RMSEEventi(1:height(Eventi),i,:
))/height(Eventi);
IndiciComplessiviParziali(4,i,:)=sum(NashEventi(1:height(Eventi),i,:
))/height(Eventi);

```

```

i=15; %Casal Cermelli Orba
Eventi=[14600 14800; 14800 15000; 15100 15400; 15850 16300; 17250
17500; 20600 21200; 21500 21750; 21800 22050; 22050 22400; 22400
22600; 24050 24500; 35200 35600; 35800 36400; 36600 37400; 37850
38400; 38900 39200; 40800 41500; 44000 44400; 46140 46320; 46340
46440; 48650 48765; 49850 50050; 50100 50350; 50850 50950; 50950
51300; 51800 52000];

i=6; %Castelnuovo Belbo
Eventi=[20600 21100; 21500 21800; 21800 22050; 22050 22350; 23500
23800; 24000 24500; 28900 29100; 34700 35200; 36600 37300; 37900
38050; 38050 38400; 40800 40900; 50100 50350; 50350 50600; 50950
51500];

i=9; % Masio Tanaro
Eventi=[11800 12200; 14800 15050; 15050 15500; 15900 16300; 21400
21800; 22000 22300; 23200 23700; 24000 24600; 34700 35200; 37800
38400; 49850 50100; 50100 50350; 50350 50700; 51000 51700];

i=2; % Asti Tanaro
Eventi=[14800 15100; 15100 15350; 15900 16200; 23200 23500; 24000
24400; 34700 35200; 43000 43300; 49800 50100; 50100 50350; 50350
50600; 51000 51350];

i=31; % S. Damiano Borbore
Eventi=[15850 16200; 18600 18800; 21400 21800; 21800 22050; 22050
22400; 24000 24500; 27000 27300; 28800 29200; 34750 35000; 37900
38250; 40800 41100; 43500 43700; 44350 44500; 44950 45050; 45100
45250; 47100 47300; 49800 50000; 50300 50500; 50950 51300];

i=17; % Alba Tanaro
Eventi=[11800 12100; 14800 15100; 15100 15400; 15900 16300; 21400
21800; 22050 22300; 23200 23500; 24000 24160; 24160 24300; 34700
35000; 35250 35500; 43000 43300; 49850 50050; 50150 50350; 50350
50600; 51000 51500];

i=18; % Farigliano Tanaro
Eventi=[14700 15100; 15100 15500; 15800 16300; 20500 21400; 21400
21800; 22000 22400; 23100 23600; 24000 24150; 24150 24350; 34750
35000; 43010 43150; 49800 50000; 50100 50350; 50350 50550; 51000
51300];

i=8; % Mondovì Ellero
Eventi=[11800 12000; 15050 15250; 15900 16100; 23200 23400; 24000
24150; 24150 24300; 43000 43200; 49800 50000; 50100 50350; 50350
50500; 51000 51350];

i=20; % Rastello Ellero
Eventi=[11700 12100; 14700 15050; 15050 15400; 22400 23600; 30900
31200; 43000 43200; 49800 50050; 50050 50350; 50350 50450; 51000
51350];

i=13; % Frabosa Soprana Corsaglia
Eventi=[11700 12100; 14700 15050; 15050 15300; 23100 23600; 24150
24300; 34700 34900; 39550 39700; 43000 43200; 49800 50000; 50100
50350; 50350 50500];

```



```

i=26;% Ponte di Nava Tanaro
Eventi=[14750 15000; 15050 15300; 15850 16150; 20700 21000; 23100
23500; 24000 24150; 24150 24300; 34700 34900; 35250 35400; 49800
50000; 50100 50180; 50180 50300; 50300 50500; 50950 51300];

IndiciComplessivi(1,:)=sum(IndiciComplessiviParziali(1,1:NStazioni,:
))/length(SezioniOk);
IndiciComplessivi(2,:)=sum(IndiciComplessiviParziali(2,1:NStazioni,:
))/length(SezioniOk);
IndiciComplessivi(3,:)=sum(IndiciComplessiviParziali(3,1:NStazioni,:
))/length(SezioniOk);
IndiciComplessivi(4,:)=sum(IndiciComplessiviParziali(4,1:NStazioni,:
))/length(SezioniOk);
writematrix(QMediaEvento,'PortateMedieEventi.txt');
writematrix(ErrQColmoEventi,'ErrQColmoEventi.txt');
writematrix(ErrQColmoAssEventi,'ErrQColmoAssEventi.txt');
writematrix(RMSEEventi,'RMSEEventi.txt');
writematrix(NashEventi,'NashEventi.txt');
writematrix(IndiciComplessiviParziali,'IndiciComplessiviParziali.txt
');
writematrix(IndiciComplessivi,'IndiciComplessivi.txt');

```

9.3.5 Plottare e salvare grafici, per ciascun evento di ogni sezione

```

t1=datetime(2012,1,1,0,0,0);
t2=datetime(2015,1,2,0,0,0);
t3=datetime(2014,12,31,23,30,0);
istanti=t1:minutes(30):t2;
istanti0=t1:minutes(30):t3;

i=26; % Ponte di Nava Tanaro
Eventi=[14750 15000; 15050 15300; 15850 16150; 20700 21000; 23100
23500; 24000 24150; 24150 24300; 34700 34900; 35250 35400; 49800
50000; 50100 50180; 50180 50300; 50300 50500; 50950 51300];
NomeSezione='Ponte di Nava';

for j=1:104
    if PortateInt(1,i+1)==SezioniDiMisura.data(j,1)
        k=j;end
end
for e=1:height(Eventi)
figure(e)
TempiEvento=Eventi(e,1):Eventi(e,2);
hold on
ax=gca;
titolo=sprintf('Sezione %s evento %d',
SezioniDiMisura.textdata(k),e);
title(titolo)
plot(istanti(TempiEvento),
Portate(TempiEvento,i),'LineWidth',1.5,'color','b')
plot(istanti(TempiEvento), PortateSim(TempiEvento, i,1),
'LineWidth',1,'color', '#006510')

```

```

plot(istanti(TempiEvento), PortateSim(TempiEvento, i,8),
'LineWidth',1,'color', '#ff0000')
ylabel('Portata [m3/s]')
yyaxis right
plot(istanti(TempiEvento),Precipitazioni(TempiEvento,i), 'LineWidth',
1,'color', '#bbbbbb')
ax.YDir = 'reverse';
ax.YAxis(2).Limits=[0 max(Precipitazioni(TempiEvento,i))*5];
ylabel('Prec [mm/h]', 'color', 'k')
legend({'Portata reale', 'Sim0
Philip', 'Sim7', 'Precipitazioni'}, 'Location', 'northeast')
lgd = legend;
hold off
figure(e+100)
hold on
ax=gca;
titolo=sprintf('Sezione %s evento %d',
SezioniDiMisura.textdata(k),e);
title(titolo)
plot(istanti(TempiEvento),
Portate(TempiEvento,i), 'LineWidth',1.5, 'color', 'b')
plot(istanti(TempiEvento), PortateSimCN(TempiEvento,
i,1), 'LineWidth',1, 'color', '#ff9500')
ylabel('Portata [m3/s]')
yyaxis right
plot(istanti(TempiEvento),Precipitazioni(TempiEvento,i), 'LineWidth',
1,'color', '#bbbbbb')
ax.YDir = 'reverse';
ax.YAxis(2).Limits=[0 max(Precipitazioni(TempiEvento,i))*5];
ylabel('Prec [mm/h]', 'color', 'k')
legend({'Portata reale',
'Sim0CN', 'Precipitazioni'}, 'Location', 'northeast')
lgd = legend;
hold off
figure(e+200)
TempiEvento=Eventi(e,1):Eventi(e,2);
hold on
ax=gca;
titolo=sprintf('Sezione %s evento %d',
SezioniDiMisura.textdata(k),e);
title(titolo)
plot(istanti(TempiEvento),
Portate(TempiEvento,i), 'LineWidth',1.5, 'color', 'b')
plot(istanti(TempiEvento), PortateSim(TempiEvento, i,8),
'LineWidth',1,'color', '#ff0000')
plot(istanti(TempiEvento), PortateSimCN(TempiEvento, i,1),
'LineWidth',1,'color', '#ff9500')
ylabel('Portata [m3/s]')
yyaxis right
plot(istanti(TempiEvento),Precipitazioni(TempiEvento,i), 'LineWidth',
1,'color', '#bbbbbb')
ax.YDir = 'reverse';
ax.YAxis(2).Limits=[0 max(Precipitazioni(TempiEvento,i))*5];
ylabel('Prec [mm/h]', 'color', 'k')
legend({'Portata reale',
'SimPhilip', 'SimCN', 'Precipitazioni'}, 'Location', 'northeast')

```

```
lgd = legend;
hold off
saveas (figure (e), sprintf ('Grafici/%s/Phil_Evento%d.fig', NomeSezione,
e));
saveas (figure (e+100), sprintf ('Grafici/%s/CN_Evento%d.fig', NomeSezion
e,e));
saveas (figure (e+200), sprintf ('Grafici/%s/Entrambi_Evento%d.fig', Nome
Sezione,e));
saveas (figure (e), sprintf ('Grafici/%s/Phil_Evento%d.png', NomeSezione,
e));
saveas (figure (e+100), sprintf ('Grafici/%s/CN_Evento%d.png', NomeSezion
e,e));
saveas (figure (e+200), sprintf ('Grafici/%s/Entrambi_Evento%d.png', Nome
Sezione,e));
end
```