POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO - ENVIRONMENTAL AND LAND PLANNING ENGINEERING

VERIFICA DI DIVERSI MODELLI DI INFILTRAZIONE NELLA MODELLISTICA IDROLOGICA A SCALA DI BACINO IN BACINI PRE ALPINI E SEMI-ARIDI

Relatore: Prof. Ing. Giovanni Ravazzani

Tesi di Laurea:

Davide Sonvico

Matr. 853557

Anno Accademico 2016-2017

RINGRAZIAMENTI

È doveroso al termine di questo lungo percorso ringraziare tutti coloro che mi hanno affiancato e sostenuto in questi anni. In primis ringrazio il Professor Giovanni Ravazzani che mi ha seguito in questi mesi con grande dedizione e passione. È sempre stato gentile e disponibile nei miei confronti fin dal nostro primo incontro per la tesi triennale.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno aiutato e spronato a migliorare e “ad alzare sempre l’asticella". Ringrazio mio fratello Riccardo per i suoi utili consigli e mia nonna che ha sempre avuto parole di incoraggiamento per me.

Ringrazio i miei amici di sempre e i miei compagni di corso, in particolar modo Tia, Ranza, Lelone e Santa. Grazie per tutte le volte che abbiamo studiato insieme, per avermi aiutato ma soprattutto sopportato durante i momenti più difficili.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE 4
INDICE DELLE TABELLE 6
ABSTRACT 10
INTRODUZIONE 11
1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO 14
1.1 Olona 15
1.2 Seveso 16
1.3 Lambro 18
1.4 Dati a disposizione 20
1.5 Tessitura del suolo 24
1.6 Serpis 26
2 IL MODELLO IDROLOGICO FEST-WB 29
2.1 I dati in ingresso 30
2.2 L'infiltrazione 31
2.2.1 Metodo del Curve Number 31
2.2.2 Metodo di Philip 32
2.2.3 Metodo di Green Ampt 33
3 CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO SUI FIUMI SEVESO, OLONA E LAMBRO 35
3.1 Curve Number 35
3.1.1 Analisi di sensitività 35
3.1.2 Calibrazione del Curve Number 36
3.1.3 Validazione del Curve Number 58
3.2 Philip 69
3.2.1 Analisi di sensitività 69
3.2.2 Calibrazione di Philip 69
3.2.3 Validazione di Philip 92
3.3 Green Ampt 103
3.3.1 Calibrazione di Green Ampt 103
3.3.2 Validazione di Green Ampt 125
3.4 Tabelle finali di confronto 137
3.5 Multimodel 139
3.6 Tabelle di contingenza 141
4 CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO SUL FIUME SERPIS 146
4.1 Calibrazione con il metodo del Curve Number evento per evento 148

4.2 Calibrazione con il metodo globale del Curve Number 150
4.3 Calibrazione con il metodo di Philip 152
4.4 Calibrazione con il metodo di Green Ampt 154
5 CONCLUSIONI 157
BIBLIOGRAFIA 158

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Bacini idrografici che convogliano le loro acque a Milano. I cerchi bianchi indicano le stazioni idrometriche: 1) Lozza, 2) Castellanza, 3) Cantù, 4) Palazzolo, 5) Caslino, 6) Lambrugo, 7) Peregallo, 8) Milano Feltre. 14
Figura 1.2 Individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi. 15
Figura 1.3 Il fiume Seveso in corrispondenza dell'inizio della "tombinatura" a Milano, in via Ornato; 1°ottobre 2010 sono in corso lavori di ulteriore arginatura delle sponde. 17
Figura 1.4 .Individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi. 17
Figura 1.5 Individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi. 19
Figura 1.6 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento delle precipitazioni e del livello idrometrico. 21
Figura 1.7 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento della temperatura dell'aria. 21
Figura 1.8 Inquadramento geografico del bacino del Serpis all'interno della confederazione idrografica dello Jucar. 26
Figura 1.9 Distribuzione delle precipitazioni cumulate per l'evento critico del 12 ottobre 2007 attorno a Valencia. 28
Figura 2.1 Illustrazione schematica del ciclo idrologico. 29
Figura 2.2 Schema concettuale del modello FEST-WB. 30
Figura 2.3 Contenuto idrico lungo il profilo del suolo. 34
Figura 3.1 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza. 41
Figura 3.2 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 43
Figura 3.3 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù. 46
Figura 3.4 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 48
Figura 3.5 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino. 50
Figura 3.6 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 53
Figura 3.7 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 55
Figura 3.8 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 58
Figura 3.9 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza. 60
Figura 3.10 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 61
Figura 3.11 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù. 62
Figura 3.12 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 64
Figura 3.13 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino. 65
Figura 3.14 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 66
Figura 3.15 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 67
Figura 3.16 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 69
Figura 3.17 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza. 72

Figura 3.18 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 75
Figura 3.19 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù. 78
Figura 3.20 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 81
Figura 3.21 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino. 83
Figura 3.22 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 86
Figura 3.23 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 88
Figura 3.24 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 91
Figura 3.25 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza. 94
Figura 3.26 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 95
Figura 3.27 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù. 96
Figura 3.28 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 98
Figura 3.29 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino. 99
Figura 3.30 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 100
Figura 3.31 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 101
Figura 3.32 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 103
Figura 3.33 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza. 106
Figura 3.34 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 109
Figura 3.35 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù. 112
Figura 3.36 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 115
Figura 3.37 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino. 117
Figura 3.38 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 119
Figura 3.39 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 122
Figura 3.40 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 125
Figura 3.41 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza. 127
Figura 3.42 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza. 128
Figura 3.43 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù. 130
Figura 3.44 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo. 131
Figura 3.45 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino. 133
Figura 3.46 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo. 134
Figura 3.47 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo. 135
Figura 3.48 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre. 137
Figura 3.49 Multi modellazione dell'evento 4 per la stazione di Castellanza. 139
Figura 3.50 Multi modellazione dell'evento 2 per la stazione di Lozza. 140
Figura 3.51 Multi modellazione dell'evento 5 per la stazione di Cantù e dell'evento 4 per la stazione di Peregallo. 140
Figura 3.52 Multi modellazione dell'evento 8 per la stazione di Castellanza (in fase di pre calibrazione). 141
Figura 4.1 Risultati della calibrazione con il metodo del CN evento per evento per la stazione idrometrica di Beniarrés. 149
Figura 4.2 Correlazione lineare crescente tra la precipitazione cumulata e i parametri idrologici del suolo S0 e λ a Beniarrés. 150
Figura 4.3 Risultati della calibrazione con il metodo globale del CN per la stazione idrometrica di Beniarrés. 152
Figura 4.4 Risultati della calibrazione con il metodo di Philip per la stazione idrometrica di Beniarrés. ..153
Figura 4.5 Risultati della calibrazione con il metodo di Green Ampt per la stazione idrometrica di Beniarrés. 155

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Olona. 16
Tabella 1.2 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del torrente Seveso. 18
Tabella 1.3 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Lambro. 19
Tabella 1.4 Descrizione delle stazioni idrometriche di interesse. 20
Tabella 1.5 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Olona. 22
Tabella 1.6 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Seveso. 22
Tabella 1.7 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Lambro. 22
Tabella 1.8 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Maidment, 2001). 24
Tabella 1.9 Riclassificazione della mappa della tessitura del suolo. 25
Tabella 1.10 Percentuale d'area interessata dallo sviluppo urbano, Urban (%), e curve number, CN, negli anni 1955, 1980 e 2010 per i tre principali bacini idrografici. 25
Tabella 1.11 Caratteristiche dell'evento critico del 12 ottobre 2007 registrate lungo le stazioni idrometriche del bacino del Serpis. 28
Tabella 3.1 Riassunto delle classi di indici di sensibilità. 36
Tabella 3.2 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza. 39
Tabella 3.3 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza. 40
Tabella 3.4 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza. 41
Tabella 3.5 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza. 42
Tabella 3.6 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Cantù. 44
Tabella 3.7 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù. 45
Tabella 3.8 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo. 46
Tabella 3.9 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo. 47
Tabella 3.10 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino. 49
Tabella 3.11 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino. 49
Tabella 3.12 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo. 51
Tabella 3.13 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo. 51
Tabella 3.14 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo. 53
Tabella 3.15 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo. 54
Tabella 3.16 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre. 56
Tabella 3.17 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre. 56
Tabella 3.18 Riassunto della calibrazione con il metodo del CN con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica. 58
Tabella 3.19 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici. 59
Tabella 3.20 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici. 60
Tabella 3.21 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici. 61
Tabella 3.22 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici. 63
Tabella 3.23 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici. 64
Tabella 3.24 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici. 65
Tabella 3.25 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici. 66
Tabella 3.26 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici. 68
Tabella 3.27 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza. 70
Tabella 3.28 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza. 71

Tabella 3.29 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lozza. 71
Tabella 3.30 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza. 73
Tabella 3.31 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza. 73
Tabella 3.32 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Castellanza. 74
Tabella 3.33 Eventi presi in esame per calibrazione della stazione di Cantù. 76
Tabella 3.34 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù. 76
Tabella 3.35 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Cantù. 77
Tabella 3.36 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo. 78
Tabella 3.37 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo. 79
Tabella 3.38 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Palazzolo. 79
Tabella 3.39 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino. 81
Tabella 3.40 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino. 81
Tabella 3.41 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Caslino. 82
Tabella 3.42 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo. 84
Tabella 3.43 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo. 84
Tabella 3.44 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lambrugo. 85
Tabella 3.45 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo. 86
Tabella 3.46 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo. 87
Tabella 3.47 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Peregallo. 87
Tabella 3.48 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre. 89
Tabella 3.49 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre. 89
Tabella 3.50 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Milano Feltre. 90
Tabella 3.51 Riassunto della calibrazione con il metodo di Philip con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica. 92
Tabella 3.52 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici. 93
Tabella 3.53 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici. 94
Tabella 3.54 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici. 95
Tabella 3.55 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici. 97
Tabella 3.56 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici. 98
Tabella 3.57 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici. 99
Tabella 3.58 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici. 100
Tabella 3.59 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici. 102
Tabella 3.60 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza. 104
Tabella 3.61 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza 104
Tabella 3.62 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lozza. 105
Tabella 3.63 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza. 107

Tabella 3.64 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza. 107
Tabella 3.65 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Castellanza. 108
Tabella 3.66 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Cantù. 110
Tabella 3.67 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù. 110
Tabella 3.68 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Cantù. 111
Tabella 3.69 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo. 112
Tabella 3.70 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo. 113
Tabella 3.71 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Palazzolo. 113
Tabella 3.72 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino. 115
Tabella 3.73 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino. 115
Tabella 3.74 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Caslino. 116
Tabella 3.75 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo. 117
Tabella 3.76 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo. 118
Tabella 3.77 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lambrugo. 118
Tabella 3.78 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo. 120
Tabella 3.79 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo. 120
Tabella 3.80 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Peregallo. 121
Tabella 3.81 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre. 123
Tabella 3.82 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre. 123
Tabella 3.83 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Milano Feltre. 123
Tabella 3.84 Riassunto della calibrazione con il metodo Green Ampt con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica. 125
Tabella 3.85 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici 126
Tabella 3.86 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici. . 127
Tabella 3.87 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici. 129
Tabella 3.88 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici. 130
Tabella 3.89 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici. 131
Tabella 3.90 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici. ... 133
Tabella 3.91 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici. 134
Tabella 3.92 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici. 136
Tabella 3.93 Confronto delle medie dei tempi di propagazione per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione. 137
Tabella 3.94 Confronto delle medie degli errori relativi sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione. 138
Tabella 3.95 Confronto delle medie degli errori assoluti sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione. 138
Tabella 3.96 Confronto delle medie dei tempi di propagazione per i tre modelli utilizzati in fase di validazione. 138

Tabella 3.97 Confronto delle medie degli errori relativi sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di validazione. 138
Tabella 3.98 Confronto delle medie degli errori assoluti sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di validazione. 138
Tabella 3.99 Soglie di portata di protezione civile, complete ed aggiornate per alcune stazioni idrometriche di studio 142
Tabella 3.100 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Castellanza con eventi calibrati e validati. 142
Tabella 3.101 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Cantù con eventi calibrati e validati. 143
Tabella 3.102 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Peregallo con eventi calibrati e validati. 143
Tabella 3.103 Tabelle di contingenza per ogni singolo modello (post calibrazione e validazione) 144
Tabella 3.104 Tabella di contingenza per la multi modellazione (post calibrazione e validazione). 145
Tabella 3.105 Tabella di contingenza per il metodo CN in fase di pre calibrazione. 145
Tabella 4.1 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo CN evento per evento e stima degli indici. 148
Tabella 4.2 Confronto tra la precipitazione cumulata e i parametri idrologici S0 e lambda per gli eventi studiati. 150
Tabella 4.3 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo globale del CN e stima degli indici. 151
Tabella 4.4 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo di Philip e stima degli indici. 152
Tabella 4.5 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo di Green Ampt e stima degli indici. 154
Tabella 4.6 Riassunto della calibrazione per il bacino del Serpis con tutti i metodi e i parametri utilizzati. 155
Tabella 4.7 Confronto delle medie degli indici stimati dei diversi metodi di calibrazione per il bacino del Serpis. 155

ABSTRACT

Il territorio lombardo del bacino Seveso-Olona-Lambro (SOL) rappresenta un esempio significativo di criticità idraulica-ambientale derivante da una forte urbanizzazione, in quanto esso è inserito in un'area densamente sviluppata e industrializzata. Nel nostro contesto di studio, in particolare, i danni da esondazioni sono aumentati esponenzialmente negli ultimi 60 anni e negli ultimi decenni questo territorio è stato colpito duramente da numerosi eventi di piena.
La presente tesi si pone l'obiettivo di verificare come diversi metodi per il calcolo dell'infiltrazione del suolo, possano migliorare la previsione delle piene. Si andranno ad utilizzare 3 metodi concentrati: il metodo empirico del SCS-CN (1972) e quelli fisicamente basati di Philip (1957) e Green-Ampt (1911). In particolare questi ultimi due sono stati implementati a scala di bacino per la prima volta all'interno del modello idrologico distribuito FEST.

Inoltre si valuterà l'efficienza di un approccio multimodel in modo da compensare le varie incertezze intrinseche presenti nei singoli modelli.

La seconda parte di questa tesi ha l'obiettivo di valutare se questi stessi modelli possono essere applicati anche su bacini semi-aridi come quelli spagnoli (nel nostro caso attorno a Valencia) con caratteristiche morfologiche particolari e distribuzione delle precipitazioni ben differenti in termini di frequenza e intensità.

INTRODUZIONE

Su una superficie totale di circa 2500 km^2 vive e opera una popolazione complessiva di circa 4 milioni di abitanti, con un impatto sul territorio assai rilevante per la presenza di attività industriali, agricole e zootecniche di grande rilievo a livello nazionale ed internazionale.
L'evidente incremento delle precipitazioni ad alta intensità a scala regionale (Trenbert et al.,2007) e locale (Beniston,2009; Giorgi et al., 2011) supportano l'idea che il ciclo idrologico stia cambiando come risultato del riscaldamento globale e dell'aumento associato di contenuto di vapor d'acqua ed energetico in atmosfera.

Molti processi del ciclo idrologico avvengono nella zona insatura del terreno (vadose zone), considerata come il collegamento tra l'atmosfera e il suolo. Tra i principali processi svolge un ruolo fondamentale l'infiltrazione, che ha guadagnato una grande importanza in campo scientifico e idrologico. È definita come il movimento dell'acqua dalla superficie del terreno all'interno del suolo. Il processo viene chiamato infiltrazione, qualora questo si intrinsechi in una matrice non satura; quando il moto avviene in ambiente saturo si parla invece di filtrazione. La conoscenza qualitativa e quantitativa del fenomeno dell'infiltrazione riveste grande importanza nel ciclo idrologico, anche per questo sono numerose le leggi empiriche e teoriche che ne descrivono il funzionamento. Il fenomeno dell'infiltrazione dipende fortemente dalla tipologia della matrice solida del suolo. Quest'ultima è caratterizzata dalla tessitura, ovvero dalla composizione granulometrica, e dalla struttura che ne definisce invece la tipologia di aggregazione dei singoli granuli (granulare, laminare o compatta). La granulometria determina la porosità del suolo e quindi influisce sulla conducibilità idraulica e la capacità di ritenzione di volume idrico.

Per una descrizione appropriata del movimento dell'acqua all'interno della zona satura, l'equazione di Richards (1931) è stata implementata in modo sofisticato per simulare questo processo.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(k + D\frac{\partial\theta}{\partial z})$$

rappresenta la forma monodimensionale dell'equazione del moto vario in un mezzo poroso insaturo, nell'incognita Θ. La sua integrazione pone numerosi problemi operativi, dovuti alla necessità di specificare le condizioni iniziali di Θ nonché le condizioni al contorno, ovvero il volume d'acqua disponibile per infiltrazione alla superficie e la conducibilità idraulica nel sottosuolo. Per ovviare a tali problemi sono stati introdotti, da diversi autori, approcci semplificati per il calcolo dell'infiltrazione.

In letteratura esistono molti modelli d'infiltrazione che sono caratterizzati da differenti livelli di accuratezza. I modelli che simulano questo processo hanno avuto un ruolo primario, poiché forniscono indicazioni sui meccanismi che controllano il movimento delle acque sotterranee nella zona vadosa e le caratteristiche del loro deflusso. I risultati ottenuti con i modelli d'infiltrazione possono, inoltre, essere utilizzati come input in altri processi di modellazione.

Questi modelli sono solitamente basati sulla legge di Darcy e l'equazione di bilancio della massa che dimostra di essere uno strumento appropriato per descrivere il processo d'infiltrazione. La ritenzione idrica del suolo e la conduttività idraulica sono i parametri richiesti come input per le simulazioni basate sull'equazione di Richards. Quest'equazione permette una descrizione dettagliata del flusso e della distribuzione dell'acqua all'interno del profilo del terreno. Un modo sofisticato per risolvere quest'equazione è possibile attraverso l'uso delle soluzioni numeriche non lineari.

Molti dei modelli che vengono esaminati in questa tesi, per la loro formulazione matematica, sono rappresentativi della sola capacità di drenaggio del terreno al variare del tempo per assegnate condizioni iniziali (superficie satura), indipendentemente dalla precipitazione. Pertanto si parla di infiltrazione potenziale, o capacità di infiltrazione, cioè quella che presenterebbe il terreno in determinate condizioni se l'acqua fosse messa continuamente ed illimitatamente a disposizione alla superficie. Il reale tasso di infiltrazione si ottiene, invece, attraverso il confronto tra capacità di infiltrazione ed intensità di pioggia. Se quest'ultima risulta in ogni istante maggiore del tasso di infiltrazione potenziale, l'acqua disponibile è sufficiente a soddisfare la capacità del terreno di assorbire acqua, ed il tasso di infiltrazione potenziale coincide con il reale.

La valutazione delle perdite per infiltrazione effettuata con l'approccio che esamina la variazione nel tempo dell'infiltrazione nel terreno tramite l'equazione di Richards determina notevoli problemi per la sua utilizzazione pratica, specie nei modelli che si sviluppano su base spaziale e temporale estesa. Si parte dall'ipotesi semplificata che il terreno sia omogeneo, infinitamente profondo e che il primo strato di suolo sia saturo.

In un moto di filtrazione il campo di velocità del fluido è estremamente eterogeneo, essendo la velocità stessa estremamente variabile nello spazio in dipendenza della posizione dei grani e dei canali di scorrimento. Un'analisi puntuale di tale variabilità è quindi estremamente complessa e praticamente impossibile, in ragione dell'impossibilità di conoscere nel dettaglio la geometria del sistema. Di conseguenza, nell'analisi dei moti idrici subsuperficiali si introduce normalmente l'ipotesi di omogeneità all'interno di un volume di controllo sufficientemente piccolo, limitandosi quindi a studiare la velocità media (o la portata) del fluido che attraversa una superficie di area A normale alla direzione generale del movimento. Inoltre si presume che le traiettorie del fluido abbiano sensibilmente la stessa direzione e che quindi il moto appartenga alla categoria delle correnti. Poiché di norma le traiettorie hanno curvatura trascurabile, si può assumere che la corrente sia lineare e che quindi la distribuzione delle pressioni al suo interno segua la legge idrostatica. È importante quindi valutare il comportamento del suolo tramite curve di ritenzione, sfruttando parametri come il contenuto d'acqua e la permeabilità.

Al fine di ridurre le perdite causate dalle inondazioni, i sistemi di previsione in tempo reale basati sull'accoppiamento dei modelli meteorologici e idrologici, attraverso l'emissione d'allerte in anticipo, possono lavorare in perfetta sinergia con gli interventi strutturali (Amengual et al., 2007 and 2015; Rabuffetti et al., 2008; Ceppi et al., 2013). Nonostante l'uso diffuso dei sistemi di allerta per le piene, sono numerose le problematiche che non trovano ancora risposte univoche quando si affrontano inondazioni in bacini di piccole dimensioni (Silvestro et al., 2015).

L'accuratezza delle simulazioni dipende fortemente dalla qualità dei parametri di input tra i quali, in particolare, quelli che riguardano l'idraulica del suolo. Una descrizione accurata di queste proprietà è comunque necessaria per ridurre l'incertezza associata alla predizione modellistica. Nel corso degli anni sono stati fatti molti tentativi per sviluppare metodi semplici per derivare questi parametri come alternativa alle misure dirette.

Numerosi esperimenti di modellazione numerica sulle piene (flash floods) sono stati condotti sull'area oggetto di studio in anni recenti. Molti di questi si sono focalizzati sul test di sensitività (Federico et al.,2008; Bresson et al., 2009), sullo sviluppo dei sistemi di previsione (Davolio et al., 2009) e sui meccanismi di investigazione riguardanti gli eventi di forti precipitazioni (Miglietta and Regano,2008). Le

analisi di sensitività sono importanti perché anticipano la calibrazione vera e propria e permettono di determinare i parametri più sensibili.

Secondo (Yapo et al.,1998; Madsen,2000) uno schema di calibrazione può includere l'ottimizzazione di obiettivi multipli che misurano aspetti differenti della risposta idrologica come per esempio il rapporto tra i volumi di runoff simulati e osservati, i picchi di piena e la forma dell'idrogramma.

La protezione dalle piene, la qualità dell'acqua e gli schemi di gestione delle acque, richiedono una buona ed accurata conoscenza della modellazione del deflusso su scala locale. È comune per gli idrologi lavorare alla scala di singoli eventi precipitativi. La più importante sfida che attende il modellatore consiste nella scelta del modello afflussi-deflussi che può accuratamente simulare un'ampia varietà di eventi di piena.

A causa dei brevi tempi di consegna, l'accuratezza di ogni allarme preventivo per le piene improvvise dipende dall'alto grado di qualità del monitoraggio e della previsione della precipitazione (Collier,207; Alfieri et al.,2012; Quintero et al.,2012; Liechti et al.,2013). Si vuole migliorare sia la previsione meteorologica che quella idrologica, quindi nello specifico il fenomeno dell'infiltrazione direttamente connesso al deflusso delle piene. È opportuno considerare che le piene improvvise sono solitamente la conseguenza di fenomeni precipitativi di breve o elevata intensità, principalmente confinati spazialmente, di origine convettiva e spesso intensificati a causa dell'orografia (Gaume et al., 2009).

Per quanto riguarda il regime idrologico nei bacini aridi e semi-aridi è lecito affermare come esso sia estremo e altamente variabile; può capitare che le piene istantanee provenienti da un singolo grande temporale eccedano il deflusso superficiale totale caratterizzante un certo numero di anni (Wheater et al.,2008). Molti di questi fiumi sono spesso asciutti durante la stagione estiva, così da rendere meno sopportabili i danni causati dalle piene intense ed inattese (Belmonte and Beltràn,2001; Amengual et al.,2007 and 2015). Di conseguenza, è fondamentale definire il passo temporale, considerato uno dei fattori più importanti per la simulazione e la previsione delle piene (Singh adn Frevert,2002; Wang et al.,2010).

Il territorio spagnolo del Mediterraneo è una regione incline a piene fluviali durante la fine dell'estate e l'inizio della primavera, con tassi elevati di precipitazione che perdurano per diverse ore sui singoli bacini. Questa persistenza è spesso associata all'orografia che stabilizza i sistemi convettivi quasi-stazionari alla mesoscala (Kolios e Feidas, 2010). Inoltre, il setting geografico particolare di questa regione semi arida, con molti bacini costieri di piccole e medie dimensioni, ripidi e densamente urbanizzati, riduce ulteriormente i tempi di risposta idrologici ed incrementa i rischi di piena. Può succedere che ci siano improvvisi incrementi dei livelli, portate più veloci e con picchi più elevati, che possono causare danni sostanziali alle proprietà e alle vite umane. Si evidenzia una forte non linearità nella risposta idrologica dei bacini semi aridi alle intense precipitazioni, essendo un compito piuttosto arduo produrre previsioni idrologiche accurate.

Nei terreni molto secchi si formano delle zone superficiali completamente asciutte che causano una sorta di discontinuità idraulica all'interno del processo d'infiltrazione: al contrario di quanto si potrebbe immaginare, quando piove poco l'acqua non è in grado di infiltrarsi, di conseguenza si trasforma tutto in deflusso superficiale. Invece dove i volumi d'acqua sono maggiori, torna a formarsi una continuità idraulica, con una fase di imbibimento iniziale tale per cui, per eventi con volumi di precipitazione maggiori, si hanno per assurdo deflussi minori. Invece, con anche piccoli volumi di pioggia, possono accadere eventi incredibili, con portate di piena che in pochissimo tempo possono raggiungere e superare picchi di centinaia di m^3/s.

1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO

Qui di seguito viene presentata e descritta l'area di interesse, dal punto di vista geomorfologico e climatico. In un primo momento vengono analizzati i bacini pre alpini interessati dal nostro studio, quali il Seveso, l'Olona e il Lambro, successivamente il bacino del Serpis all'interno della comunità valenciana, come rappresentante dei bacini semi-aridi.

I numerosi corsi d'acqua naturali che scorrono a nord di Milano, si muovono in direzione nord-sud e risultano interconnessi fra di loro da una fitta rete di canali artificiali, realizzati sia per scopi irrigui che per la protezione delle piene dai centri abitati. Il principale corso d'acqua è il Lambro settentrionale, che scorre a est di Milano. Procedendo verso ovest si incontrano il Seveso e l'Olona. I più importanti canali artificiali sono il Villoresi e i navigli della Martesana, Grande e di Pavia, tutt'oggi utilizzati come vie di trasporto.

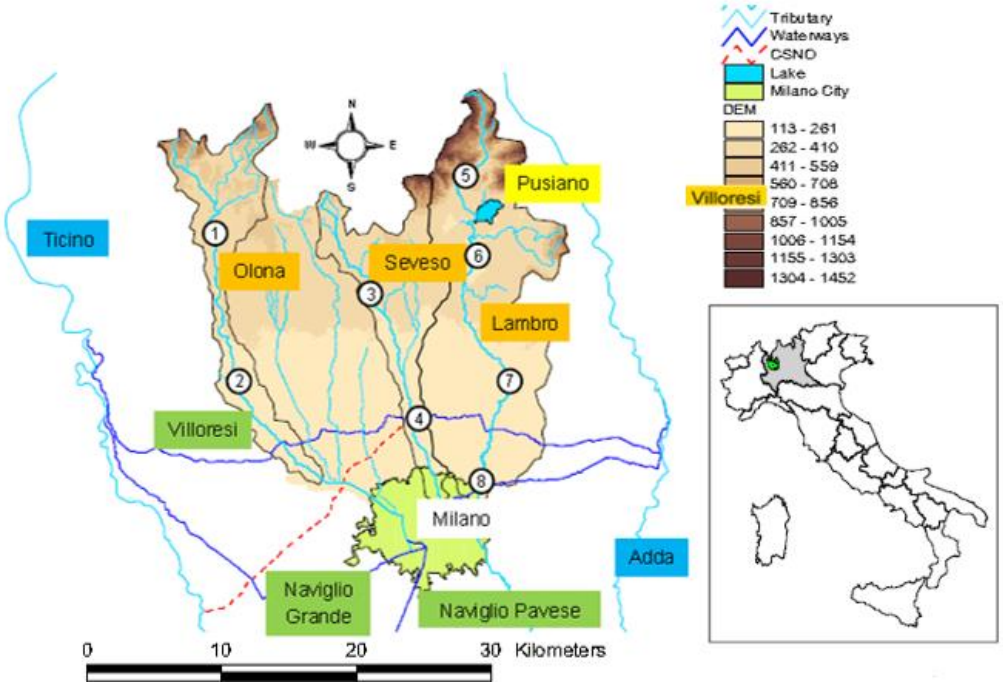


Figura 1.1 Bacini idrografici che convogliano le loro acque a Milano. I cerchi bianchi indicano le stazioni idrometriche: 1) Lozza, 2) Castellanza, 3) Cantù, 4) Palazzolo, 5) Caslino, 6) Lambrugo, 7) Peregallo, 8) Milano Feltre.

Per alleggerire i carichi idraulici dei corsi d'acqua diretti a Milano, all'inizio degli anni 80' fu realizzato il canale scolmatore di nord-ovest (CSNO) che deriva le acque del Seveso per confluirle nel Ticino in prossimità di Abbiategrasso; lungo il suo percorso, lo scolmatore intercetta le portate eccedenti dell'Olona. Esiste anche il cosiddetto Deviatore Olona che ha il compito di alleggerire le portate dell'Olona in ingresso a Milano, che non possono essere deviate dal CSNO.

ANALISI DEI BACINI DI INTERESSE

Per quanto riguarda il reticolo idrografico che insiste sul territorio milanese fortemente urbanizzato, si presentano con maggiore dettaglio i bacini relativi ai fiumi che determinano particolari criticità.

1.1 Olona

Inquadramento fisico e idrografico

Il bacino dell'Olona, che si estende dalla sorgente fino al limite urbano di Milano, ha una superficie complessiva di circa 911 km², ubicato per il 99% circa (902 km²) in territorio italiano e per il rimanente in territorio svizzero. Complessivamente il bacino si trova per l'11% in ambito montano (10% la parte italiana, 1% la parte svizzera).

Il fiume Olona ha origine alle pendici dei monti a nord di Varese ad una quota di circa 1100 m s.l.m. e, dopo un tragitto di circa 60 km, entra nell'abitato di Milano da cui esce con il nome di Lambro Meridionale. Il bacino imbrifero dell'Olona è suddivisibile in due distinte zone: una prima montana, dal limite superiore del bacino fino a Ponte Gurone e una seconda più pianeggiante, da Ponte Gurone alla città di Milano. La parte montana ha forma a Y, con il ramo occidentale costituito dal bacino dell'Olona vero e proprio e il ramo orientale costituito da diversi torrenti. Al ramo occidentale, molto urbanizzato, appartengono gli abitati di Varese e di Induno Olona; quello orientale, salvo alcuni centri abitati di modeste dimensioni, è per la maggior parte costituito da terreno boschivo e agricolo. A valle di Ponte Gurone il bacino diventa di forma molto stretta e allungata in direzione nord-sud, alternando zone densamente urbanizzate ad altre che mantengono una considerevole porzione di superficie non occupata da insediamenti. Terminata la valle dell'Olona, il bacino diventa pianeggiante e il fiume entra nella zona maggiormente urbanizzata, attraversando i comuni di Castellanza e Legnano. A valle di questi centri abitati, si ha ancora un'alternanza di aree agricole e di aree urbane fino al confine del territorio del comune di Rho, dove è posta l'opera di derivazione "Olona 1", attraverso la quale le piene sono scolmate nello Scolmatore di Nord Ovest.
In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Castellanza ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica in figura, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse nella tabella.

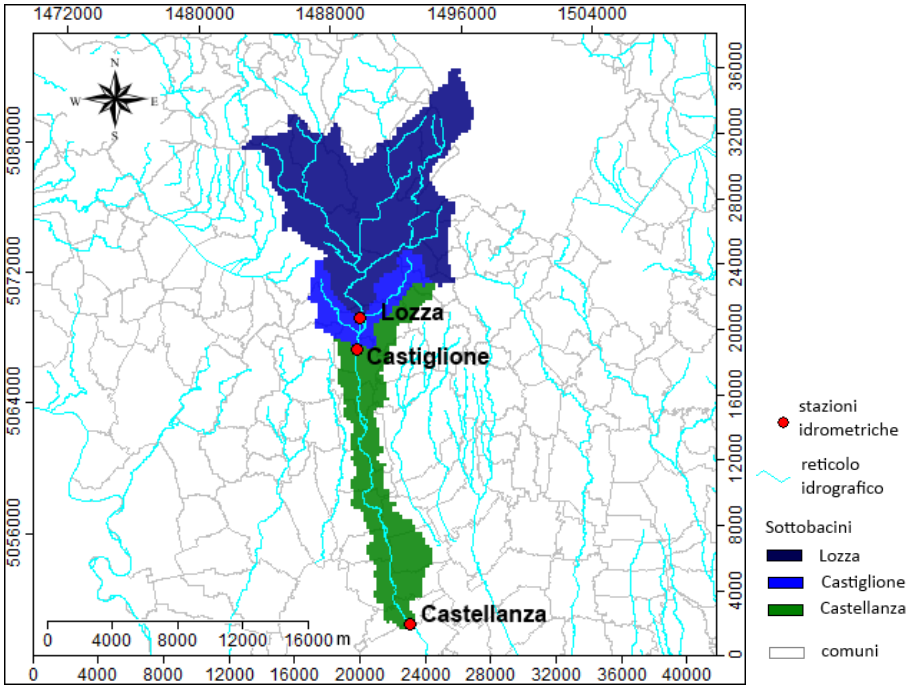


Figura 1.2 Individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi.

	Lozza	Castiglione	Castellanza
Area bacino [km^2]	96.88	114.56	162.6
Lunghezza asta principale [km]	16.7	18.6	39.6
Pendenza media [%]	6.95	6.4	5.17
Altitudine media [m]	464.5	449.2	399.6
Tempo di Lag [h]	3.7	4.2	6.9

Tabella 1.1 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Olona.

Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

La stazione di misura dell'Olona a Ponte Gurone (bacino di 97 km^2, altitudine media 472 m s.l.m.) ha funzionato nel periodo dal 1939 al 1956; la portata media risulta essere di 2.3 m^3/s mentre la massima registrata e stata di 59 m^3/s il 12 novembre 1951. A Legnano la portata media aumenta a 4 m^3/s, mentre a Rho, dopo che il fiume riceve gli apporti di Bozzente e Lura, si toccano i 6.9 m^3/s.
L'Olona, prima della costruzione di argini e canali scolmatori, è stato un fiume che ha flagellato con frequenti esondazioni le aree che attraversa. Considerando gli ultimi quattro secoli, si possono contare più di 70 alluvioni. I principali eventi alluvionali che hanno interessato l'Olona negli ultimi 200 anni sono i seguenti:

- ottobre 1801, piena dell'Olona con esondazioni in vari centri compresa Milano;
- 9-13 dicembre 1910, esondazioni diffuse dell'Olona nel tratto compreso tra Varese e Milano, di cui e allagata la periferia;
- 4-5 giugno 1936, alluvione dell'Olona con allagamento di vari centri abitati fra cui Legnano;
- 1 giugno 1992, alluvione sull'Olona con danni soprattutto a Castiglione;
- 1993, alluvione sull'Olona con allagamenti alla periferia di Milano;
- luglio 2009, alluvione sull'Olona con danni soprattutto a Varese.

Nella parte montana del bacino le portate defluenti nell'Olona hanno origine naturale, dalle sorgenti o dai contributi che si generano per effetto degli afflussi meteorici sul bacino. Nella parte valliva il regime delle portate è fortemente artificializzato a causa degli apporti dalle reti di scolo fognario, dagli scarichi e dai drenaggi urbani. Complessivamente il regime dell'Olona è tipicamente prealpino con periodi di portata elevata in autunno e primavera e periodi di magra in inverno.

1.2 Seveso

Inquadramento fisico e idrografico

Il Seveso nasce alle falde del Monte Pallanza nel Comune di San Fermo della Battaglia (CO) e converge con il Naviglio della Martesana. Attraversa un territorio molto differenziato, con notevoli variazioni geologiche, litologiche, geomorfologiche e altimetriche: il bacino presenta la sua quota maggiore a 614m s.l.m. e la quota di chiusura a 120m s.l.m. quando raggiunge la città di Milano.
Verso Milano il bacino del Seveso perde ogni caratteristica di naturalità: le acque del Seveso attraversano Milano, scorrendo sotto la città, per poi tornare in superficie in direzione Sud/Ovest in corrispondenza con la direttrice insediativa della via Emilia raccogliendo le acque della Vettabbia e del depuratore di Milano/Nosedo fino a confluire nel Lambro nei pressi di Melegnano. In Figura 1.3 viene mostrato il fiume Seveso all'entrata nella città di Milano.

Figura 1.3 Il fiume Seveso in corrispondenza dell'inizio della "tombinatura" a Milano, in via Ornato; 1°ottobre 2010 sono in corso lavori di ulteriore arginatura delle sponde.

Per quanto riguarda il reticolo idrografico, gli affluenti del fiume Seveso sono:

- in sponda sinistra: rio Rossola, rio Acquanegro, torrente S.Antonio, torrente Serenza, torrente Certesa;
- in sponda destra: torrente Comasinella.

In termini di quantità di acqua apportata e di contributo per la formazione delle piene, il più importante è certamente il torrente Certesa, che sottende un bacino di area pari a 62 km^2 circa con una lunghezza dell'asta pari a 20 km. Esso confluisce nel Seveso a Cesano Maderno, ai piedi degli altopiani morenici. In esso a sua volta confluisce la roggia Vecchia, che ha origine dal lago di Montorfano.

In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Paderno Dugnano ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse in tabella 1.2.

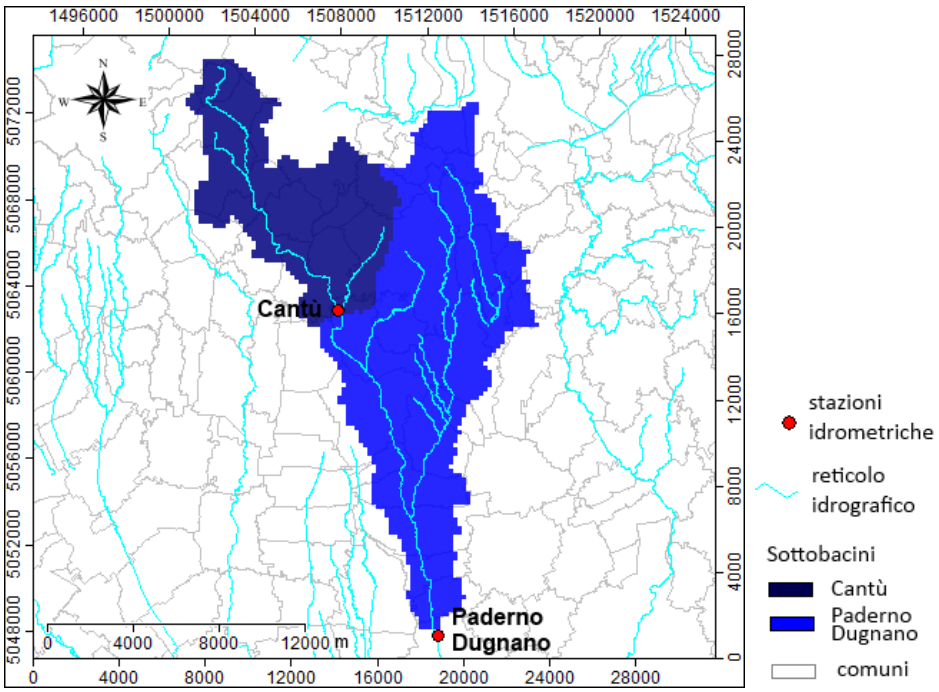


Figura 1.4 .Individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi.

	Cantù	Paderno Dugnano
Area bacino [km^2]	61.12	175.36
Lunghezza asta principale [km]	16.3	34.4
Pendenza media [%]	3.59	2.49
Altitudine media [m]	335	305.4
Tempo di Lag [h]	3.8	7.5

Tabella 1.2 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del torrente Seveso.

Caratteri generali del paesaggio naturale e antropizzato

La continuità dell'ambiente fluviale viene spezzata da una serie di attraversamenti infrastrutturali e il corridoio fluviale del torrente è suddiviso in diverse aree dal profilo omogeneo; si possono trovare aree boscate e diffuse colture prative oppure più a sud, zone di estrema frammentazione dell'attività agricola. Nella parte settentrionale di Milano, in concomitanza con la fascia di cintura metropolitana a contatto con il comune di Milano, si ha un aumento della percentuale d'urbanizzazione e di aree industriali o di servizio lungo le sponde del fiume. Infine, spostandosi più a sud, gli insediamenti civili e industriali risultano esercitare una diversa pressione, e il territorio torna ad avere un carattere prevalentemente agricolo.

Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

L'analisi dei dati idropluviometrici evidenzia un ruolo determinante nell'"antropizzazione" del regime idrologico da parte degli scarichi che versano nel corpo idrico un carico tale da aumentare le portate naturali in alveo e incrementare il rischio di insufficienza idraulica del sistema. Infatti, considerando la conformazione del Seveso per cui la capacità di deflusso decresce gradatamente da monte a valle, si nota come il regime fluviale presenta un carattere quasi torrentizio con precipitazioni abbondanti concentrate, con onde di piena che provocano esondazioni frequenti in prossimità delle grandi citta, mentre per il resto dell'anno idrologico i deflussi sono modesti se non scarsi. Questi fenomeni di esondazione sono determinati da un'intensa antropizzazione sul bacino, che ha ridotto ulteriormente gli alvei dimensionati naturalmente per smaltire solo i deflussi provenienti dalle parti alte dei bacini e che ha determinato apporti spesso di gran lunga superiori a quelli dei maggiori affluenti naturali.

1.3 Lambro

Inquadramento fisico e idrografico

Il bacino del Lambro ha una superficie complessiva di circa 1980 km^2 di cui solo il 5% si trova in territorio montano. Il reticolo idrografico risulta essere piuttosto complesso e articolato. Le portate provenienti dal bacino di monte sono laminate dal lago di Pusiano che, a causa della sua superficie poco trascurabile (circa 5 km^2) rispetto a quella del bacino sotteso, esercita una forte azione moderatrice sui fenomeni di piena.
Ci sono tre tratti caratterizzati dalla prevalenza di rilevanti apporti idrici rispetto ai fenomeni di trasporto. Nel primo tratto, sito nella zona di studio, compreso tra Peregallo e Sesto S. Giovanni, gli apporti provengono essenzialmente dai centri abitati di Monza e Sesto S. Giovanni. Nel secondo tratto, compreso tra S. Donato Milanese e Melegnano, confluiscono nel Lambro gli apporti del settore orientale di Milano

e i contributi di due corsi d'acqua minori che provengono dall'interno di Milano, il cavo Redefossi e la roggia Vettabbia. Il terzo tratto, a valle di S. Angelo Lodigiano, in cui il Lambro meridionale (nome preso dall'Olona dopo l'attraversamento di Milano) confluisce nel Lambro settentrionale.
In questo studio viene considerato il bacino chiuso alla stazione idrometrica di Milano - via Feltre ed è possibile apprezzarne la configurazione geografica, dove sono anche mostrati alcuni sottobacini di interesse. In seguito, vengono presentati alcuni parametri morfologici di interesse.

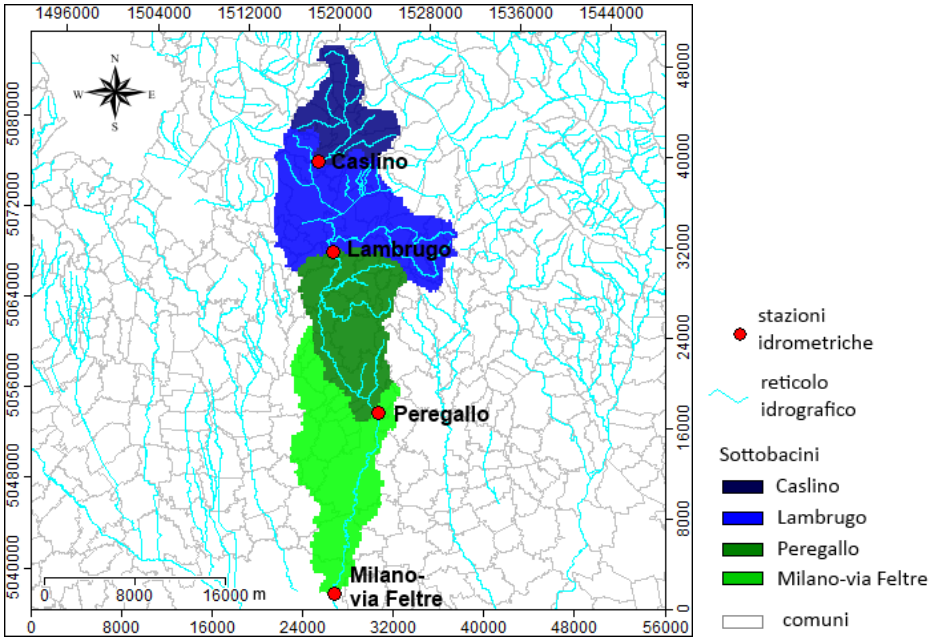


Figura 1.5 Individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi.

	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano-via Feltre
Area bacino [km^2]	52.84	176.84	270.08	382.84
Lunghezza asta principale [km]	14.2	27.7	51	86.7
Pendenza media [%]	17.8	10.8	7.9	5.8
Altitudine media [m]	776.7	514.7	435.9	360.4
Tempo di Lag [h]	2.3	5.2	8.5	13.7

Tabella 1.3 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Lambro.

Caratteri generali del paesaggio naturale e antropizzato

La valle del Lambro presenta quattro realtà geografiche-paesaggistiche differenti. La prima è l'area montana del triangolo Lariano, che va da Magreglio, dove nasce il Lambro, ai laghi di Pusiano e di Alserio. La seconda va dai laghi di Alserio e Pusiano e termina a Monza. Il processo di urbanizzazione si è attuato soprattutto sulla riva destra del Lambro lungo i due assi prevalenti: la Vallassina e la Monza-Carate. La terza è l'area metropolitana milanese, che interessa il tratto Monza-Melegnano, cioè la porzione di valle del Lambro compresa nell'area metropolitana milanese; in questa regione l'intensa urbanizzazione nasconde spesso le morfologie relitte del corso d'acqua. L'ultima area interessa la pianura agricola del Lodigiano che va da Melegnano al Po, dove il Lambro conclude il suo corso.

Aspetti idrologici, morfologici e idraulici

Storicamente nel tratto di Lambro compreso fra Monza e la confluenza nel Po, nell'intervallo compreso tra il 1872 e il 1980, le piene hanno prodotto inondazioni discontinue, ma talvolta abbastanza estese, manifestandosi mediamente ogni 6 anni. Gli eventi maggiormente critici si sono avuti nel 1917, 1937 e 1951, accompagnati da frane nel bacino montano e inondazioni diffuse in pianura, in particolare a Monza e nella periferia di Milano, e nel 1879, 1947, 1976 e 2002 accompagnati da fenomeni erosivi spondali e allagamenti abbastanza estesi e continui tanto che a Monza si sono registrati allagamenti nell'area del parco presso Villasanta e nel centro storico.
Per maggiori informazioni riguardanti una descrizione più completa dei tre bacini di studio, si rimanda alla tesi precedente "Implementazione di un modello idrologico per la protezione idraulica della città di Milano" (Bocus e Di Luccio, 2013).

1.4 Dati a disposizione

I dati idrologici a cadenza oraria sono stati raccolti dal database on-line dell'ARPA Lombardia e fanno parte della Rete Idronivometeo. In particolare si sono presi in esame gli anni dal 2003 al 2016.
Le grandezze fornite sono:

- il livello idrometrico [cm]: grandezza fondamentale per la stima delle portate;
- la scala di deflusso: legge che lega le altezze idrometriche alle portate defluenti.

In figura 1.6 e 1.7 viene mostrata la distribuzione geografica delle 8 stazioni idrometriche e di tutte le stazioni pluviometriche e termometriche presenti nel territorio in esame.

Stazione	Codice	X	Y	Z	DATA MINIMA [aaaa/mm/gg]	DATA MASSIMA [aaaa/mm/gg]	SCALA DI DEFLUSSO
Lozza –Ponte Vedano	8117	5068954	14898998	276	1998/06/29	ad_oggi	SI
Castellanza	8118	5050428	1492810	216	1998/07/24	ad_oggi	SI
Cantù Asnago	8119	5062800	1507838	244	1998/07/24	ad_oggi	SI
Paderno Dugnano	8121	1512429	5047728	176	1998/07/24	ad_oggi	NO
Caslino d'Erba	8124	5075805	1518073	427	1998/07/24	ad_oggi	SI
Lambrugo	8148	5067778	1519408	273	2001/10/17	ad_oggi	SI
Peregallo	8120	5053579	1523339	240	1998/07/24	ad_oggi	SI
Milano-viaFeltre	8125	5037620	1519463	127	1998/07/24	ad_oggi	SI

Tabella 1.4 Descrizione delle stazioni idrometriche di interesse.

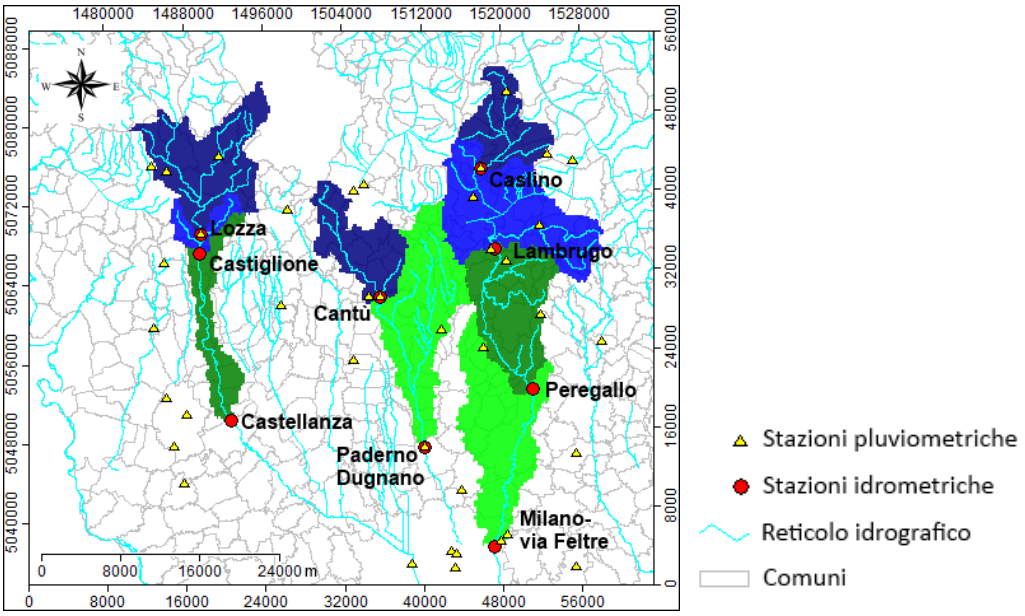


Figura 1.6 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento delle precipitazioni e del livello idrometrico.

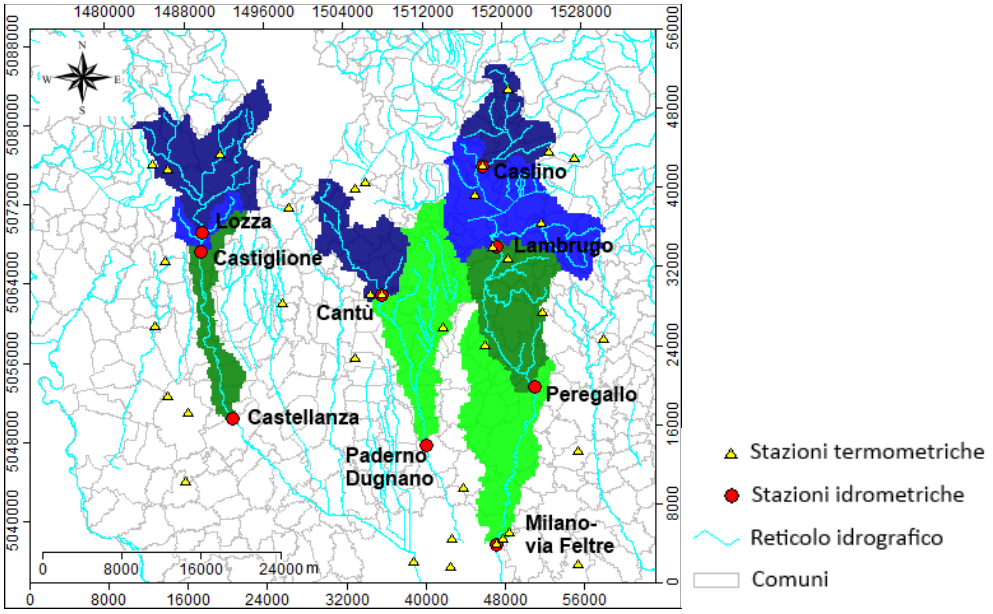


Figura 1.7 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento della temperatura dell'aria.

Sono state anche elencate le scale di deflusso storiche e attuali disponibili per le stazioni in esame: come possiamo notare dalla tabella precedente, la stazione di Paderno Dugnano ne è sprovvista in quanto l'idrometro è posto vicino all'ingresso del canale scolmatore Nord-Ovest; di conseguenza il livello dell'acqua risente della struttura. Per questo motivo la scala di deflusso che veniva utilizzata fino a quel momento ha perso di significatività, poiché la presenza di una nuova struttura idraulica causa la perdita di biunivocità tra la portata e il livello idrometrico. La stazione di Paderno è stata sostituita con quella di Palazzolo che si trova comunque nelle vicinanze, e sfrutta la strumentazione posta al di sopra di un ponte stradale nel 2014. Essendo vicino a quella precedente, monitora la stessa porzione di territorio, però il vantaggio è che, trovandosi più a monte dello scolmatore, non risente della sua presenza. La stazione è

composta da un radar che ha il compito di misurare il movimento delle onde superficiali così da determinare la velocità di deflusso del fiume, sfruttando l'effetto Doppler.
Tutte le scale di deflusso sono state riportate nelle tabelle sottostanti, indicando per ogni stazione l'equazione, il range e il periodo di validità, in quanto la scala di deflusso è stata oggetto di aggiornamenti nel corso del tempo, a causa di variazioni morfologiche e idrauliche dei bacini di interesse.

Tabella 1.5 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Olona.

Sezione	Equazione	Range di validita' [m]	Periodo di validità [gg/mm/aaaa]	Stato
Lozza	Q=40.94*(h-0.67) ^1.73	0.67 < h < 2.0	dal 01/01/2004	storica
Lozza	Q=40.606*(h-0.7) ^1.59	0.7 < h< 3.2	dal 01/01/2006	storica
Lozza	Q=40.606*(H-0.7) ^1.59	0.7 < h < = 0.85	dal 30/05/2008	attiva
Lozza	Q=4.59*(h+0.064) ^5.145	0.85 < h < = 1.05	dal 30/05/2008	attiva
Lozza	Q=66.14*(h-0.83) ^1.397	1.05 < h < 1.5	dal 30/05/2008	attiva
Castellanza	Q = 19.69*(h-0.25) ^1.76	0.25 < h < 2.82	dal 01/01/2002	storica
Castellanza	Q = 0.914*(h+0.603) ^7.785	0.45 < h < =0.66	dal 07/08/2008	storica
Castellanza	Q = 18.846*(h-0.183) ^1.633	0.66 < h < 2.17	dal 07/08/2008	storica
Castellanza	Q = 20.76*(h-0.254) ^1.501	0.53 < h < 1.41	dal 04/11/2014 - ad oggi	attiva

Tabella 1.6 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Seveso.

Sezione	Equazione	Range di validita' [m]	Periodo di validità [gg/mm/aaaa]	Stato
Cantu'	Q=10.12*(h-0.15) ^2.29	0.15 < h< 2.5	dal 01/01/2004	storica
Cantu'	Q = 9.209*(h-0.13) ^2.225	0.13 < h < 2.5	dal 01/08/2006	storica
Cantu'	Q = 8.24*(h-0.02) ^2.548	0.28 < h < 1.055	dal 1/4/2008	storica
Cantu'	Q =6.0064*(h+0.137) ^2.8646	0.54 < h < 1.05	dal 03/05/2010 al 11/1/2011	storica
Cantu'	Q = 15.854*(h-0.41) ^1.632	0.52 < h < 1.08	dal 17/09/2012	storica
Cantu'	Q = 17.033*(h-0.393) ^1.521	0.55 < h < 1.41	dal 26/02/2014 al 19/11/2014	storica
Cantu'	Q = 13.751*(h-0.243) ^1.3	0.39 < h < 1.39	dal 26/04/2015 al 26/10/2015	storica

Tabella 1.7 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Lambro.

Sezione	Equazione	Range di validita' [m]	Periodo di validità [gg/mm/aaaa]	Stato
Caslino d'Erba	Q = 16.285*(h-0.1) ^1.682	0.1 < h < 1.7	dal 17/10/2004	storica
Caslino d'Erba	Q=21.89*(h-0.108) ^1.66	0.18< h < 1.3	dal 01/01/2007	attiva
Lambrugo	Q=1.388888*h	0 < h < 0.36	dal 01/01/2001	storica
Lambrugo	Q=22.0*h^1.1681-6.2617	0.36 < h < 2.78	dal 01/01/2001	storica
Lambrugo	Q=24.8368*(h-0.293) ^1.1485	0.30 < h < 2.45	dal 03/05/2010	attiva
Peregallo	Q=14.1235*(H+0.1192) ^2.4924	0 < h < 3	dal 1/1/1988 al 31/12/2004	storica
Peregallo	Q=3.4647*(h+0.725) ^5.6313	0 < h < = 0.25	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	storica

Peregallo	Q=28.12*(h+0.0368) ^1.7874	0.25 < h < = 2	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	storica
Peregallo	Q=26.367*(h+0.181) ^1.68223	-0.15 < h <3	dal 3/5/2010	attiva
Milano- via Feltre	Q = 15.2184*(h)^1.90687	0 < h < 3.5	dal 01/01/1998	storica
Milano- via Feltre	Q=16.392*h^1.954	0 < h < 3.5	dal 3/5/2010	storica
Milano- via Feltre	Q = 27.743*(h-0.215) ^1.491	0.45 < h <= 2.33	06/08/2014 - ad oggi	attiva
Milano- via Feltre	Q = 108.481*(h-1.922) ^0.276	2.33 < h < 3.85	06/08/2014 - ad oggi	attiva

Durante la definizione della portata, con estrema diligenza si sono rispettati i periodi di validità; non è stato possibile fare lo stesso con i range, in quanto per alcuni eventi di piena, il livello idrometrico misurato supera tale limite. In questi casi si e applicata ugualmente l'equazione a disposizione.

Alcune sezioni di raccolta dati sono state già affrontate nella tesi di laurea "Implementazione di un modello idrologico per la protezione idraulica della città di Milano" (Bocus e Di Luccio, 2013) ma, in questa tesi, sono state completamente riprese dall'inizio, con l'aggiunta di nuove stazioni (esempio Lambrugo e Palazzolo) e di eventi di piena (dal 2013 al 2016).

Le soglie di criticità, fornite dalla protezione civile, si distinguono sui 3 livelli tradizionali: soglie di ORDINARIA, MODERATA ed ELEVATA criticità, ricavate in funzione di criteri statistici.

1. La soglia di ORDINARIA criticità è associata alla piena ordinaria;
2. La soglia di MODERATA criticità è associata alla piena con tempo di ritorno di 2/5 anni (bacini di poche centinaia di km^2 Tr=2 anni, bacini di estensione maggiore Tr=5 anni);
3. La soglia di ELEVATA criticità è associata alla piena con tempo di ritorno di 5/10 anni (bacini di poche centinaia di km^2 Tr=5 anni, bacini di estensione maggiore Tr=10 anni).

Tali considerazioni sono integrate con valutazioni relative alle caratteristiche del corso d'acqua, generalmente condivise con le strutture tecniche ed amministrative locali; quest'ultima valutazione è fondamentale per dare efficacia all'azione di allertamento ed in continuo aggiornamento.

Le sezioni considerate sono quelle per cui esiste un numero sufficiente di dati di portata (per le elaborazioni statistiche) e sono quelle ad oggi indicative delle caratteristiche idrauliche dei corsi d'acqua.

Di seguito si riportano quelle utilizzate sui corsi d'acqua oggetto di studio: è importante valutare se la soglia di criticità moderata presa in considerazione, appartenga al range di riferimento, predisposto da ARPA Lombardia. Si inserisce il valore di soglia all'interno dell'equazione della scala di deflusso, così da ottenere un valore di portata che verrà utilizzato come riferimento per la capacità di smaltimento dell'alveo. Si è scelto di concentrare lo studio sulle portate di criticità moderata e non elevata, per rimanere in condizioni di sicurezza.

- **OLONA:**

Castellanza: 1.80 - **2.10** - 2.40 -> la soglia di criticità moderata utilizzata per ricavare il range di portate di studio rientra nella scala di deflusso del 2007 (Q = 19.69*(h-0.25) ^1.76, 0.25 < h < 2.82).

- **SEVESO:**

Cantù Asnago: 1.20 - **1.50** - 1.70 -> dal 2008 in poi la soglia di criticità risulta maggiore della scala di deflusso (Q = 8.24*(h-0.02) ^2.548, 0.28 < h < 1.055).

Palazzolo: 2.30 - **2.70** - 3.30 **->** non c'è la scala di deflusso a causa del canale scolmatore.

- **LAMBRO:**

Lambrugo: 1.40 - **1.70** - 2.10 -> non ci sono problemi per tutto il periodo di calibrazione (0.36 < h < 2.78).

Peregallo: 1.00 - **1.50** - 2.20 -> non ci sono problemi per tutto il periodo di calibrazione (0.25 < h < = 2).

Milano-via Feltre: 2.10 - **2.30** - 2.60 -> non ci sono problemi per tutto il periodo di calibrazione (0 < h < 3.5).

Successivamente, durante lo studio degli eventi, sarà necessario valutare se anche le portate osservate rientreranno nei range definiti dalla scala di deflusso.

1.5 Tessitura del suolo

Il modello FEST-WB, essendo un modello distribuito, richiede la descrizione delle proprietà idrologiche delle celle elementari in cui è stato suddiviso il territorio: in particolare è di grande importanza la creazione delle mappe della permeabilità, del CN e di altri parametri, poiché su di esse verrà svolta la calibrazione. I dati d'ingresso necessari sono la tessitura e l'uso del suolo.

Quando si vogliono fare delle simulazioni sui bacini idrografici, una delle prime cose da ricercare sono tutte quelle informazioni riguardanti la tessitura del suolo, anche se inizialmente può risultare piuttosto qualitativa. Dalla letteratura si ottengono dei parametri come per esempio ksat o θ residuo, i cui valori sono stati forniti sotto forma di range e sono stati assunti i valori medi. A questi si associano delle classi da 1 a 7 per indicare la tipologia di suolo, dalla ghiaia che risulta essere quella più permeabile, a quella meno permeabile, ovvero la roccia. Per quanto riguarda la settima categoria sono stati considerati però i valori più estremi delle argille. In questo modo per ogni tipologia di terreno si avrà un valore medio per ogni singolo parametro associato. Il terreno sarà diviso in poligoni e per ogni celletta sarà associato un codice. Questi parametri idrologici sono richiesti dal FEST-WB e sono riportati nella tabella sottostante.

classe	Tipo	Ksat [m/s]	θ residuo [-]	θ saturo [-]	Brooks& Corey [cm]	wilting point [-]	field capacity [-]	bubbling pressure [m]	Suction head
1	Ghiaia	1.00E-04	0.006	0.417	1.09	0.007	0.018	0.0136	0.010
2	Sabbia	6.94E-05	0.02	0.437	0.694	0.033	0.091	0.0726	0.050
3	Sabbia limosa	1.39E-05	0.035	0.437	0.553	0.055	0.125	0.0869	0.061
4	Limo sabbioso	6.94E-06	0.041	0.453	0.378	0.095	0.207	0.1466	0.110
5	Limo	4.17E-06	0.027	0.463	0.252	0.117	0.27	0.1115	0.200
6	Argilla	1.11E-07	0.09	0.475	0.165	0.272	0.396	0.373	0.316
7	Roccia	1.00E-09	0.195	0.523	0.293	0.336	0.466	1.872	0.010

Tabella 1.8 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Maidment, 2001).

Tutte le informazioni digitali necessarie per la descrizione sono state elaborate a partire dalle mappe di tessitura del suolo e di permeabilità. La mappa di tessitura del suolo è fornita dalla Regione Lombardia nell'ambito del progetto Dusaf, la quale comprende solamente i territori della pianura padana e pedemontana.

classe	CODICE	DESCRIZIONE
6	A4	argille con sabbia
1	G1	ghiaie poco/ben gradate con argilla e/o sabbia
1	G2	ghiaie poco/ben gradate con argilla e sabbia o con limo e sabbia
1	G3	ghiaie limose con sabbia
5	L4	limi (con sabbia)
4	L5	limi sabbiosi
7	R1	Torbiditi, argille e marne con livelli e/o lenti arenacee e/o calcaree
7	R2	Rocce sedimentarie carbonatiche; Torbiditi, argille e marne con livelli e/o lenti arenacee e/o calcaree
2	S1	sabbie poco gradate (con ghiaia)
2	S2	sabbie poco/ben gradate con limo e/o ghiaia
3	S3	sabbie argillose con ghiaia / sabbie limose con ghiaia
3	NO	no suolo

Tabella 1.9 Riclassificazione della mappa della tessitura del suolo.

La Regione Lombardia si è occupata anche della mappa di permeabilità riguardante le comunità montane lombarde e una volta riclassificate, sono state unite in modo da coprire tutto il territorio dei bacini oggetti di studio.

Successivamente si è determinato il Curve Number di ciascuna cella, parametro necessario per il metodo SCS-CN implementato nel FEST-WB. Essendo un parametro che tiene conto sia dell'uso del suolo che delle caratteristiche idrologiche del suolo, si è compiuta una suddivisione delle celle in più classi in base alla permeabilità. Si e scelto l'SCS-CN per misurare il deflusso del bacino, poiché più il valore del CN è elevato, maggiore sarà il volume d'acqua generato dal deflusso. La tabella sottostante mostra la percentuale d'area urbanizzata e il valore medio di CN per gli anni selezionati nei tre maggiori bacini fluviali che interessano Milano.

	1955		1980		2010	
	Urban (%)	CN	Urban (%)	CN	Urban (%)	CN
Olona	16.4	70	33.4	73.1	42.9	75.1
Seveso	17.1	73.9	38.3	77.3	50.7	80.1
Lambro	15.3	74.6	33.8	77.8	43.7	79.6
Total	16.1	72.7	35.1	75.9	44.9	77.7

Tabella 1.10 Percentuale d'area interessata dallo sviluppo urbano, Urban (%), e curve number, CN, negli anni 1955, 1980 e 2010 per i tre principali bacini idrografici.

I risultati mostrano che la percentuale complessiva d'urbanizzazione è aumentata, a partire dal 16.1% del 1955, sino al 35.1% nel 1980 per poi raggiungere il 44.9% nel 2010. A causa di questa modifica dell'uso del suolo il CN è passato dal valore di 72.7 nel 1955 al valore di 75.9 nel 1980 mentre nel 2010 si è registrato il valore massimo di 77.7. Il bacino del Seveso e quello con la percentuale più alta d'area urbanizzata, vantando il 50.7% nel 2010.

1.6 Serpis

Il Serpis è uno dei bacini mediterranei gestiti dalla Confederazione Idrografica dello Jucar (CHJ). Amministra un territorio di oltre 40000 km^2, comprende molti dei fiumi centrali spagnoli che sfociano nel Mediterraneo, tra cui appunto lo Jucar che è il più importante. Il bacino del Serpis ha un'estensione di circa 800 km^2 ed una lunghezza di 74 km all'uscite del bacino in corrispondenza della città di Gandía. È principalmente caratterizzato da materiale calcareo a monte, e strati carbonati e depositi alluvionali a valle. Comprende più di 200 mila abitanti e le città più popolate sono Alcoi e Gandía. Il territorio è prevalentemente boschivo e agricolo, mentre risulta essere poco urbanizzato (circa il 3%). La regione di Valencia ha un clima mediterraneo semi arido con una precipitazione annuale che varia dai 300 ai 1000 mm. La distribuzione delle piogge stagionali è tipica della regione del Mediterraneo, con un periodo estivo di siccità e periodi umidi principalmente in autunno e in primavera. Pesanti precipitazioni occasionali in estate e autunno possono però contare come una frazione piuttosto consistente sul totale annuale (Romero et al. 1998, Pastor et al. 2010). Il bacino del Serpis è situato in una delle regioni più piovose di Valencia, con precipitazioni annuali tra i 700 e i 900 mm, soprattutto a causa del setting geografico. Infatti si trova in prossimità della cordigliera betica.

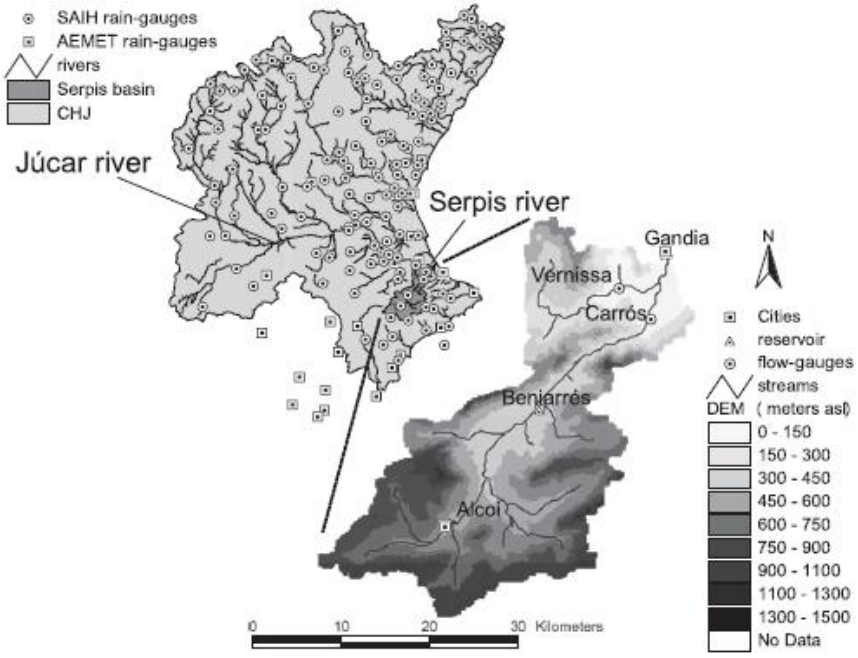


Figura 1.8 Inquadramento geografico del bacino del Serpis all'interno della confederazione idrografica dello Jucar.

Consapevoli del regime idraulico piuttosto irregolare, la divisione idraulica del CHJ ha costruito un serbatoio con una capacità di 27 hm^3 come rifornimento d'acqua e controllo del deflusso nei pressi di Beniarrés, città localizzata nel mezzo dello spartiacque.

Il 12 ottobre 2007, molte piene fluviali hanno colpito il territorio di Valencia, con un impatto devastante in termini di perdite umane, sociali ed economiche. Un potenziamento della modellazione e della previsione di questi eventi estremi è una delle motivazioni fondamentali del programma internazionale chiamato HyMeX (Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment). Può risultare come una base tangibile per le procedure di allerta delle piene e per le misure di mitigazione nel Mediterraneo. Nell'articolo di (Amengual et al.: A Comparison of Ensemble Strategies for Flash Flood Forecasting: The 12 October 2007 Case Study in Valencia, Spain) vengono trattati i sistemi di previsione idrometeorologica per il bacino del Serpis. Il modello idrologico FEST-WB è stato utilizzato per esaminare la risposta idrologica del bacino semi arido e carsico alle pesanti precipitazioni.

L'evento di piena a Valencia del 12/10/07 è un caso esemplare delle conseguenze pericolose degli incrementi rapidi del flusso e rappresenta uno dei temporali più critici della storia della comunità valenciana. Quel giorno, la parte centrale ed esterna di Valencia fu colpita da una precipitazione convettiva di lunga durata che ebbe un impatto sulla maggior parte dei bacini interni, causando seri danni materiali e umani. In questo articolo viene analizzato specificatamente quello che è successo sul bacino del fiume Serpis, il quale è di piccole dimensioni e risponde velocemente agli eventi estremi di pioggia.

Per quanto riguarda l'evento preso in considerazione, nelle 42 h di precipitazioni cumulate osservate (dalla mezzanotte dell'11 ottobre alle 18 del 12 ottobre 2007) sono stati misurati 400 mm in due stazioni di misura, 300 mm in altre tre e 200 in 7 stazioni aggiuntive. I tassi più intensi risalgono alle prime ore del mattino del 12 ottobre in cui si registravano 90 mm di pioggia ogni ora. Le conseguenze di queste piogge torrenziali furono disastrose: 40 persone vennero salvate, 243 evacuate, più di mille abitazioni vennero danneggiate e alcuni ponti crollarono. Le perdite economiche furono stimare intorno ai 100 milioni di euro. A Vernissa, dove è situata una delle stazioni idrometriche, sono state registrati due eventi di piena consecutivi nell'arco di poche ore, con picchi superiori ai 200 e 300 m^3/s. Dalle mappe dell'Instituto Nacional de Meteorología e del CEAM (Centro de estudios ambientales del Mediterráneo) qui presentate ci si può rendere conto della distribuzione delle precipitazioni per quell'evento.

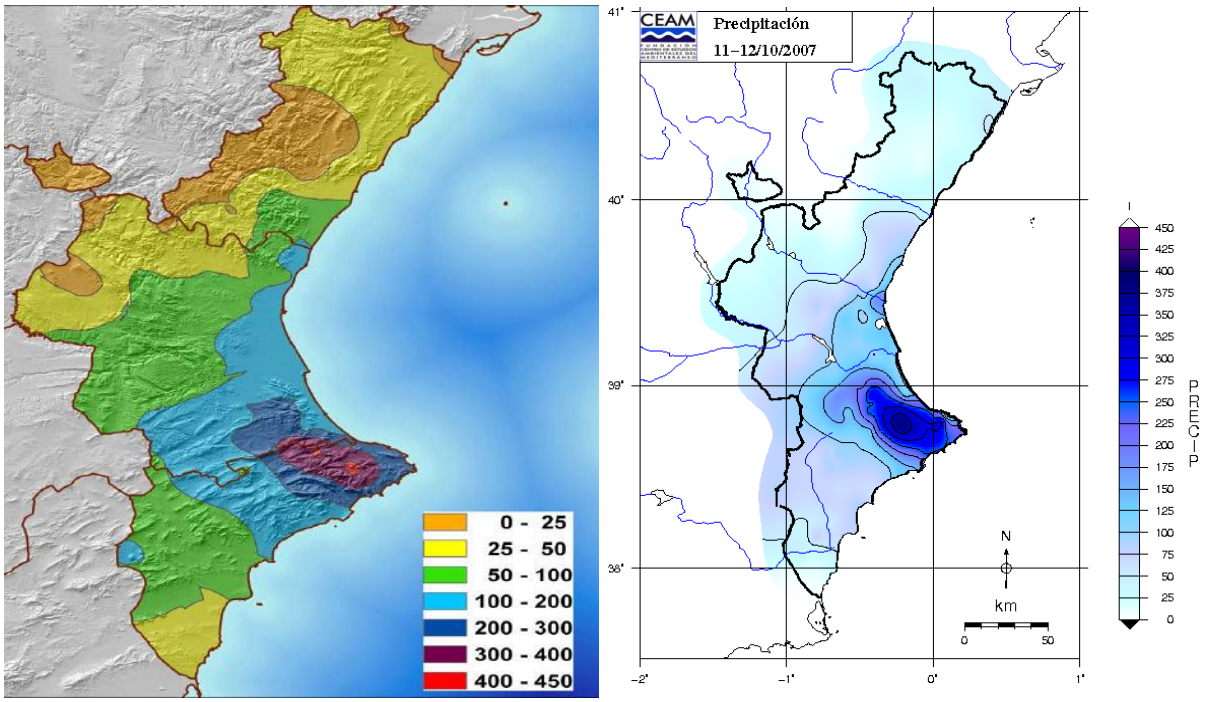


Figura 1.9 Distribuzione delle precipitazioni cumulate per l'evento critico del 12 ottobre 2007 attorno a Valencia.

Per le previsioni meteorologiche è stato utilizzato il modello WRF, con una risoluzione di 2,5 km, su 50 livelli verticali e con un tempo di calcolo di 12 sec per ogni run.

Hydrometric section	Total precipitation (mm)	Total runoff (mm)	Peak discharge ($m^3 s^{-1}$)	Unit peak discharge ($m^3 s^{-1} km^{-2}$)	Runoff ratio
Vernissa	229.3	80.7	314.4	2.8	0.35
Beniarrés	174.2	21.9	255.9	0.5	0.13
Carrós	185.3	35.8	201.4	0.3	0.19
Gandia	196.2	47.2	537.8	0.7	0.24

Tabella 1.11 Caratteristiche dell'evento critico del 12 ottobre 2007 registrate lungo le stazioni idrometriche del bacino del Serpis.

2 IL MODELLO IDROLOGICO FEST-WB

In questa tesi si è usato il modello FEST-WB, acronimo di "Flash flood Event-based Spatially-distribuited rainfall-runoff Transformation-Water Balance", modello distribuito del bilancio idrico (Montaldo et al., 2007; Ravazzani et al., 2007; Ravazzani et al., 2010; Rabuffetti et al., 2008), la cui nascita ha avuto luogo presso il Politecnico di Milano (Mancini, 1990), per simulare la trasformazione degli afflussi in deflussi. A partire da parametri fisici in ingresso riguardanti le forzanti meteorologiche e le caratteristiche del suolo, il modello FEST-WB è in grado di stimare la portata di un corso d'acqua attraverso bilanci di massa e di energia che coinvolgono i principali processi del ciclo idrologico (Figura 2.1): evapotraspirazione, infiltrazione, deflusso superficiale, deflusso sotterraneo e la dinamica della neve.

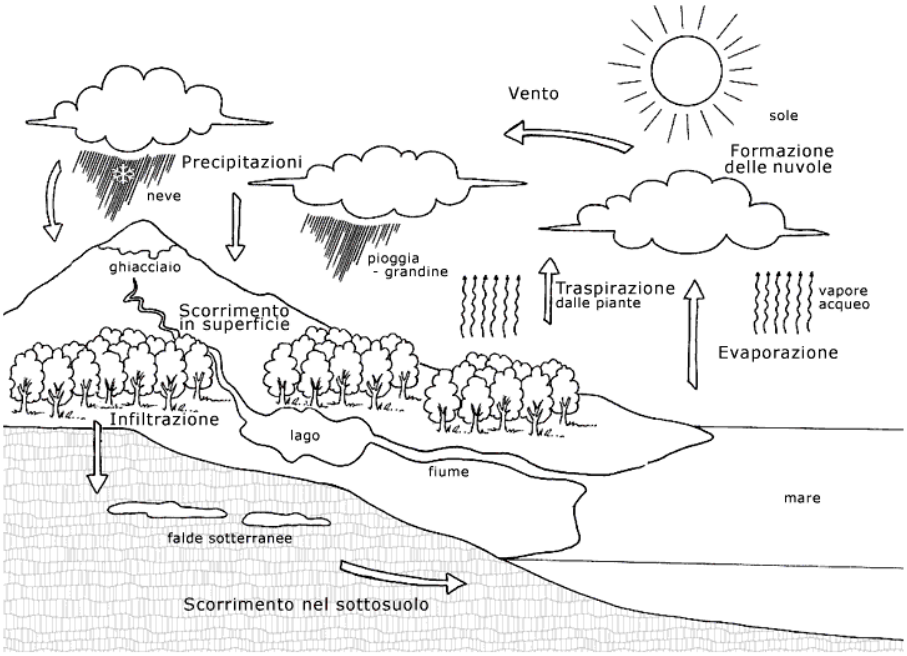


Figura 2.1 Illustrazione schematica del ciclo idrologico.

I modelli fisicamente basati applicano equazioni differenziali per calcolare il bilancio di massa, considerano la variabilità spaziale, temporale ed una griglia tridimensionale per dividere il bacino; richiedono tempi di calcolo piuttosto lunghi ed una grande quantità di dati disponibili. Si differenziano dai modelli di tipo "Black Box", che compiono una semplice trasformazione afflussi-deflussi senza considerare le reali dinamiche idrologiche. I modelli concentrati sono basati su un semplice modello di processi idrologici, usano relazioni empiriche ed elementari per descrivere i vari fenomeni idrologici, come l'evapotraspirazione, l'infiltrazione ecc.; tuttavia, il set di equazioni descrive il bacino come se fosse una singola cella. Un valore medio dei parametri e degli input può essere stimato alla scala di bacino, così possono essere approssimati con un alto livello di accuratezza se c'è un'alta variabilità spaziale all'interno del bacino. Al contrario, con i modelli distribuiti i parametri sono stimati per ogni singola cella del bacino, ottenendo un'alta risoluzione di discretizzazione nelle variabili idrologiche.

Nel nostro caso, il dominio di calcolo è discretizzato con una griglia regolare di celle quadrate (200 x 200 m nella presente tesi) in ognuna delle quali vengono calcolati i flussi d'acqua con cadenza oraria.

L'uso di questo tipo di modello richiede l'acquisizione di una grande quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco sarà dato dal numero delle grandezze usate per descrivere la singola cella elementare, moltiplicato per il totale delle celle presenti. Questa notevole mole di lavoro favorisce però una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, ecc.) abbia una grande influenza sulla risposta del bacino (Ceppi, 2011). Per i dati di carattere puntuale è necessaria una fase di preelaborazione in modo tale da rendere le informazioni distribuite e in formato raster: questo rappresenta un importante differenza rispetto a un modello di tipo concentrato, che considera il sistema-bacino un tutt'uno. Lo schema di funzionamento del modello FEST-WB viene mostrato in Figura 2.2.

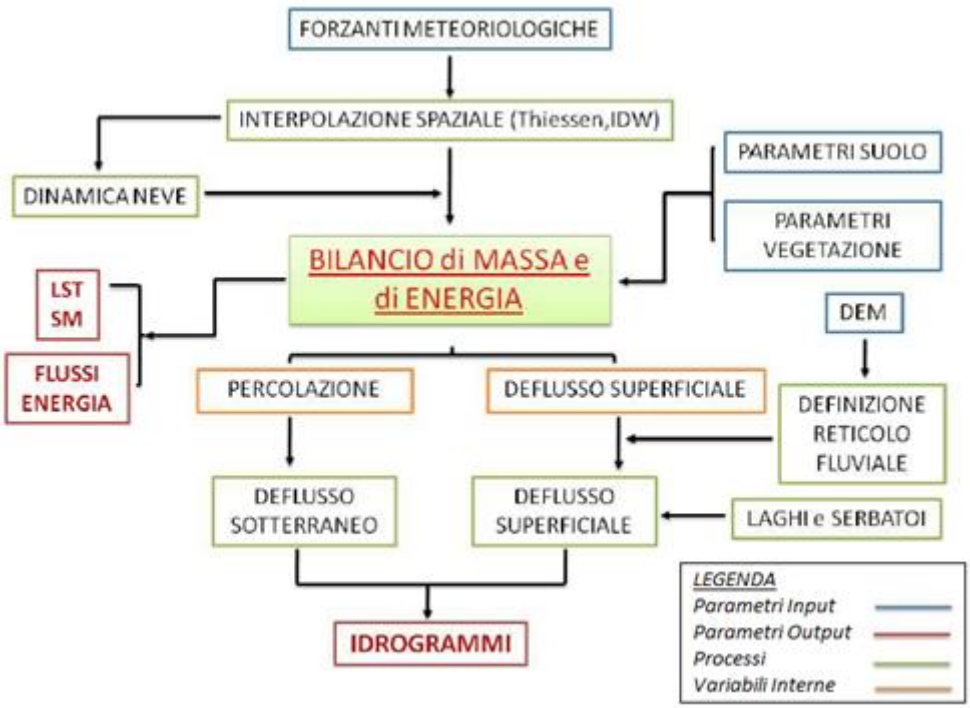


Figura 2.2 Schema concettuale del modello FEST-WB.

2.1 I dati in ingresso

Il modello richiede come input le forzanti meteorologiche e le mappe GIS contenenti informazioni sull'uso del suolo, le quote altimetriche e sulla vegetazione. I dati meteorologici sono di tipo orario e puntuali, in quanto raccolti da stazioni strumentate; per far sì che venga considerata la loro variabilità spaziale su tutto il bacino, risulta necessario interpolare i valori per ciascuna cella attraverso il metodo IDW (Inverse Distance Weighted Method) o della distanza inversa.

Essi sono:

- precipitazione [mm];
- temperatura [°C]: siccome essa varia anche con la quota, in primis vengono riportati tutti i valori noti ad una altitudine predefinita di riferimento; successivamente viene applicato il metodo IDW per la spazializzazione del dato e, come ultimo passaggio, la nuova informazione viene riportata alla quota di interesse considerando un gradiente verticale.

Per quanto riguarda le mappe GIS, un supporto fondamentale è costituito dal Modello Digitale delle Quote del terreno (Digital Elevation Model – DEM), che fornisce il valore della quota media per ogni cella elementare in cui è suddiviso il bacino di interesse. Partendo dalla matrice delle quote si è in grado di ricavare, tramite algoritmi comuni in ambiente GIS, i parametri geomorfologici necessari al modello per il calcolo del deflusso superficiale quali la direzione dei deflussi (puntatori), la pendenza, la direzionalità del versante (ovvero orientamento della linea di massima pendenza) e l'albedo. Sono inoltre necessarie ulteriori mappe, fondamentali nella fase di calcolo del bilancio di massa e di energia. Per ogni pixel devono essere note l'uso del suolo, da cui ricavare il CN (Curve Number), la tessitura, necessaria per determinare la profondità e la caratterizzazione idraulica, utile anche per la definizione della dinamica della vegetazione:

- la conduttività idraulica in condizioni sature (Ksat);
- la "bubbling pressure" (o livello della frangia capillare), che indica il livello del sottosuolo posto nella zona di aerazione, subito al di sopra della superficie piezometrica di una falda acquifera libera, caratterizzato dalla presenza di acqua capillare continua e sospesa;
- l'umidita del suolo residua e satura;
- l'indice di Brooks & Corey (o indice di distribuzione della dimensione dei pori);

Per maggiori informazioni riguardanti una descrizione più completa del modello idrologico, si rimanda alla tesi precedente "Implementazione di un modello idrologico per la protezione idraulica della città di Milano" (Bocus e Di Luccio, 2013).

2.2 L'infiltrazione

Di seguito vengono illustrati i 3 metodi d'infiltrazione utilizzati all'interno di questa tesi. Il metodo del CN era già implementato alli'interno del modello FEST mentre per la prima volta vengono implementati anche il metodo di Philip e di Green Ampt alla scala di bacino.

2.2.1 Metodo del Curve Number

SCS-curve number (U.S Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1985) è uno dei modelli maggiormente implementati per il calcolo del ruscellamento superficiale. Per poter calcolare nelle equazioni del bilancio di massa il ruscellamento e la percolazione, in ogni istante dt della simulazione, è necessario prima di tutto stimare l'infiltrazione S nel momento in cui si verifica un evento piovoso. A tale scopo viene utilizzato il metodo SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number) adattato alle simulazioni continue (Ravazzani et al., 2007). La sua versione classica è formulata per mezzo di un modello a parametri concentrati: il bacino è considerato come un unico elemento e quindi richiede in ingresso un unico valore di precipitazione e dei parametri idrologici. All'interno del FEST-WB esso viene applicato in ciascuna delle celle in cui è stata suddivisa l'area di interesse in modo da considerare la variabilità spaziale di tutte le grandezze in gioco. Il modello distribuito SCS-CN con bilancio idrologico, calcola lo stato iniziale dell'umidità del terreno in modo differente dal metodo classico. Infatti, l'umidità iniziale non viene calcolata considerando il valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento

meteorico (le classi d'umidita AMC I, AMC II, AMC III), ma si considera la condizione di umidita del terreno nell'istante in cui ha inizio l'evento. Per avere il valore dell'umidità nell'istante in cui comincia a piovere, si procede aggiornando il valore del parametro Θ (umidità del suolo) ad ogni intervallo di tempo. Partendo dal valore di CN_{II}, si calcolano i valori di CN_I, tramite la formula:

$$CN_I = \frac{4.2 \cdot CN_{II}}{10 - 0.058 \cdot CN_{II}} \tag{2.1}$$

e successivamente si ottiene il valore di S_I con la formula

$$S_I = 254 \cdot \left[\left(\frac{100}{CN_I}\right) - 1\right] \tag{2.2}$$

A partire dal valore di umidità, si ricava poi la saturazione del suolo (ε_t), tramite la formula:

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \tag{2.3}$$

dove θ_{sat} rappresenta l'umidità a saturazione, mentre θ_{res} corrisponde all'umidità residua.
Si ottiene quindi un valore di S_I ad ogni step di calcolo, con cui si calcola il parametro S_t:

$$S_t = S_I(1 - \varepsilon_t) \tag{2.4}$$

La procedura fa sì che il parametro S_t vari linearmente. In questo modo non si hanno più solo tre possibili valori di S_t (S_I, S_{II}, S_{III} corrispondenti alle tre classi d'umidità), ma si hanno valori di S_t che variano nell'intervallo [0 - S_I]. Il valore della capacità del massimo invaso non viene limitata inferiormente, in modo da considerare anche le situazioni di terreno completamente saturo, mentre il limite superiore corrisponde al valore massimo (S_I), che corrisponde al valore CN_I quando $\vartheta=\vartheta_{res}$ ($\varepsilon_t=0$).

2.2.2 Metodo di Philip

Philip (1957) sviluppò una soluzione per risolvere l'equazione di Richards alle differenze parziali non lineari. Permette di descrivere le componenti idrologiche verticali e orizzontali all'interno del suolo. Una restrizione di questa soluzione potrebbe essere applicata solo per un suolo omogeneo profondo con un contenuto d'acqua iniziale sotto condizioni stagnanti. L'infiltrazione cumulata, espressa dall'equazione di Philip, è approssimata nel seguente modo:

$$F(t) = S\ x\ t^{1/2} + Kt$$
(2.5)

dove S, è un parametro chiamato sorptivity, che è funzione della suzione potenziale del suolo e K rappresenta la conduttività idraulica. Il primo è determinato dalla presenza d'acqua in condizioni non sature all'istante iniziale, mentre il secondo indica la permeabilità in condizioni sature del suolo, già definita con la legge di Darcy. I mezzi fluidi, acqua e aria, essendo privi di resistenza al taglio, sono caratterizzati da uno stato di tensione sferico. In un terreno parzialmente saturo, a causa della tensione superficiale, la pressione dell'acqua dei pori risulta sempre inferiore alla pressione dell'aria nei pori. La

differenza tra la pressione dell'aria, che in condizioni naturali è pari alla pressione atmosferica, e la pressione dell'acqua nei pori è detta suzione di matrice.
La sorptivity è definita come la misura della capacità di un mezzo di assorbire un liquido tramite capillarità. Quando l'acqua è applicata in un suolo secco, inizialmente la maggior parte di essa viene assorbita tramite capillarità potenziale dalla matrice solida. Le forze di capillarità dominano il processo iniziale d'infiltrazione dell'acqua, tuttavia, quando l'infiltrazione procede, dominano le forze gravitazionali. La sorptivity è collegata all'infiltrazione, che è guidata solamente dalle forze di capillarità. Può essere definita analiticamente come funzione del contenuto d'acqua iniziale e della diffusività.
Il tasso d'infiltrazione si ottiene dalla derivata nel tempo dell'infiltrazione cumulata:

$$f(t) = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + K \tag{2.6}$$

Questo metodo non è adatto per periodi lunghi di simulazione e tassi d'infiltrazione bassi poiché quando il valore t tende all'infinito, l'infiltrazione sarà uguale a K. Philip suggerisce che K dipenda dal contenuto d'acqua del suolo.

2.2.3 Metodo di Green Ampt

Il metodo di Green e Ampt rappresenta il terzo ed ultimo metodo che viene applicato all'interno di questa tesi. Nel 1911 Green e Ampt proposero il primo modello fisicamente basato per la descrizione del processo di infiltrazione delle acque nel terreno. A differenza dei modelli empirici, quelli fisicamente basati sono modelli le cui equazioni descrivono in modo realistico il fenomeno da studiare. In virtù della propria semplicità e della bontà dei risultati cui porta, il modello di Green-Ampt è stato soggetto a una serie di sviluppi che ne hanno esteso l'applicabilità a una vastissima gamma di problemi idrogeologici.

Come il metodo del Curve Number, appartiene a quella classe di metodi in cui il tasso potenziale di infiltrazione non dipende solo dal tempo. Grazie alla sua semplicità ed alle sue performances soddisfacenti per una grande varietà di problemi d'infiltrazione, è stato il modello di scelta per la stima dell'infiltrazione in molti modelli idrologici fisicamente basati.

ll metodo di Green Ampt per la valutazione del tasso d'infiltrazione consente una descrizione più aderente, ma pur sempre semplificata, del processo di infiltrazione. Si ipotizza che il fronte d'umidità che avanza verso il basso, costituisca una netta divisione orizzontale tra gli strati di suolo non ancora raggiunti dall'acqua infiltrata, nei quali il contenuto di umidità è uguale al contenuto di umidità iniziale θi, e gli strati già raggiunti nei quali si assume che il suolo sia in condizioni di saturazione e il contenuto d'acqua sia pari alla porosità η del suolo. Si ipotizza che la velocità di infiltrazione sia pari al tasso di precipitazione, fin quando non si abbia accumulo d'acqua in superficie ("ponding") e sia pari alla capacità di infiltrazione (o infiltrazione potenziale) dopo che l'accumulo si è verificato.

L'analisi del contenuto idrico lungo il profilo del suolo durante il moto dell'acqua verso il basso, evidenzia la presenza di un fronte di umidificazione o di bagnatura dove la variazione di contenuto idrico, in relazione alla profondità, è tanto elevata da dare l'impressione di una netta discontinuità tra il suolo umido e quello asciutto.

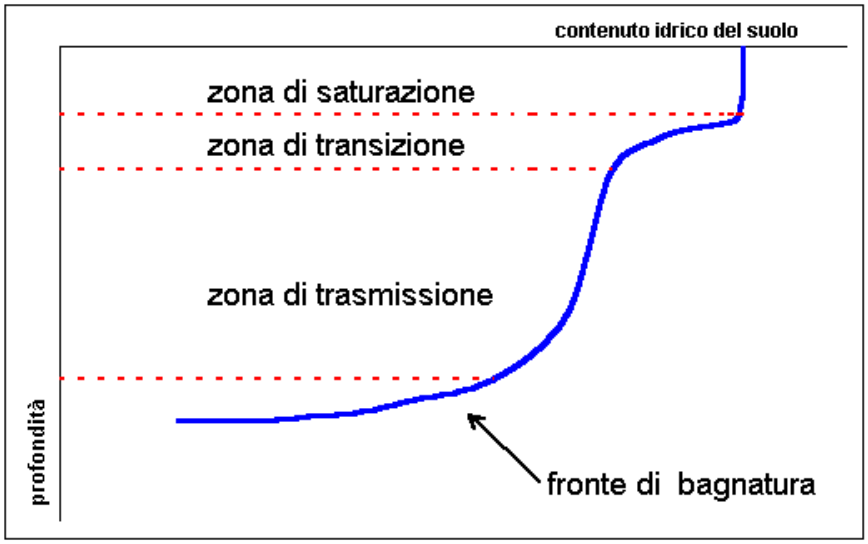


Figura 2.3 Contenuto idrico lungo il profilo del suolo.

Da questa figura si può osservare la presenza di una zona satura nelle vicinanze della superficie. Tale zona si origina dopo un assegnato intervallo di tempo a partire dall'inizio dell'evento di precipitazione. All'aumentare della profondità si osserva una zona di trasmissione nella quale si verifica flusso insaturo, ed inoltre l'umidità del suolo è caratterizzata da una scarsa variabilità lungo la verticale. Segue una zona di inumidimento, nella quale l'umidità decresce all'aumentare della profondità. Oltre il fronte umido, il suolo è pressoché asciutto.

Si applica, quindi, l'equazione di continuità ad una colonna cilindrica di suolo compresa fra la superficie ed il fronte di umidità che ha raggiunto la condizione di saturazione.

$$F(t) = Kt + \varphi\Delta\theta \ln(1 + \frac{F(t)}{\varphi\Delta\theta}) \tag{2.7}$$

La soluzione dell'equazione porta a valutare il valore dell'infiltrazione cumulata F(t) al tempo t, ossia le perdite da sottrarre alla precipitazione per trovare la pioggia netta.

Philips nel 1957 dimostrò che l'equazione del modello di Green-Ampt poteva essere ottenuta come soluzione analitica dell'equazione di Richards, ponendo la diffusività pari a un Delta di Dirac con valore diverso da zero solo in corrispondenza del contenuto d'acqua a saturazione.

Grazie alla sua semplicità e alla sua accuratezza, questo modello e le sue varie modifiche, sono state ampiamente utilizzate per la simulazione dell'infiltrazione monodimensionale verticale nel suolo. È applicabile per terreni uniformi, stratificati e per condizioni di precipitazione stazionarie e non.

Il modello utilizza un'equazione implicita per la stima dell'infiltrazione cumulata nel tempo. La sua stima in un determinato tempo è un processo trial and error, ed è generalmente ottenuto tramite tecniche iterative, esempio metodo di Newton-Raphson, Runge-Kutta ecc. Per superare questo problema, nel corso degli anni molti ricercatori hanno sviluppato differenti approssimazioni esplicite all'equazione di GA, basate su schemi di successioni numeriche.

3 CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO SUI FIUMI SEVESO, OLONA E LAMBRO

Sul modello idrologico FEST-WB è stata effettuata la taratura sfruttando i dati in ingresso presentati nei capitoli precedenti. Essa prevede tre fasi: l'analisi di sensitività, la calibrazione, eseguita prendendo come riferimento gli eventi di piena più importanti verificati nel periodo 2003 – 2010 e la validazione negli anni seguenti 2011-2016.

L'obiettivo della calibrazione del modello è quella di selezionare i valori dei parametri, in modo tale che il modello simuli l'idrogramma misurato avvicinandosi il più possibile. La qualità dei dati, le semplificazioni e gli errori inerenti alla struttura del modello pongono delle limitazioni sulla capacità stessa del modello di simulare l'idrogramma. Gli aspetti idrologici più importanti sui cui bisogna focalizzare l'attenzione sono il confronto tra il volume medio del deflusso osservato rispetto a quello simulato, tra i vari picchi di piena e infine la forma dell'idrogramma. A riguardo, è importante sottolineare che, in generale, esiste un trade-off tra i differenti obiettivi. Per esempio, si potrebbe trovare un set di parametri che provvedono ad una buona simulazione del volume ma ad una scarsa simulazione della forma dell'idrogramma e dei picchi, e viceversa. Data la diversità degli eventi di piena che devono essere modellati, un possibile approccio sarebbe quello di considerare inizialmente gli eventi più consistenti e successivamente tutti quelli di ugual peso. Indipendentemente da ciò, è necessario considerare la conservazione dei volumi per la dimensione del problema, la riproduzione dei picchi che è essenziale per la piena e il trasporto di soluto e gli indici di errore come il RMSE per il confronto delle curve tra le osservate e le simulate. Infine, è lecito pensare che ci potranno essere delle difficoltà durante la simulazione a causa delle assunzioni fatte dai modelli d'infiltrazione, come ad esempio l'applicazione di proprietà omogenee del suolo.
Nei paragrafi successivi viene mostrato nel dettaglio la procedura utilizzata, che costituisce il fulcro del lavoro di tesi.

3.1 Curve Number

3.1.1 Analisi di sensitività

Le analisi di sensitività sono molto importanti, si svolgono prima della calibrazione del modello e sono utili per determinare l'influenza dei parametri sui risultati della simulazione. Ci siamo concentrati su permeabilità del suolo e CN: il primo definisce la conduttività idraulica satura verticale che regola il flusso dell'acqua nel suolo, mentre il CN, come spiegato in precedenza, tiene conto sia dell'uso del suolo che delle sue caratteristiche idrologiche. Nell'ambito dell'analisi di sensitività è stata fatta luce su come la variazione di questi parametri influenzi il risultato finale, dando inoltre uno spunto su come operare sui parametri citati.

Gli output del modello non dipendono solo dalla struttura del modello stesso ma anche dai parametri in input che vengono implementati. L'analisi di sensitività misura l'effetto dei cambiamenti dei parametri in input sugli output del modello. È considerato uno step importante all'interno della valutazione del modello in quanto, permette di verificare l'influenza di ogni singolo parametro durante la calibrazione e la validazione del modello (Moriasi et al., 2002). Per questo studio è stata portata avanti un'analisi di sensitività locale dei parametri relativi al suolo per i vari modelli d'infiltrazione. La procedura consiste nel

variare individualmente un singolo parametro da una percentuale fissata, ovvero un valore di Δx del 20%. Risulta essere il metodo più semplice per eseguire l'analisi di sensitività più frequentemente utilizzata in letteratura. L'indice di sensitività è adimensionale. Il valore base è cambiato da un $\pm\Delta x$ con x1= x0- Δx e x2=x0+ Δx.

Gli output del modello provenienti dall'implementazione di questi valori sono y1 e y2. L'indice di sensitività è calcolato come segue: $I = \frac{(y2-y1)/yo}{2\mathbf{\Delta x}}$

in cui da una variazione percentuale dell'input, si ottiene una variazione percentuale dell'output. Il segno dell'indice rivela l'effetto del parametro, ovvero se l'indice è positivo, significa che l'aumento del parametro di input comporta un aumento del modello, mentre se è negativo vuol dire che un aumento dello stesso provoca un decremento dell'output. Alla fine però si considera il suo valore assoluto, in modo da poter stabilire la sua classe di appartenenza. Le classi sono in tutto 4 e vanno da un livello basso o trascurabile, ad uno molto alto. L'indice di sensitività è stato mediato per l'intero periodo di simulazione. Qui sotto si riporta una tabella, suggerita da Lenhart et al. (2002), che evidenzia il legame tra la singola classe di appartenenza e il range di validità corrispondente e quindi si può notare come, all'aumentare della classe, aumenti il valore assoluto dell'indice di sensitività.

Class	Index	Sensitivity
I	$0.00 \leq \lvert I \rvert < 0.05$	Small to negligible
II	$0.05 \leq \lvert I \rvert < 0.2$	Medium
III	$0.2 \leq \lvert I \rvert < 1.00$	High
IV	$\lvert I \rvert \geq 1.00$	Very high

Tabella 3.1 Riassunto delle classi di indici di sensibilità.

Per maggiori informazioni a riguardo si rimanda alla Tesi di Dottorato di Feki M, 2013-2016. Uncertainty reduction of soil moisture simulations based on combined improvement approach of model structure and parametrization.

3.1.2 Calibrazione del Curve Number

Per quanto riguarda la calibrazione con il metodo del CN, non è servita l'analisi di sensitività poiché era già fatta nella tesi precedente, mentre è stata necessaria per il metodo di Philips e Green Ampt, data la loro prima applicazione all'interno di questa tematica. In questa prima fase del lavoro si sono calibrate le mappe sulle mappe di K_{sat} e del CN: a partire dai loro valori iniziali sono stati modificati allo scopo di ottenere un andamento delle portate prossimo a quello osservato. Affinché si rispettasse la variabilità dei parametri fisici, si è deciso di modificare la permeabilità satura verticale attraverso un coefficiente moltiplicativo tra x0.01 e x100 mentre il Curve Number con un coefficiente additivo tra -10 e +10. È lecito ricordare che al diminuire del CN si ha un conseguente aumento della permeabilità del terreno e, quindi, una riduzione dell'idrogramma di piena; viceversa se si aumentasse il parametro.

Il metodo del Curve Number nasce come modello empirico con CN come unico parametro, però nel nostro caso il modello è un po' un ibrido perché è stato esteso per fare simulazioni di lungo periodo in continuo. In queste simulazioni è necessario tenere in considerazione il bilancio, l'umidità del suolo ecc. Gli altri parametri invece hanno un significato fisico e caratterizzano il suolo.

Il parametro CN è un numero adimensionale e varia da 100 (per luoghi fortemente urbanizzati ed impermeabili) a circa 30 per suoli permeabili con elevati tassi d'infiltrazione. È quindi essenzialmente legato alla natura del suolo, al tipo di copertura vegetale ed alle condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione.

La permeabilità ha un significato fisico, in quanto dipende dalla tipologia di suolo, però la sua variazione non deve superare la sua l'incertezza. Ciò significa che, indipendentemente dal tipo di suolo, il valore medio per ogni classe può variare esclusivamente nel range definito in precedenza. Se si arrivasse all'estremo e la simulazione non fosse sufficiente per ridurre l'errore, si passerebbe alla calibrazione del parametro successivo (in questo caso il CN). Quando si ha una sottostima dei volumi conviene ridurre la permeabilità, quindi si modifica il CN che agisce direttamente, mentre la ksat ha un effetto indiretto. Invece quando il suolo è meno permeabile, l'acqua si muove più lentamente nel suolo e quindi si svuota anche più lentamente perché la percolazione è ridotta. Perciò, quando comincia la precipitazione, il terreno risulta più bagnato e il run off più grande. Il parametro ksat non compare direttamente nell'equazione ma l'effetto è comunque quello di aumentare il volume della piena, come le portate. Sarebbe sbagliato pensare che raddoppiando la permeabilità si ottenga sempre un effetto positivo, ovvero, un'ulteriore modifica del parametro potrebbe anche lasciare invariata l'incertezza, risultando quindi superfluo.

La calibrazione è stata effettuata prendendo come riferimento gli eventi di piena più importanti che si sono verificati nel periodo in esame: 2003 – 2010. I primi 6 mesi vengono sempre trascurati in quanto rappresentano il periodo necessario per l'inizializzazione del modello. Questo è molto importante poiché, le risposte dei bacini alle precipitazioni sono molto influenzate dalle condizioni iniziali di umidità del suolo. Di conseguenza, per avere una migliore simulazione dell'evento, conviene inizializzare il modello in modo da avere una buona approssimazione dell'umidità del terreno.
I tre bacini sono indipendenti tra di loro, di conseguenza è stato possibile eseguire delle simulazioni simultaneamente. Inizialmente sono state calibrare le stazioni più a monte di ogni bacino, ed una volta terminate, si è passati alla calibrazione delle sezioni situate più a valle. Inoltre, l'effetto dei parametri è indipendente dal modello d'infiltrazione.

Per ottenere i risultati conclusivi mostrati in questo capitolo, sono state compiute circa 20 simulazioni.
Inizialmente si sono individuati dieci eventi per stazione di misura, su cui è stato fatto un controllo sull'attendibilità del dato di ingresso, ma in alcuni casi il numero è diminuito a causa di diverse problematiche come per esempio:

- eventi con un andamento inverosimile a causa di errori di misurazione o malfunzionamento dello strumento sono stati scartati;
- eventi con dati nulli, che sono stati sostituiti mediante un'interpolazione lineare;
- eventi duranti i quali il livello idrico ha raggiunto valori al di fuori del range di validità della scala di deflusso.

A queste si aggiunge la difficoltà di rilevare in maniera completa il campo di precipitazioni attraverso le stazioni meteorologiche presentate in figura 1.6.

Per confrontare i risultati ottenuti con i valori di portata osservati, sono stati stimati 6 indici differenti per ogni evento: l'errore relativo sulla portata al colmo di piena, *err* Q_{max}, l'errore sul tempo di propagazione del picco, *err* T_{max}, l'RMSE, acronimo di "*Root Mean* Square Error", l'indice di Nash, l'errore sui volumi cumulati ed infine l'errore assoluto sul picco. Quest'ultimo è sicuramente uno dei più importanti poiché evidenzia la discrepanza tra le simulazioni e le osservazioni indipendentemente dalla presenza di sottostime o sovrastime. Il RMSE e NS sono utili nella valutazione della riproduzione della forma dell'idrogramma di piena. Il primo, cioè l'errore quadratico medio, tende a 0 quando si ha una perfetta corrispondenza tra l'osservato e il simulato. L'indice di Nash, invece, misura il rapporto degli scarti dei valori di portata simulati dal modello idrologico, con gli scarti dei valori di portata osservati e considera che venga rispettato il rapporto degli ordini di grandezza delle serie confrontate. Il range può variare da -∞ a 1: il valore ottimale è 1, mentre quelli accettabili sono compresi tra 0 e 1.

Per avere un'idea generale sulle prestazioni del modello, sono stati calcolati anche i valori medi degli indici sugli eventi per ciascuna stazione. Rispettivamente hanno la seguente espressione:

$$err\ Q_{max} = \frac{Q_{sim} - Q_{oss}}{Q_{oss}}$$

(3.1)

$$err\ Vol = \frac{V_{sim} - V_{oss}}{V_{oss}} \tag{3.2}$$

$$era\ t_{max} = t_{sim} - t_{oss} \tag{3.3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}^{i} - Q_{oss}^{i})^2} \tag{3.4}$$

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}^{i} - Q_{oss}^{i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{Q}sim - Q_{oss}^{i})^2} \tag{3.5}$$

dove Q_{sim}^{i}è la portata simulata al tempo i-esimo, Q_{oss}^{i} è la portata osservata al tempo i-esimo e $\bar{Q}sim$ è la portata simulata media sull'evento. Per quanto riguarda l'errore sul volume, si intende quello sul volume cumulato, simulato o osservato, per ogni singolo evento.
In particolare si è dato maggior peso all'errore relativo ed assoluto sul colmo di piena e all'errore sul tempo, in quanto questo studio ha come scopo la riproduzione, nella maniera più accurata possibile, del massimo della piena.

La stima della portata di picco, per un'assegnata probabilità di eccedenza, è frequentemente portata avanti in applicazioni idrologiche per progettare misure di controllo delle piene. Infatti, la limitata disponibilità di dati di picchi storici rispetto ad un periodo di osservazioni sufficientemente lungo, induce un'incertezza rilevante nell'analisi di frequenza delle piene. Una possibile soluzione per superare questo problema, è l'applicazione di simulazioni idrologiche in modo da generare lunghe serie di deflussi fluviali.

Sicuramente non si riuscirà a ridurre gli errori in tutti gli eventi ma l'importante sarà far tendere a 0 l'errore complessivo sul picco.

Qui di seguito vengono riportati i risultati per ogni singola stazione di riferimento.

Olona

Le sezioni considerate sono quelle di Lozza e Castellanza.
È importante sottolineare che a Ponte Gurone, poco più a monte di Lozza, il 12 dicembre 2009 è stata inaugurata la vasca di laminazione. Superata la fase di collaudo verificatasi tra maggio e giugno del 2010, l'opera idraulica è stata attivata. Per questo motivo, nel caso di Lozza, si è deciso di interrompere il periodo di calibrazione proprio al 2010, in quanto i dati successivi sarebbero stati influenzati dalla presenza della cassa stessa. Di conseguenza, avendo 8 anni a disposizione per lo studio di questa stazione, si è posta la calibrazione fino alla fine del 2007 mentre i 3 anni rimanenti sono stati sfruttati per la validazione.

Lozza

Come già detto in precedenza, inizialmente si consideravano 10 eventi per la fase di calibrazione, ma poi il numero è stato ridotto, come in questo caso ad 8, a causa di possibili malfunzionamenti della strumentazione, che portavano a dei risultati molto diversi rispetto agli altri. La durata degli eventi non è fissata: può variare dalle poche ore, per esempio a causa di forti e rapide precipitazioni con conseguenti ed improvvisi eventi di piena, come per l'evento numero 5, a eventi molto più duraturi di 3, 4 giorni come nel caso dell'evento numero 8.

evento	inizio	fine
1	27/11/2003 09:59	29/11/2003 14:59
2	10/08/2004 23:58	11/08/2004 11:58
3	31/10/2004 23:58	03/11/2004 21:58
4	27/08/2005 13:58	27/08/2005 22:58
5	17/09/2005 05:58	17/09/2005 17:58
6	10/04/2006 10:57	12/04/2006 04:57
7	14/09/2006 21:57	16/09/2006 15:57
8	06/12/2006 07:57	10/12/2006 22:57

Tabella 3.2 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza.

Si riporta in primis una tabella con l'inizio e la fine di ogni singolo evento e poi, successivamente, un riassunto con l'analisi degli errori di ogni singolo evento, basandosi sui cinque indici descritti in precedenza. Si riporta sempre il risultato finale che si è raggiunto con la simulazione conclusiva, in modo da poter commentare quanto ottenuto. Infine si evidenzia una media di tutti gli indici di errore e l'errore assoluto del picco di portata, presente sulla colonna di destra. Per poter stabilire che i risultati conseguiti siano buoni è necessario concentrarsi sull'errore sul picco e sul tempo di propagazione del deflusso. Il primo dovrebbe risultare il più basso possibile, mentre il secondo nell'intorno di poche ore, considerando il fatto che non si è valutato l'errore assoluto ma quello relativo, compensando così gli anticipi e i ritardi del picco. Non sono comunque da sottovalutare anche gli altri 3 indici, in cui per esempio il RMSE deve avvicinarsi il più possibile allo 0 mentre il NS deve essere almeno positivo.

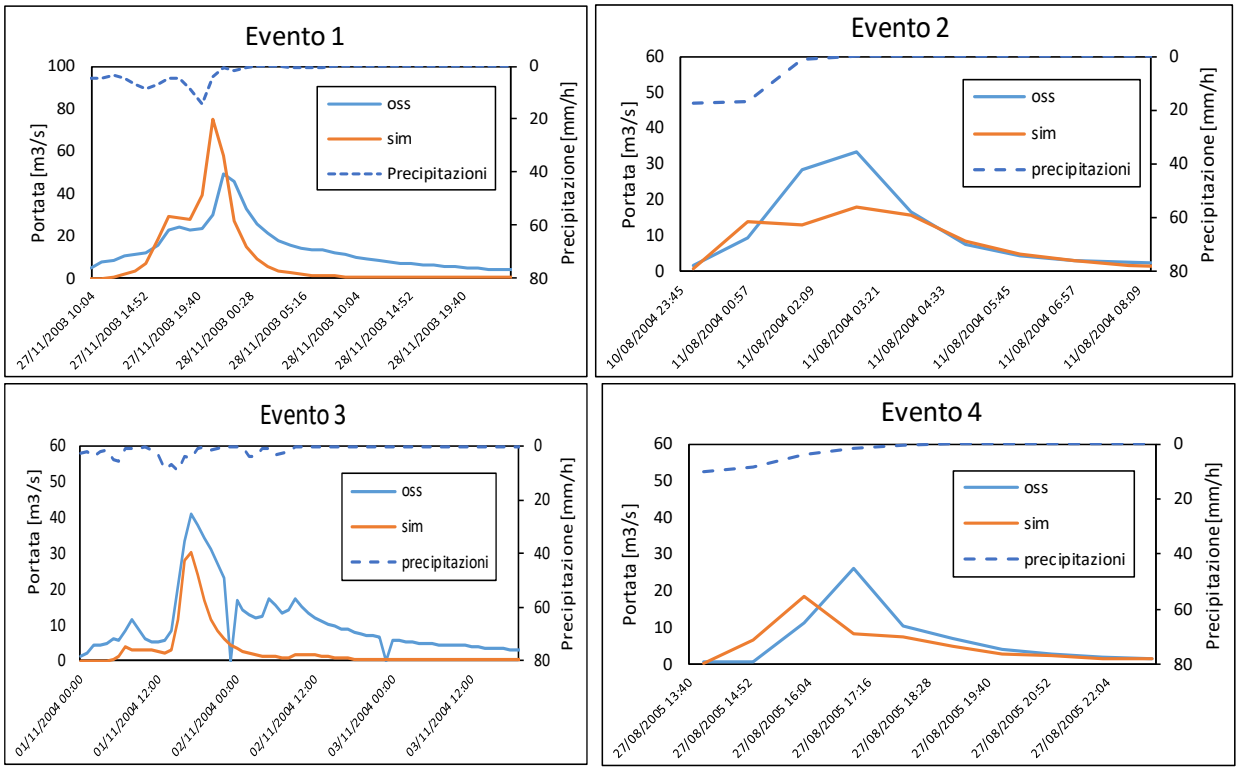
Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore di permeabilità per 30 e sottraendo al coefficiente CN 5 unità, poiché la simulazione iniziale sovrastimava notevolmente le portate massime, dando l'idea che il terreno fosse poco permeabile.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.52	-1	-0.40	10.27	0.19	0.52
2	-0.47	0	-0.28	6.18	0.66	0.47
3	-0.26	-1	-0.72	8.61	0.43	0.26
4	-0.29	-1	-0.18	6.50	0.26	0.29
5	-0.79	0	-0.74	7.17	0.30	0.79
6	0.33	-1	-0.42	4.45	0.51	0.33
7	1.13	1	0.17	8.96	-1.70	1.13
8	0.20	-1	-0.58	5.70	0.58	0.20

MEDIA	0.05	-0.50	-0.39	7.23	0.15	0.50

Tabella 3.3 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza.

Come si può notare, osservando la media degli errori, l'errore relativo sul picco risulta molto basso, rispetto a quello iniziale che era superiore al 60%. Nonostante questo, l'errore assoluto risulta essere del 50%; questo significa che c'è un forte equilibrio tra gli eventi in cui viene sottostimata la portata osservata e quelli in cui viene sovrastimata. Infatti sono equamente divisi; in particolare si può notare come nell'evento 5 ci sia una forte sottostima e nell'evento 7 la sovrastima del primo picco di portata sia piuttosto elevata. Per avere una visione migliore di quanto detto finora, vengono presentati qui sotto i grafici riguardanti ogni singolo evento analizzato.



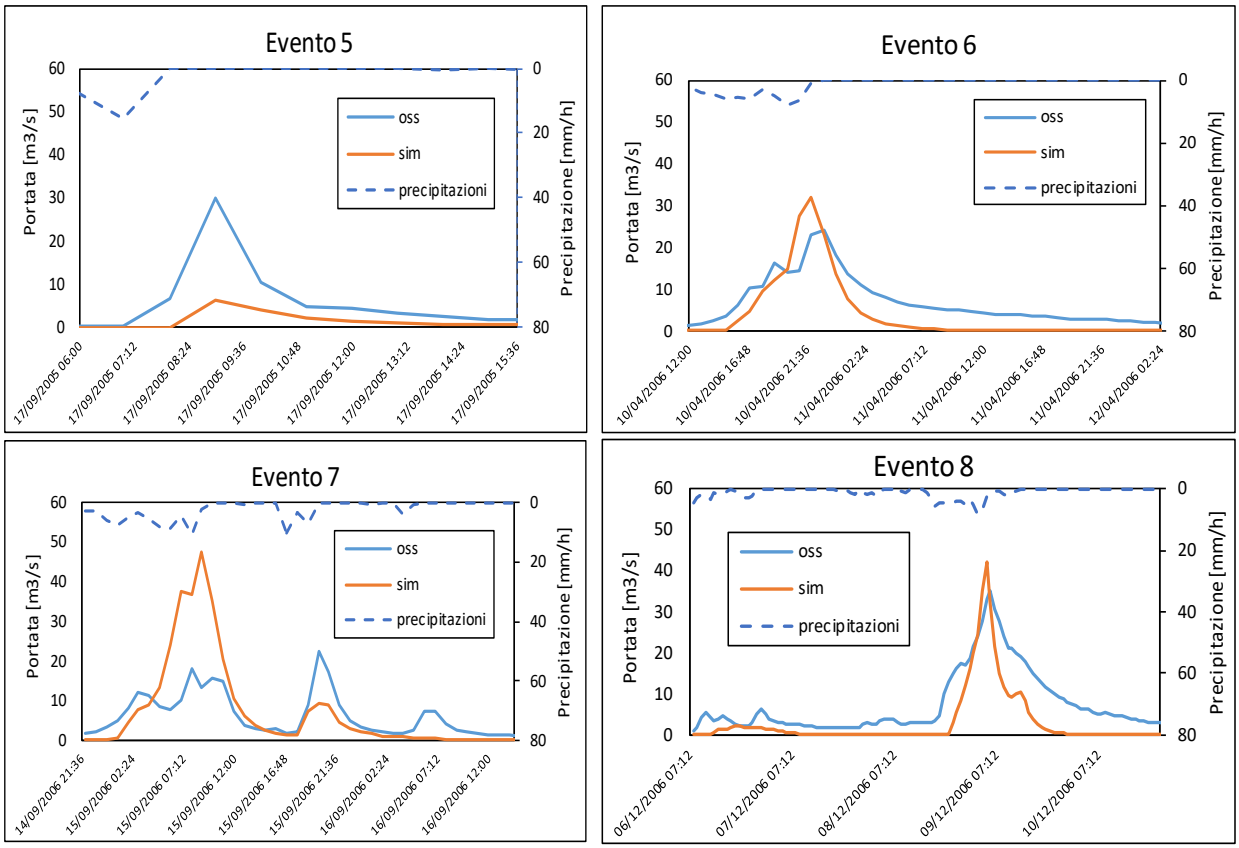


Figura 3.1 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Le portate osservate, in azzurro nel grafico, presentano picchi intorno ai 30, 40 m^3/s, tipici del fiume Olona. In arancione si può osservare l'idrogramma delle portate simulate e di come si avvicini oppure meno, a quello delle portate osservate. Si riportano anche le precipitazioni, tratteggiate in blu.

Castellanza

Per lo stesso motivo di Lozza, la calibrazione di Castellanza è stata interrotta alla fine del 2007, in quanto anche questa stazione idrometrica appartiene al fiume Olona.

evento	inizio	fine
1	23/11/2003 18:59	03/12/2003 04:59
2	18/04/2004 13:59	20/04/2004 21:59
3	29/04/2004 16:59	10/05/2004 11:59
4	10/08/2004 18:58	11/08/2004 12:58
5	31/10/2004 21:58	03/11/2004 05:58
6	10/04/2006 11:57	11/04/2006 14:57
7	14/09/2006 16:57	16/09/2006 11:57
8	08/12/2006 14:57	10/12/2006 10:57
9	28/05/2007 06:56	29/05/2007 02:56

Tabella 3.4 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza.

Come per tutte le altre stazioni in cui sono presenti le soglie di criticità, derivanti dalla protezione civile, si è deciso di utilizzare la soglia di criticità moderata all'interno della scala di deflusso corrente, per evitare

di considerare eventi estremi. Applicando l'equazione, si ottiene una portata di criticità moderata di circa 55 m^3/s e si è scelto di considerare come portata minima per il nostro studio, un quinto della stessa, ovvero in questo caso circa 11 m^3/s.

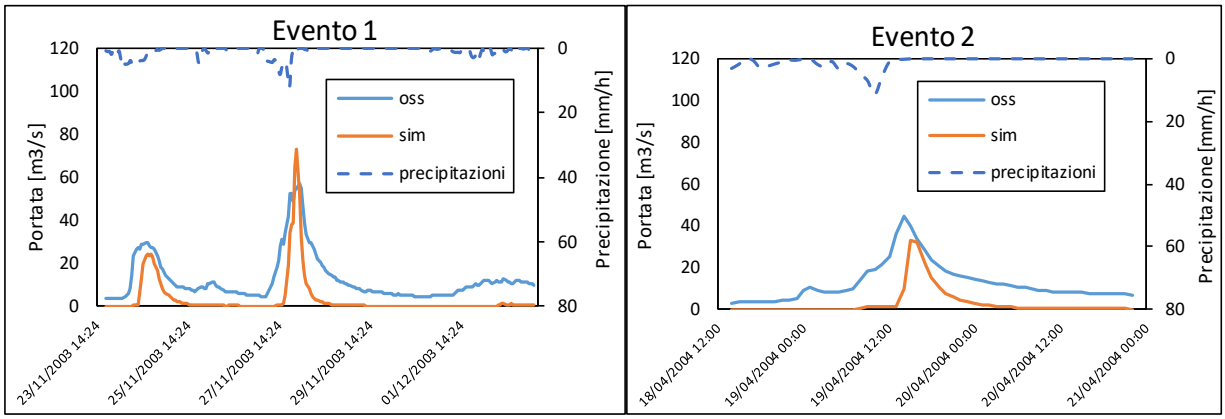
Il risultato finale riportato nella tabella sottostante è stato ottenuto semplicemente moltiplicando per 10 il valore di permeabilità e modificando il coefficiente di strickler per regolare il tempo di propagazione del deflusso.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.28	-2	-0.74	10.90	0.40	0.28
2	-0.25	0	-0.77	11.54	0.25	0.25
3	-0.38	-5	-0.82	20.86	0.22	0.38
4	-0.42	-1	-0.51	12.17	0.30	0.42
5	-0.31	0	-0.76	14.61	0.28	0.31
6	0.03	-1	-0.56	11.48	0.18	0.03
7	0.77	2	-0.29	11.04	-0.72	0.77
8	-0.06	-2	-0.56	13.28	0.4	0.06
9	-0.53	1	-0.55	12.48	-0.11	0.53
MEDIA	-0.10	-0.89	-0.62	13.15	0.13	0.34

Tabella 3.5 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza.

La media dell'errore sul picco è piuttosto bassa, di conseguenza soddisfacente e si presenta con un valore negativo in quanto le portate simulate per la maggior parte degli eventi tendono a sottostimare quelle osservate. C'è solo un evento in particolare che sovrastima notevolmente il picco, ovvero il numero 7. Infatti, l'errore assoluto risulta essere sicuramente migliore rispetto al caso precedente di Lozza.

Inoltre, tranne il primo ed il terzo evento che lo superano di poco, tutti gli altri eventi presentano delle portate che rientrano nel range di validità espresso dalla scala di deflusso, ovvero dagli 11 ai circa 55 m^3/s.



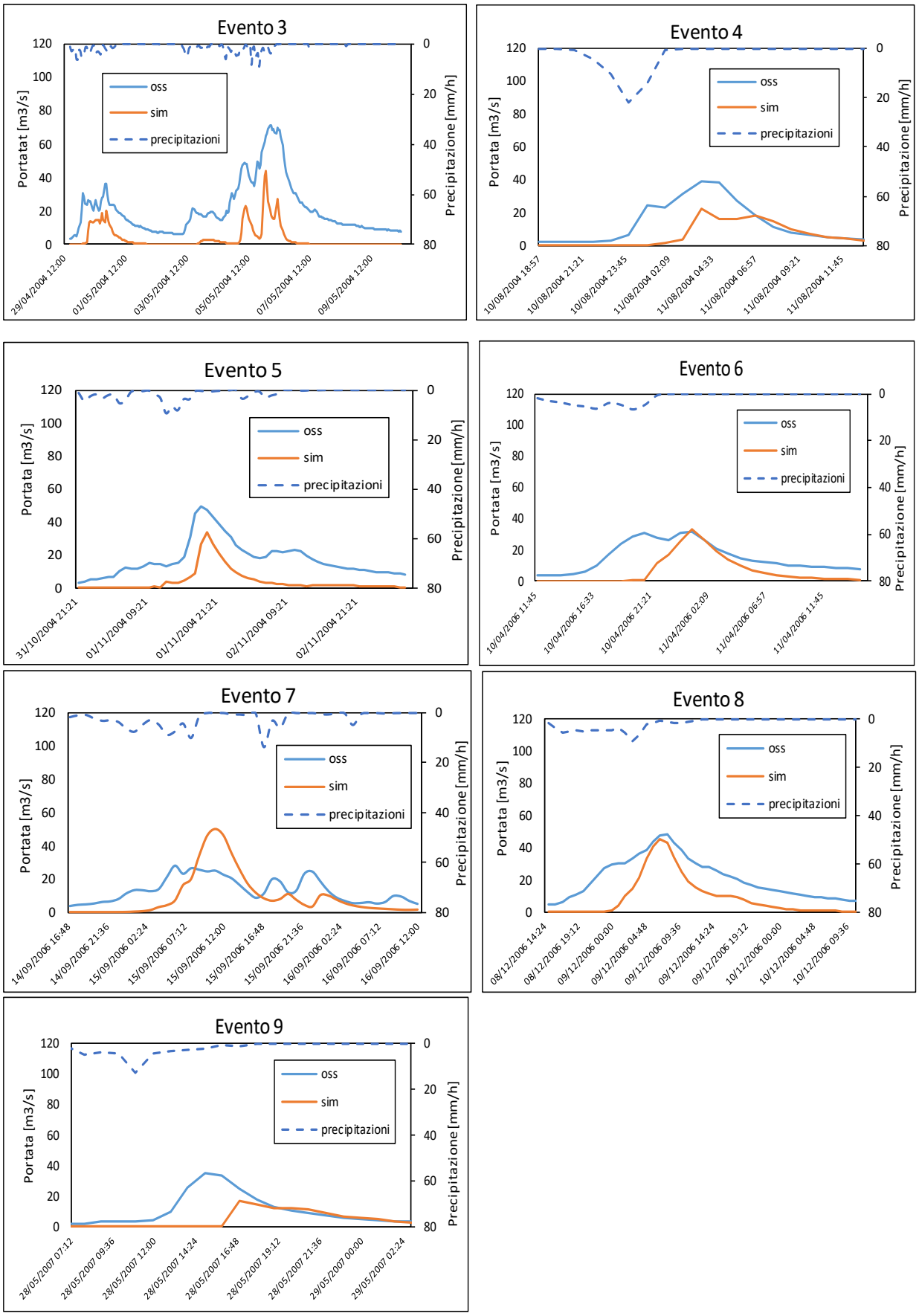


Figura 3.2 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Seveso

Le sezioni prese in esame sono quelle di Cantù e Palazzolo. Per la prima stazione non ci sono problemi, quindi il periodo di calibrazione dura fino al 2010 mentre la seconda è nuova a causa della presenza del canale scolmatore di nord ovest. Prima c'era un idrometro posto vicino all'ingresso del CSNO e di conseguenza il livello dell'acqua risentiva della struttura. Dal 2014 è stato installato un radar a Palazzolo che, sfruttando l'effetto Doppler, misura la velocità superficiale e quindi la portata del bacino.

Cantù

Per la sezione di Cantù sono stati presi 8 eventi, di cui la maggior parte sono del 2010, anno caratterizzato da abbondanti precipitazioni e quindi da molteplici eventi di piena.

evento	inizio	fine
1	09/09/2005 11:58	10/09/2005 03:58
2	02/10/2005 11:57	03/10/2005 00:57
3	17/05/2008 18:56	18/05/2008 07:56
4	10/05/2010 19:54	15/05/2010 03:54
5	12/08/2010 00:54	12/08/2010 11:54
6	18/09/2010 08:54	18/09/2010 21:54
7	31/10/2010 09:54	02/11/2010 10:54
8	15/11/2010 09:54	17/11/2010 08:54

Tabella 3.6 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Cantù.

Le scale di deflusso qui utilizzate sono state diverse poiché, secondo i dati provenienti da ARPA, il fondo e la morfologia del bacino è cambiata spesso negli anni, di conseguenza le scale venivano frequentemente aggiornate. La portata media di criticità moderata è piuttosto bassa e si aggira intorno ai 25 m^3/s.

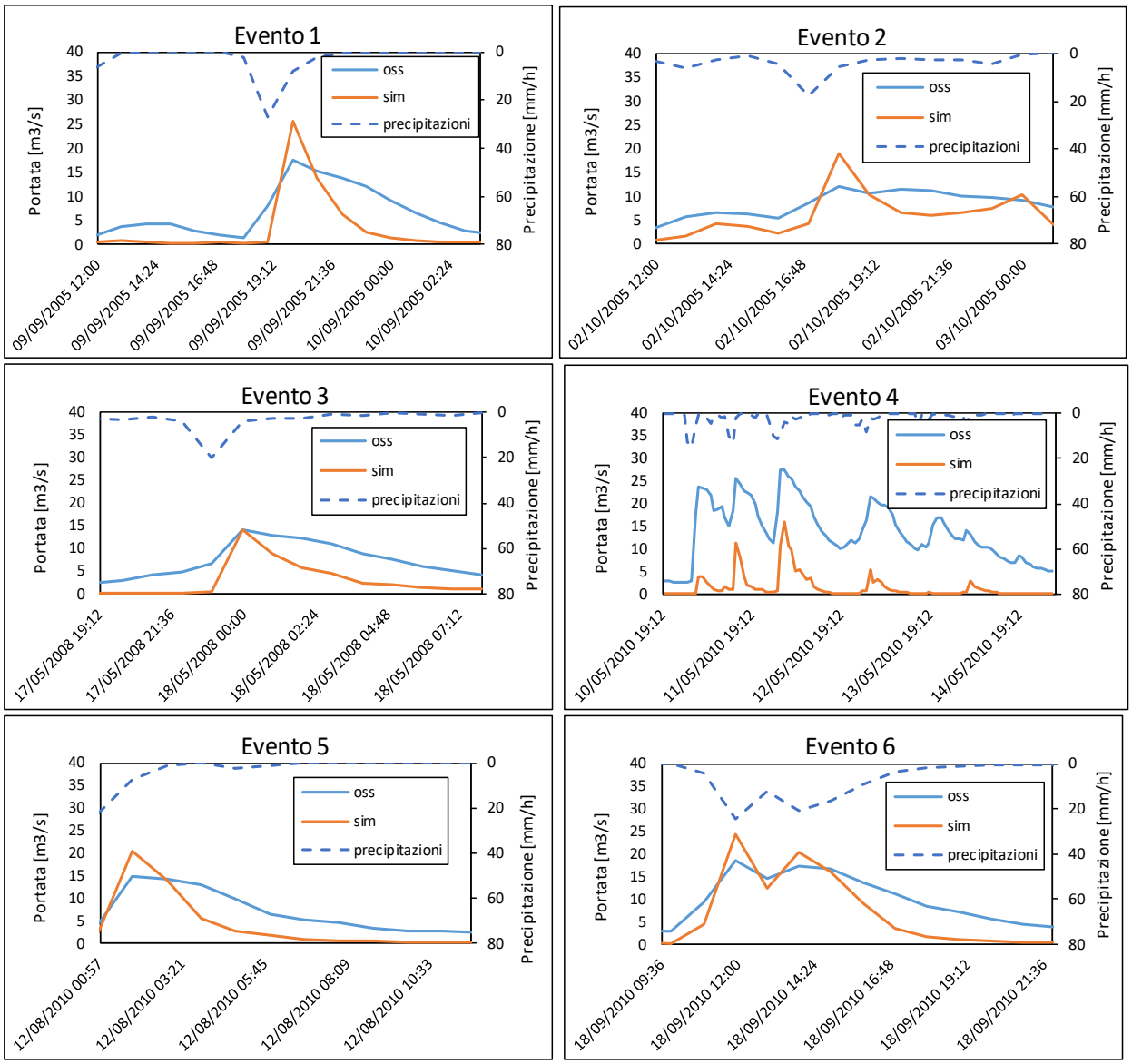
Cantù rappresenta l'unica stazione che non necessita una lunga calibrazione con il metodo del CN, in quanto già la simulazione iniziale fornisce dei risultati soddisfacenti. Ciò è dovuto probabilmente al fatto che sia un bacino piuttosto piccolo, poco antropizzato e senza opere idrauliche di regolazione (a differenza di Lozza, Palazzolo e delle 3 stazioni del Lambro a valle del lago di Pusiano). È stato comunque complicato analizzare gli eventi disponibili in quanto, essendo proprio un bacino piccolo, non sempre i dati risultavano sufficienti.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.47	0	-0.51	6.06	-0.01	0.47
2	0.55	0	-0.26	3.69	-0.21	0.55
3	0.00	0	-0.59	4.71	0.33	0.00
4	-0.35	0	-0.89	13.34	0.08	0.35
5	0.37	0	-0.41	4.29	0.36	0.37
6	0.31	0	-0.30	4.62	0.43	0.31
7	-0.28	-1	-0.74	9.81	0.21	0.28
8	-0.52	-1	-0.87	11.17	0.14	0.52

MEDIA	0.07	-0.25	-0.57	7.21	0.16	0.36

Tabella 3.7 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù.

Dalla tabella si deduce che l'errore sul picco è molto basso, in quanto ci sono 3 eventi che sottostimano e 4 che invece sovrastimano, così da compensarsi fra di loro. L'errore assoluto si attesta a 36 m^3/s e gli altri indici sono piuttosto buoni, anche con una rapida calibrazione. Infine, osservando i grafici si può osservare come il range di portate venga rispettato, in quanto esse raggiungano al massimo i 25,30 m^3/s.



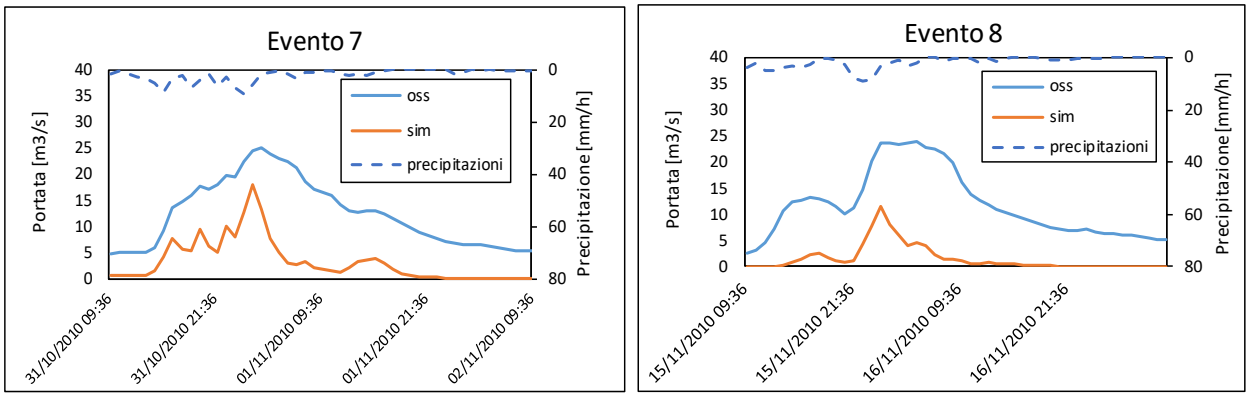


Figura 3.3 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Palazzolo

Come già spiegato in precedenza, gli eventi di piena per questa stazione appartengono solo al periodo compreso tra luglio 2014 a giugno 2016, equamente divisi in un anno per la calibrazione e il seguente per la validazione.

Sono eventi sicuramente molto più consistenti rispetto a quelli fin qui analizzati, in quanto il 2014, in particolare a Milano, è stato un anno terribile per quanto riguarda i fenomeni di precipitazione e i conseguenti danni causati dalle esondazioni del Seveso.

evento	inizio	fine
1	07/07/2014 20:51	09/07/2014 19:51
2	25/07/2014 22:51	27/07/2014 00:51
3	03/08/2014 08:51	04/08/2014 18:51
4	20/08/2014 18:51	21/08/2014 04:51
5	04/11/2014 17:51	07/11/2014 06:51
6	10/11/2014 08:51	18/11/2014 20:51
7	15/02/2015 04:51	16/02/2015 03:51
8	15/05/2015 16:50	16/05/2015 08:50
9	14/06/2015 11:50	15/06/2015 01:50

Tabella 3.8 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo.

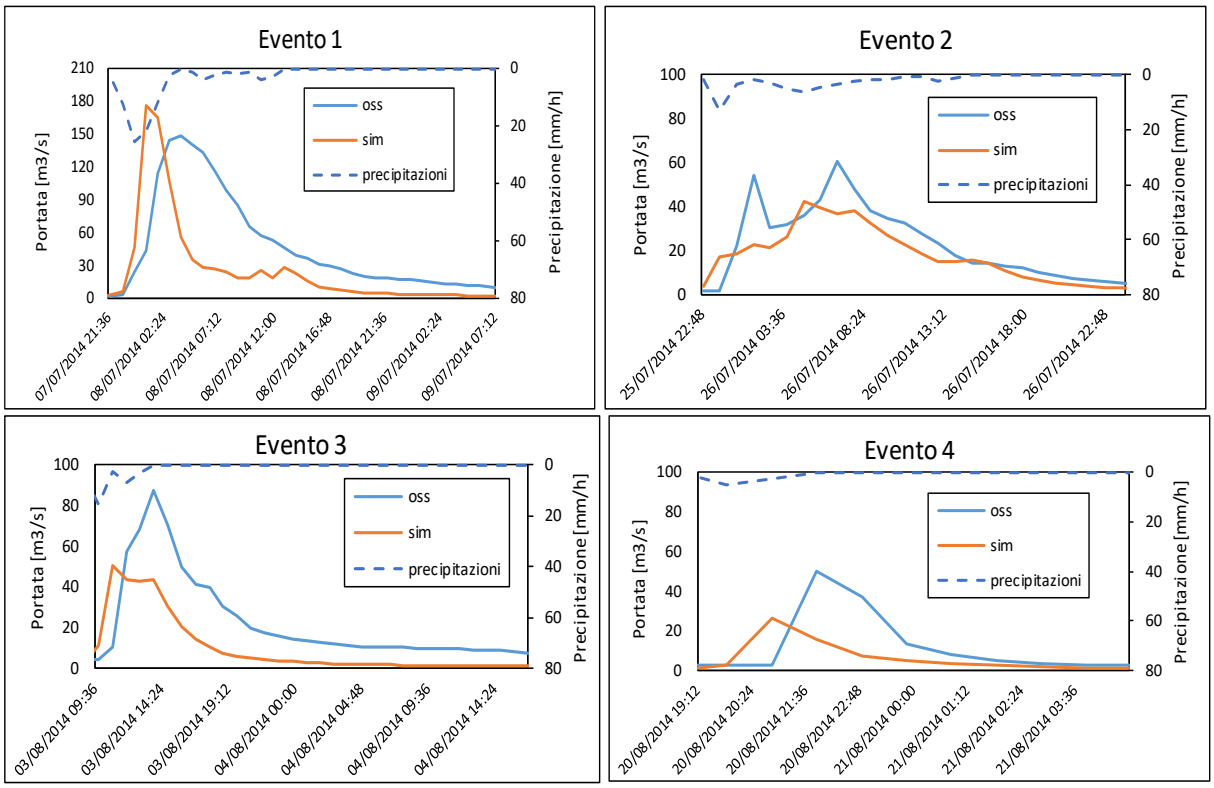
Il risultato finale è stato ottenuto agendo su tutti i parametri a disposizione: oltre a ksat e al CN, sono stati modificati altri due parametri, il kprof, che rappresenta la velocità di propagazione del flusso sub superficiale (quindi nel terreno superficiale), e la profondità stessa del terreno. Ciò è stato necessario poiché secondo i dati iniziali, la sottostima delle portate era piuttosto consistente. Si è moltiplicato il valore della permeabilità per 0.01 e si è sommato al coefficiente CN 10 unità, ovvero il massimo per entrambi i casi. In un secondo momento si è moltiplicato il fattore kprof per un valore di riferimento pari a 20000 ed infine si la profondità del terreno è stata ridotta di un decimo.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.19	-3	-0.48	28.11	0.62	0.19
2	-0.31	-2	-0.22	10.44	0.64	0.31
3	-0.42	-3	-0.56	15.08	0.60	0.42
4	-0.47	-1	-0.48	14.64	0.22	0.47
5	-0.15	-1	-0.33	10.62	0.56	0.15
6	-0.22	-2	-0.56	23.28	0.54	0.22
7	-0.18	0	-0.32	5.48	0.77	0.18
8	1.03	-1	0.09	11.68	0.26	1.03
9	0.17	-2	0.00	5.35	0.82	0.17
MEDIA	-0.04	-1.67	-0.32	13.85	0.56	0.35

Tabella 3.9 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo.

Agendo in questo modo sui 4 parametri si è passati da un errore sul picco di circa -60% a uno quasi nullo, ottenendo così un ottimo risultato. L'errore assoluto non è troppo alto, come anche l'errore sul volume e l'indice di Nash; solo il RMSE rimane leggermente alto rispetto alla media generale.

Ci sono eventi che presentano portate osservate che vanno dai 40 ai 100 m^3/s fino al caso più importante descritto dall'evento numero 1. Nella notte tra il 7 e l'8 luglio 2014 c'è stato un violento nubifragio che si è abbattuto su Milano causando gravi danni e allagamenti ai quartieri di Isola e Niguarda. In quel caso le precipitazioni hanno superato i 20 mm/h.



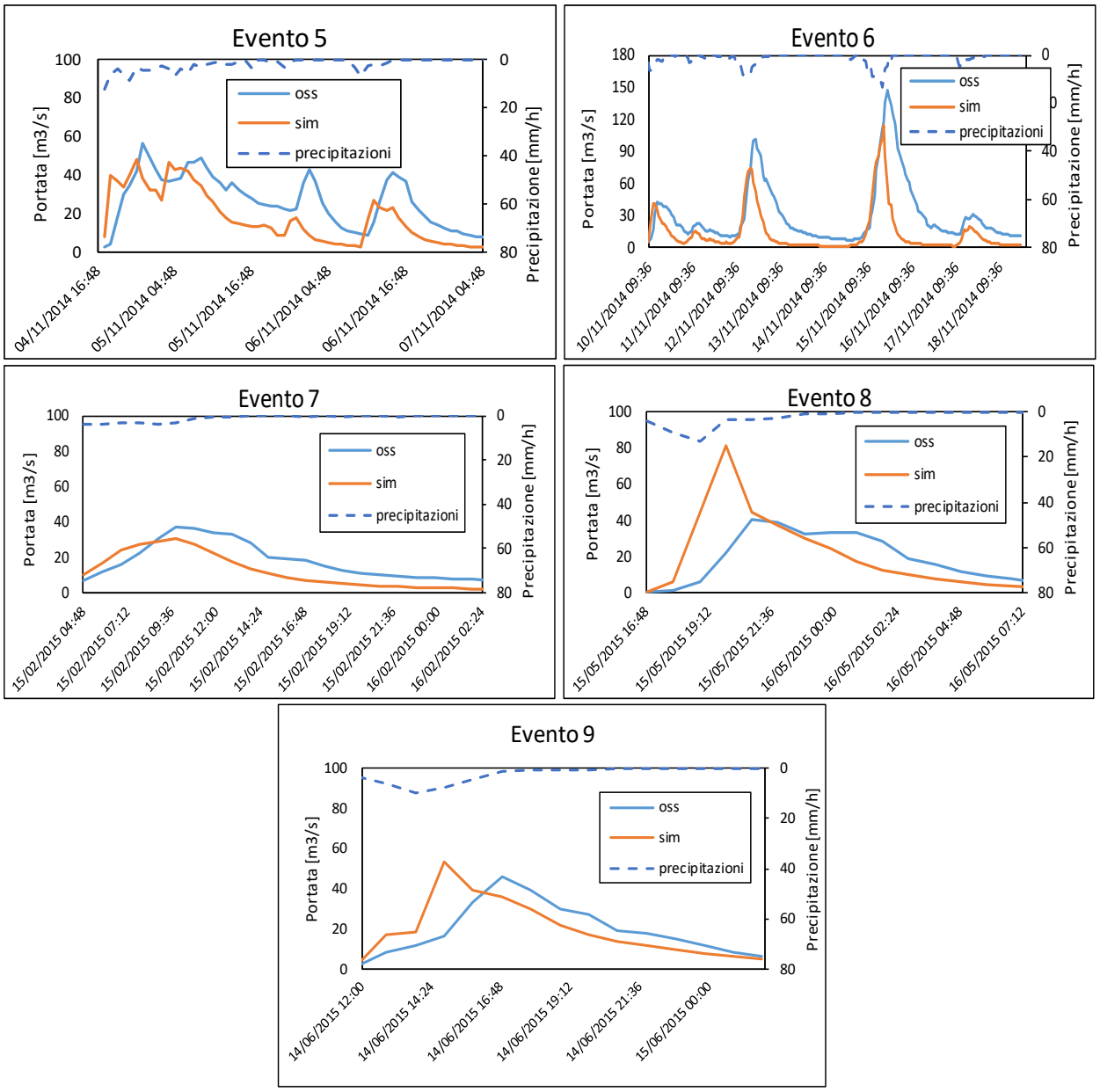


Figura 3.4 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

Lambro

La calibrazione del fiume Lambro è risultata più complicata rispetto al bacino dell'Olona e del Seveso. Bisogna tenere in considerazione la presenza del lago di Pusiano che comporta una regolazione artificiale dei deflussi nell'alveo. All'interno della modellazione quindi è importante tenere conto delle sue coordinate, della geometria, della curva di invaso e della legge di uscita. La legge di deflusso del lago è stata inserita tramite le informazioni date dal gestore e dalla regolazione del cavo diotti.

Caslino

Caslino è l'unica stazione presente sul Lambro che non risente della presenza del lago di Pusiano poiché si trova più a monte di esso, ma nonostante questo si è dovuti intervenire su alcune variabili diverse da ksat e CN. Si è deciso di modificare quelle variabili che regolano la propagazione del deflusso superficiale e che dipendono dall'area drenata da ciascuna cella, ovvero il coefficiente di Strickler ks, grandezza che varia rispetto alla scabrezza della superficie di riferimento e l'area soglia minima, che consente di distinguere le celle di tipo "versante" da quelle di tipo "canale".

evento	inizio	fine
1	01/11/2004 13:58	02/11/2004 22:58
2	08/12/2006 19:57	10/12/2006 04:57
3	11/04/2008 09:56	13/04/2008 02:56
4	06/02/2009 04:55	08/02/2009 18:55
5	27/04/2009 18:55	30/04/2009 03:55
6	17/07/2009 03:55	18/07/2009 12:55
7	11/05/2010 02:54	14/05/2010 02:54
8	31/10/2010 14:54	02/11/2010 07:54

Tabella 3.10 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando per 30 il valore di permeabilità e sottraendo al coefficiente CN 5 unità. In tabella sono riportati i valori degli indici stimati e in Figura 5.6 sono mostrati i risultati della calibrazione.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.92	-3	-0.70	15.00	-0.79	0.92
2	0.14	-2	-0.65	14.90	-0.20	0.14
3	0.10	-3	-0.66	21.04	-0.26	0.10
4	-0.22	-3	-0.58	17.25	0.02	0.22
5	-0.21	-2	-0.79	21.06	0.00	0.21
6	-0.12	-1	-0.60	36.75	-0.88	0.12
7	-0.09	-4	-0.84	19.96	-0.12	0.09
8	-0.08	-5	-0.50	24.27	-0.47	0.08
MEDIA	0.06	-2.88	-0.66	21.28	-0.34	0.24

Tabella 3.11 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino.

L'errore medio sul picco è molto buono, si ha una leggera sovrastima del 6% dovuta all'evento numero 1 che risulta essere l'unico degli 8 eventi studiati fuori dall'ordinario. Infatti, tutti gli altri eventi presentano o una piccola sovrastima o sottostima del picco di portata; del resto, anche l'errore assoluto (24%) è sicuramente il più basso delle sezioni analizzate finora. In compenso, la portata massima simulata risulta essere costantemente in anticipo di almeno un paio d'ore rispetto all'osservata ed inoltre, i due indici caratterizzanti la forma dell'idrogramma non sono molto soddisfacenti a causa del fatto che l'andamento simulato è sempre più improvviso e meno graduale rispetto a quello naturale. Nella maggior parte degli

eventi, le portate massime si aggirano intorno ai 40-60 m³/s eccetto per l'evento numero 6, in cui si sono superati anche i 100 m³/s a causa di abbondanti precipitazioni, anche di 40 mm/h.

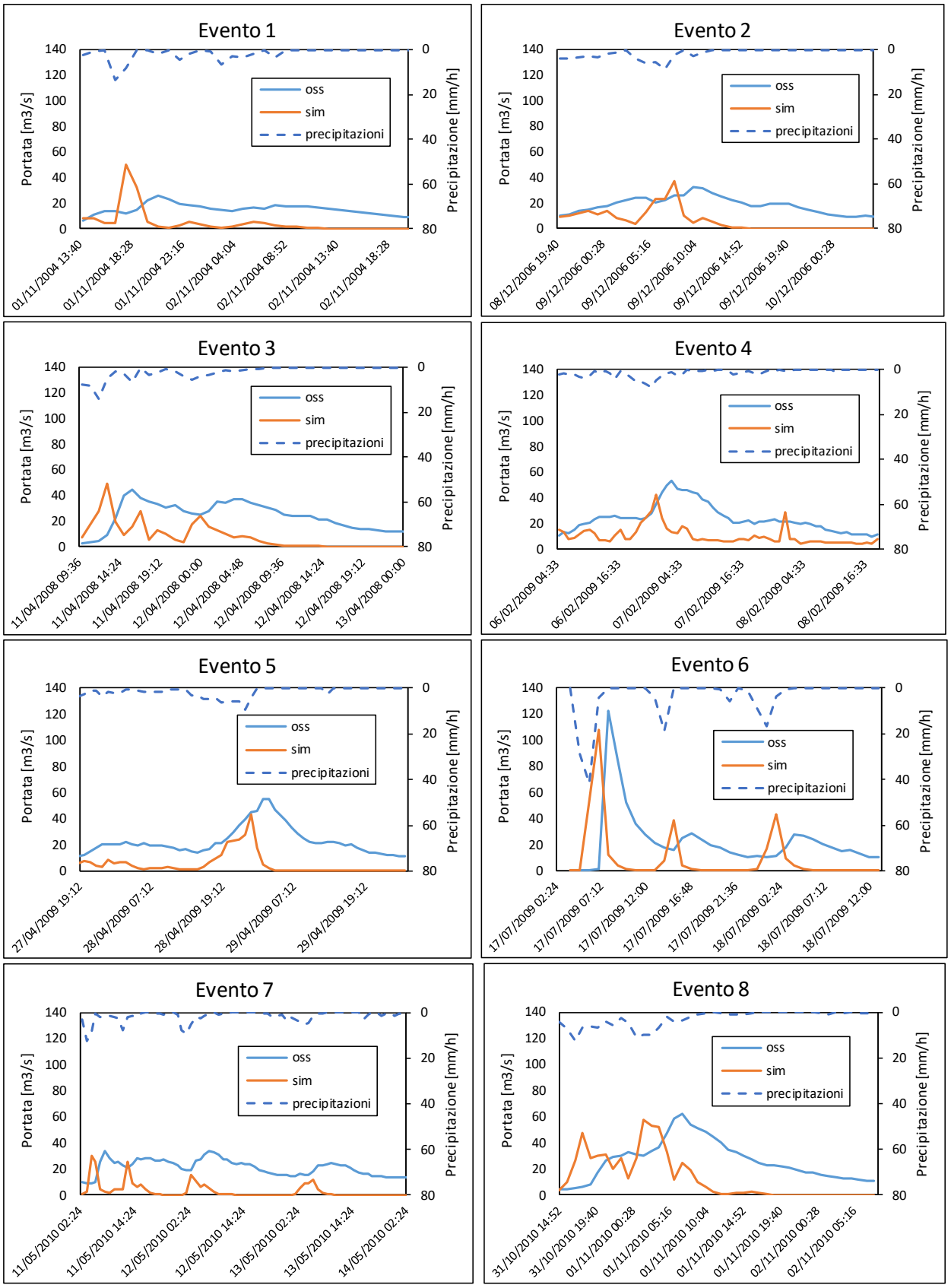


Figura 3.5 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

Lambrugo è la prima stazione più a valle rispetto al lago di Pusiano e ovviamente sarà quella che risentirà di più della laminazione delle piene dovuta alla regolazione del lago stesso. È comunque una stazione aggiuntiva che può dare risposte utili per l'analisi di un bacino più grande rispetto a quello dell'Olona e del Seveso e per questo necessita di maggiori stazioni idrometriche.

evento	inizio	fine
1	31/10/2003 08:59	01/11/2003 12:59
2	29/04/2004 17:59	01/05/2004 06:59
3	09/09/2005 06:58	10/09/2005 06:58
4	14/09/2006 19:57	16/09/2006 07:57
5	16/09/2007 23:56	17/09/2007 12:56
6	17/05/2008 20:56	19/05/2008 04:56
7	07/07/2009 02:55	07/07/2009 20:55
8	02/05/2010 21:54	19/05/2010 12:54
9	18/09/2010 08:54	20/09/2010 13:54
10	30/10/2010 23:54	30/11/2010 04:54

Tabella 3.12 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo.

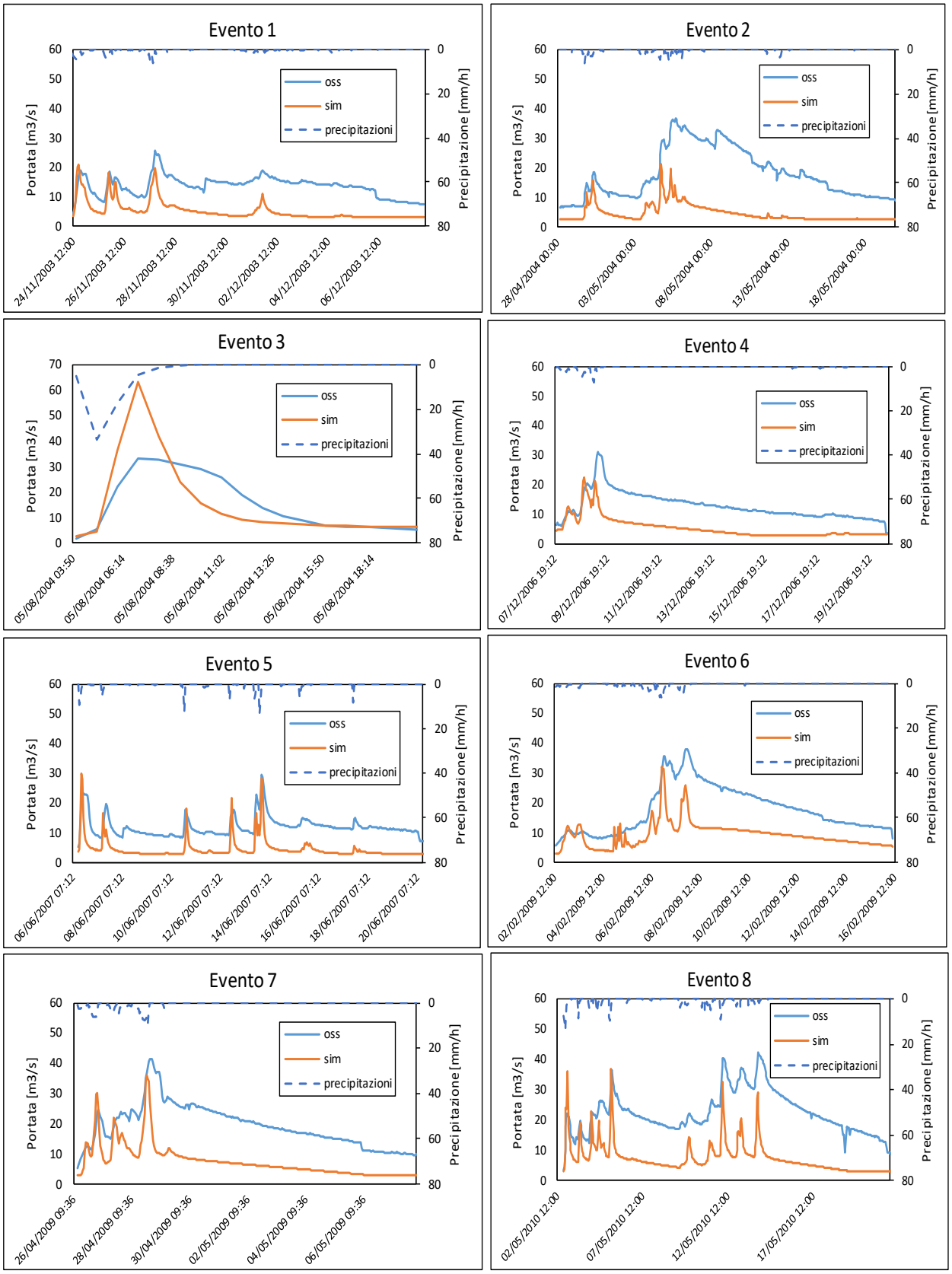
Come si può notare dalla tabella qui sopra gli eventi sono molto più duraturi rispetto ai casi precedenti: secondo la scala di deflusso corrispondente e il range di portata di criticità moderata, in cui vengono considerate le portate dai 7 m^3/ ai 33 m^3/s, si possono raggiungere periodi di 10 e addirittura 20 giorni.
Il risultato finale è stato ottenuto andando a modificare tutti e 4 i parametri (come nel caso di Palazzolo), sfruttando al massimo gli ordini di grandezza di ksat e del CN. Sarà lo stesso anche per le altre due stazioni rimanenti.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.02	3	-0.06	7.71	0.59	0.02
2	-0.28	1	-0.21	10.08	0.67	0.28
3	-0.19	0	-0.08	13.34	0.70	0.19
4	0.35	0	0.29	11.48	0.57	0.35
5	-0.17	0	-0.05	15.37	0.64	0.17
6	-0.40	3	-0.33	16.10	0.62	0.40
7	0.20	1	-0.05	12.59	0.67	0.20
8	-0.14	-1	-0.59	26.37	0.18	0.14
9	0.28	-3	-0.36	30.28	0.17	0.28
10	-0.24	2	-0.61	23.51	0.35	0.24
MEDIA	-0.06	0.60	-0.20	16.68	0.52	0.23

Tabella 3.13 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo.

In questo modo si è ottenuto un buon risultato, in particolare per il tempo di propagazione e l'errore medio relativo sul picco. Si è passati da una sottostima del 45% ad una sovrastima del 7%, con un errore assoluto non troppo alto. Se si osservano i vari eventi, si può notare come l'evento numero 3 e il numero

9 presentino delle sovrastime piuttosto elevate e queste sono dovute probabilmente alle abbondanti precipitazioni. In entrambi i casi hanno superato i 30 mm/h andando così ad influenzare la simulazione delle portate.



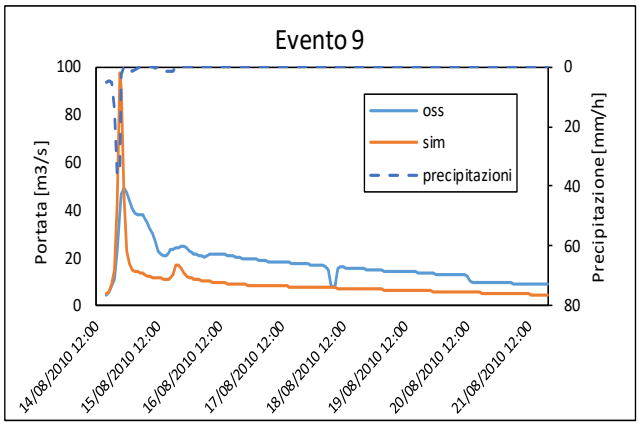


Figura 3.6 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

È importante sottolineare come la curva di esaurimento sia molto più lunga rispetto agli altri bacini ma anche a Caslino stessa. Ciò è sicuramente dovuto alla presenza del lago, di conseguenza anche il tempo di corrivazione è molto più lungo e lo si può constatare graficamente. La pendenza appare quasi perfetta, quindi la legge di efflusso dal lago sembra essere adeguata.

Peregallo

È una delle poche stazioni in cui si è riusciti ad analizzare ben 10 eventi e quasi la metà di questi sono caratterizzati da periodi piuttosto lunghi. Spostandosi più a valle lungo il Lambro, il valore delle portate smaltibili dall'alveo aumentano di conseguenza: la media delle portate di piena supera i 60 m^3/s ma in alcuni casi (vedi più in basso gli eventi 6,8 e 9), sono stati superati anche i 100 m^3/s. In particolare nel 2010 ci sono stati forti precipitazioni, come già visto in casi precedenti, che hanno causato diverse esondazioni, a volte contemporaneamente del Seveso e del Lambro. Ci sono diversi eventi, come per esempio il numero 9 e 10, mostrano precipitazioni che raggiungono anche i 100 mm in un solo giorno.

evento	inizio	fine
1	04/05/2004 14:59	10/05/2004 00:59
2	02/10/2005 12:57	03/10/2005 04:57
3	13/06/2007 15:56	16/06/2007 05:56
4	01/07/2008 01:55	01/07/2008 12:55
5	02/11/2008 23:55	15/11/2008 02:55
6	26/04/2009 16:55	06/05/2009 10:55
7	02/05/2010 21:54	21/05/2010 23:54
8	14/08/2010 14:54	21/08/2010 06:54
9	31/10/2010 11:54	27/11/2010 03:54
10	21/12/2010 23:54	31/12/2010 22:54

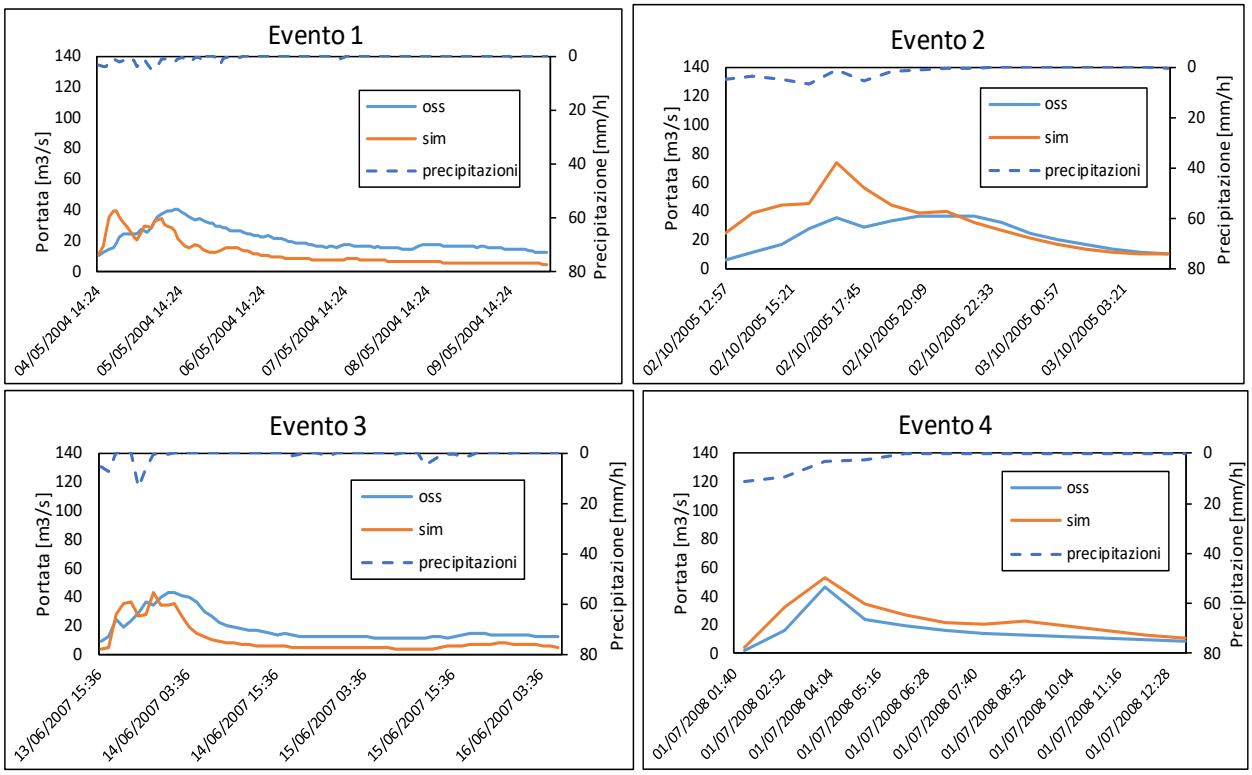
Tabella 3.14 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo.

Come già detto in precedenza, anche qui il risultato finale è stato ottenuto modificando tutti i parametri a disposizione, quindi moltiplicando ksat x0.01, kprof x30000, prof x0.1 e sommando 10 al CN. Per tutti e tre le stazioni presenti a valle del lago di Pusiano, è stato necessario agire su tutti i parametri per poter ridurre il più possibile l'errore medio sul picco.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.01	-4	-0.42	10.89	0.08	0.01
2	1.02	0	0.39	15.00	0.19	1.02
3	0.00	-3	-0.42	8.87	0.44	0.00
4	0.13	0	0.45	12.89	-0.07	0.13
5	-0.07	-5	-0.41	11.50	0.41	0.07
6	-0.36	-1	-0.58	24.00	0.31	0.36
7	-0.18	-4	-0.66	25.97	0.13	0.18
8	0.42	-5	-0.57	23.13	0.24	0.42
9	-0.27	0	-0.69	25.08	0.20	0.27
10	-0.27	-4	-0.51	14.99	0.25	0.27
MEDIA	0.04	-2.60	-0.34	17.23	0.22	0.27

Tabella 3.15 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo.

La calibrazione sulle tre stazioni a valle del lago di Pusiano è stata piuttosto lunga e complicata, ma comunque ha portato a dei risultati più che soddisfacenti, sia per l'errore medio relativo, che per quello assoluto. Si è riusciti a ridurre in modo piuttosto consistente le sottostime della maggior parte degli eventi, a discapito ovviamente di un paio di eventi in cui si manifestano evidenti sovrastime (vedi evento 2 e 8).



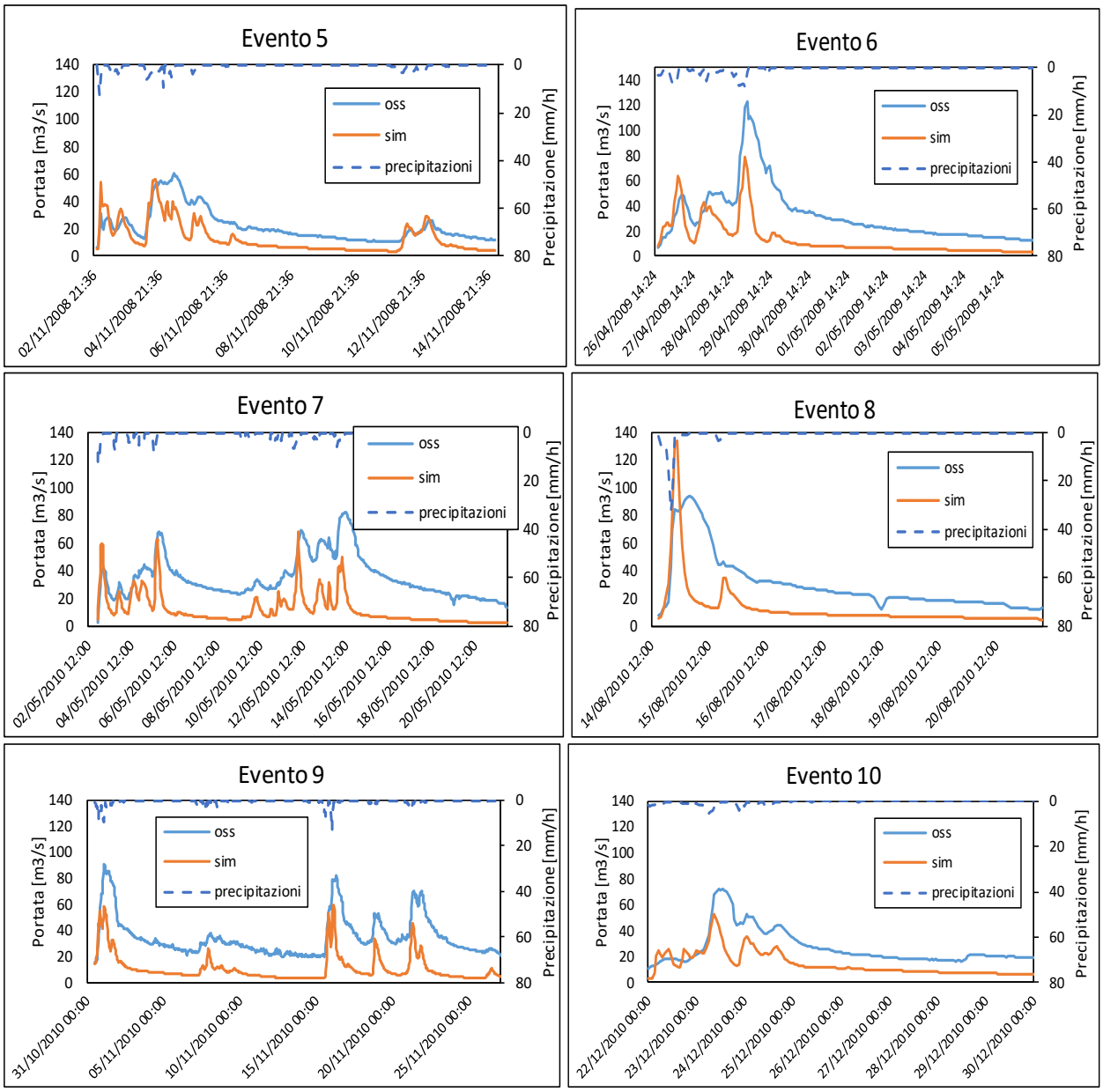


Figura 3.7 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

Milano Feltre

Essendo la stazione più a valle, la soglia di criticità moderata risulta essere la più alta di tutte, superando anche i 2 m come livello idrometrico. Infatti, inserendo questo valore all'interno dell'equazione della scala di deflusso si ottengono valori di portata superiori agli 80 m^3/s. Per questo motivo, come succedeva anche per le altre stazioni idrometriche del Lambro, gli eventi di piena da analizzare sono abbastanza lunghi.

evento	inizio	fine
1	31/10/2003 08:59	01/11/2003 12:59
2	29/04/2004 17:59	01/05/2004 06:59
3	09/09/2005 06:58	10/09/2005 06:58
4	14/09/2006 19:57	16/09/2006 07:57
5	16/09/2007 23:56	17/09/2007 12:56
6	17/05/2008 20:56	19/05/2008 04:56
7	07/07/2009 02:55	07/07/2009 20:55
8	02/05/2010 21:54	19/05/2010 12:54
9	18/09/2010 08:54	20/09/2010 13:54
10	30/10/2010 23:54	30/11/2010 04:54

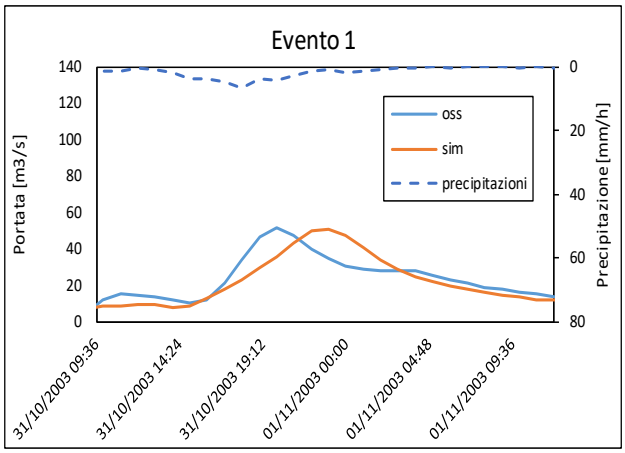
Tabella 3.16 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre.

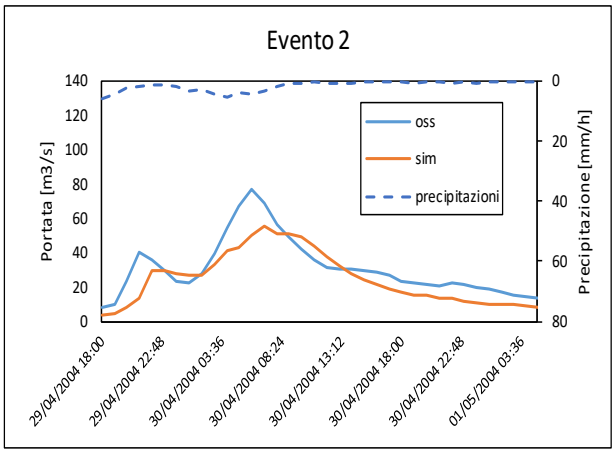
Per quanto fatto in calibrazione, non c'è molto da aggiungere rispetto a quanto è già stato detto in precedenza, di conseguenza è sufficiente osservare i valori degli indici stimati nella tabella sottostante.

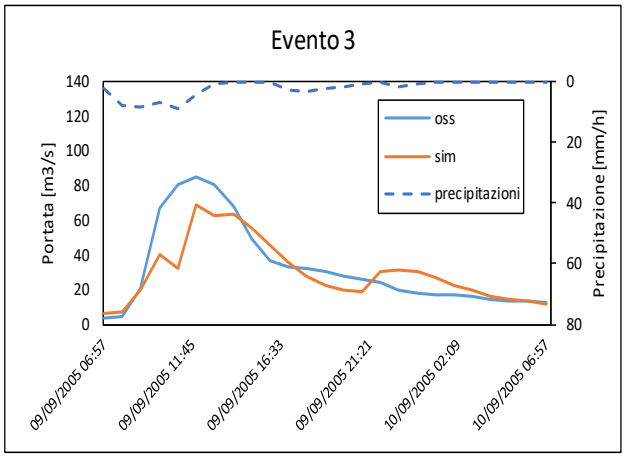
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.02	3	-0.06	7.71	0.59	0.02
2	-0.28	1	-0.21	10.08	0.67	0.28
3	-0.19	0	-0.08	13.34	0.70	0.19
4	0.35	0	0.29	11.48	0.57	0.35
5	-0.17	0	-0.05	15.37	0.64	0.17
6	-0.40	3	-0.33	16.10	0.62	0.40
7	0.20	1	-0.05	12.59	0.67	0.20
8	-0.14	-1	-0.59	26.37	0.18	0.14
9	0.28	-3	-0.36	30.28	0.17	0.28
10	-0.24	2	-0.61	23.51	0.35	0.24
MEDIA	-0.06	0.60	-0.20	16.68	0.52	0.23

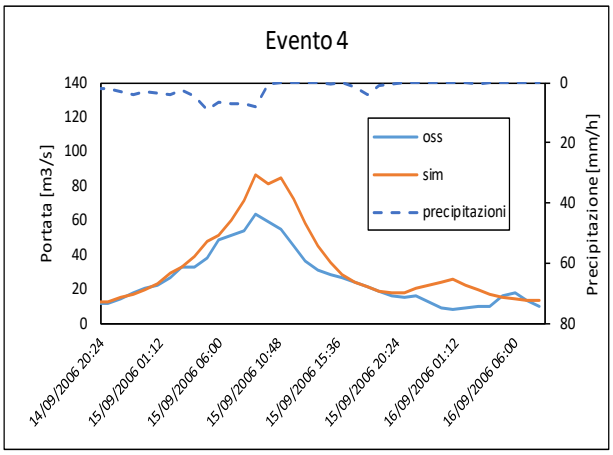
Tabella 3.17 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre.

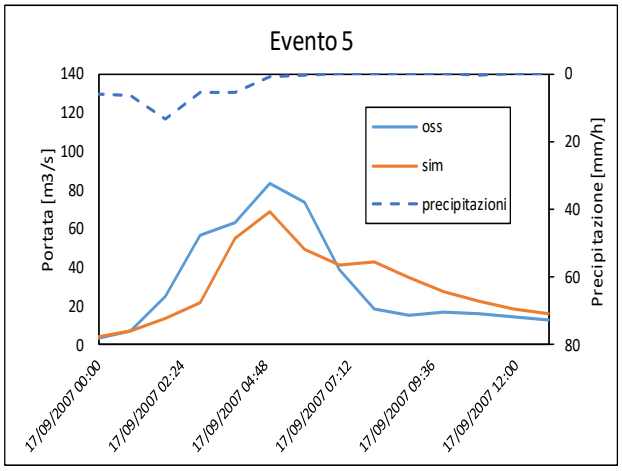
Rispetto agli altri casi, qui è stato necessario incrementare notevolmente il parametro kprof fino a 150000, per poter ridurre l'errore sul picco. Come per le altre stazioni sul Lambro, l'errore relativo è diminuito fino al 6%. La differenza sostanziale rispetto a Lambrugo e Peregallo riguarda i tempi di propagazione: mentre poco più a monte ci sono evidenti anticipi del picco di piena, qui si manifesta un leggero ritardo. Può essere dovuto probabilmente anche alle diverse sottostime delle portate simulate. La propagazione del fest avviene a celerità variabile, ciò significa che essa viene ricalcolata in base alle portate attuali che ci sono in alveo e quindi, tanto più è alta la portata, tanto più aumenta la celerità e tanto più viaggia velocemente la propagazione della piena. Per questo motivo, innalzando certe portate simulate che sono sottostimate, automaticamente andrebbero più veloci. Non riuscendo però ad aumentare le portate in alcuni eventi, non si riesce a compensare il ritardo per ogni evento.

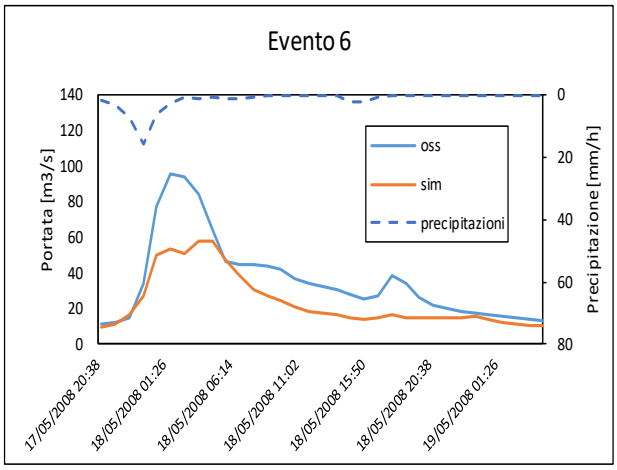

Evento 1
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
31/10/2003 09:36
31/10/2003 14:24
31/10/2003 19:12
01/11/2003 00:00
01/11/2003 04:48
01/11/2003 09:36

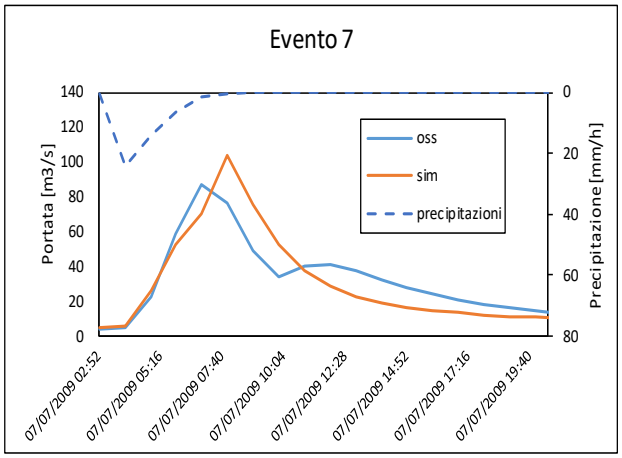

Evento 2
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
29/04/2004 18:00
29/04/2004 22:48
30/04/2004 03:36
30/04/2004 08:24
30/04/2004 13:12
30/04/2004 18:00
30/04/2004 22:48
01/05/2004 03:36

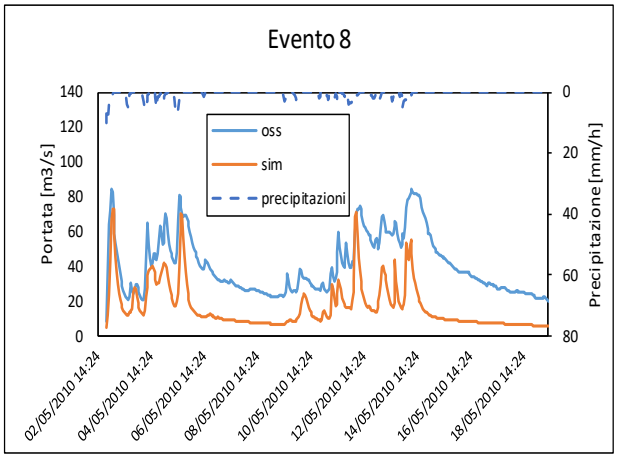

Evento 3
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
09/09/2005 06:57
09/09/2005 11:45
09/09/2005 16:33
09/09/2005 21:21
10/09/2005 02:09
10/09/2005 06:57


Evento 4
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
14/09/2006 20:24
15/09/2006 01:12
15/09/2006 06:00
15/09/2006 10:48
15/09/2006 15:36
15/09/2006 20:24
16/09/2006 01:12
16/09/2006 06:00


Evento 5
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
17/09/2007 00:00
17/09/2007 02:24
17/09/2007 04:48
17/09/2007 07:12
17/09/2007 09:36
17/09/2007 12:00


Evento 6
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
17/05/2008 20:38
18/05/2008 01:26
18/05/2008 06:14
18/05/2008 11:02
18/05/2008 15:50
18/05/2008 20:38
19/05/2008 01:26


Evento 7
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
07/07/2009 02:52
07/07/2009 05:16
07/07/2009 07:40
07/07/2009 10:04
07/07/2009 12:28
07/07/2009 14:52
07/07/2009 17:16
07/07/2009 19:40


Evento 8
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
02/05/2010 14:24
04/05/2010 14:24
06/05/2010 14:24
08/05/2010 14:24
10/05/2010 14:24
12/05/2010 14:24
14/05/2010 14:24
16/05/2010 14:24
18/05/2010 14:24

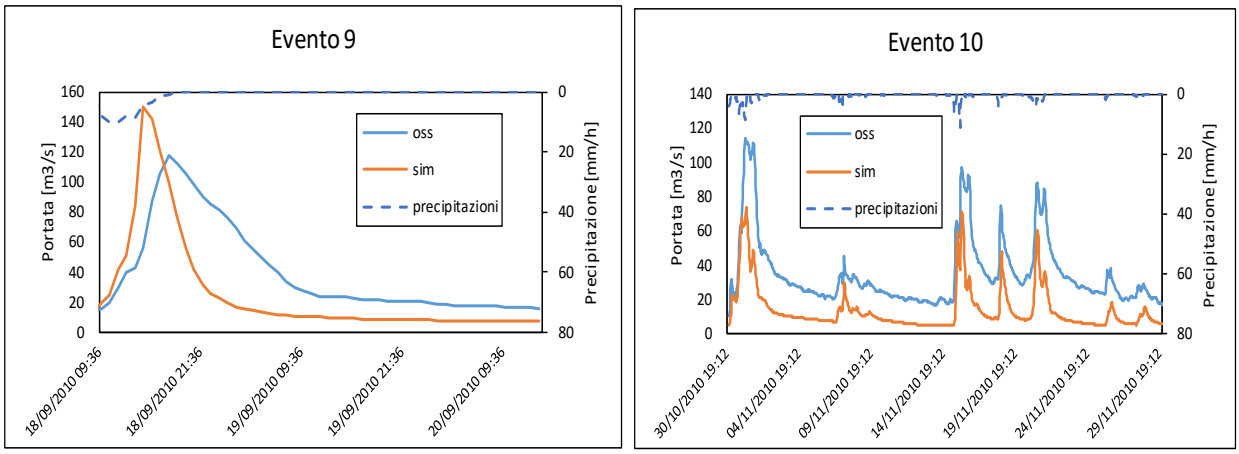


Figura 3.8 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

Per riassumere tutti i processi e i parametri considerati nella fase di calibrazione con il metodo CN, si riporta una tabella conclusiva in cui si evidenziano le modifiche che sono state fatte ai vari parametri idrologici per ogni singola stazione idrometrica. La prima cosa che si può notare è che non è stato sempre necessario agire su tutti i parametri, infatti solo la metà delle stazioni lo hanno richiesto. Tra queste troviamo Palazzolo che rappresenta la sezione con meno dati a disposizione, quindi con meno possibilità di calibrazione, poi ci sono le 3 stazioni di valle del bacino del Lambro, che come già detto più volte, risentono dei laghi posti più a monte. Inoltre è lecito aggiungere che il metodo tende a sottostimare le portate osservare, infatti per le stazioni del Seveso e del Lambro, eccetto Caslino, si è sempre dovuto moltiplicare il valore della permeabilità per 0.01 e sommare 10 unità al coefficiente CN.

	Ksat	CN	kprof	prof
Lozza	30	-5	/	/
Castellanza	10	/	/	/
Cantù	0.1	/	/	/
Palazzolo	0.01	10	20000	0.1
Caslino	30	-5	/	/
Lambrugo	0.01	10	30000	0.1
Peregallo	0.01	10	40000	0.1
Feltre	0.01	10	150000	0.1

Tabella 3.18 Riassunto della calibrazione con il metodo del CN con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica.

3.1.3 Validazione del Curve Number

Terminata la calibrazione, si è passati alla fase conclusiva riguardante il metodo CN, ovvero la validazione. Gli eventi analizzati per ogni stazioni sono 5, quindi meno rispetto alla fase di calibrazione, semplicemente per il fatto che il numero degli anni di studio a disposizione è minore. I casi particolari sono quelli dell'Olona che hanno 3 anni di validazione, dal 2008 al 2010; Palazzolo solo un anno da luglio 2015 a giugno 2016 per i motivi spiegati in precedenza. Infine le altre 5 stazioni, sono state analizzate dal 2011 al 2016. Il procedimento che è stato applicato è del tutto analogo a quanto definito nella fase precedente,

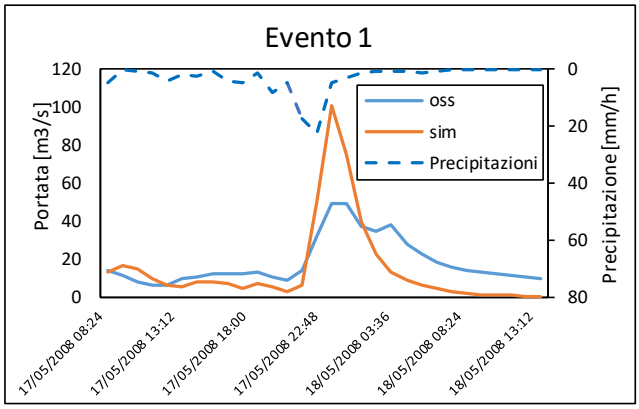
con il vantaggio che è stato sufficiente eseguire una sola simulazione, sfruttando i parametri già calibrati e riassunti nella tabella 3.18.
Non c'è niente di particolare da aggiungere riguardo ai risultati ottenuti in quanto seguono abbastanza l'andamento di ciò che è stato fatto durante la calibrazione. Per il bacino dell'Olona e del Seveso si ha un leggero miglioramento in fase di validazione che di calibrazione, mentre per il Lambro viceversa. Si riportano di seguito le tabelle con gli indici stimati e i grafici con i risultati raggiunti.

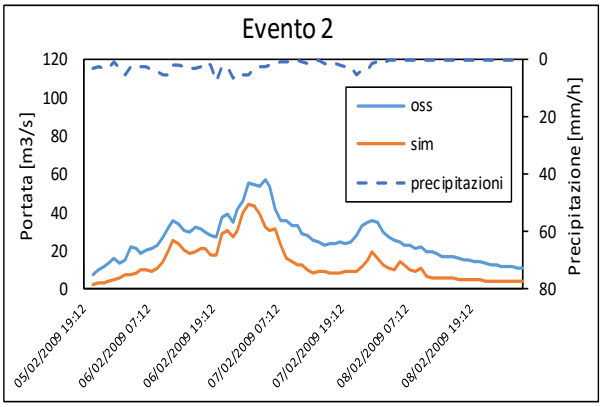
Lozza

evento	inizio	fine
1	17/05/2008 08:56	18/05/2008 13:56
2	05/02/2009 20:55	09/02/2009 04:55
3	27/04/2009 00:55	30/04/2009 08:55
4	07/07/2009 02:55	07/07/2009 11:55
5	09/05/2010 07:54	15/05/2010 02:54

Tabella 3.19 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.03	-1	-0.19	14.73	0.58	1.03
2	-0.22	-3	-0.47	12.95	0.40	0.22
3	0.05	0	-0.59	17.36	0.23	0.05
4	-0.32	0	-0.46	15.70	0.43	0.32
5	-0.56	1	-0.92	21.55	0.05	0.56
MEDIA	-0.004	-0.60	-0.53	16.46	0.34	0.44





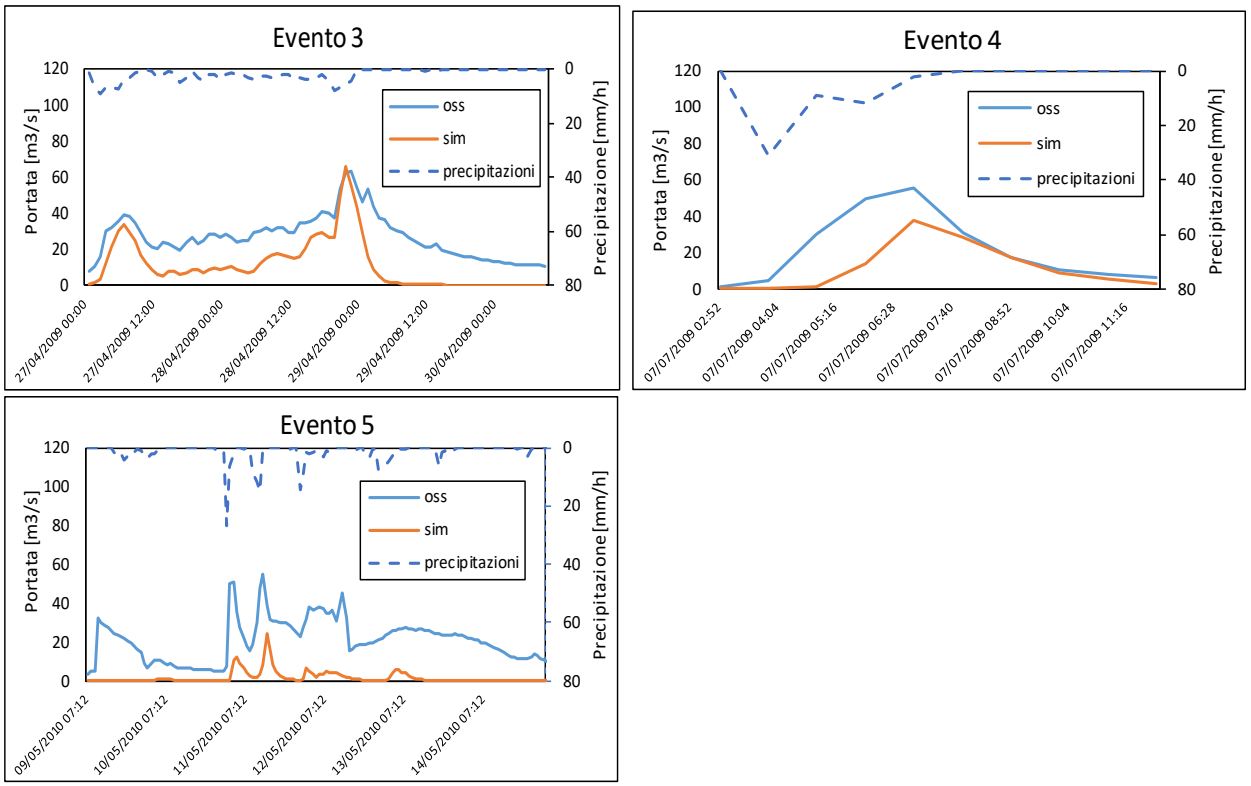


Figura 3.9 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Castellanza

evento	inizio	fine
1	17/05/2008 02:56	19/05/2008 01:56
2	05/02/2009 18:55	11/02/2009 03:55
3	26/04/2009 13:55	02/05/2009 02:55
4	31/10/2010 01:54	03/11/2010 03:54
5	22/12/2010 09:54	26/12/2010 06:54

Tabella 3.20 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.73	-1	-0.51	17.21	0.20	0.73
2	-0.11	-1	-0.59	15.65	0.38	0.11
3	0.07	3	-0.70	21.64	0.26	0.07
4	0.32	0	-0.45	13.87	0.39	0.32
5	-0.21	2	-0.74	15.17	0.09	0.21
MEDIA	0.16	0.60	-0.60	16.71	0.26	0.29

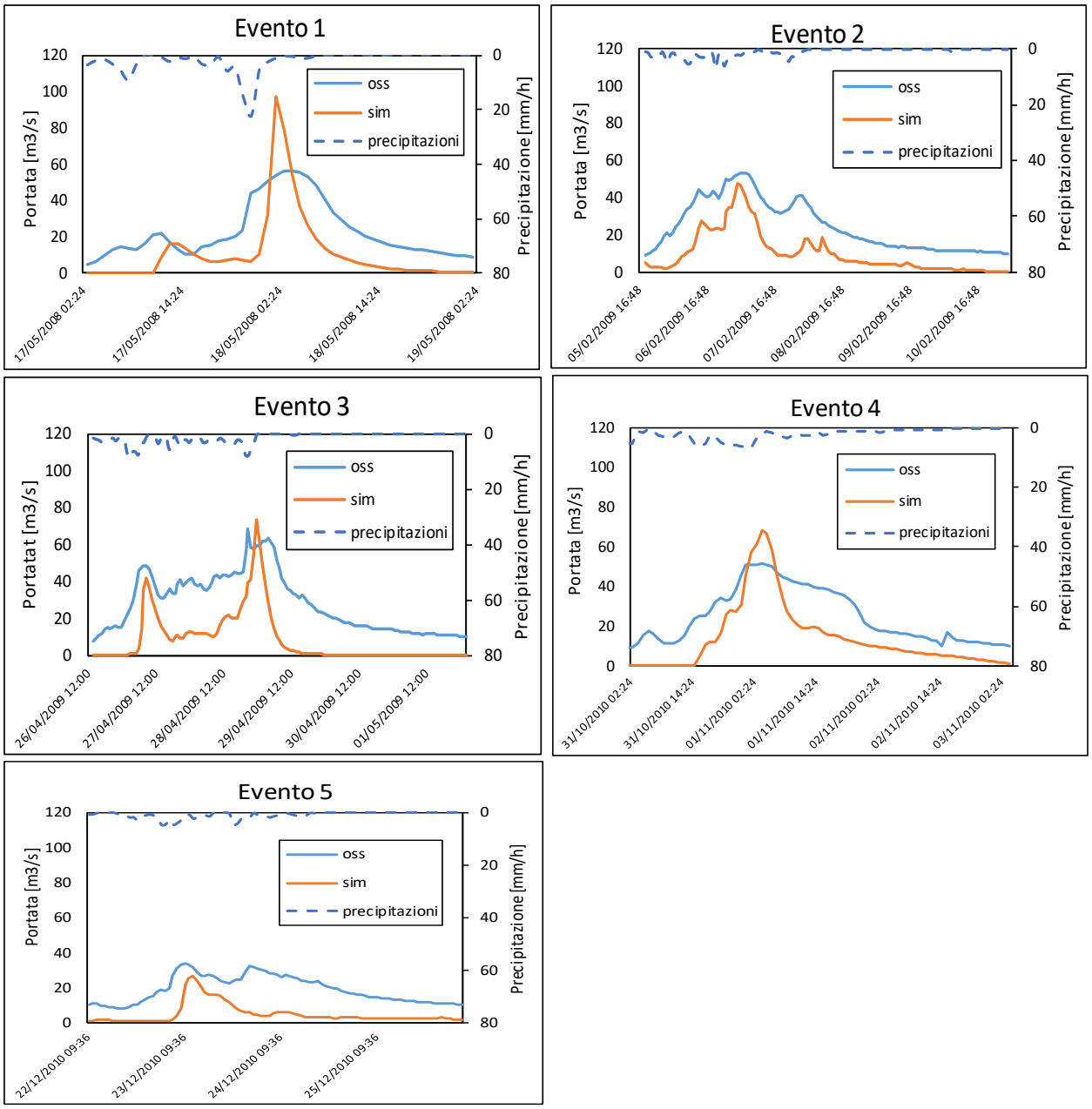


Figura 3.10 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Cantù

evento	inizio	fine
1	06/07/2012 17:53	07/07/2012 03:53
2	12/09/2012 08:52	12/09/2012 18:52
3	23/10/2013 12:52	24/10/2013 01:52
4	07/07/2014 20:51	08/07/2014 14:51
5	23/09/2015 05:50	23/09/2015 14:50

Tabella 3.21 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.14	0	-0.56	3.32	0.52	0.14
2	-0.34	0	-0.56	3.90	0.50	0.34
3	0.32	0	-0.53	4.14	0.09	0.32
4	0.28	0	-0.59	12.11	0.02	0.28
5	0.18	-2	-0.43	8.47	-0.87	0.18

MEDIA	0.06	-0.40	-0.54	6.39	0.05	0.25

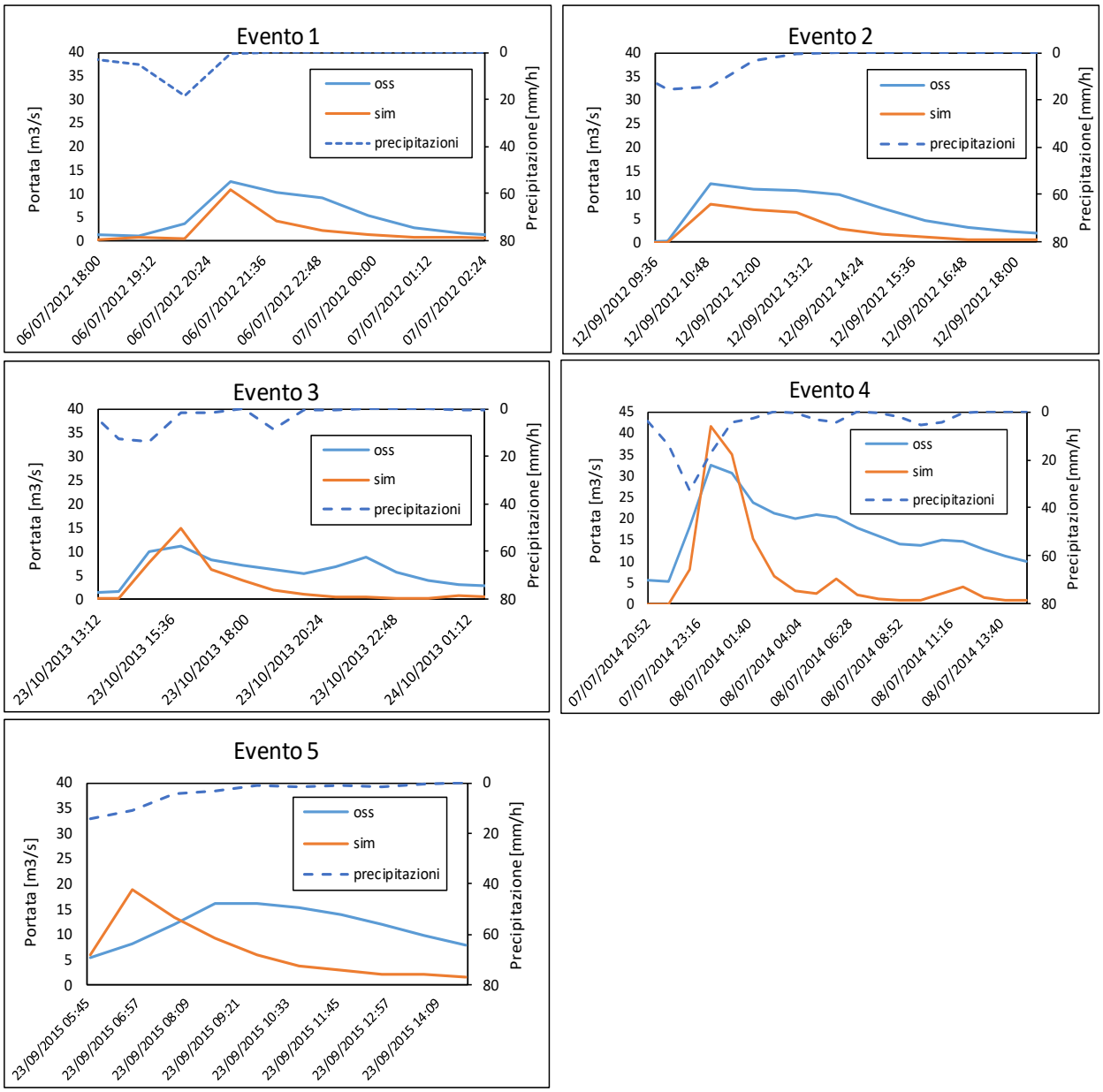


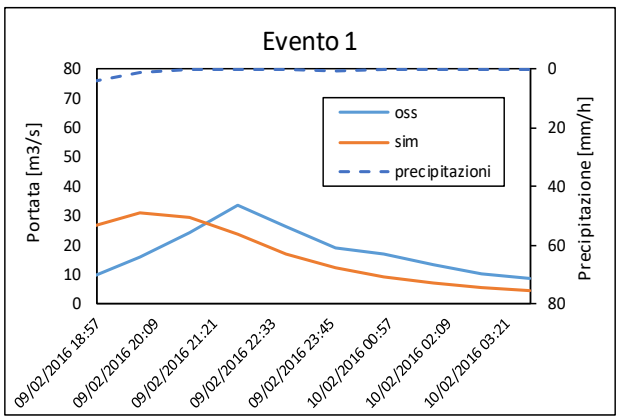
Figura 3.11 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù.

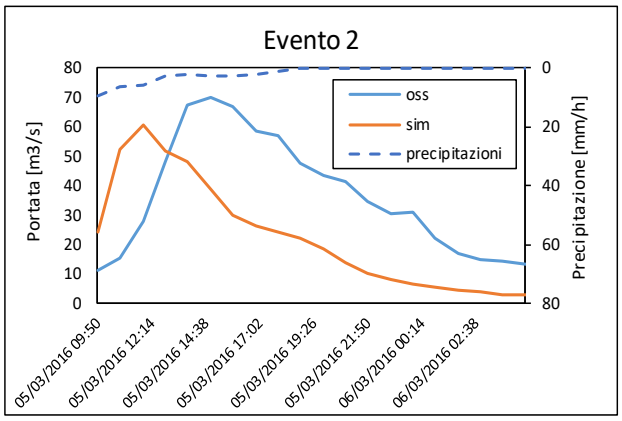
Palazzolo

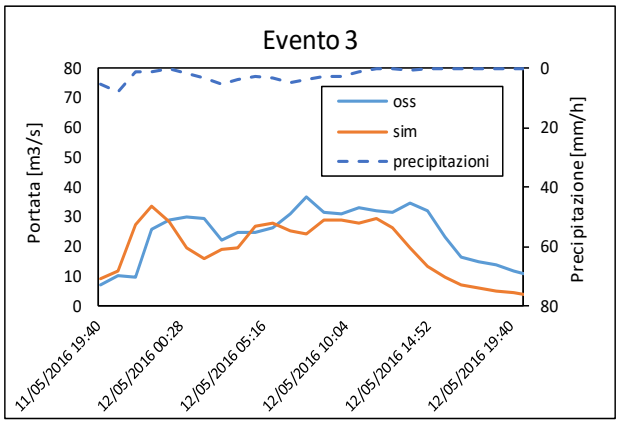
evento	inizio	fine
1	09/02/2016 18:50	10/02/2016 03:50
2	05/03/2016 09:50	06/03/2016 04:50
3	11/05/2016 19:50	12/05/2016 20:50
4	04/06/2016 05:50	04/06/2016 17:50
5	16/06/2016 15:50	17/06/2016 00:50

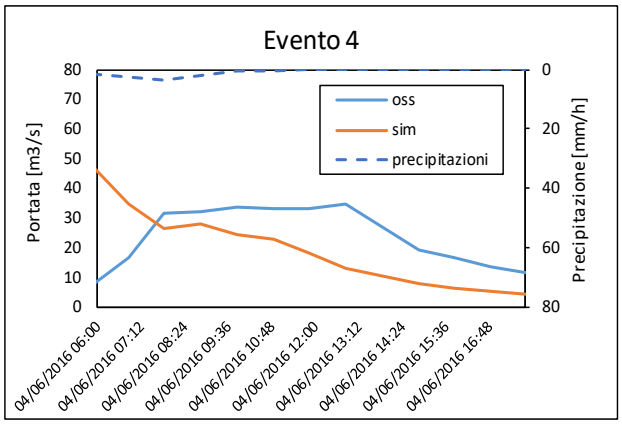
Tabella 3.22 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.08	-2	-0.06	9.71	-0.49	0.08
2	-0.14	-3	-0.38	24.45	-0.04	0.14
3	-0.08	-2	-0.20	8.89	0.22	0.08
4	0.36	-4	-0.20	16.38	-1.36	0.36
5	-0.08	-1	-0.34	14.28	0.37	0.08
MEDIA	0.00	-2.40	-0.24	14.74	-0.26	0.15









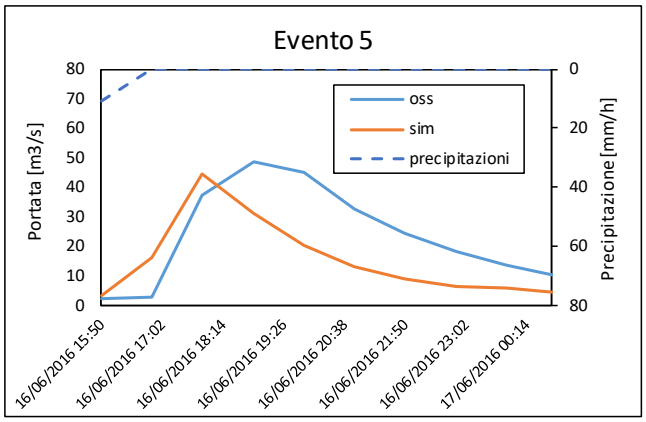


Figura 3.12 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

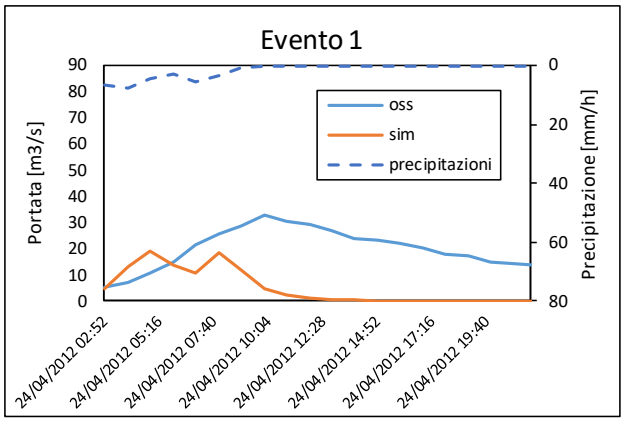
Caslino

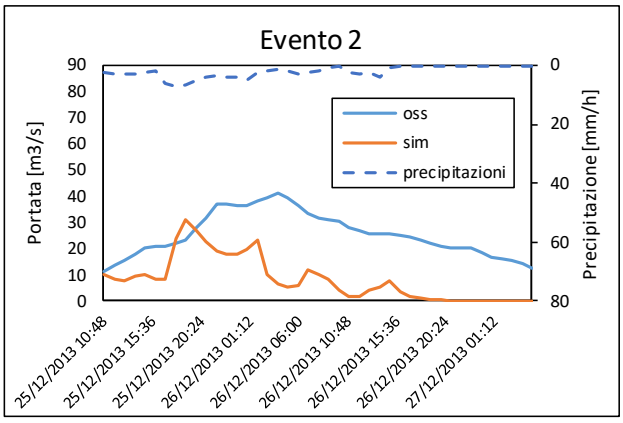
evento	inizio	fine
1	24/04/2012 02:53	24/04/2012 21:53
2	25/12/2013 10:51	27/12/2013 04:51
3	16/05/2013 09:52	18/05/2013 05:52
4	10/11/2014 10:51	16/11/2014 22:51
5	11/05/2016 19:50	12/05/2016 21:50

Tabella 3.23 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.42	-2	-0.75	18.56	-0.21	0.42
2	-0.25	-2	-0.68	19.35	-0.03	0.25
3	-0.07	-3	-0.73	16.07	-0.28	0.07
4	-0.35	-3	-0.78	20.23	0.08	0.35
5	0.02	-4	-0.70	12.26	-0.24	0.02

MEDIA	-0.21	-2.80	-0.73	17.29	-0.13	0.22





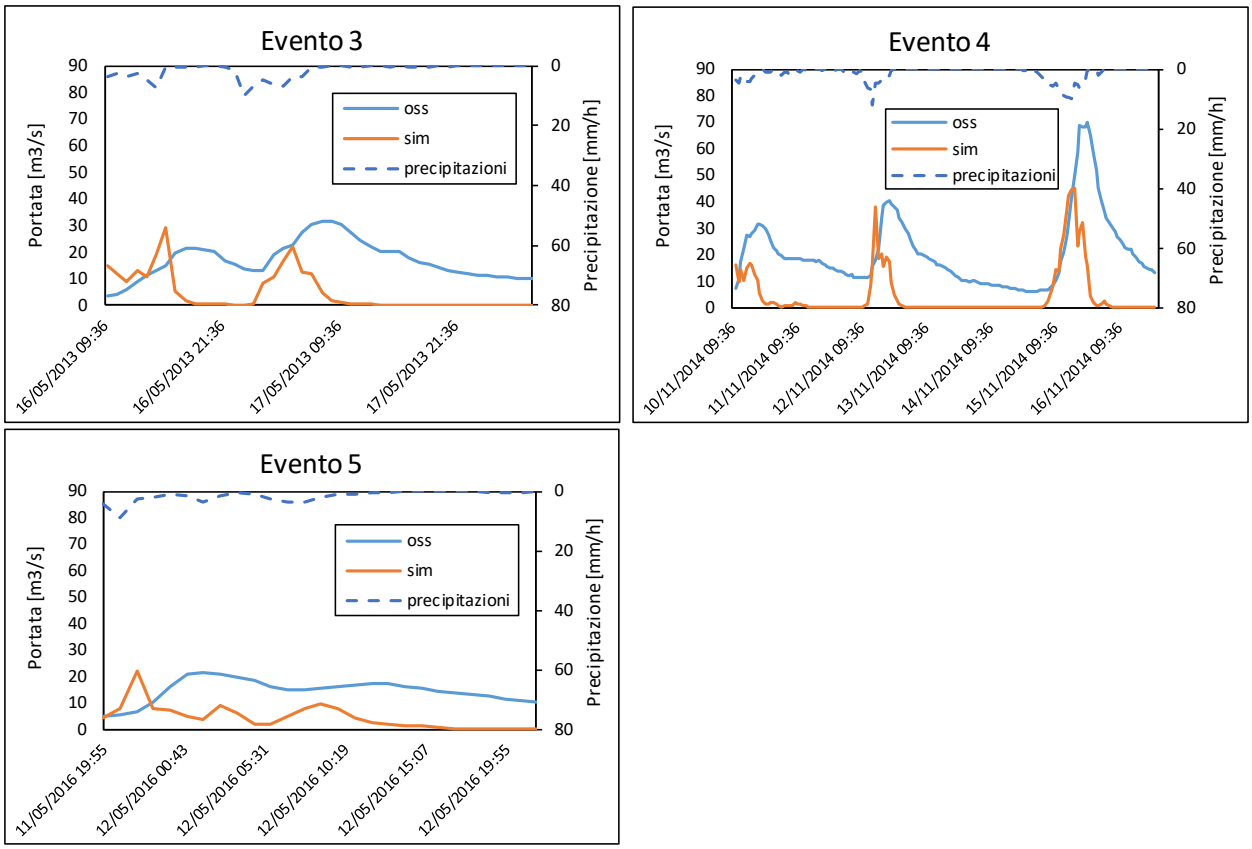


Figura 3.13 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

evento	inizio	fine
1	19/04/2012 13:53	04/05/2012 00:53
2	04/11/2012 00:52	07/11/2012 14:52
3	09/06/2013 13:52	12/06/2013 10:52
4	29/06/2014 10:51	22/07/2014 06:51
5	04/06/2016 00:50	21/06/2016 18:50

Tabella 3.24 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.09	-6	-0.66	8.80	0.00	0.09
2	0.23	-3	-0.40	4.97	0.33	0.23
3	0.41	-1	-0.29	4.29	0.41	0.41
4	0.26	-1	-0.56	8.35	0.30	0.26
5	0.46	-2	-0.63	8.20	-0.06	0.46
MEDIA	0.29	-2.60	-0.51	6.92	0.20	0.29

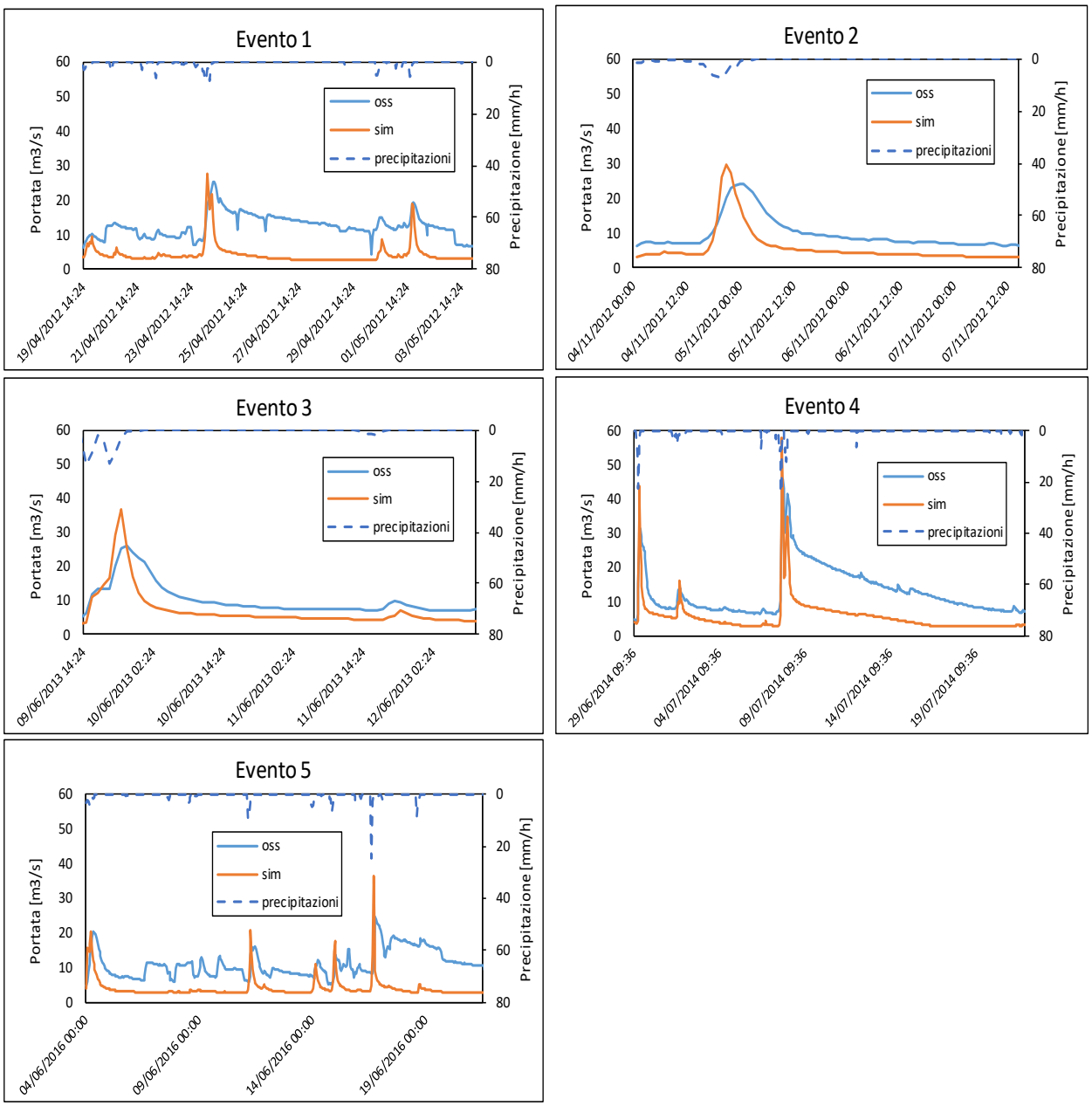


Figura 3.14 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

Peregallo

evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 12:53
2	09/06/2013 14:52	10/06/2013 18:52
3	14/06/2014 16:51	15/06/2014 05:51
4	15/05/2015 15:50	16/05/2015 09:50
5	16/06/2016 14:50	19/06/2016 22:50

Tabella 3.25 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.57	-1	0.17	15.80	-0.82	0.57
2	0.32	-1	-0.16	11.78	0.12	0.32
3	0.26	-2	-0.14	22.09	-0.23	0.26
4	0.42	-4	0.24	22.02	-1.24	0.42
5	-0.04	-3	-0.70	15.06	0.11	0.04

MEDIA	0.31	-2.20	-0.12	17.35	-0.41	0.32

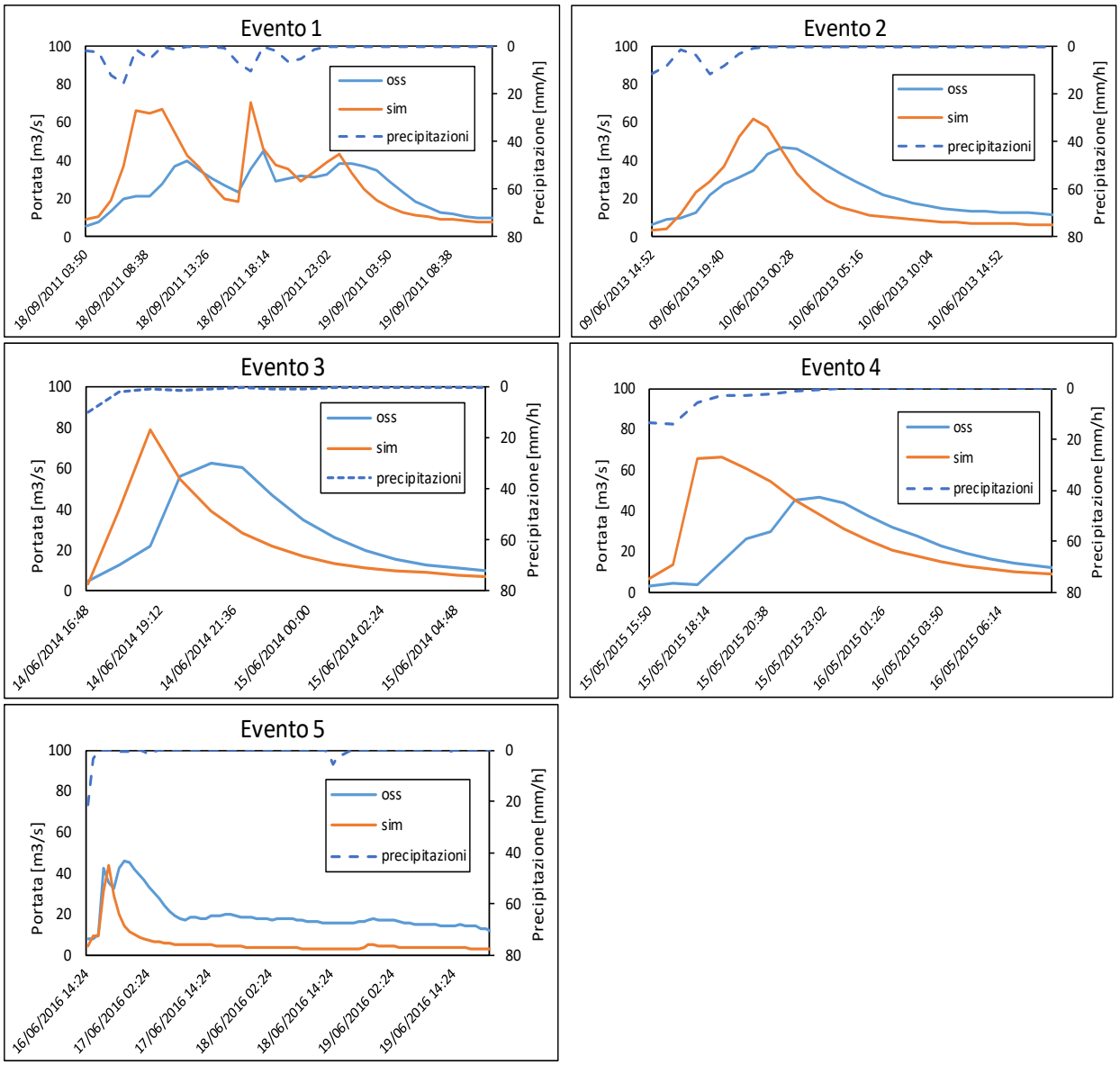


Figura 3.15 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

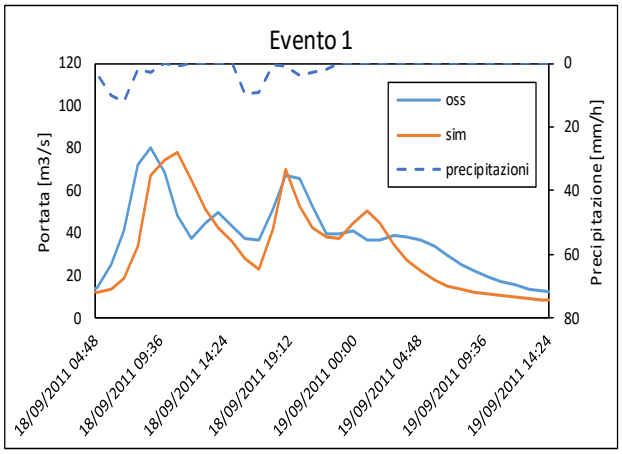
Milano Feltre

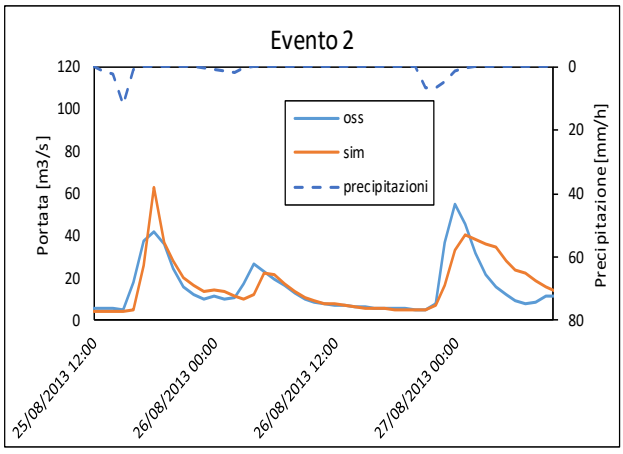
evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 15:53
2	25/08/2013 11:52	27/08/2013 10:52
3	07/07/2014 21:51	17/07/2014 00:51
4	25/07/2014 20:51	08/08/2014 05:51
5	15/05/2015 18:50	16/05/2015 18:50

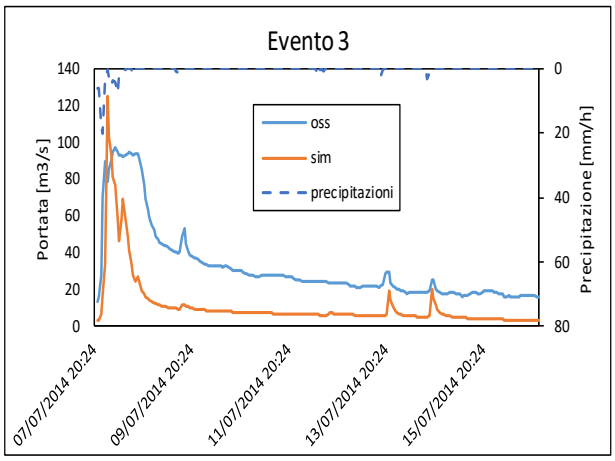
Tabella 3.26 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici.

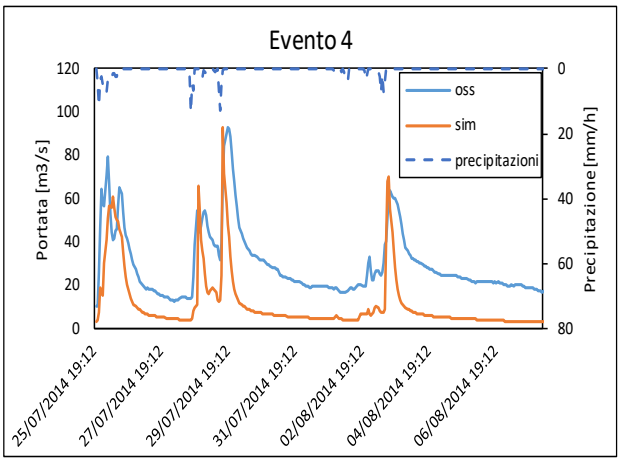
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.03	2	-0.13	13.08	0.51	0.03
2	0.15	1	0.07	8.45	0.51	0.15
3	0.28	-4	-0.65	24.61	0.31	0.28
4	0.00	-2	-0.62	20.81	0.25	0.00
5	0.02	-4	-0.24	22.83	-0.18	0.02

MEDIA	0.09	-1.40	-0.32	17.96	0.28	0.10









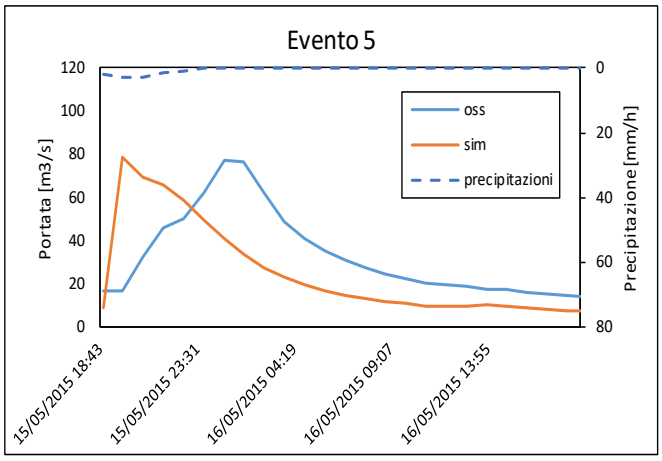


Figura 3.16 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

3.2 Philip

Dopo aver terminato la calibrazione e validazione con il metodo SCS-CN, il secondo step consiste nel valutare se utilizzando un altro modello, in questo caso quello di Philip, ci sia un miglioramento. Il nostro obiettivo infatti, è quello di cercare di ridurre l'incertezza del modello attraverso un'evoluzione della qualità dei parametri di input e del modulo d'infiltrazione implementato all'interno del modello idrologico. Philip rappresenta un altro metodo semplificato di stima del tasso di infiltrazione potenziale in funzione esclusivamente del tempo.

3.2.1 Analisi di sensitività

Mentre per il metodo del CN si era sfruttata l'analisi di sensitività già realizzata in una tesi precedente, in questo caso si è dovuti partire dall'inizio, prima di poter calibrare il modello. L'analisi è stata eseguita su 5 parametri: il contenuto saturo d'acqua, il contenuto residuo d'acqua, l'indice di distribuzione della dimensione dei pori, la profondità del suolo e infine la conduttività idraulica satura. Si è preferito utilizzare la stazione di Caslino come sezione di riferimento, in quanto forniva risultati più coerenti e sono stati scelti una decina di eventi tra il 2008 e il 2010 compresi. È stato scelto un periodo di pochi anni per velocizzare le simulazioni; non è casuale la volontà di inserire il 2010, in quanto è un anno caratterizzato da numerosi e consistenti eventi di precipitazione. Successivamente è stato modificato il file di configurazione iniziale del modello applicando uno scale factor su ciascun parametro selezionato. In questo modo, attraverso le diverse simulazioni, si è ricavato l'indice di sensitività e, conseguentemente, la classe di appartenenza. Gli unici parametri idraulici del suolo che hanno una classe di sensitività elevata sono il ksat e il contenuto d'acqua saturo (swc), entrambi di classe 3 su un massimo di 4. Questi due parametri specifici saranno importanti nel prossimo step, cioè nella fase di calibrazione.

3.2.2 Calibrazione di Philip

La calibrazione è stata eseguita mantenendo la stessa procedura ed organizzazione del modello precedente, di conseguenza sono stati presi in considerazione gli stessi eventi per ciascuna stazione, analizzati con il metodo CN. L'obiettivo è quello di applicare un nuovo modello idrologico, oltre a quello

tradizionale del SCS in modo da valutare se si possa ridurre l'incertezza e quindi gli errori di simulazione. A differenza dell'equazione del SCS, la ksat sia direttamente presente all'interno di quella di Philip. Infatti, nell'analisi di sensitività del primo modello, in cui solo il parametro CN era di classe di sensitività molto alta (classe 4), la ksat apparteneva semplicemente alla classe 2, quindi media. Eseguendo l'analisi di sensitività per il modello di Philip invece, il parametro di permeabilità è rientrato nella classe successiva, ovvero quella alta, come era lecito prevedere.

Per quanto riguarda la scelta degli eventi, si è preferito mantenere un campione omogeneo, cioè evitando di studiare eventi che non fossero presenti in entrambi i metodi, così da poter confrontare più facilmente i dati. Ci sono stati più casi in cui, un evento offriva dei buoni risultati con il metodo di Philip ma non con quello del CN, e viceversa; di conseguenza, si è deciso in alcuni casi di trascurarli. Inoltre, in aggiunta alle solite tabelle con gli indici stimati, ci sono altre due tabelle che rappresentano il confronto tra la media di tutti gli errori degli indici presenti e tra gli errori assoluti del picco di piena per ciascun evento. In questo modo, è possibile già avere un'idea iniziale e parziale su quale sia eventualmente il miglior metodo di simulazione.

Lozza

evento	inizio	fine
1	27/11/2003 09:59	29/11/2003 14:59
2	10/08/2004 23:58	11/08/2004 11:58
3	31/10/2004 23:58	03/11/2004 21:58
4	27/08/2005 13:58	27/08/2005 22:58
5	17/09/2005 05:58	17/09/2005 17:58
6	10/04/2006 10:57	12/04/2006 04:57
7	14/09/2006 21:57	16/09/2006 15:57
8	06/12/2006 07:57	10/12/2006 22:57

Tabella 3.27 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza.

Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore della permeabilità per 0.2 e il valore di Θ_s, rappresentante il saturated water content, per 0.5. Questo passaggio esprime ovviamente la prima differenza rispetto alla calibrazione avvenuta in precedenza, poiché non si utilizza più il parametro CN, bensì appunto il Θ_s. Solo la calibrazione di ksat aveva permesso un miglioramento della simulazione da una sottostima del 90% ad una del 15%, ma l'aggiunta del secondo parametro è stato utile per praticamente azzerarla. Dalla tabella riportata qui sotto si può notare come i risultati siano piuttosto buoni, eccetto l'evento numero 4 che, oltre che sovrastimare enormemente la portata massima, si discosta particolarmente dall'andamento delle osservate, come si può intuire dagli indici RMSE e NS. Si può comunque accettare che uno o due eventi siano poco coerenti con il resto, a patto che la media finale risulti positiva e confortante.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.03	0	-0.72	10.08	0.42	0.03
2	0.56	0	0.49	8.37	0.44	0.56
3	-0.22	-1	-0.86	10.75	0.23	0.22
4	1.50	-2	0.74	21.67	-4.92	1.50
5	-0.24	0	-0.10	3.30	0.81	0.24
6	-0.51	-1	-0.85	6.80	0.27	0.51
7	-0.02	-1	-0.39	4.26	0.47	0.02
8	-0.79	-1	-0.93	9.49	0.15	0.79
MEDIA	0.03	-0.75	-0.33	9.34	-0.27	0.48

Tabella 3.28 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza.

Oltre all'evento numero 4, anche l'evento numero 8 presenta particolari problemi in quanto mostra delle forti sottostime. Nonostante questo, è giusto evidenziare come, confrontando la media degli indici stimati con i due metodi, non ci siano grosse differenze, come da suggerire che la scelta di un metodo o l'altro per la simulazione delle portate sia irrilevante.

PH	0.03	-0.75	-0.33	9.34	-0.27	0.48
CN	0.05	-0.50	-0.39	7.23	0.15	0.50

PH	CN
0.03	0.52
0.56	0.47
0.22	0.26
1.50	0.29
0.24	0.79
0.51	0.33
0.02	1.13
0.79	0.20
0.48	0.50

Tabella 3.29 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lozza.

Comparando l'errore assoluto sul picco, si può notare che insieme all'evento 4 e 8, già citati in precedenza, anche il 5 e il 7 sono rilevanti, ma questa volta per il metodo del CN. Questi ultimi due eventi risultano essere però molto buoni dalla calibrazione con Philip, come a confermare quanto detto all'inizio del capitolo, ovvero che ci possono essere eventi soddisfacenti ottenuti con un metodo e non con l'altro.

Si riportano i grafici con il risultato finale della simulazione per ogni singolo evento: in azzurro ci sono le stesse portate osservate, mentre in arancione le nuove portate simulate con il secondo modello idrologico.

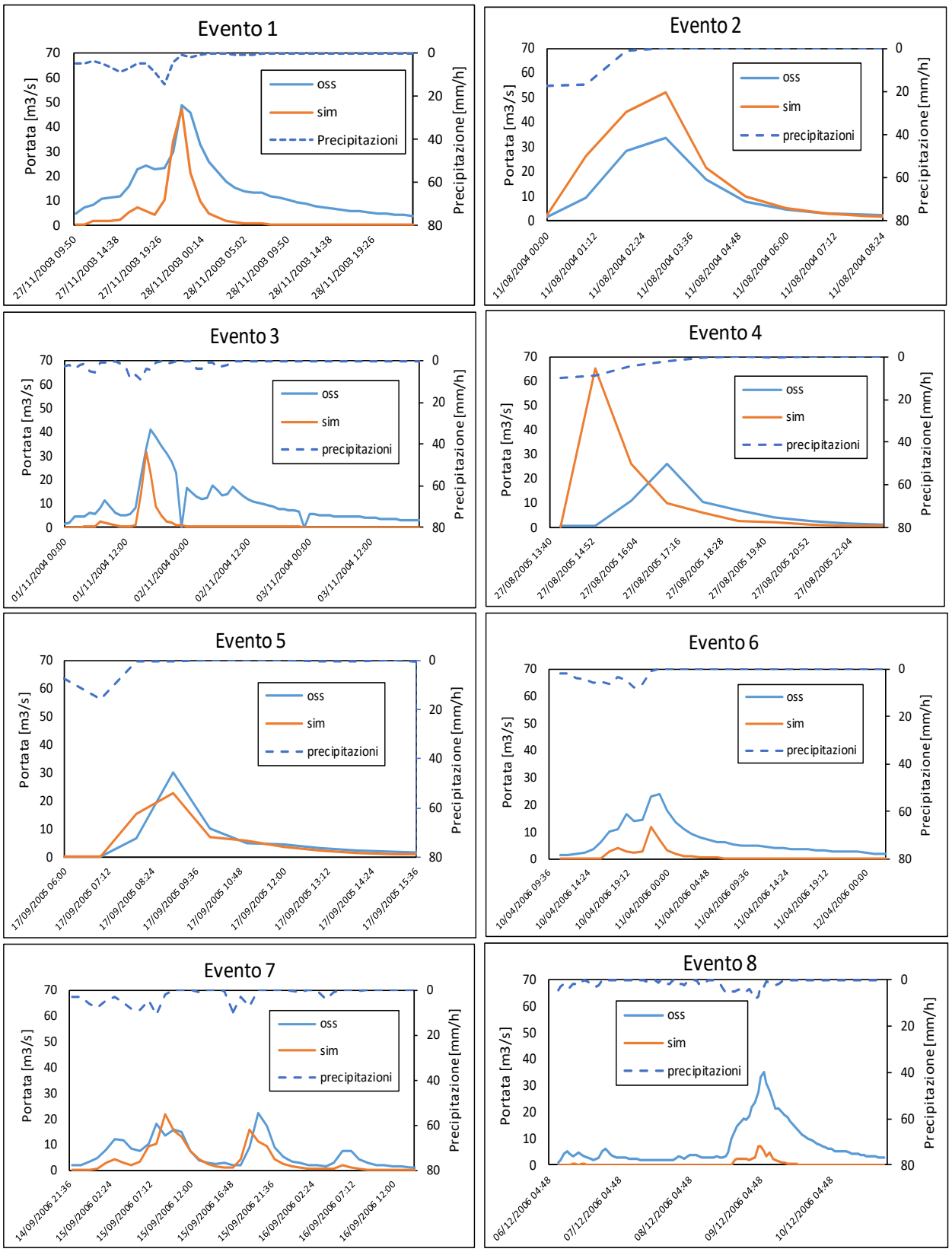


Figura 3.17 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Castellanza

evento	inizio	fine
1	23/11/2003 18:59	03/12/2003 04:59
2	18/04/2004 13:59	20/04/2004 21:59
3	29/04/2004 16:59	10/05/2004 11:59
4	10/08/2004 18:58	11/08/2004 12:58
5	31/10/2004 21:58	03/11/2004 05:58
6	10/04/2006 11:57	11/04/2006 14:57
7	14/09/2006 16:57	16/09/2006 11:57
8	08/12/2006 14:57	10/12/2006 10:57
9	28/05/2007 06:56	29/05/2007 02:56

Tabella 3.30 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza.

La calibrazione di Lozza è stata vantaggiosa anche per Castellanza, in quanto l'errore sul picco iniziale da cui si partiva era solamente un -38%, terminato poi con una leggera sovrastima, dopo aver moltiplicato per 0.01 ksat, per 0.2 Θ_s e kprof per 20000. Il parametro Θ_s è stato utilizzato poco ed esclusivamente per il bacino dell'Olona, poiché per le stazioni successive si è preferito sfruttare altri parametri, come quello relativo alla profondità e al deflusso sub superficiale.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.04	-1	-0.37	6.09	0.73	0.04
2	-0.06	1	-0.51	7.38	0.57	0.06
3	-0.41	-6	-0.66	17.95	0.29	0.41
4	1.07	-2	0.38	15.57	-0.30	1.07
5	-0.01	0	-0.34	8.75	0.50	0.01
6	-0.14	-5	-0.36	6.41	0.65	0.14
7	0.53	5	0.45	8.58	0.21	0.53
8	-0.10	-3	-0.31	8.67	0.6	0.10
9	-0.12	1	-0.14	7.19	0.51	0.12
MEDIA	0.08	-1.11	-0.21	9.62	0.42	0.27

Tabella 3.31 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza.

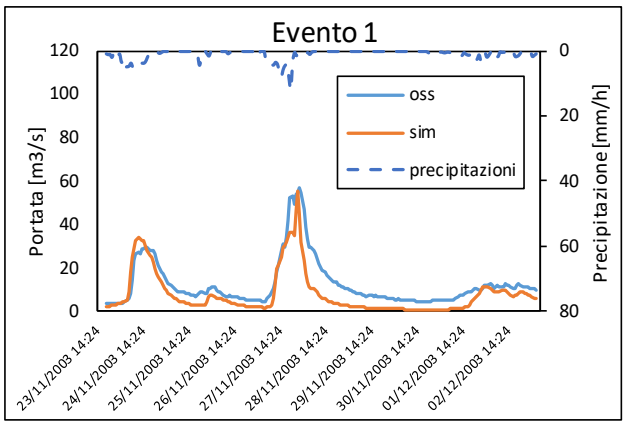
La media di tutti gli indici stimati sembra essere buona, sia in termini relativi che assoluti, anche se ci sono un paio di eventi con sovrastime piuttosto abbondanti. Queste però sono ben compensate dal resto degli eventi, che sono tutte e 7 sottostime.
Confrontando i due metodi si possono aggiungere un paio di commenti: per quanto riguarda l'errore relativo sul picco e i tempi di propagazione, la situazione è piuttosto simile, mentre per gli altri 3 indici il modello di Philip sembra dare risultati migliori.

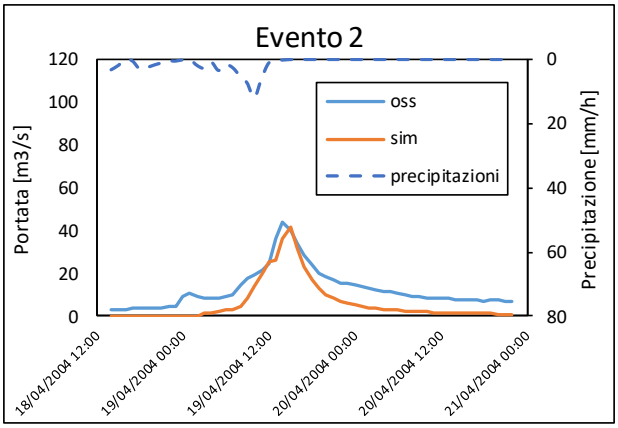
PH	0.08	-1.11	-0.21	9.62	0.42	0.27
CN	-0.10	-0.89	-0.62	13.15	0.13	0.34

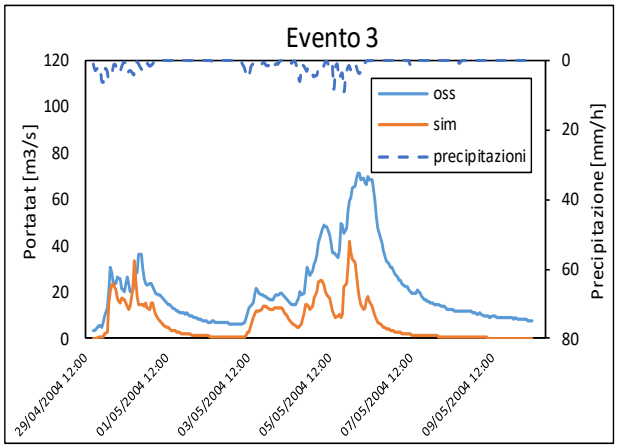
PH	CN
0.04	0.28
0.06	0.25
0.41	0.38
1.07	0.42
0.01	0.31
0.14	0.03
0.53	0.77
0.10	0.06
0.12	0.53
0.27	0.34

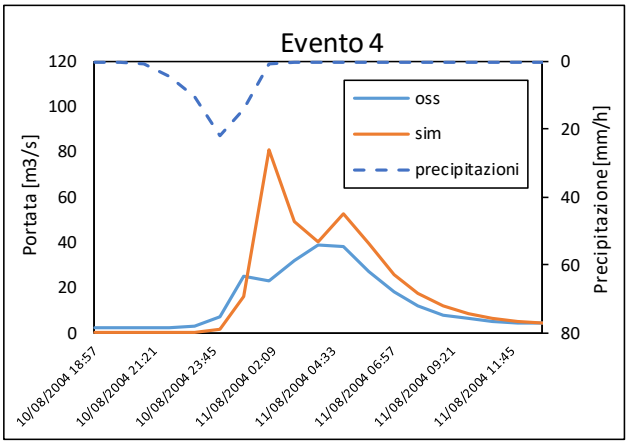
Tabella 3.32 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Castellanza.

Anche l'errore assoluto risulta essere minore con il secondo modello idrologico. Questo non significa che un metodo sia migliore dell'altro perché ovviamente ogni stazione si comporta in modo indipendente; ci saranno casi in cui sarà il metodo del CN a dare esiti più confortanti. La cosa più importante è, che entrambi i metodi siano efficaci ed utili per la simulazione delle portate per il bacino del fiume Olona.









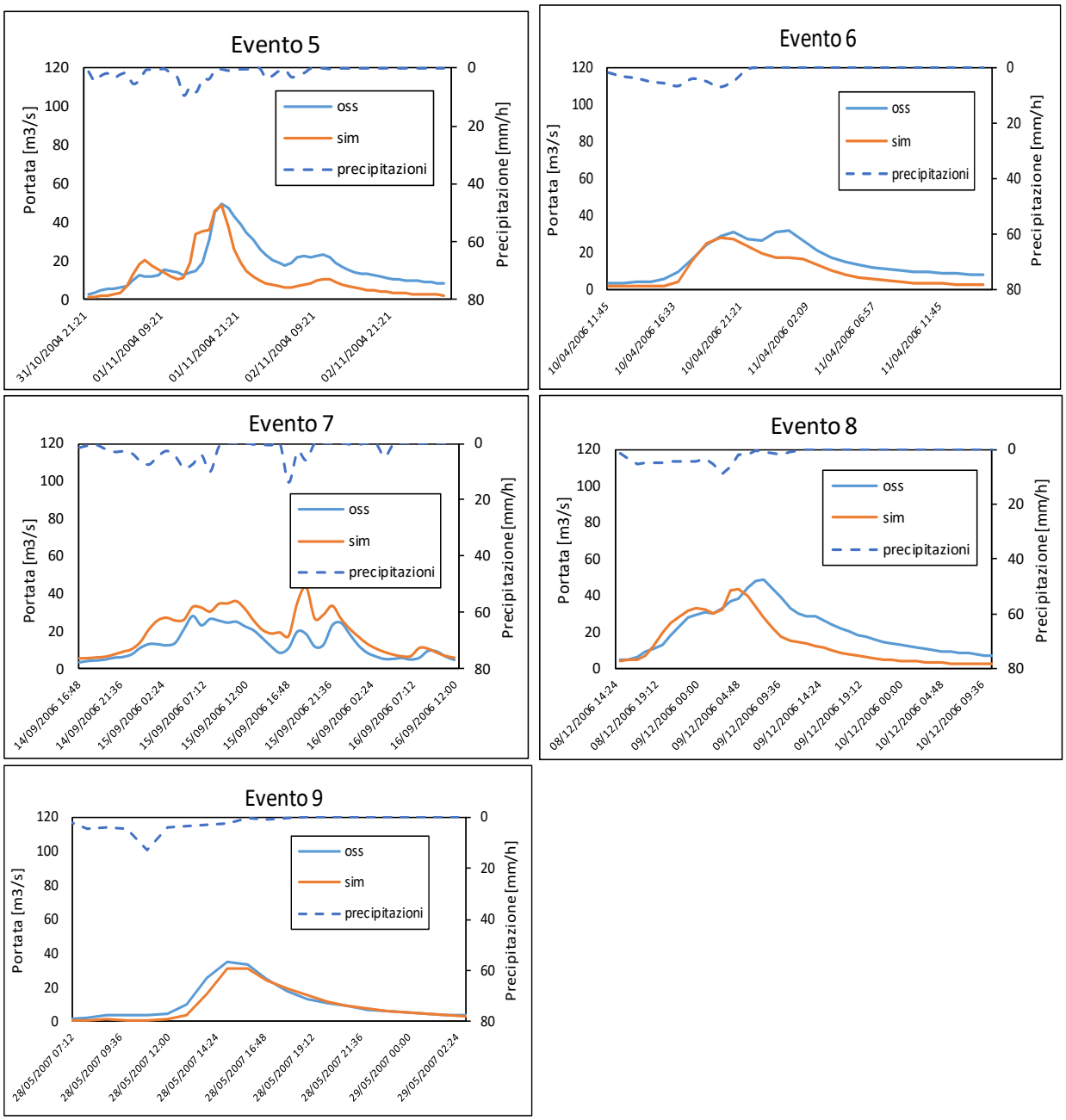


Figura 3.18 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Cantù

Cantù, rispecchia quanto detto precedentemente durante l'analisi con il metodo del CN, infatti è stata sicuramente una delle stazioni idrometriche che ha richiesto più attenzione nel suo studio. È stato difficile omogeneizzare il campione con gli eventi di piena del primo modello, a causa di molti problemi di simulazione e possibili outliers.

evento	inizio	fine
1	09/09/2005 11:58	10/09/2005 03:58
2	02/10/2005 09:57	03/10/2005 00:57
3	17/05/2008 21:56	18/05/2008 08:56
4	10/05/2010 19:54	15/05/2010 03:54
5	11/08/2010 22:54	12/08/2010 07:54
6	18/09/2010 06:54	18/09/2010 16:54
7	31/10/2010 09:54	02/11/2010 10:54
8	15/11/2010 09:54	17/11/2010 08:54

Tabella 3.33 Eventi presi in esame per calibrazione della stazione di Cantù.

Ksat è stato moltiplicata per 0.1, kprof per 5000, in modo da ottenere una buona approssimazione. Di solito, nelle altre situazioni è stato necessario moltiplicare il valore della permeabilità fino a 0.01, mentre qui è bastato un ordine di grandezza inferiore. Si è passati da una sottostima del 90% circa ad una sovrastima del 12%.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.27	0	-0.25	7.75	-1.13	1.27
2	0.20	0	-0.39	3.68	0.32	0.20
3	0.14	0	-0.44	4.37	0.29	0.14
4	-0.22	0	-0.73	11.19	0.13	0.22
5	0.24	0	-0.24	3.01	0.59	0.24
6	0.43	0	-0.19	3.94	0.63	0.43
7	-0.47	-1	-0.65	8.84	0.25	0.47
8	-0.60	-1	-0.77	10.18	0.15	0.60
MEDIA	0.12	-0.25	-0.46	6.62	0.15	0.45

Tabella 3.34 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù.

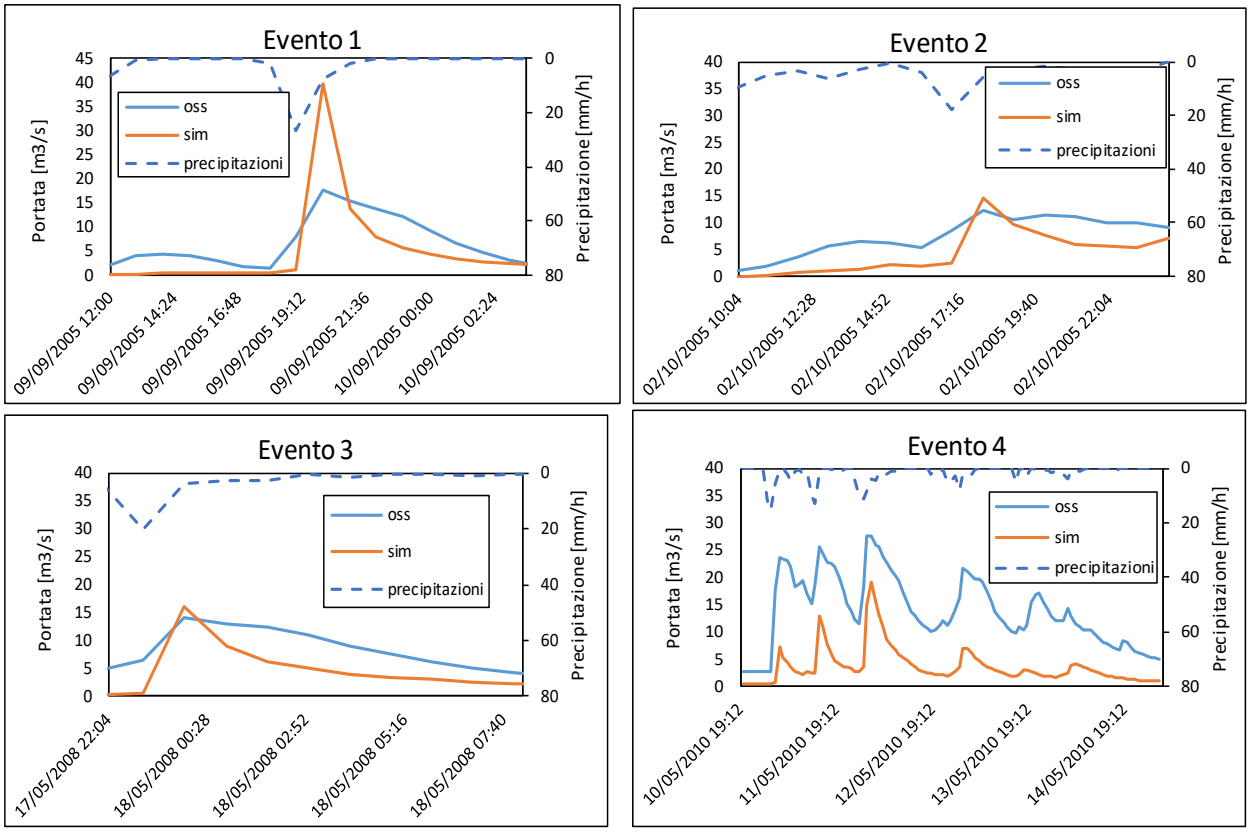
Tutti gli indici sono piuttosto soddisfacenti, eccetto l'errore assoluto che, a causa di alcuni eventi che presentano elevate sovrastime (vedi evento 1) o sottostime (vedi evento 7 e 8), risulta essere un po' alto. Nonostante questo, i risultati non sembrano essere molto differenti da quelli conseguiti con il CN.

PH	0.12	-0.25	-0.46	6.62	0.15	0.45
CN	0.07	-0.25	-0.57	7.21	0.16	0.36

PH	CN
1.27	0.47
0.20	0.55
0.14	0.00
0.22	0.35
0.24	0.37
0.43	0.31
0.47	0.28
0.60	0.52
0.45	0.36

Tabella 3.35 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Cantù.

Rispetto alle stazioni dell'Olona, qui risulta ancora più evidente come l'errore assoluto per ogni singolo evento, sia ben diverso tra un metodo e l'altro. È sicuramente un fatto da non trascurare e nemmeno da considerare per forza negativo, in quanto potrà risultare utile durante la modellazione combinata di tutti i metodi disponibili.



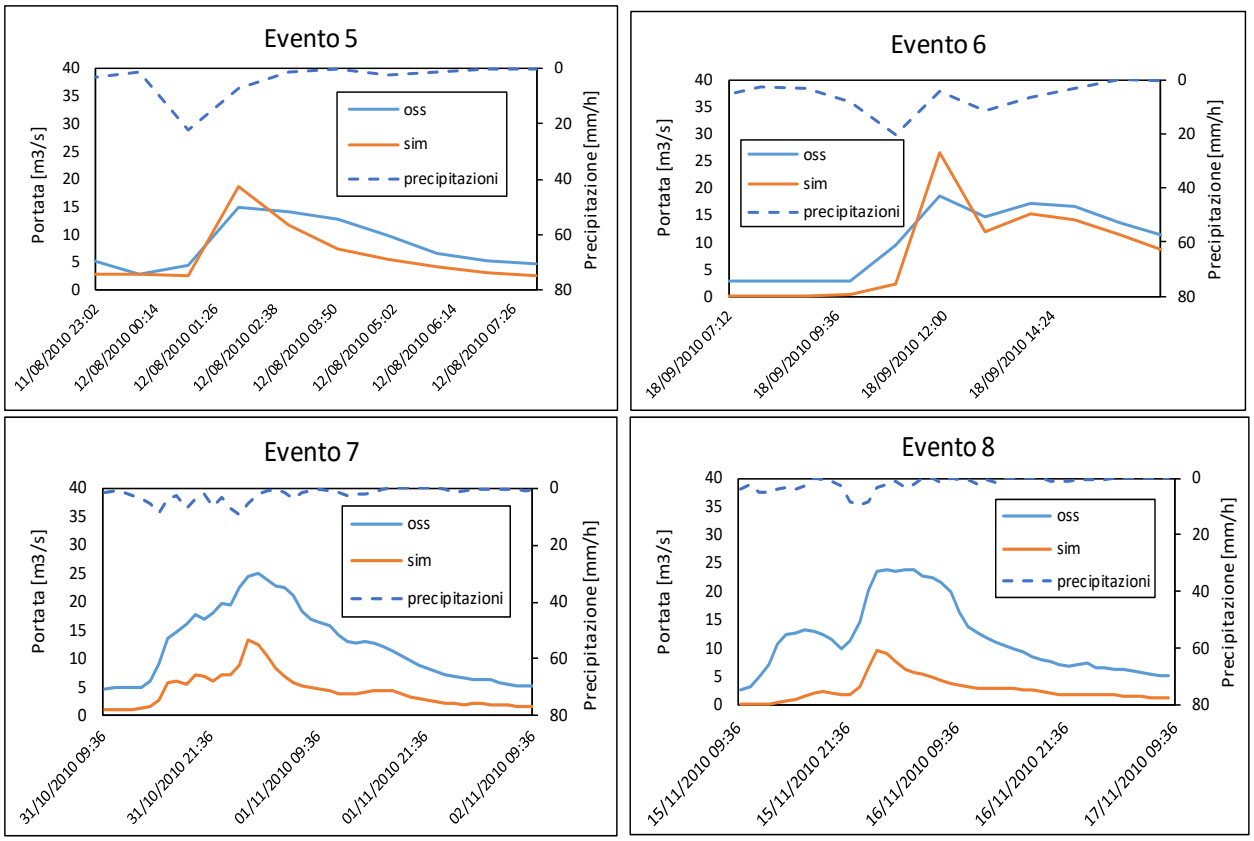


Figura 3.19 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Palazzolo

evento	inizio	fine
1	07/07/2014 20:51	09/07/2014 19:51
2	25/07/2014 22:51	27/07/2014 00:51
3	03/08/2014 08:51	04/08/2014 18:51
4	20/08/2014 18:51	21/08/2014 04:51
5	04/11/2014 17:51	07/11/2014 06:51
6	10/11/2014 08:51	18/11/2014 20:51
7	15/02/2015 04:51	16/02/2015 03:51
8	15/05/2015 16:50	16/05/2015 08:50
9	14/06/2015 11:50	15/06/2015 01:50

Tabella 3.36 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo.

La calibrazione di Palazzolo, memore di ciò che era stato fatto con il primo metodo, è avvenuta con un unico processo dove sono stati modificati i parametri idrologici con gli stessi ordini di grandezza, eccetto ovviamente quello del CN che non rientra più nell'equazione di Philip. Di conseguenza si è moltiplicato per 0.01 ksat, per 20000 kprof e per 0.1 prof, ottenendo così un errore relativo di -7% rispetto ad un -90% iniziale. Tranne tre eventi, il numero 1,9 e soprattutto l'8, in cui si hanno sovrastime, gli altre 6 eventi sottostimano le osservate. Inoltre, come succedeva per il metodo SCS, la simulazione tende ad anticipare il picco della piena, nello stesso identico modo.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.15	-3	-0.49	31.57	0.53	0.15
2	-0.30	-2	-0.23	9.95	0.67	0.30
3	-0.42	-3	-0.59	16.08	0.56	0.42
4	-0.51	-1	-0.51	10.52	0.60	0.51
5	-0.16	-1	-0.31	11.09	0.51	0.16
6	-0.34	-2	-0.58	24.82	0.48	0.34
7	-0.22	0	-0.31	6.43	0.69	0.22
8	1.00	-1	0.00	12.06	0.20	1.00
9	0.15	-2	-0.08	6.94	0.70	0.15
MEDIA	-0.07	-1.67	-0.34	14.39	0.55	0.36

Tabella 3.37 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo.

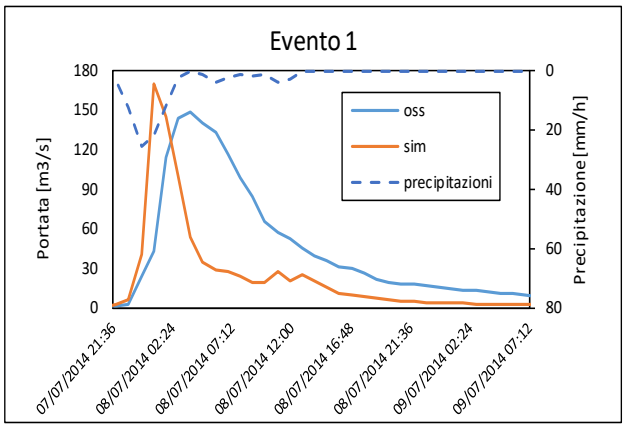
Per il resto, gli altri indici sembrano dare buone risposte e anche confrontando i risultati con il CN, non ci sono differenze significative.

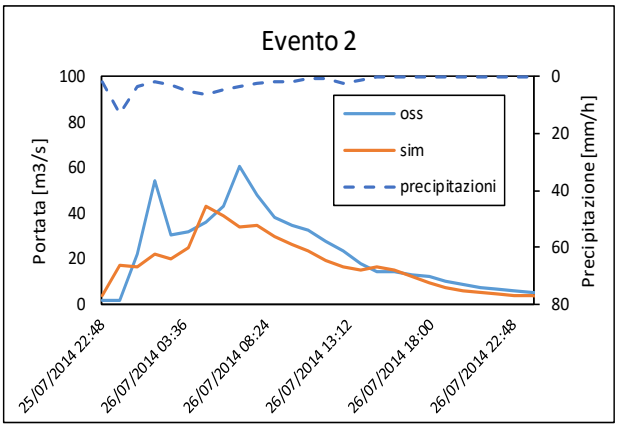
PH	-0.07	-1.67	-0.34	14.39	0.55	0.36
CN	-0.04	-1.67	-0.32	13.85	0.56	0.35

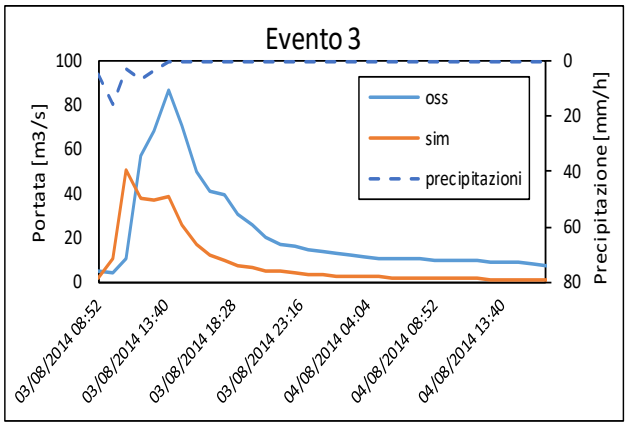
PH	CN
0.15	0.19
0.30	0.31
0.42	0.42
0.51	0.47
0.16	0.15
0.34	0.22
0.22	0.18
1.00	1.03
0.15	0.17
0.36	0.35

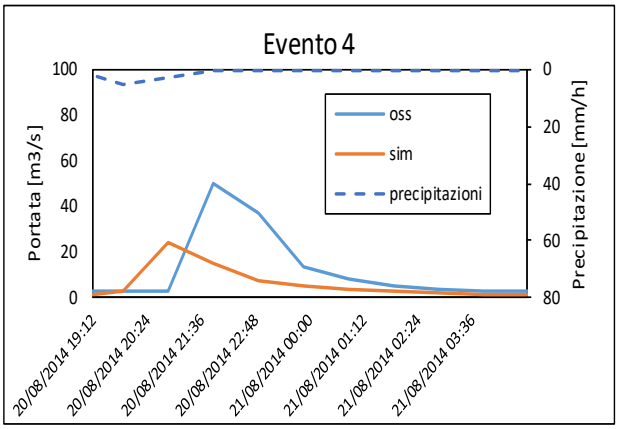
Tabella 3.38 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Palazzolo.

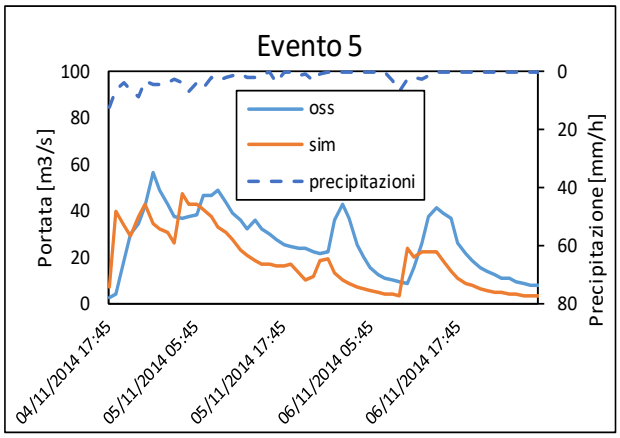
Un'ulteriore nota positiva è data da tabella soprastante, poiché la media dell'errore assoluto non è molto diversa e soffermandosi su ogni singolo evento, si evidenza come tutti gli eventi, eccetto una leggera discrepanza per il numero 6, sono molto simili nei due casi. Si può concludere che, tranne per alcuni dubbi che ci possono essere sulla stazione di Cantù, le simulazioni con il modello idrologico di Philip sembrano dare risposte positive anche sul bacino del fiume Seveso.

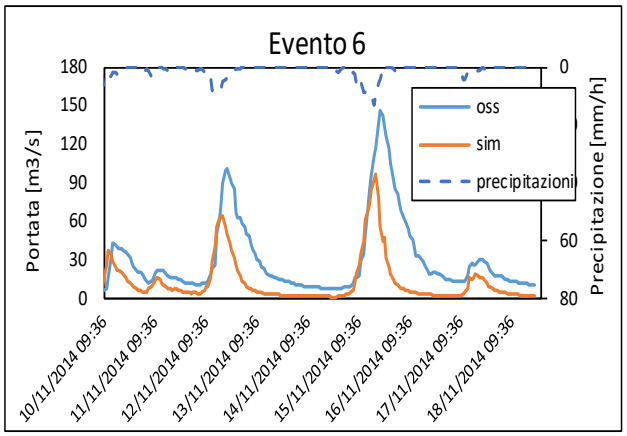

Evento 1
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
180
150
120
90
60
30
0
0
20
40
60
80
07/07/2014 21:36
08/07/2014 02:24
08/07/2014 07:12
08/07/2014 12:00
08/07/2014 16:48
08/07/2014 21:36
09/07/2014 02:24
09/07/2014 07:12

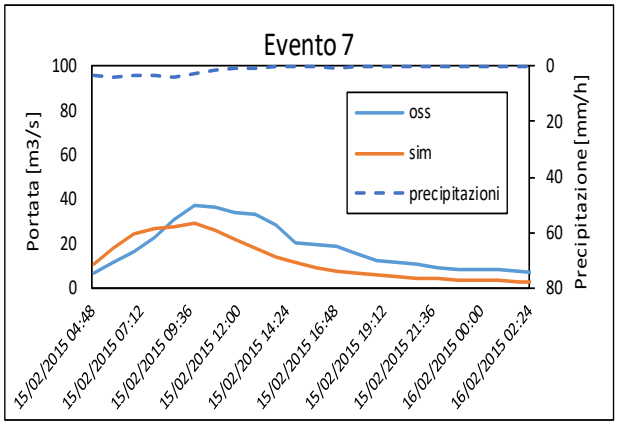

Evento 2
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
25/07/2014 22:48
26/07/2014 03:36
26/07/2014 08:24
26/07/2014 13:12
26/07/2014 18:00
26/07/2014 22:48

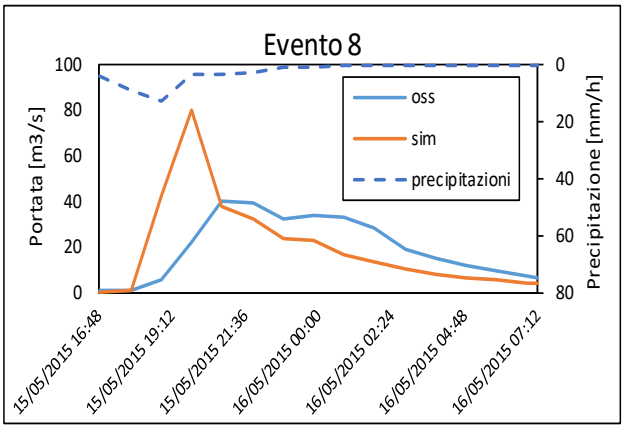

Evento 3
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
03/08/2014 08:52
03/08/2014 13:40
03/08/2014 18:28
03/08/2014 23:16
04/08/2014 04:04
04/08/2014 08:52
04/08/2014 13:40


Evento 4
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
20/08/2014 19:12
20/08/2014 20:24
20/08/2014 21:36
20/08/2014 22:48
21/08/2014 00:00
21/08/2014 01:12
21/08/2014 02:24
21/08/2014 03:36


Evento 5
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
04/11/2014 17:45
05/11/2014 05:45
05/11/2014 17:45
06/11/2014 05:45
06/11/2014 17:45


Evento 6
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
180
150
120
90
60
30
0
0
60
80
10/11/2014 09:36
11/11/2014 09:36
12/11/2014 09:36
13/11/2014 09:36
14/11/2014 09:36
15/11/2014 09:36
16/11/2014 09:36
17/11/2014 09:36
18/11/2014 09:36


Evento 7
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
15/02/2015 04:48
15/02/2015 07:12
15/02/2015 09:36
15/02/2015 12:00
15/02/2015 14:24
15/02/2015 16:48
15/02/2015 19:12
15/02/2015 21:36
16/02/2015 00:00
16/02/2015 02:24


Evento 8
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
15/05/2015 16:48
15/05/2015 19:12
15/05/2015 21:36
16/05/2015 00:00
16/05/2015 02:24
16/05/2015 04:48
16/05/2015 07:12

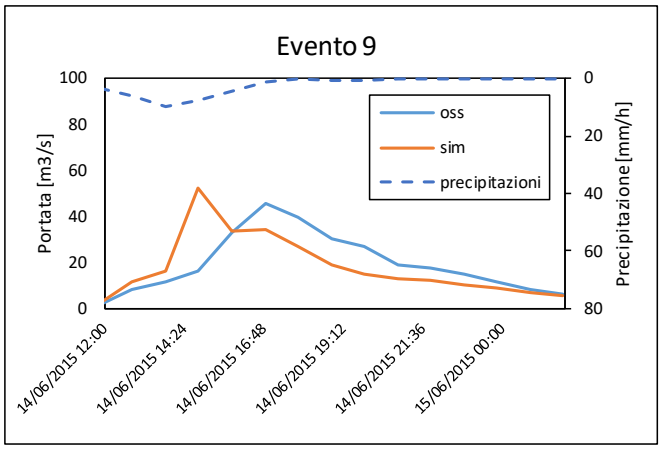


Figura 3.20 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

Caslino

evento	inizio	fine
1	01/11/2004 13:58	02/11/2004 22:58
2	08/12/2006 19:57	10/12/2006 04:57
3	11/04/2008 09:56	13/04/2008 02:56
4	06/02/2009 04:55	08/02/2009 18:55
5	27/04/2009 18:55	30/04/2009 03:55
6	17/07/2009 03:55	18/07/2009 12:55
7	11/05/2010 02:54	14/05/2010 02:54
8	31/10/2010 14:54	02/11/2010 07:54

Tabella 3.39 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino.

La calibrazione di Caslino è stata positiva e soprattutto rapida, poiché già la simulazione iniziale mostrava un errore relativo sul picco molto basso, -6%; si è comunque deciso di intervenire modificando un solo parametro, cioè kprof, in modo da ridurre ancora ulteriormente l'incertezza. È l'unica stazione idrometrica del Lambro in cui è stato sufficiente agire solo su un parametro; la situazione era simile anche con il primo metodo in cui sono stati calibrati esclusivamente la metà dei parametri. La situazione è ben diversa per le altre 3 sezioni, in quanto è stato necessario utilizzare quasi tutti quelli che si avevano a disposizione. Tutto ciò è dovuto probabilmente al fatto che, come già detto più volte, Caslino si trovi geograficamente più a monte rispetti al lago di Pusiano, di conseguenza non risente della sua presenza.

Tabella 3.40 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.82	-3	-0.56	13.23	-0.98	0.82
2	-0.10	-2	-0.66	14.67	-0.15	0.10
3	0.07	-3	-0.69	21.93	-0.30	0.07
4	-0.33	-3	-0.63	18.45	0.00	0.33
5	-0.38	-2	-0.77	20.67	0.01	0.38
6	0.20	-1	-0.44	41.62	-1.73	0.20
7	0.29	-4	-0.75	19.10	-0.27	0.29
8	-0.34	-5	-0.63	24.56	-0.21	0.34

MEDIA	0.03	-2.88	-0.64	21.78	-0.45	0.32

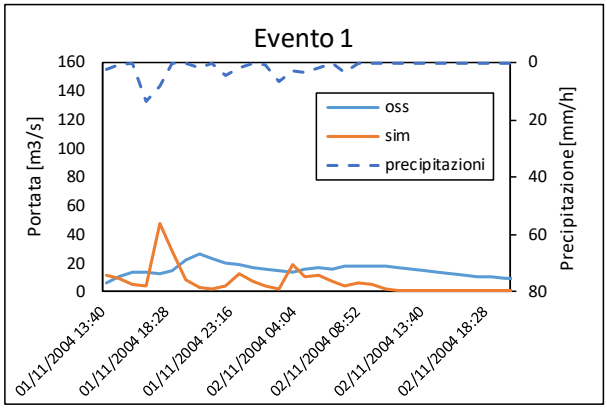
La media dell'errore relativo e assoluto sul picco risultano essere molto buoni, il numero di eventi che sottostimano e sovrastimano le osservate si bilanciano fra di loro; però l'indice RMSE e NS sono un po' meno accettabili rispetto al solito, forse perché l'andamento delle portate simulate è più dinamica e improvvisa rispetto a quella delle osservate. In realtà, esaminando la tabellina di confronto sottostante, si nota come la situazione fosse identica anche con il modello idrologico precedente. Tutti e 5 gli indici stimati sono praticamente identici.

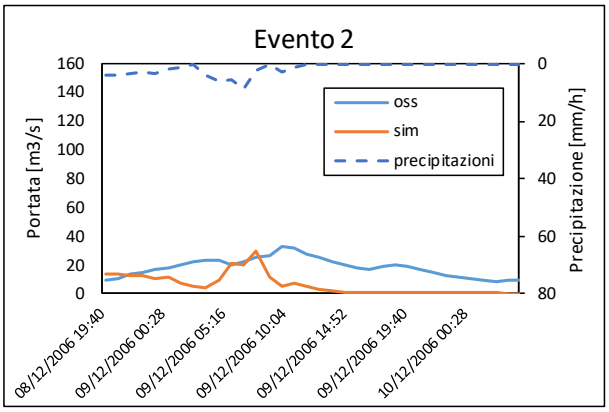
PH	0.03	-2.88	-0.64	21.78	-0.45	0.32
CN	0.06	-2.88	-0.66	21.28	-0.34	0.24

PH	CN
0.82	0.92
0.10	0.14
0.07	0.10
0.33	0.22
0.38	0.21
0.20	0.12
0.29	0.09
0.34	0.08
0.32	0.24

Tabella 3.41 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Caslino.

La media dell'errore assoluto è un po' più alta rispetto al caso precedente ma comunque offre dei risultati positivi. Solo alcuni eventi presentano un valore più alto rispetto al metodo CN. Se invece si volesse confrontare i grafici ottenuti con il metodo di Philip con quelli precedente, si noterebbe come l'andamento di tutti gli eventi è praticamente identico. L'unica eccezione è il numero 6, caratterizzato da abbondanti precipitazioni, che mentre prima sottostimava la portata massima, qui si comporta al contrario.





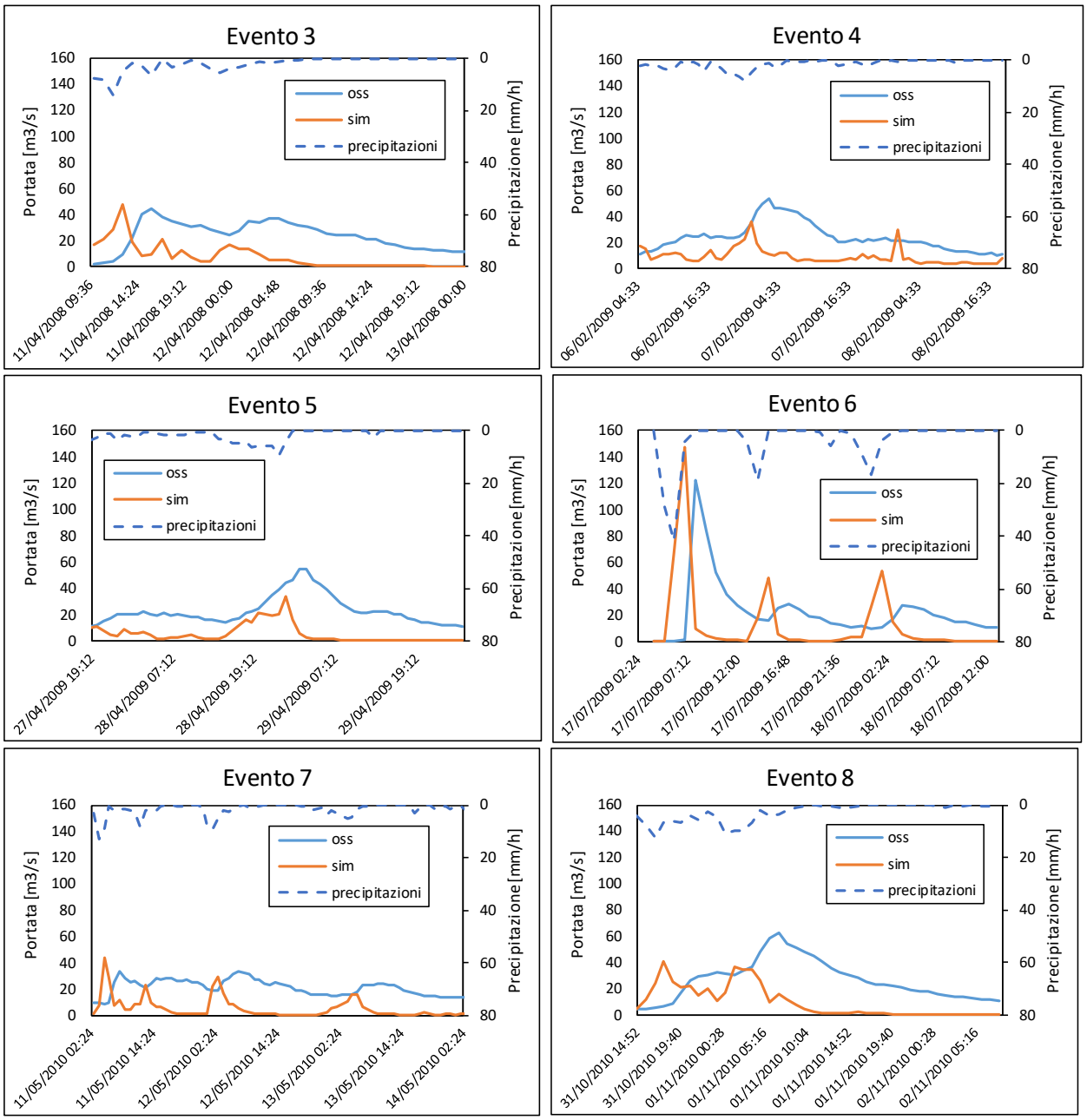


Figura 3.21 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

evento	inizio	fine
1	24/11/2003 10:59	08/12/2003 05:59
2	28/04/2004 03:59	20/05/2004 03:58
3	05/08/2004 03:58	05/08/2004 20:58
4	07/12/2006 20:57	20/12/2006 10:57
5	06/06/2007 11:56	20/06/2007 12:56
6	02/02/2009 12:55	16/02/2009 09:55
7	26/04/2009 12:55	08/05/2009 06:55
8	02/05/2010 20:54	22/05/2010 01:54
9	14/08/2010 15:54	21/08/2010 18:54

Tabella 3.42 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo.

Il procedimento qui utilizzato è il medesimo rispetto a prima e anche i risultati sono più o meno gli stessi. Il risultato finale è stato ottenuto moltiplicando il valore della permeabilità per 0.02 e modificando kprof e prof (si ricorda che Θ_s è stato calibrato solo per il bacino dell'Olona). L'errore relativo iniziale era circa -80%.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.03	0	-0.57	8.44	0.02	0.03
2	-0.34	-3	-0.71	14.51	0.09	0.34
3	1.05	0	0.07	10.18	0.11	1.05
4	-0.12	-3	-0.50	7.12	0.17	0.12
5	0.14	0	-0.55	7.03	0.09	0.14
6	-0.02	0	-0.43	9.20	0.27	0.02
7	0.03	-4	-0.53	11.41	0.13	0.03
8	-0.01	-1	-0.57	13.74	0.09	0.01
9	1.13	-2	-0.36	9.94	0.07	1.13
MEDIA	0.20	-1.44	-0.46	10.17	0.12	0.32

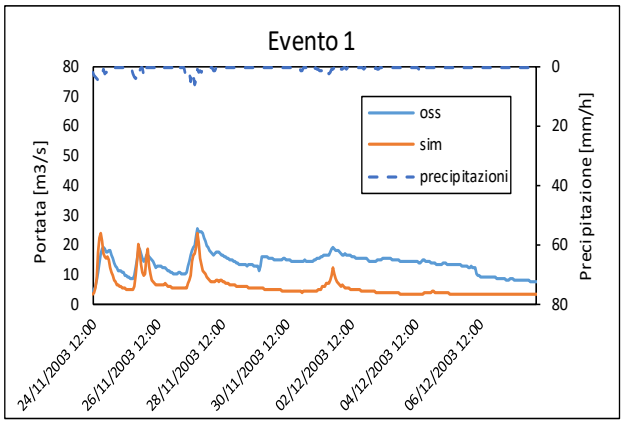
Tabella 3.43 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo.

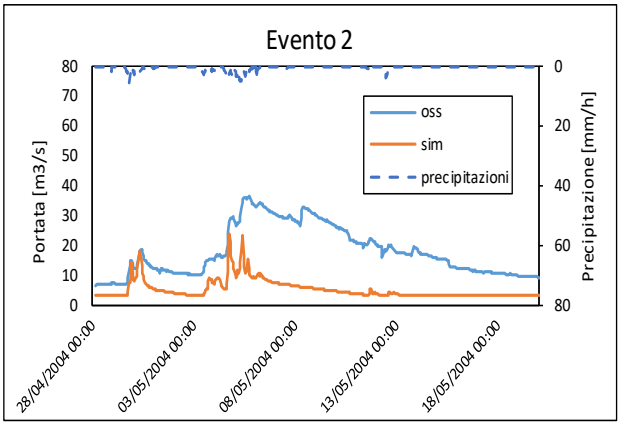
Si è passati da una forte sottostima ad una leggera, ma comunque evidente sovrastima, che però ha permesso di ridurre sempre di più l'errore medio assoluto sul picco di piena. Per il resto, tutti gli altri indici risultano molto simili fra loro, se non identici.

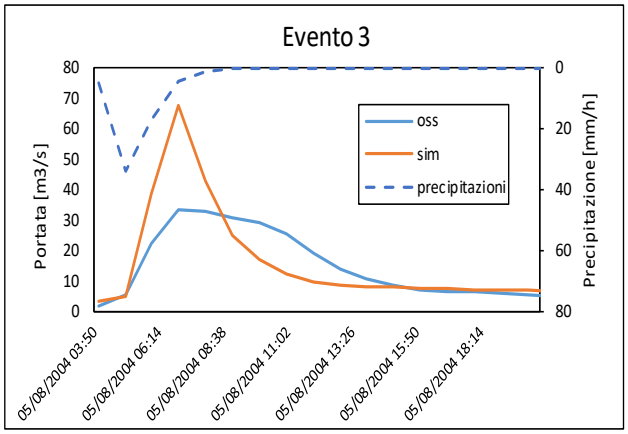
PH	0.20	-1.44	-0.46	10.17	0.12	0.32
CN	0.07	-1.44	-0.53	10.89	0.12	0.35

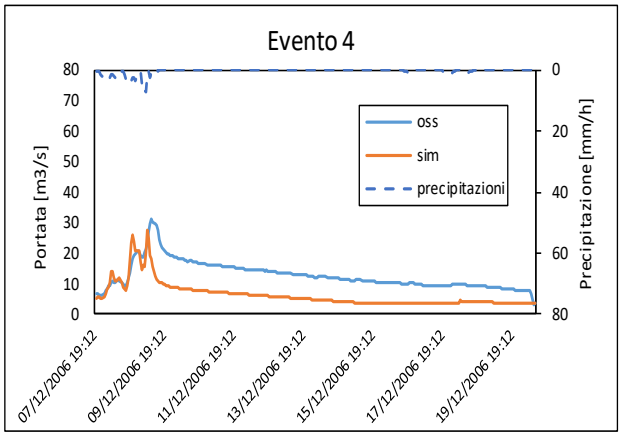
PH	CN
0.03	0.14
0.34	0.41
1.05	0.92
0.12	0.28
0.14	0.02
0.02	0.16
0.03	0.13
0.01	0.13
1.13	0.97
0.32	0.35

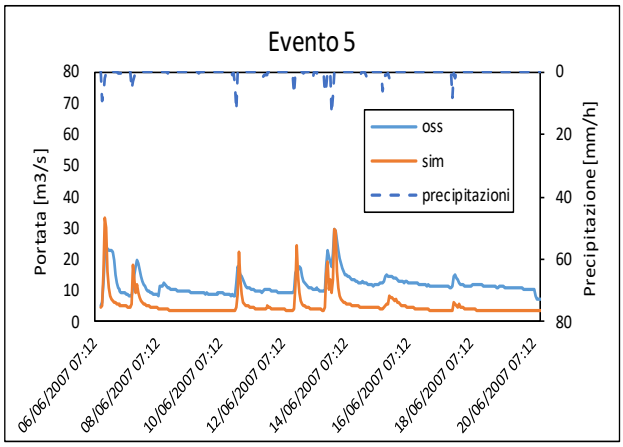
Tabella 3.44 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lambrugo.

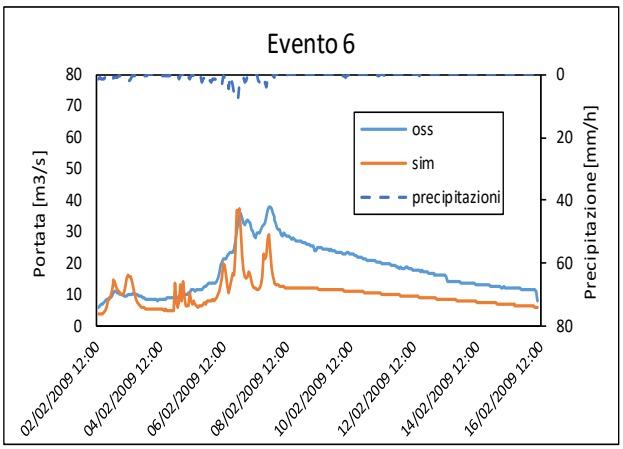












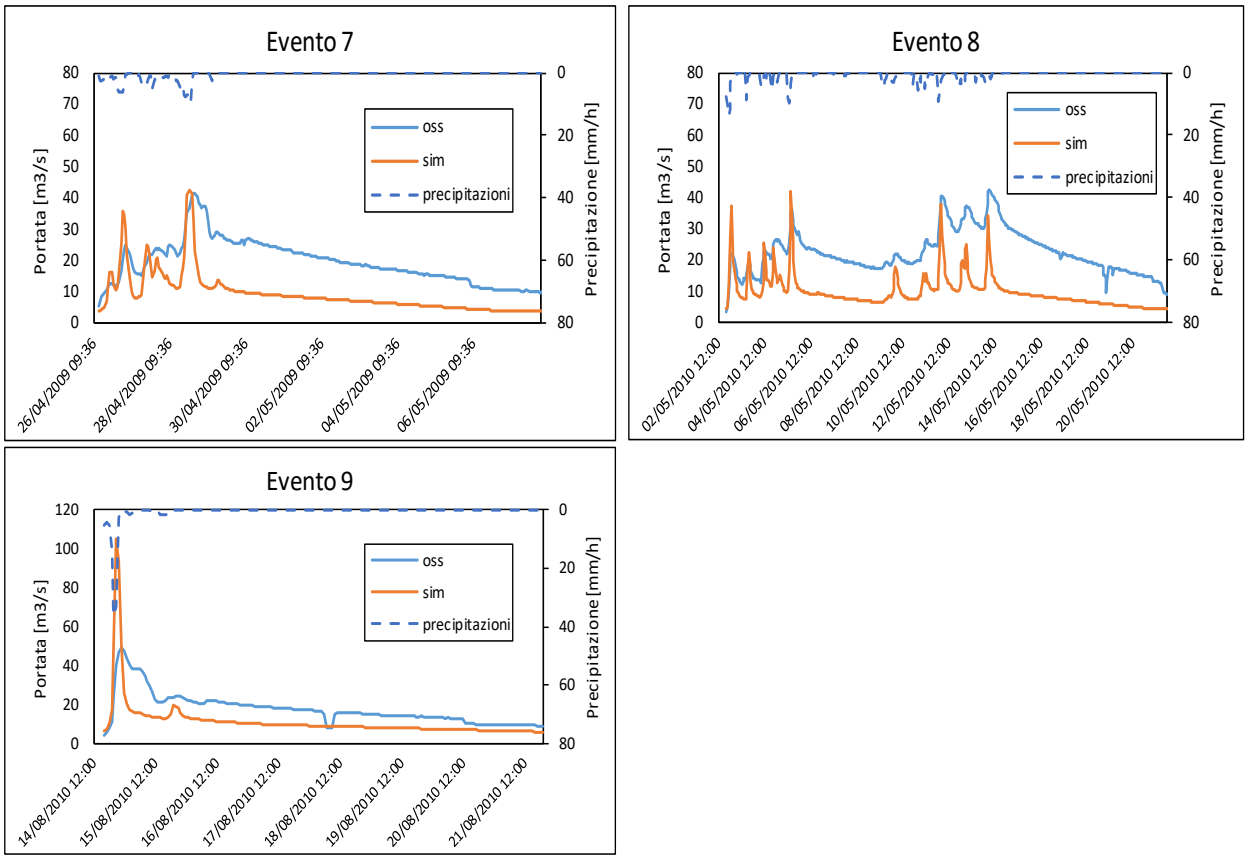


Figura 3.22 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

Peregallo

evento	inizio	fine
1	04/05/2004 14:59	10/05/2004 00:59
2	02/10/2005 12:57	03/10/2005 04:57
3	13/06/2007 15:56	16/06/2007 05:56
4	01/07/2008 01:55	01/07/2008 12:55
5	02/11/2008 23:55	15/11/2008 02:55
6	26/04/2009 16:55	06/05/2009 10:55
7	02/05/2010 21:54	21/05/2010 23:54
8	14/08/2010 14:54	21/08/2010 06:54
9	31/10/2010 11:54	27/11/2010 03:54
10	21/12/2010 23:54	31/12/2010 22:54

Tabella 3.45 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo.

Per queste ultime due stazioni si possono fare gli stessi commenti, poiché i parametri sono stati calibrati sempre nello stesso modo, dando più o meno risultati simili a quelli precedenti. L'errore relativo ed assoluto quasi coincidono, l'errore sul tempo di propagazione mantiene la stessa inclinazione fin qui mostrata, ovvero tende sempre ad anticipare l'arrivo delle portate massime di piena.
L'errore relativo iniziale sul picco era circa del 60%.

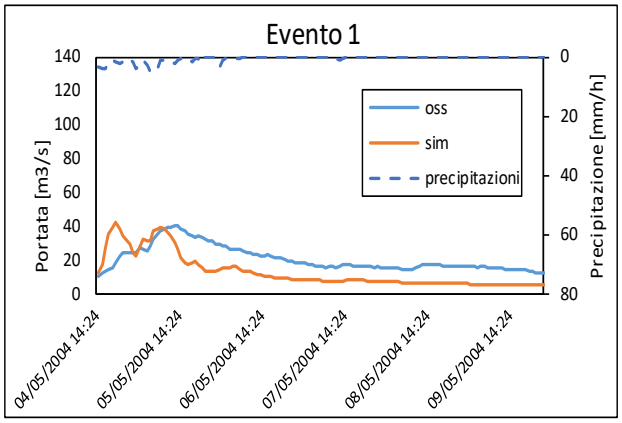
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.06	-4	-0.38	10.40	0.05	0.06
2	0.96	0	0.35	13.63	0.19	0.96
3	-0.05	-3	-0.39	8.38	0.48	0.05
4	0.11	0	0.47	12.54	0.01	0.11
5	0.02	-1	-0.32	10.02	0.48	0.02
6	-0.29	-1	-0.51	22.10	0.35	0.29
7	-0.15	-4	-0.60	23.97	0.16	0.15
8	0.45	-5	-0.52	21.92	0.27	0.45
9	-0.14	0	-0.64	23.39	0.24	0.14
10	-0.20	-4	-0.45	13.47	0.31	0.20
MEDIA	0.08	-2.20	-0.30	15.98	0.25	0.24

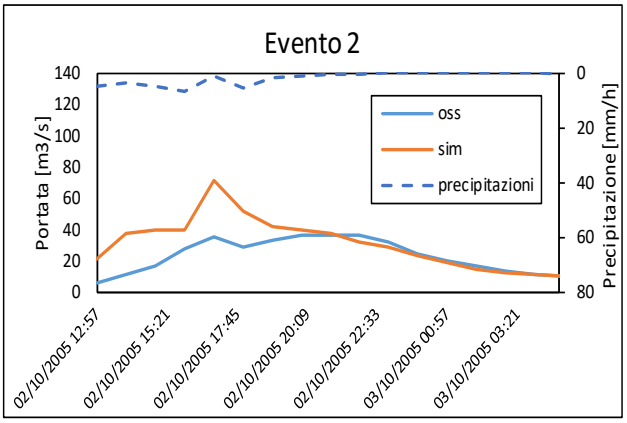
Tabella 3.46 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo.

PH	0.08	-2.20	-0.30	15.98	0.25	0.24
CN	0.04	-2.60	-0.34	17.23	0.22	0.27

PH	CN
0.06	0.01
0.96	1.02
0.05	0.00
0.11	0.13
0.02	0.07
0.29	0.36
0.15	0.18
0.45	0.42
0.14	0.27
0.20	0.27
0.24	0.27

Tabella 3.47 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Peregallo.





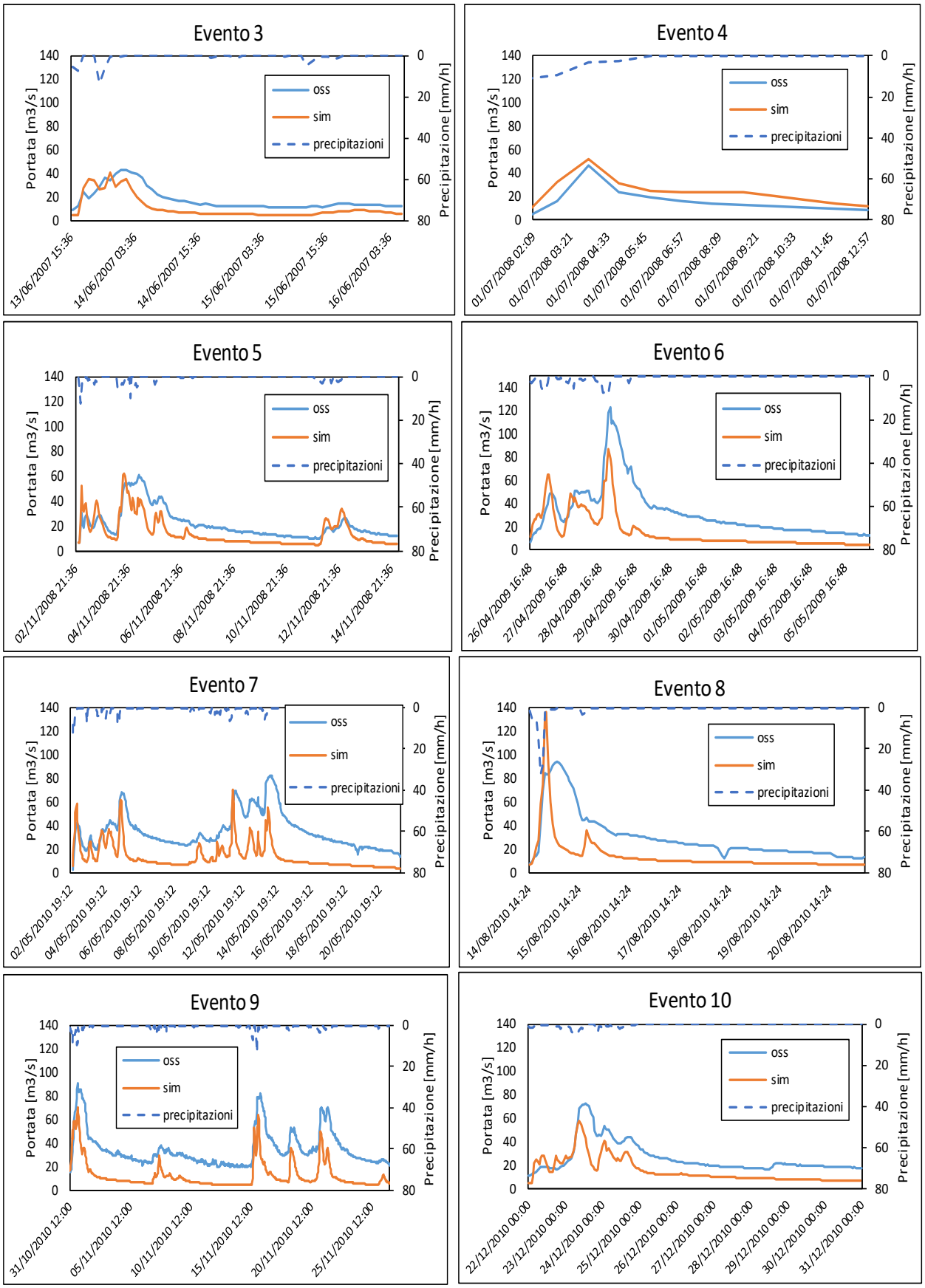


Figura 3.23 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

Milano Feltre

evento	inizio	fine
1	31/10/2003 08:59	01/11/2003 12:59
2	29/04/2004 17:59	01/05/2004 06:59
3	09/09/2005 06:58	10/09/2005 06:58
4	14/09/2006 19:57	16/09/2006 07:57
5	16/09/2007 23:56	17/09/2007 12:56
6	17/05/2008 20:56	19/05/2008 04:56
7	07/07/2009 02:55	07/07/2009 20:55
8	02/05/2010 21:54	19/05/2010 12:54
9	18/09/2010 08:54	20/09/2010 13:54
10	30/10/2010 23:54	30/11/2010 04:54

Tabella 3.48 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre.

Si conclude la calibrazione del bacino del Lambro in linea con quanto visto finora; come era successo in precedenza, spostandosi più a valle lungo il bacino, l'errore medio assoluto tendeva a diminuire. Anche per il metodo di Philip, la fase di calibrazione è stata piuttosto lunga ma necessaria per ridurre notevolmente l'incertezza.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.09	3	0.02	8.76	0.46	0.09
2	-0.26	3	-0.14	9.51	0.69	0.26
3	-0.25	0	-0.14	15.64	0.59	0.25
4	0.41	2	0.35	13.23	0.48	0.41
5	-0.30	0	-0.15	17.70	0.54	0.30
6	-0.38	3	-0.32	16.22	0.60	0.38
7	0.06	1	-0.10	12.32	0.69	0.06
8	-0.16	-1	-0.58	26.13	0.19	0.16
9	0.22	-3	-0.38	28.78	0.26	0.22
10	-0.12	2	-0.60	23.02	0.38	0.12
MEDIA	-0.07	1.00	-0.20	17.13	0.49	0.22

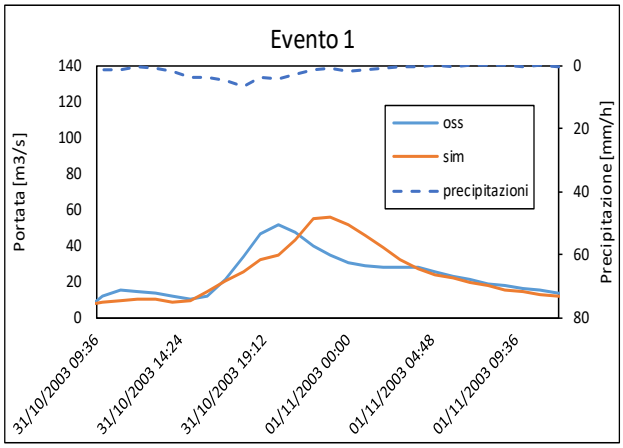
Tabella 3.49 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre.

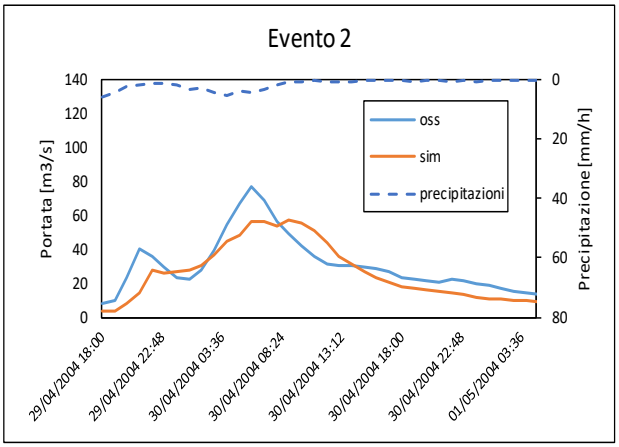
PH	-0.07	1.00	-0.20	17.13	0.49	0.22
CN	-0.06	0.60	-0.20	16.68	0.52	0.23

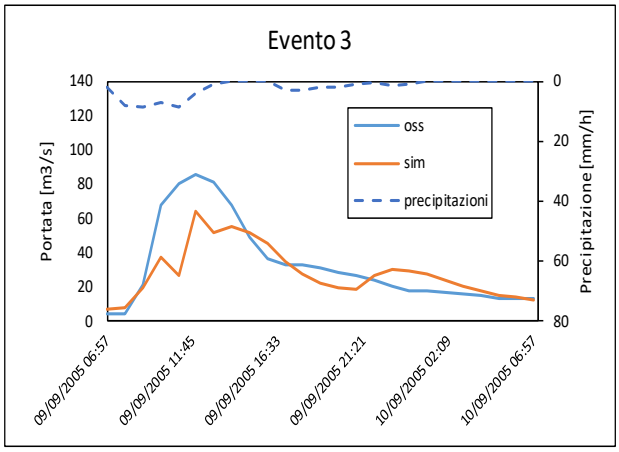
Come visto anche per il metodo del CN, la stazione di Milano Feltre presenta un cambiamento del trend per quanto riguarda la propagazione delle piene. Infatti, invece che avere un anticipo della simulazione della piena, si ha un leggero ritardo, di circa 1h. Infine, è giusto sottolineare come quest'ultima stazione idrometrica, presenti l'errore medio assoluto più basso di tutte, per entrambi i metodi. Tutto ciò è stato ottenuto grazie ad un'attenta e mirata calibrazione sui parametri, in particolare sul kprof.

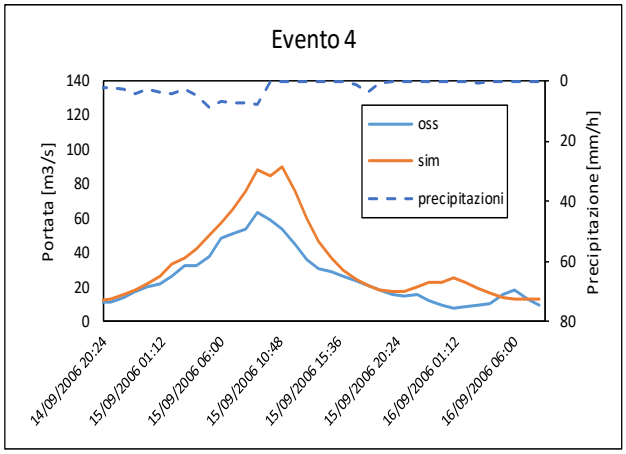
PH	CN
0.09	0.02
0.26	0.28
0.25	0.19
0.41	0.35
0.30	0.17
0.38	0.40
0.06	0.20
0.16	0.14
0.22	0.28
0.12	0.24
0.22	0.23

Tabella 3.50 Confronto dell'errore assoluto tra i due modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Milano Feltre.









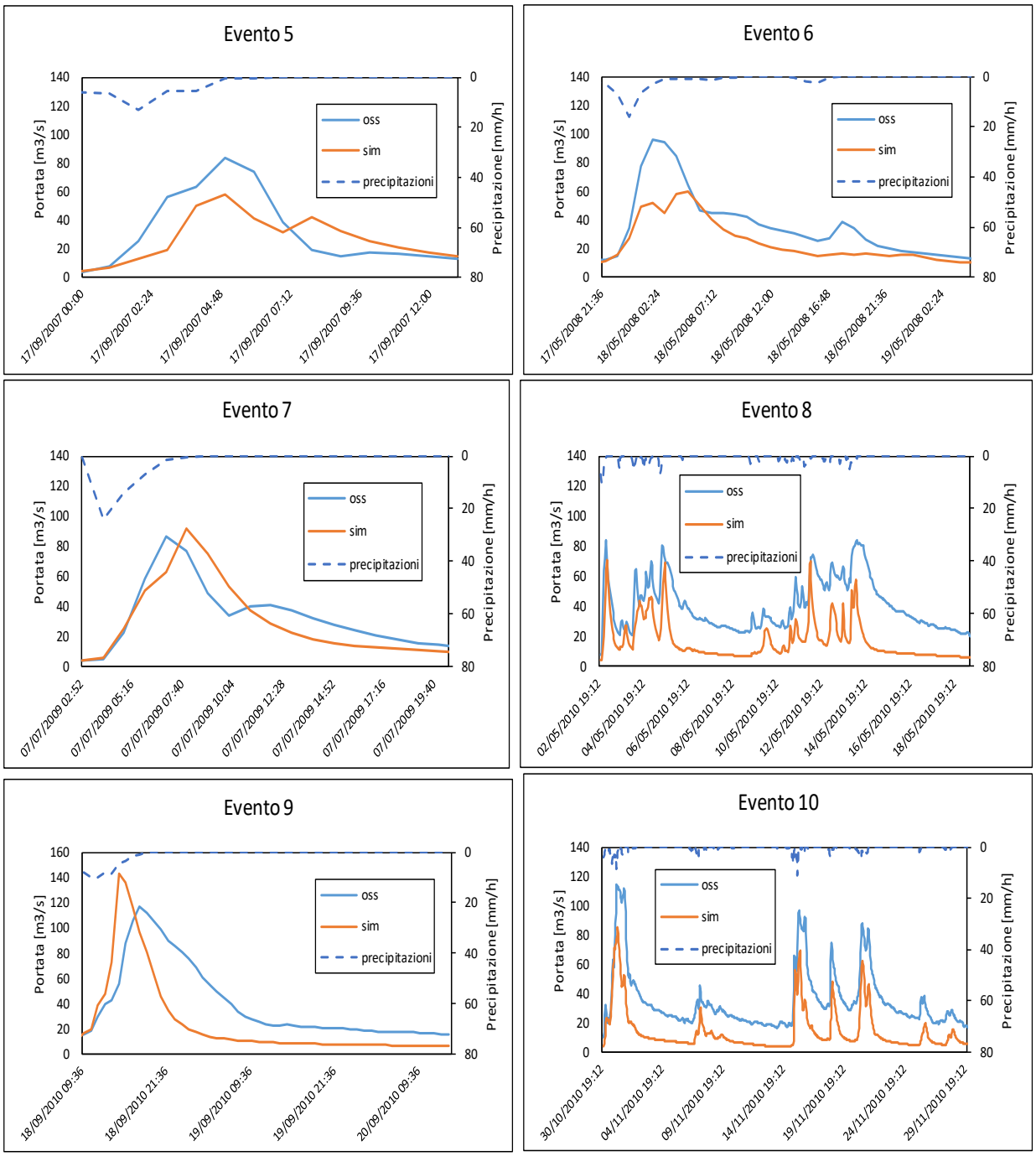


Figura 3.24 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

Terminata la fase di calibrazione anche con questo secondo metodo, è opportuno aggiungere qualche conclusione sulla base di quanto è stato ottenuto. Per quanto riguarda i tempi di propagazione, si può dire come entrambi i modelli tendano ad anticipare il picco della piena. Infatti, 7 stazioni su 8 presentano un anticipo un paio d'ore al massimo, eccetto per Caslino e Peregallo. Invece, confrontando l'errore relativo sul picco, non ci sono grandi distinzioni tra i valori ottenuti dai due modelli, per ciascuna stazione. Come già ribadito più volte però, la maggior parte delle stazioni, hanno richiesto una lunga fase di calibrazione a causa delle forti sottostime iniziali. Avendo sempre adoperato un tipo di calibrazione manuale e non automatica, il numero delle simulazioni effettuate per terminare l'analisi è stato abbastanza elevato, in particolare per il bacino del Lambro. Questo modello idrologico, nonostante venisse applicato per la prima volta agli eventi di piena, ha portato dei risultati più che sufficienti. Sicuramente non dimostra di

essere un metodo migliore rispetto a quello del CN, comunque non è assolutamente da trascurare ma da implementare anche in parallelo al primo. Infatti, confrontando la media degli errori assoluti sul picco di piena, si può notare il modello di Philip fornisca risultati positivi e per alcune sezioni anche migliori. Non sembrano quindi esserci distinzioni particolare tra la scelta di un modello idrologico e l'altro, e ciò lo si può anche constatare dall'andamento dei grafici ottenuti. Inoltre è importante sottolineare, che le incertezze elevate presenti per una particolare stazione (per esempio Lozza, in cui l'errore medio assoluto è il più alto di tutti) si riscontrano in entrambe le applicazioni.

	Ksat	Θs	kprof	prof
Lozza	0.2	0.5	/	/
Castellanza	0.01	0.2	20000	/
Cantù	0.1	/	5000	/
Palazzolo	0.01	/	20000	0.1
Caslino	/	/	10000	/
Lambrugo	0.02	/	30000	0.1
Peregallo	0.01	/	40000	0.1
Feltre	0.01	/	150000	0.1

Tabella 3.51 Riassunto della calibrazione con il metodo di Philip con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica.

Osservando la tabella conclusiva, ci sono altre due considerazioni importanti da fare. La prima consiste nel fatto che, la calibrazione è stata eseguita in modo da aumentare per tutte le sezioni il valore della permeabilità. Questo è dovuto ad una costante sottostima delle portate nelle simulazioni iniziali, diversamente da quanto accadeva con il primo metodo, in cui la situazione iniziale per le due stazioni dell'Olona e quella di Caslino era il contrario. Infine, si evince che, rispetto alla calibrazione precedente, il numero di parametri utilizzati per ridurre le incertezze è inferiore. Infatti, eccetto il caso dell'Olona in cui si è provato a diminuire le sottostime con il parametro Θs (in realtà anche per il Lambro ma con scarsi risultati), sono stati necessari solo 3 parametri idrologici. Prima invece, applicando il metodo SCS, ovviamente c'era in aggiunta il parametro relativo del CN. Per questo motivo, non è assolutamente da trascurare il fatto che, con il metodo di Philip, siano stati raggiunti risultati simili, calibrando un parametro in meno.

3.2.3 Validazione di Philip

Come fatto in precedenza, una volta terminata la fase di calibrazione, si è passati alla validazione, sfruttando gli anni di studio rimanenti. Si riportano le tabelle con gli indici stimati e i grafici con i risultati ottenuti. Inoltre, è possibile confrontare la media degli errori degli indici tra un metodo e l'altro. Si può concludere che per il metodo di Philip siano leggermente migliori i risultati forniti dalla calibrazione, rispetto alla validazione; comparando invece le due fasi di validazione, eccetto il caso di Lozza e Lambrugo, in cui le simulazioni sono migliori con il CN, per il resto risultano essere simili, se non identiche.

Lozza

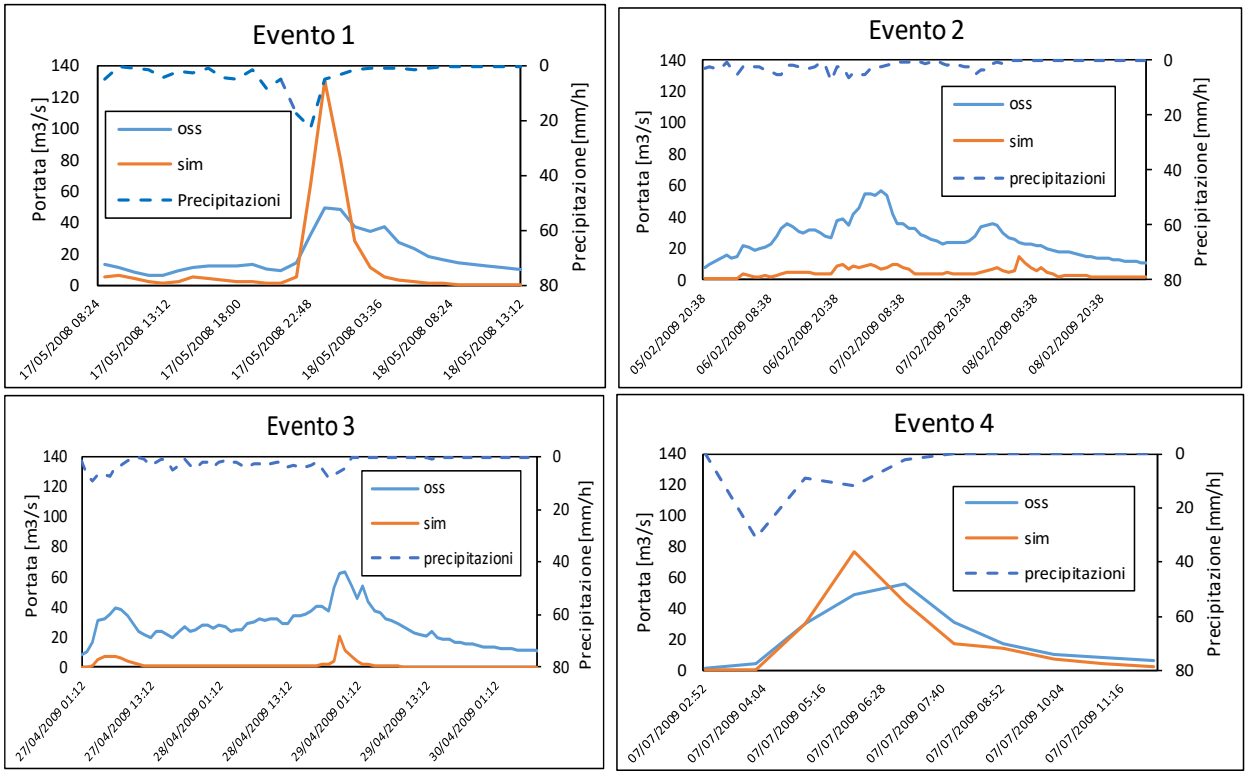
evento	inizio	fine
1	17/05/2008 08:56	18/05/2008 13:56
2	05/02/2009 20:55	09/02/2009 04:55
3	27/04/2009 00:55	30/04/2009 08:55
4	07/07/2009 02:55	07/07/2009 11:55
5	09/05/2010 07:54	15/05/2010 02:54

Tabella 3.52 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.64	0	-0.31	21.24	0.44	1.64
2	-0.73	-3	-0.82	23.40	0.07	0.73
3	-0.68	-1	-0.95	27.48	0.05	0.68
4	0.38	-1	-0.08	10.74	0.66	0.38
5	0.22	1	-0.87	20.74	0.04	0.22

MEDIA	0.17	-0.80	-0.60	20.72	0.25	0.73

VALID PH	0.17	-0.80	-0.60	20.72	0.25	0.73
VALID CN	-0.004	-0.60	-0.53	16.46	0.34	0.44



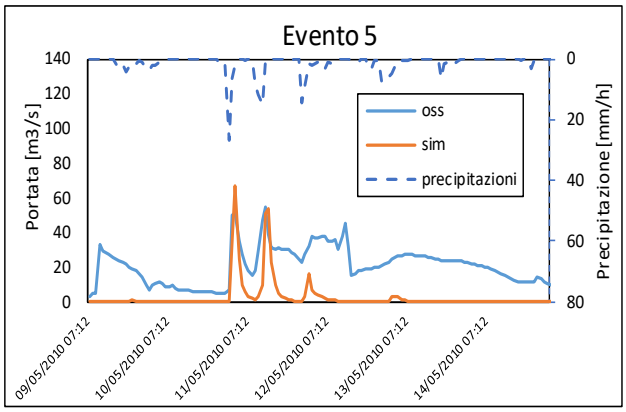


Figura 3.25 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Castellanza

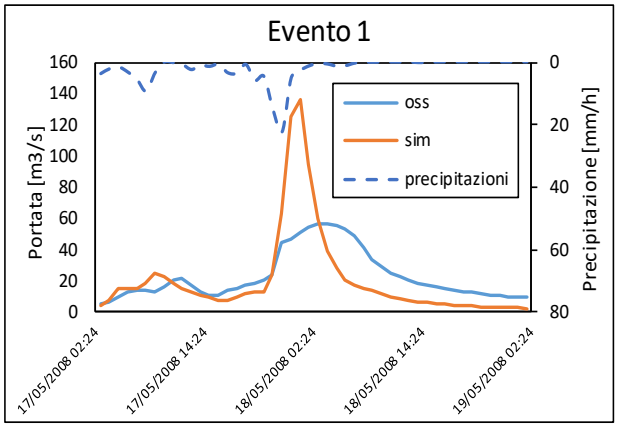
evento	inizio	fine
1	17/05/2008 02:56	19/05/2008 01:56
2	05/02/2009 18:55	11/02/2009 03:55
3	26/04/2009 13:55	02/05/2009 02:55
4	31/10/2010 01:54	03/11/2010 03:54
5	22/12/2010 09:54	26/12/2010 06:54

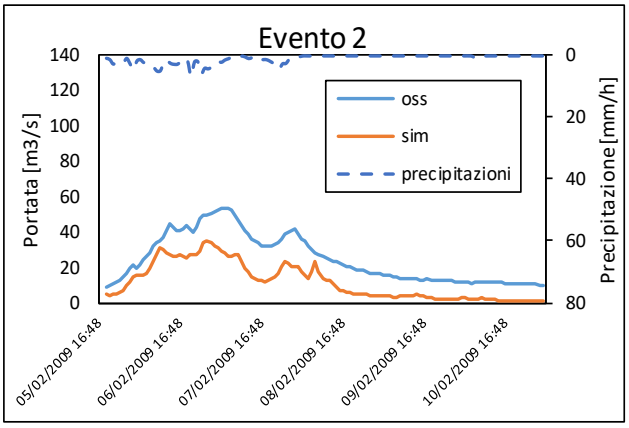
Tabella 3.53 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.42	-2	-0.11	21.50	-0.91	1.42
2	-0.34	-4	-0.52	13.81	0.46	0.34
3	-0.34	2	-0.59	19.06	0.30	0.34
4	-0.18	-2	-0.34	9.29	0.67	0.18
5	0.22	-1	-0.36	8.26	0.34	0.22

MEDIA	0.16	-1.40	-0.38	14.38	0.17	0.50

VALID PH	0.16	-1.40	-0.38	14.38	0.17	0.50
VALID CN	0.16	0.60	-0.60	16.71	0.26	0.29





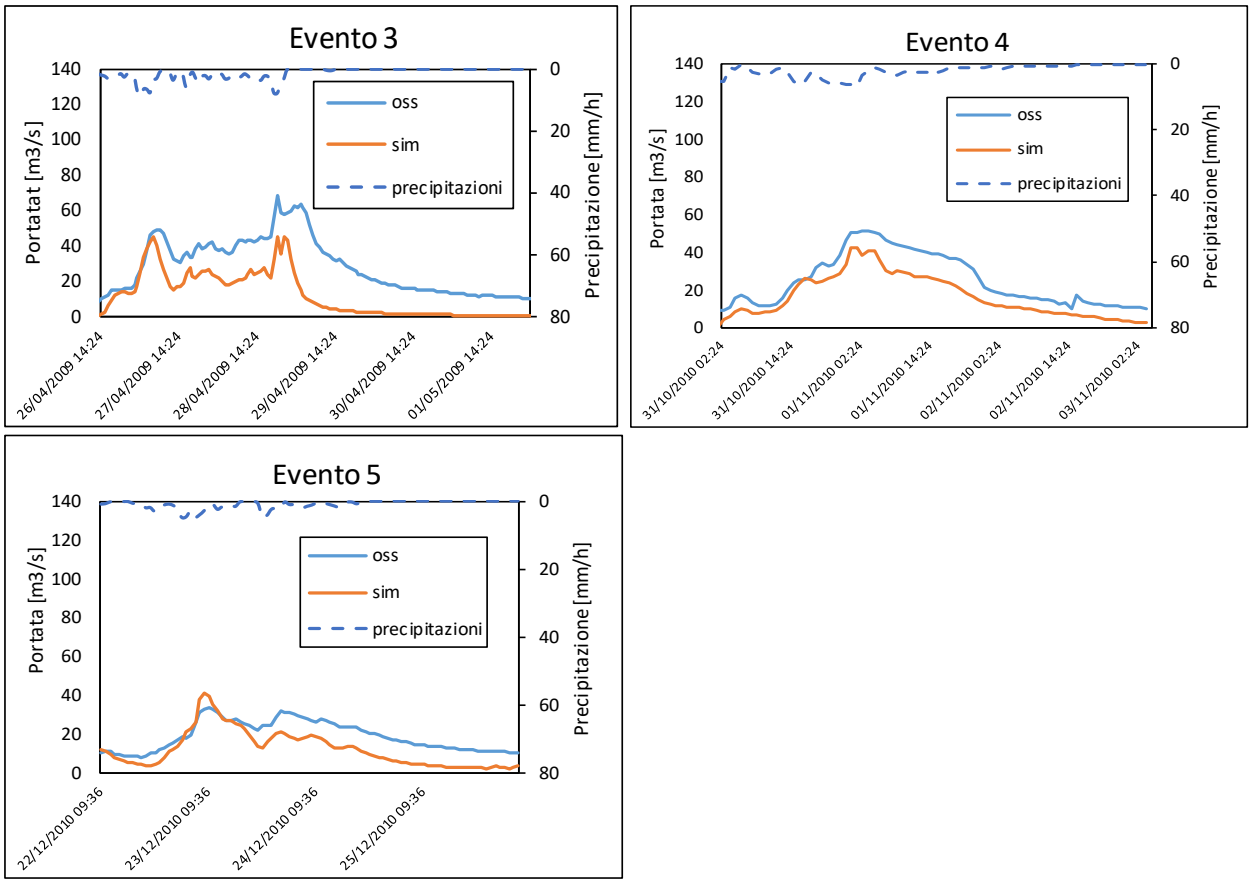


Figura 3.26 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Cantù

evento	inizio	fine
1	06/07/2012 15:53	07/07/2012 01:53
2	12/09/2012 08:52	12/09/2012 18:52
3	23/10/2013 09:52	23/10/2013 22:52
4	07/07/2014 20:51	08/07/2014 14:51
5	23/09/2015 05:50	23/09/2015 14:50

Tabella 3.54 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.02	0	-0.48	2.89	0.61	0.02
2	-0.38	0	-0.54	3.97	0.48	0.38
3	0.12	0	-0.35	2.70	0.53	0.12
4	0.42	0	-0.46	9.92	0.11	0.42
5	0.02	-2	-0.40	7.17	-0.51	0.02

MEDIA	0.03	-0.40	-0.45	5.33	0.24	0.19

VALID PH	0.03	-0.40	-0.45	5.33	0.24	0.19
VALID CN	0.06	-0.40	-0.54	6.39	0.05	0.25

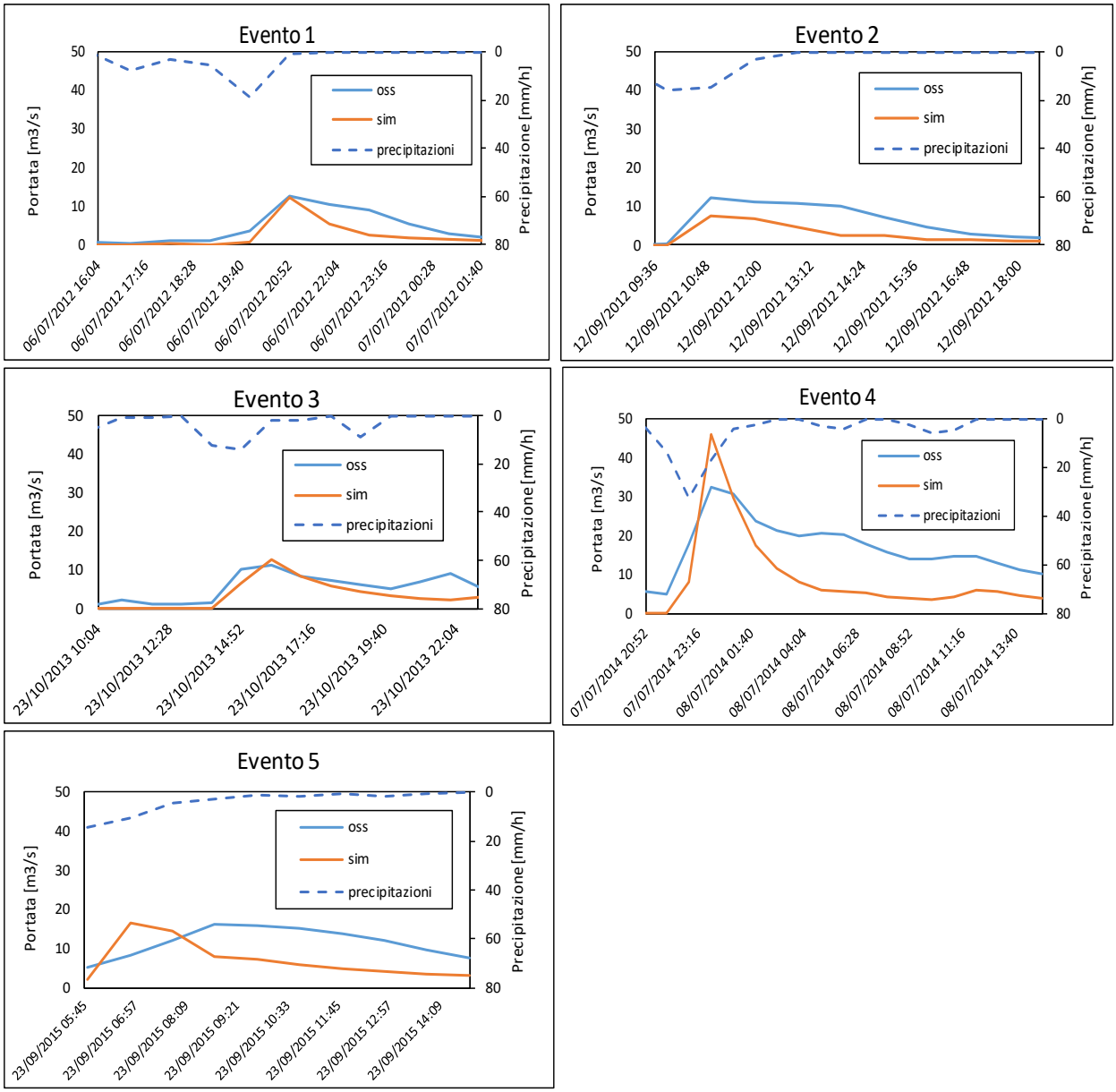


Figura 3.27 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Palazzolo

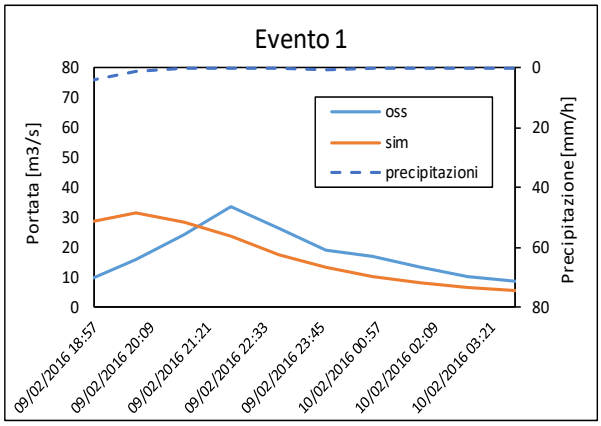
evento	inizio	fine
1	09/02/2016 18:50	10/02/2016 03:50
2	05/03/2016 09:50	06/03/2016 04:50
3	11/05/2016 19:50	12/05/2016 20:50
4	04/06/2016 05:50	04/06/2016 17:50
5	16/06/2016 15:50	17/06/2016 00:50

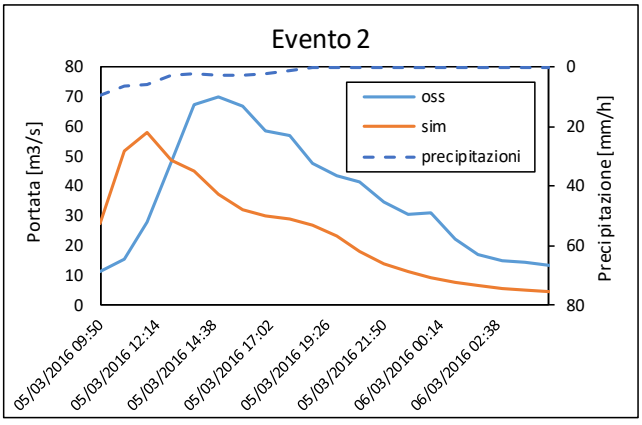
Tabella 3.55 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici.

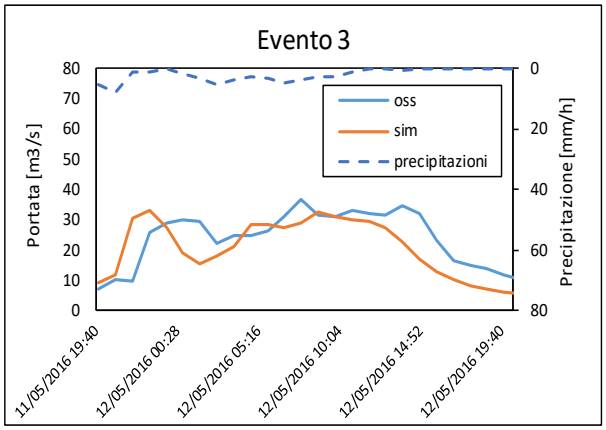
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.06	-2	-0.02	9.74	-0.53	0.06
2	-0.17	-3	-0.33	22.56	0.03	0.17
3	-0.09	-2	-0.13	7.85	0.31	0.09
4	0.27	-4	-0.24	15.65	-0.98	0.27
5	-0.08	-1	-0.37	14.71	0.35	0.08

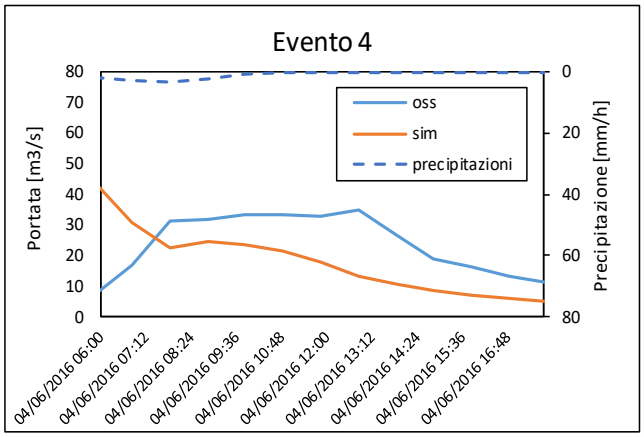
MEDIA	-0.03	-2.40	-0.22	14.10	-0.16	0.14

VALID PH	-0.03	-2.40	-0.22	14.10	-0.16	0.14
VALID CN	0.00	-2.40	-0.24	14.74	-0.26	0.15









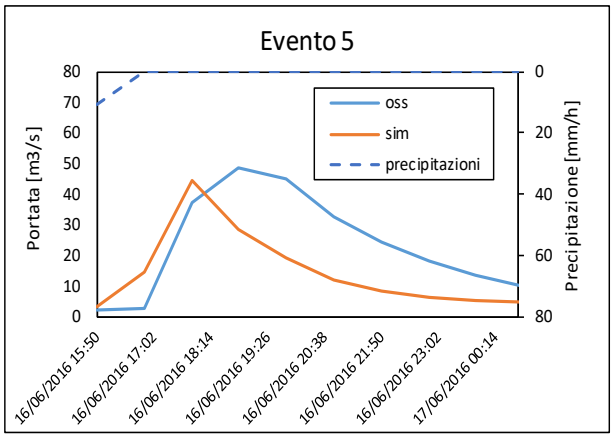


Figura 3.28 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

Caslino

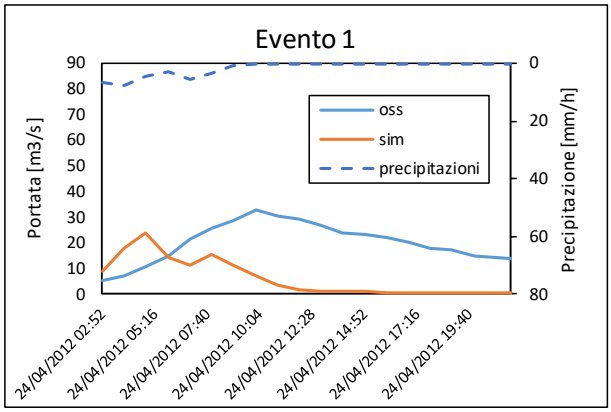
evento	inizio	fine
1	24/04/2012 02:53	24/04/2012 21:53
2	25/12/2013 10:51	27/12/2013 04:51
3	16/05/2013 06:52	18/05/2013 01:52
4	10/11/2014 10:51	16/11/2014 22:51
5	11/05/2016 19:50	12/05/2016 16:50

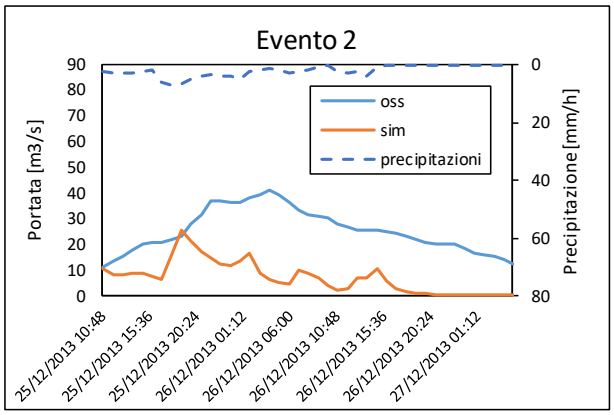
Tabella 3.56 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.27	-2	-0.70	18.29	-0.32	0.27
2	-0.38	-2	-0.72	19.96	0.01	0.38
3	0.11	-4	-0.60	15.78	-0.57	0.11
4	-0.40	-3	-0.77	20.58	0.03	0.40
5	0.17	-4	-0.62	12.46	-0.44	0.17

MEDIA	-0.15	-3.00	-0.68	17.41	-0.26	0.27

VALID PH	-0.15	-3.00	-0.68	17.41	-0.26	0.27
VALID CN	-0.21	-2.80	-0.73	17.29	-0.13	0.22





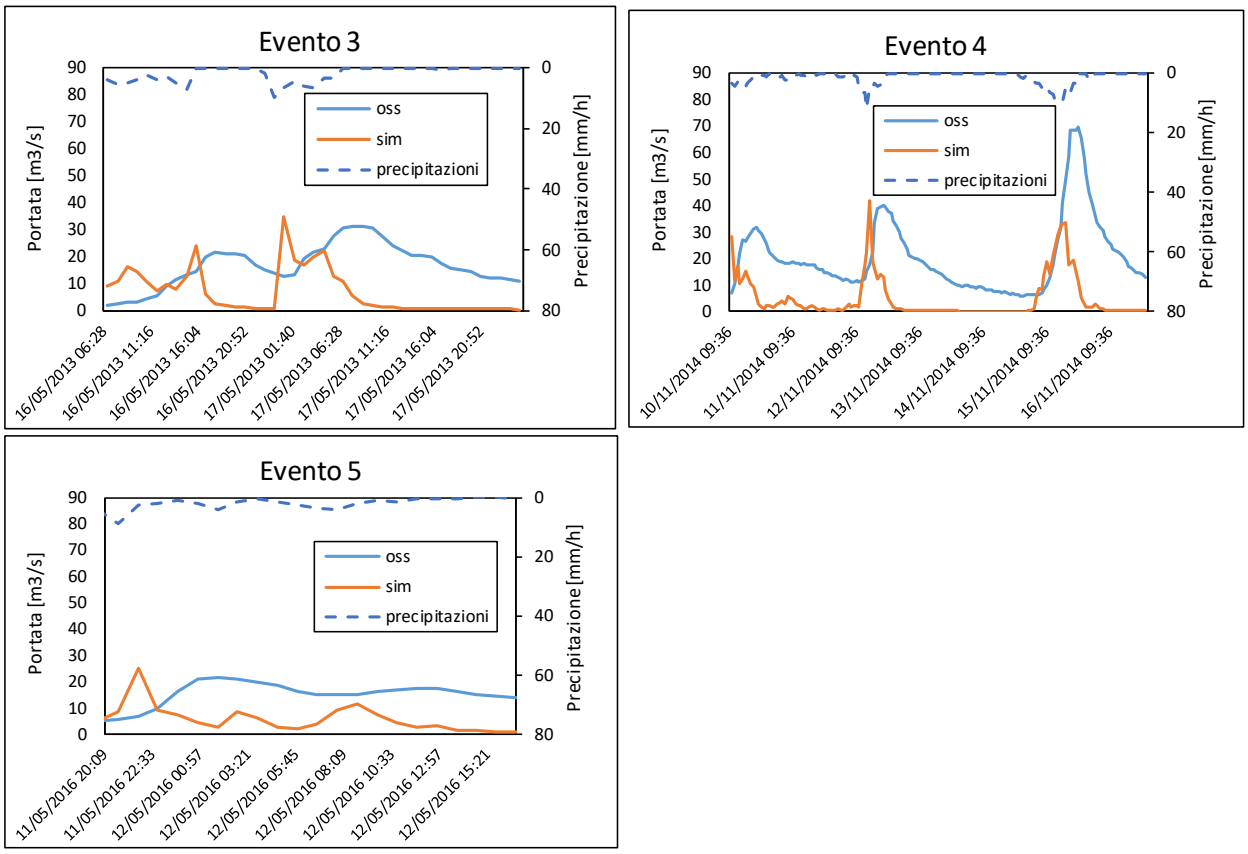


Figura 3.29 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

evento	inizio	fine
1	19/04/2012 13:53	04/05/2012 00:53
2	04/11/2012 00:52	07/11/2012 14:52
3	09/06/2013 13:52	12/06/2013 10:52
4	29/06/2014 10:51	22/07/2014 06:51
5	04/06/2016 00:50	21/06/2016 18:50

Tabella 3.57 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.28	-6	-0.55	7.66	-0.01	0.28
2	0.44	-3	-0.26	4.17	0.37	0.44
3	0.58	-1	-0.16	3.84	0.40	0.58
4	0.37	-1	-0.44	7.19	0.36	0.37
5	0.57	-2	-0.50	7.03	-0.10	0.57

MEDIA	0.45	-2.60	-0.38	5.98	0.20	0.45

VALID PH	0.45	-2.60	-0.38	5.98	0.20	0.45
VALID CN	0.29	-2.60	-0.51	6.92	0.20	0.29

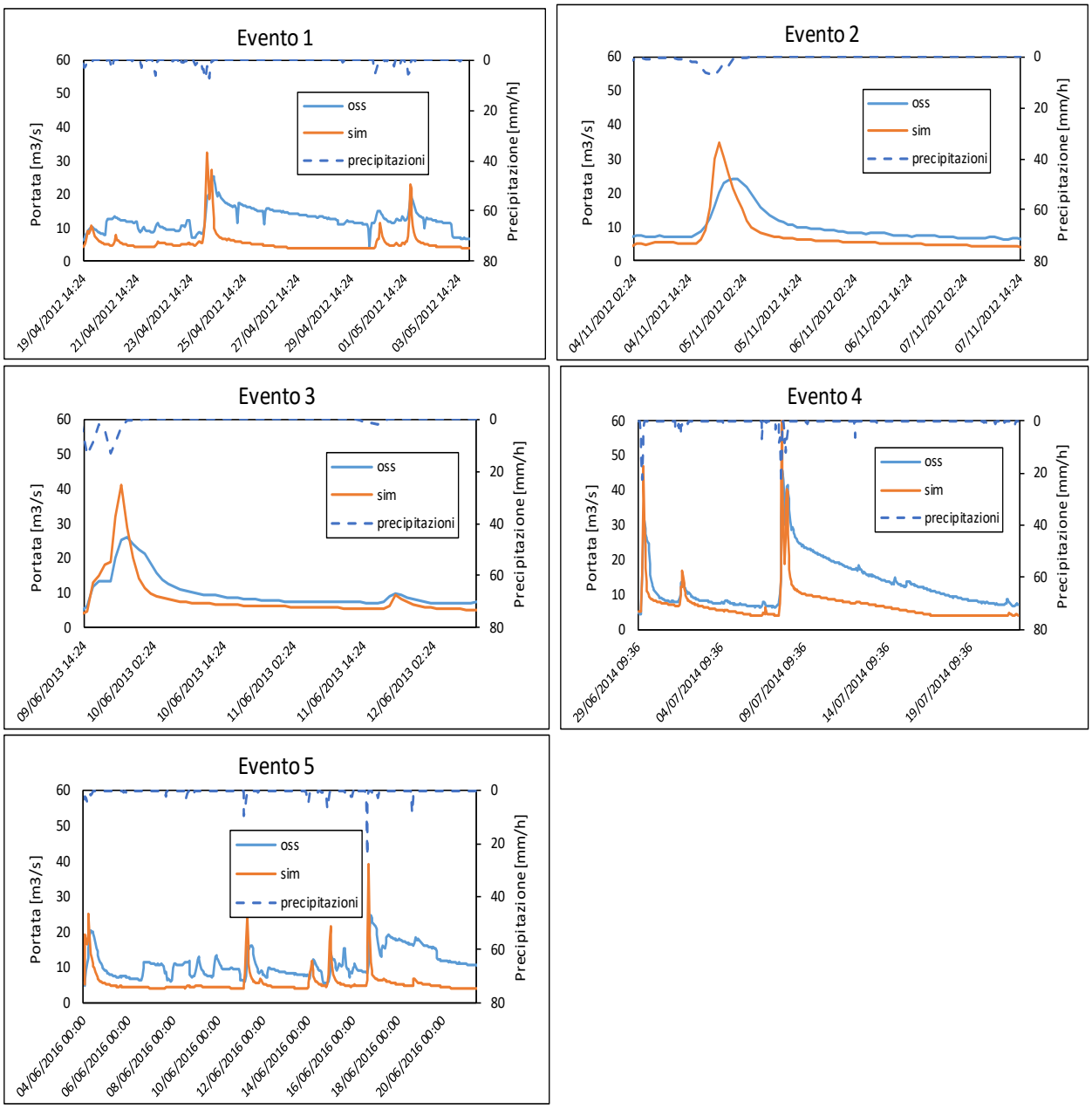


Figura 3.30 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

Peregallo

evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 12:53
2	09/06/2013 14:52	10/06/2013 18:52
3	14/06/2014 16:51	15/06/2014 05:51
4	15/05/2015 15:50	16/05/2015 09:50
5	16/06/2016 14:50	19/06/2016 22:50

Tabella 3.58 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.60	-1	0.18	14.27	-0.47	0.60
2	0.27	-2	-0.12	11.18	0.18	0.27
3	0.21	-2	-0.09	22.01	-0.25	0.21
4	0.52	-5	0.30	21.07	-0.92	0.52
5	-0.06	-3	-0.62	13.71	0.12	0.06

MEDIA	0.31	-2.60	-0.07	16.45	-0.27	0.33

VALID PH	0.31	-2.60	-0.07	16.45	-0.27	0.33
VALID CN	0.31	-2.20	-0.12	17.35	-0.41	0.32

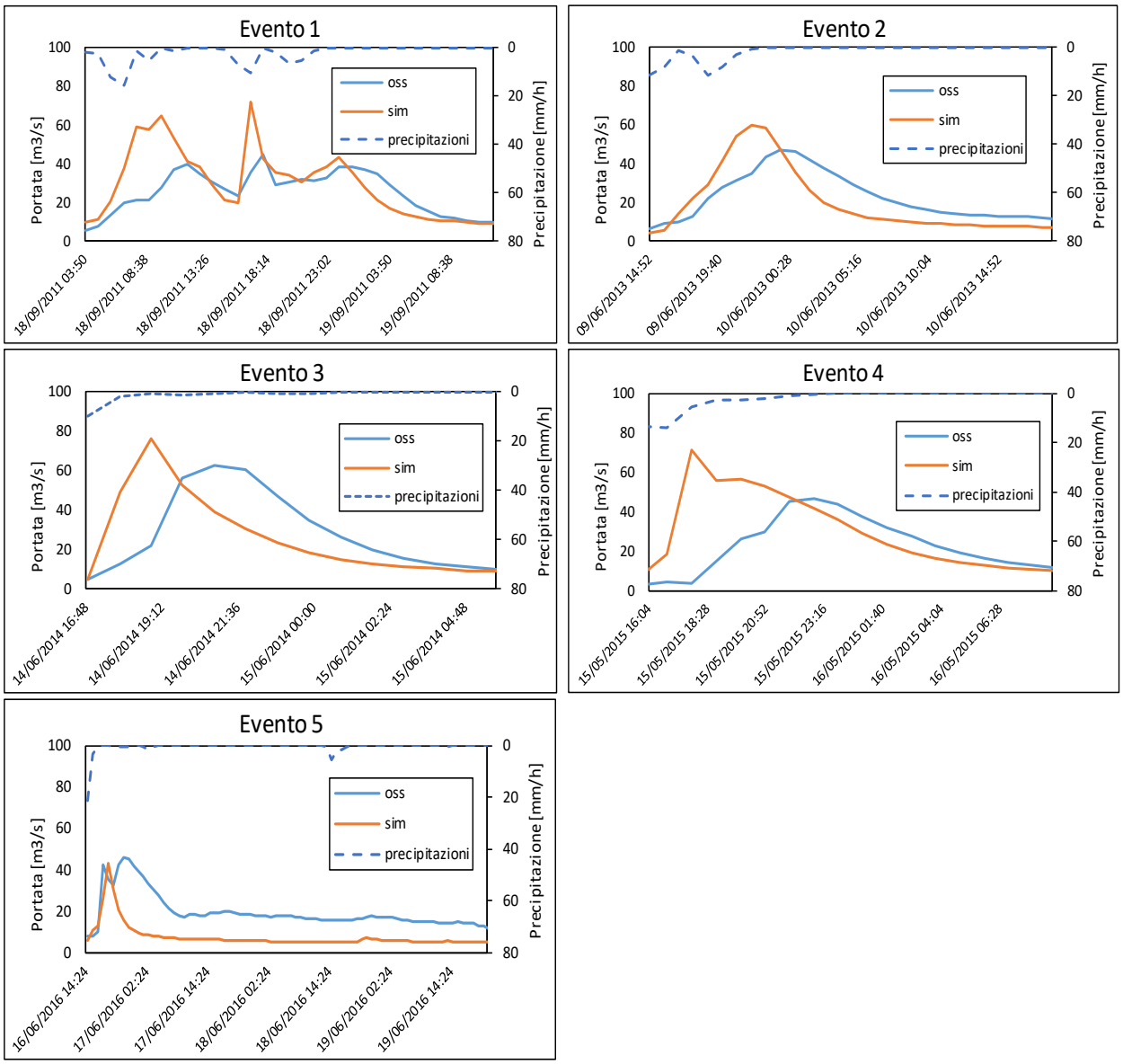


Figura 3.31 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

Milano Feltre

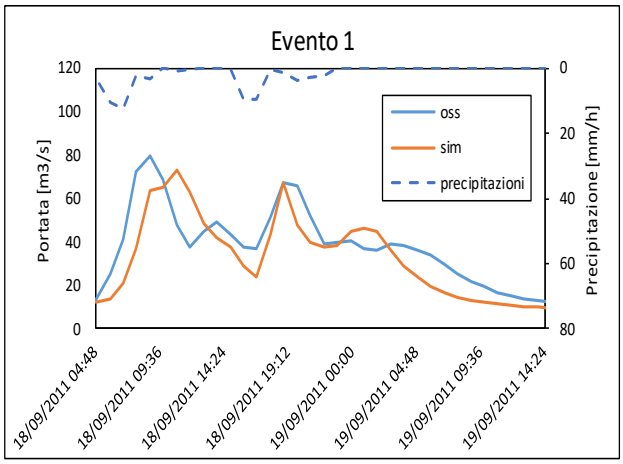
evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 15:53
2	25/08/2013 11:52	27/08/2013 10:52
3	07/07/2014 21:51	17/07/2014 00:51
4	25/07/2014 20:51	08/08/2014 05:51
5	15/05/2015 18:50	16/05/2015 18:50

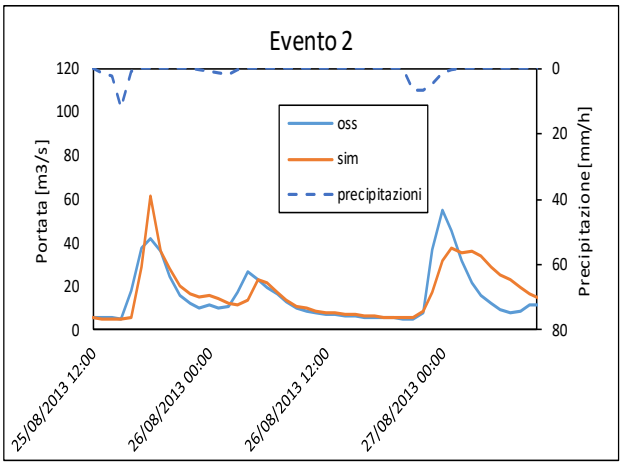
Tabella 3.59 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.09	2	-0.14	12.09	0.58	0.09
2	0.12	1	0.10	8.41	0.52	0.12
3	0.19	-4	-0.61	23.36	0.34	0.19
4	-0.07	-3	-0.57	19.44	0.28	0.07
5	-0.07	-3	-0.21	20.07	0.05	0.07

MEDIA	0.02	-1.40	-0.29	16.67	0.35	0.11

VALID PH	0.02	-1.40	-0.29	16.67	0.35	0.11
VALID CN	0.09	-1.40	-0.32	17.96	0.28	0.10





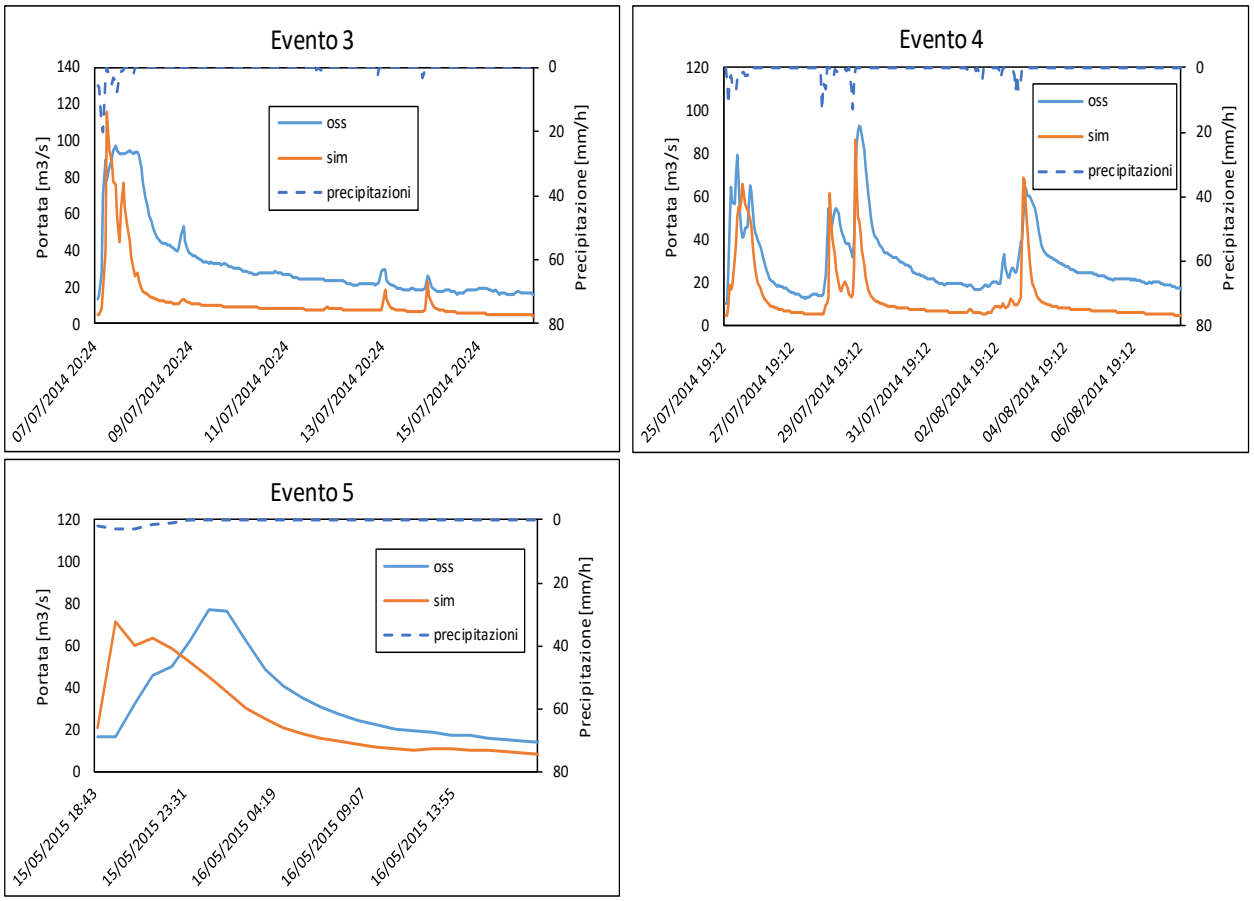


Figura 3.32 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

3.3 Green Ampt

3.3.1 Calibrazione di Green Ampt

A questo punto non rimane che eseguire un'ultima fase di calibrazione con questo terzo modello idrologico, sfruttando le caratteristiche e le conoscenze ottenute fino adesso, in modo da renderla più rapida possibile.

Gli eventi di piena e le stazioni idrometriche sono ovviamente le medesime già viste con i primi due metodi, così da poter confrontare correttamente i risultati finali. È importante valutare se esiste un metodo che sia più coerente e più affidabile rispetto agli altri, oppure è probabile che siano equivalenti tra loro. Per fare ciò, per ogni stazione vengono presentate delle tabelle di confronto con tutti gli indici stimati e con l'errore assoluto, per ogni modello calibrato.

Lozza

evento	inizio	fine
1	27/11/2003 09:59	29/11/2003 14:59
2	10/08/2004 23:58	11/08/2004 11:58
3	31/10/2004 23:58	03/11/2004 21:58
4	27/08/2005 13:58	27/08/2005 22:58
5	17/09/2005 05:58	17/09/2005 17:58
6	10/04/2006 10:57	12/04/2006 04:57
7	14/09/2006 21:57	16/09/2006 15:57
8	06/12/2006 07:57	10/12/2006 22:57

Tabella 3.60 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lozza.

Come per il modello di PH, la calibrazione è stata eseguita agendo su ksat e su Θs. Questa volta però è stato necessario aumentare (del 30%) e non diminuire il contenuto d'acqua saturo a causa di una sovrastima presente.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.15	0	-0.61	9.57	0.41	0.15
2	1.33	-1	0.96	16.89	-0.62	1.33
3	-0.01	-1	-0.79	10.33	0.24	0.01
4	1.76	-2	0.91	23.82	-5.23	1.76
5	0.03	0	0.48	6.21	0.40	0.03
6	-0.33	-1	-0.79	6.21	0.35	0.33
7	0.23	-1	-0.21	4.34	0.38	0.23
8	-0.61	0	-0.88	8.69	0.25	0.61
MEDIA	0.32	-0.75	-0.12	10.76	-0.48	0.55

Tabella 3.61 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lozza

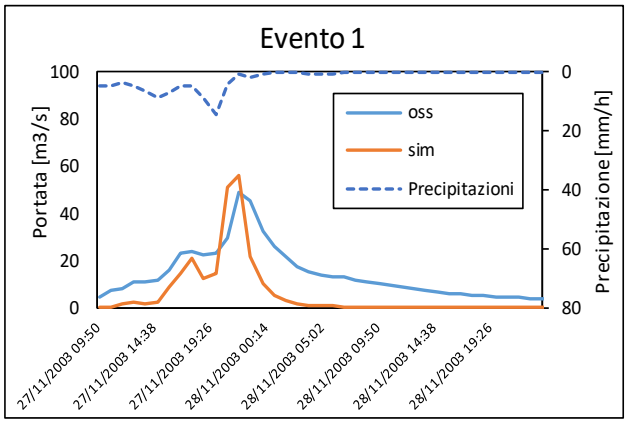
Osservando gli eventi numero 2 e 4, si può notare come Lozza sia il caso più evidente in cui non sempre il modello idrologico simuli in modo corretto le portate. Può capitare che, per qualche errore nella simulazione, ci siano delle forti sovrastime della portata, che non si sono mai manifestate nei due studi precedenti. Sia per il CN che per Philip, l'errore medio assoluto è sempre stato il più alto di tutti, avendo sempre un evento che sovrastimava parecchio le portate così da incrementare l'indice. In questa circostanza però, sono ben 2 i possibili outliers, infatti, se si decidesse di trascurarli, il risultato finale sarebbe molto positivo. Ovviamente ciò non è stato fatto, in quanto è fondamentale mantenere un campione omogeneo di eventi per tutte le stazioni, così da poter evidenziare le differenze più sostanziali. Questi due eventi rovinano appunto la media degli indici stimati e infatti, confrontandoli con gli altri due metodi, si può affermare che, per la stazione di Lozza, i risultati forniti dal modello Green-Ampt siano i peggiori.

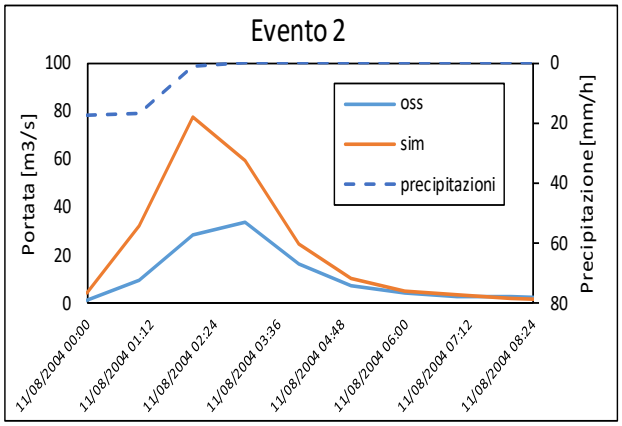
GA	0.32	-0.75	-0.12	10.76	-0.48	0.55
PH	0.03	-0.75	-0.33	9.34	-0.27	0.48
CN	0.05	-0.50	-0.39	7.23	0.15	0.50

GA	PH	CN
0.15	0.03	0.52
1.33	0.56	0.47
0.01	0.22	0.26
1.76	1.50	0.29
0.03	0.24	0.79
0.33	0.51	0.33
0.23	0.02	1.13
0.61	0.79	0.20
0.55	0.48	0.50

Tabella 3.62 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lozza.

L'importanza di questa tabella ti permette di capire, ancora una volta, come le simulazioni dei 3 metodi siano indipendenti fra loro. Per esempio, l'evento numero 4 è simulato abbastanza bene con il modello del CN ma non con gli altri 2, mentre l'evento numero 7, che si dimostra essere il peggiore per il CN, è positivo per GA ed è il migliore per Philip. Indi per cui, si può constatare come, globalmente, il modello idrologico che si basa sull'equazione di GA sia equivalente agli altri 2, ma gli eventi presi singolarmente posso essere completamente diversi.





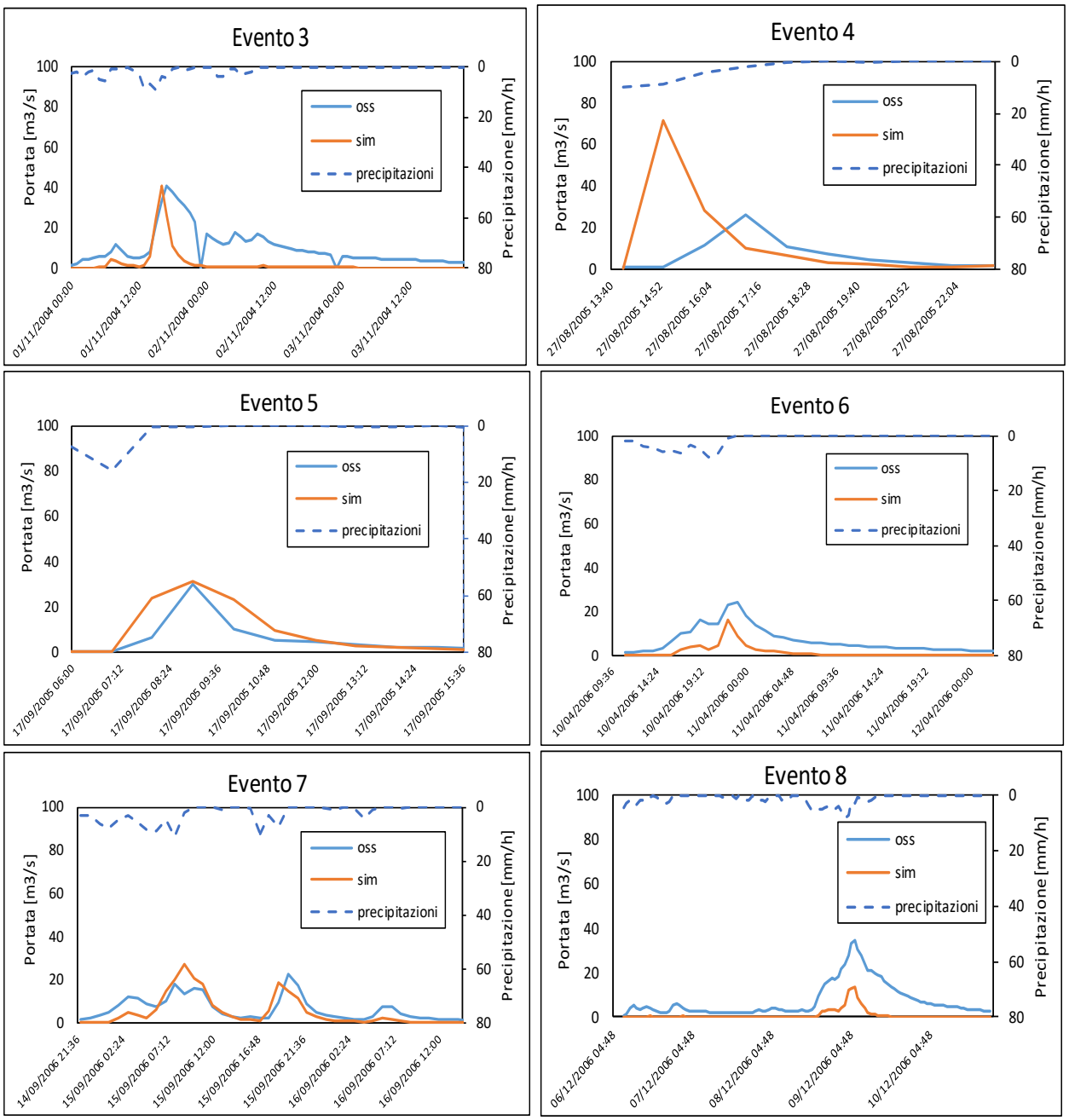


Figura 3.33 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Castellanza

evento	inizio	fine
1	23/11/2003 18:59	03/12/2003 04:59
2	18/04/2004 13:59	20/04/2004 21:59
3	29/04/2004 16:59	10/05/2004 11:59
4	10/08/2004 18:58	11/08/2004 12:58
5	31/10/2004 21:58	03/11/2004 05:58
6	10/04/2006 11:57	11/04/2006 14:57
7	14/09/2006 16:57	16/09/2006 11:57
8	08/12/2006 14:57	10/12/2006 10:57
9	28/05/2007 06:56	29/05/2007 02:56

Tabella 3.63 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Castellanza.

I risultati ottenuti derivano dalla calibrazione del ksat e del kprof, senza la necessità di dover intervenire sul parametro Θs.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.18	-1	-0.58	9.00	0.51	0.18
2	0.07	1	-0.61	11.05	0.15	0.07
3	-0.49	-6	-0.76	20.05	0.22	0.49
4	0.82	0	0.19	17.98	-0.95	0.82
5	-0.02	0	-0.56	10.89	0.45	0.02
6	-0.50	1	-0.74	14.62	0.01	0.50
7	0.25	5	-0.17	9.72	-0.54	0.25
8	-0.32	-1	-0.55	13.08	0.4	0.32
9	-0.31	1	-0.50	12.21	-0.12	0.31
MEDIA	-0.04	0.00	-0.48	13.18	0.02	0.33

Tabella 3.64 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Castellanza.

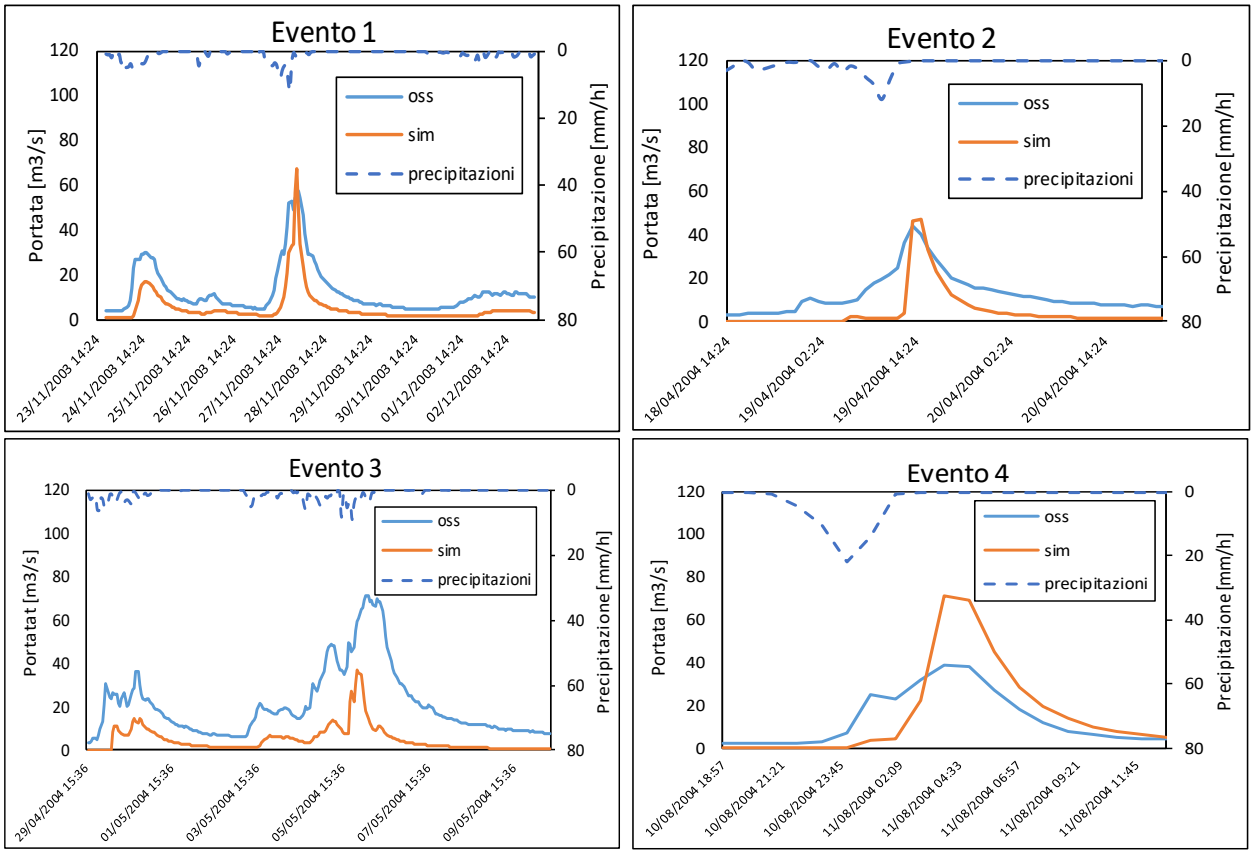
Gli indici sono abbastanza soddisfacenti, l'errore medio relativo è quasi nullo poiché si alternano diverse sottostime a sovrastime. Il confronto con gli altri metodi induce a considerare PH come modello più affidabile per la stazione di Castellanza.

GA	-0.04	0.00	-0.48	13.18	0.02	0.33
PH	0.08	-1.11	-0.21	9.62	0.42	0.27
CN	-0.10	-0.89	-0.62	13.15	0.13	0.34

GA	PH	CN
0.18	0.04	0.28
0.07	0.06	0.25
0.49	0.41	0.38
0.82	1.07	0.42
0.02	0.01	0.31
0.50	0.14	0.03
0.25	0.53	0.77
0.32	0.10	0.06
0.31	0.12	0.53
0.33	0.27	0.34

Tabella 3.65 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Castellanza.

Anche dalla tabella dell'errore medio assoluto si deduce che PH simuli in modo più efficiente le portate ma al tempo stesso, è giusto sottolineare che i risultati degli altri due metodi, comunque piuttosto buoni, sono stati ottenuti calibrando solo due parametri e non 3 come per Philip.



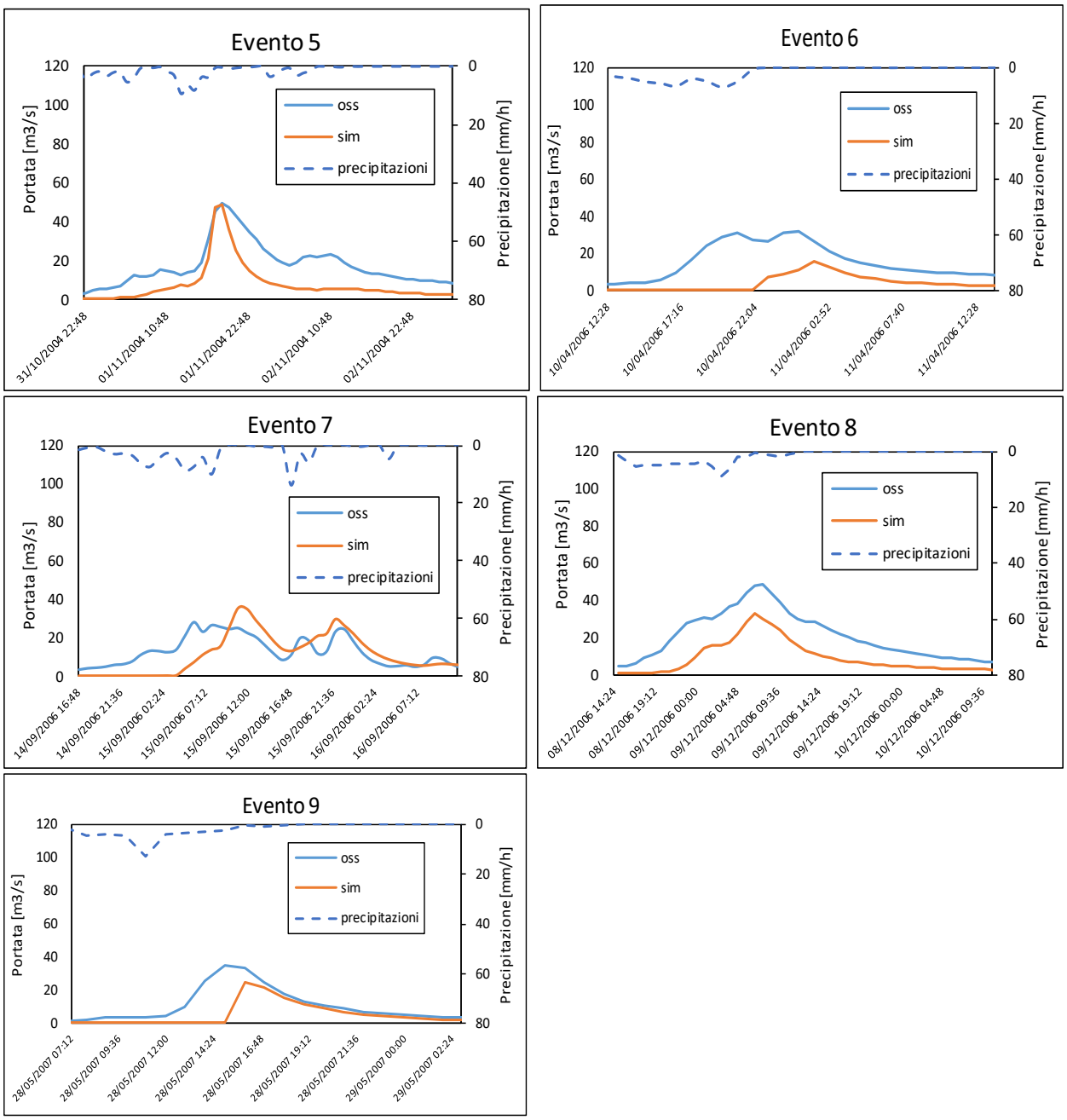


Figura 3.34 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Cantù

evento	inizio	fine
1	09/09/2005 11:58	10/09/2005 03:58
2	02/10/2005 09:57	03/10/2005 00:57
3	17/05/2008 21:56	18/05/2008 08:56
4	10/05/2010 19:54	15/05/2010 03:54
5	11/08/2010 22:54	12/08/2010 07:54
6	18/09/2010 06:54	18/09/2010 16:54
7	31/10/2010 09:54	02/11/2010 10:54
8	15/11/2010 09:54	17/11/2010 08:54

Tabella 3.66 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Cantù.

I risultati sono stati ottenuti in modo molto simile al metodo precedente, agendo quindi solo sulla permeabilità e sulla velocità sub superficiale.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.53	0	0.10	8.58	-1.91	1.53
2	0.46	0	0.03	3.58	-0.15	0.46
3	0.24	0	-0.07	2.44	0.57	0.24
4	0.32	0	-0.48	8.06	0.23	0.32
5	0.24	0	0.13	2.06	0.78	0.24
6	0.44	0	0.25	5.96	0.19	0.44
7	-0.08	0	-0.31	4.48	0.64	0.08
8	-0.32	0	-0.54	7.39	0.32	0.32
MEDIA	0.35	0.00	-0.11	5.32	0.08	0.45

Tabella 3.67 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Cantù.

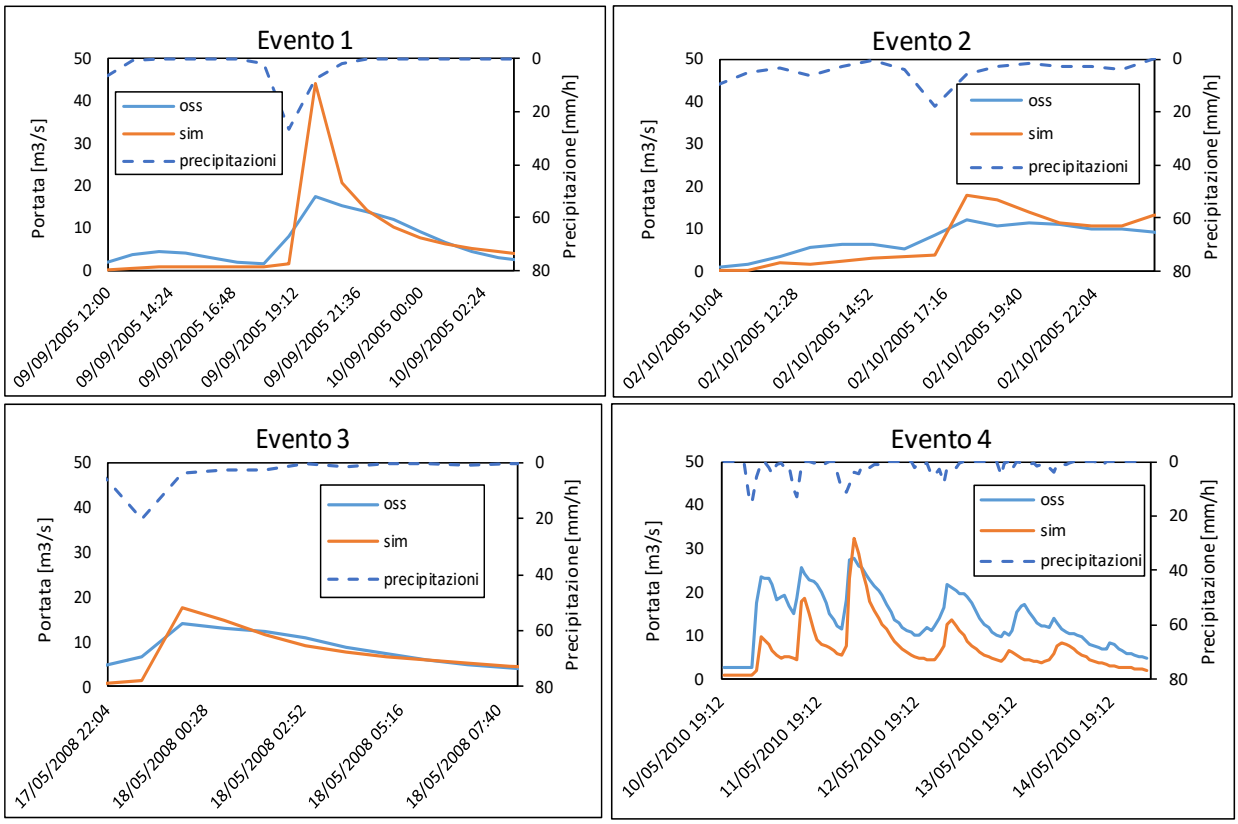
Gli indici sono piuttosto buoni, prendendo in considerazione che anche qui è presente un evento critico che altera i risultati finali. Eccetto appunto per l'evento numero 1, caratterizzato da abbondanti precipitazioni, si mantiene il trend mostrato con i modelli precedenti. Uno degli indici più caratteristici è sicuramente quello che riguarda i tempi di propagazione, in quanto la simulazione con GA per la stazione di Cantù, rappresenta l'unico caso in cui tutti i picchi di piena vengono simulati senza alcun anticipo né ritardo.

GA	0.35	0.00	-0.11	5.32	0.08	0.45
PH	0.12	-0.25	-0.46	6.62	0.15	0.45
CN	0.07	-0.25	-0.57	7.21	0.16	0.36

GA	PH	CN
1.53	1.27	0.47
0.46	0.20	0.55
0.24	0.14	0.00
0.32	0.22	0.35
0.24	0.24	0.37
0.44	0.43	0.31
0.08	0.47	0.28
0.32	0.60	0.52
0.45	0.45	0.36

Tabella 3.68 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Cantù.

L'errore medio assoluto ottenuto con questo metodo è uguale a quello ricavato con Philip, nel quale si era già riscontrato un problema per l'evento numero 1. Questa incertezza non era così evidente con il metodo del CN, che sembra appunto dare risposte più confortanti, anche a livello generale.



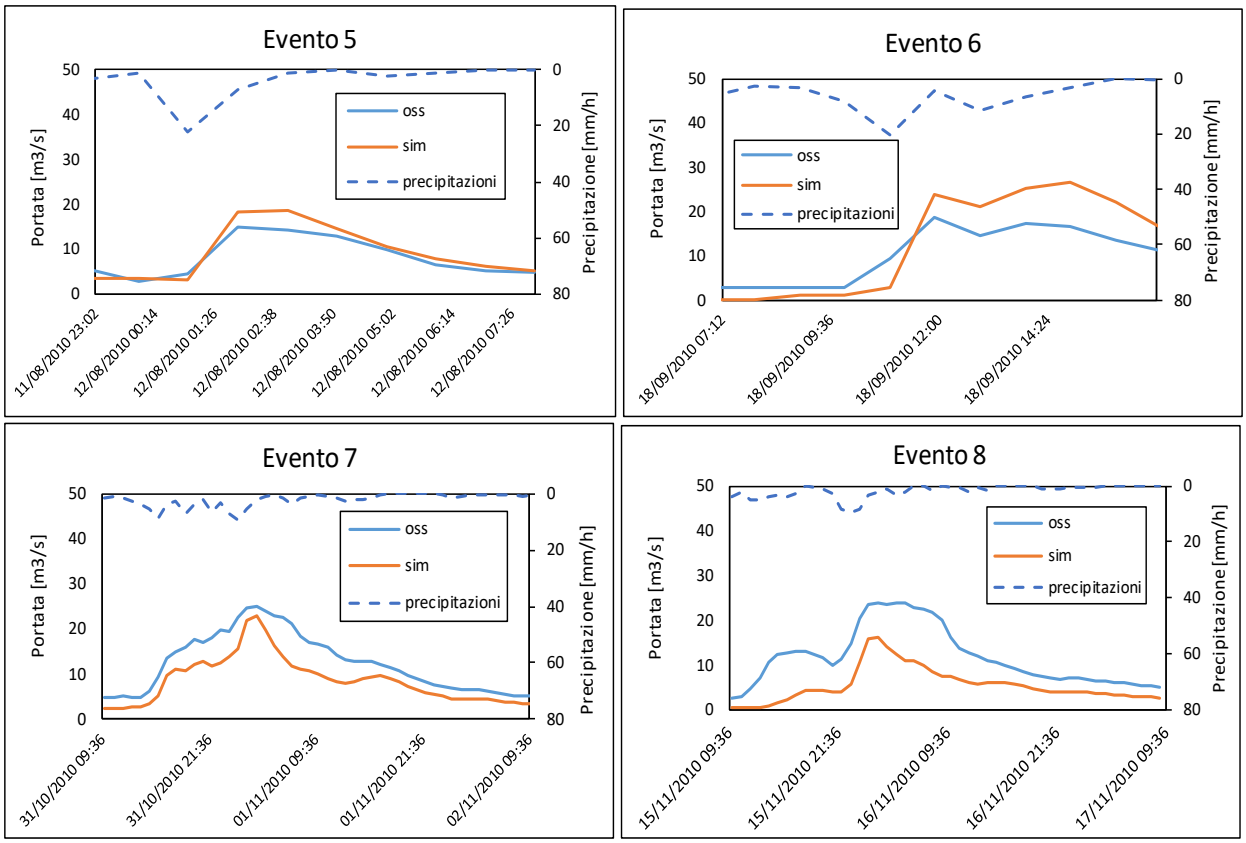


Figura 3.35 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Palazzolo

evento	inizio	fine
1	07/07/2014 20:51	09/07/2014 19:51
2	25/07/2014 22:51	27/07/2014 00:51
3	03/08/2014 08:51	04/08/2014 18:51
4	20/08/2014 18:51	21/08/2014 04:51
5	04/11/2014 17:51	07/11/2014 06:51
6	10/11/2014 08:51	18/11/2014 20:51
7	15/02/2015 04:51	16/02/2015 03:51
8	15/05/2015 16:50	16/05/2015 08:50
9	14/06/2015 11:50	15/06/2015 01:50

Tabella 3.69 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Palazzolo.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.12	-3	-0.39	27.93	0.61	0.12
2	-0.29	-2	-0.18	9.80	0.67	0.29
3	-0.44	-3	-0.53	14.71	0.62	0.44
4	-0.51	-1	-0.51	10.61	0.60	0.51
5	-0.03	-2	-0.18	8.80	0.63	0.03
6	-0.22	-2	-0.47	21.04	0.59	0.22
7	-0.12	0	-0.21	4.68	0.82	0.12
8	0.93	-1	0.06	11.70	0.25	0.93
9	0.20	-2	0.02	6.60	0.72	0.20
MEDIA	-0.04	-1.78	-0.27	12.87	0.61	0.32

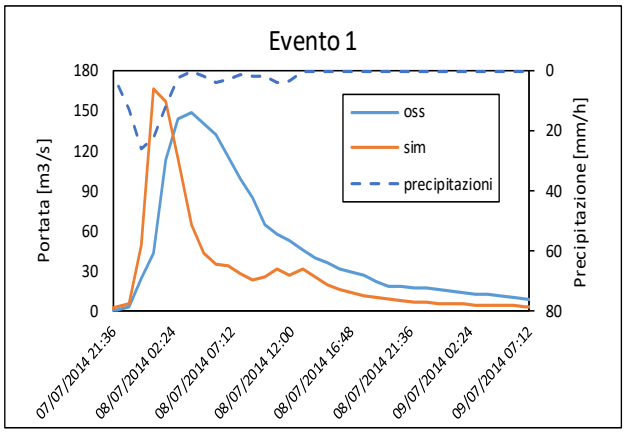
Tabella 3.70 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Palazzolo.

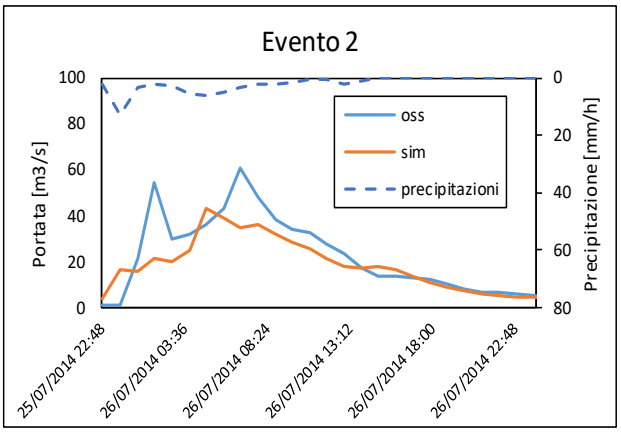
Per quanto riguarda la stazione idrometrica di Palazzolo, c'è poco da aggiungere poiché la calibrazione è stata realizzata in modo identico al caso precedente di Philip, modificando quindi 3 parametri sui 4 disponibili. Infatti, i risultati acquisiti sono molto simili, anzi leggermente migliori rispetto agli altri, se si confrontano tutti gli indici stimati, tra cui anche l'errore medio assoluto.

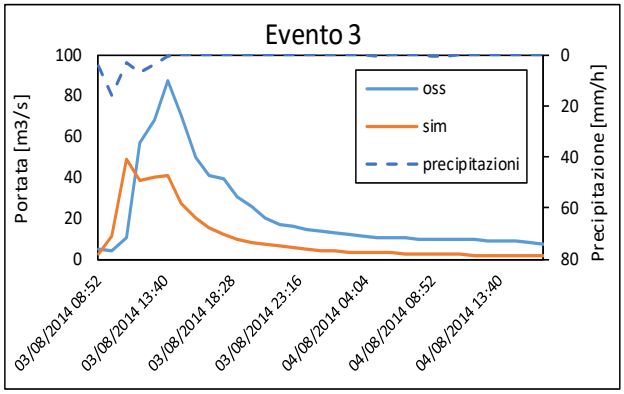
GA	-0.04	-1.78	-0.27	12.87	0.61	0.32
PH	-0.07	-1.67	-0.34	14.39	0.55	0.36
CN	-0.04	-1.67	-0.32	13.85	0.56	0.35

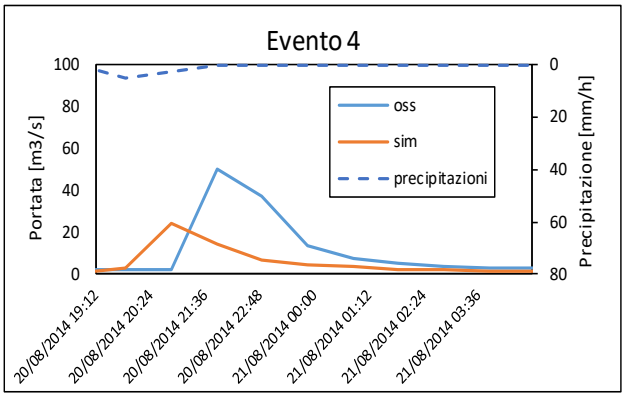
GA	PH	CN
0.12	0.15	0.19
0.29	0.30	0.31
0.44	0.42	0.42
0.51	0.51	0.47
0.03	0.16	0.15
0.22	0.34	0.22
0.12	0.22	0.18
0.93	1.00	1.03
0.20	0.15	0.17
0.32	0.36	0.35

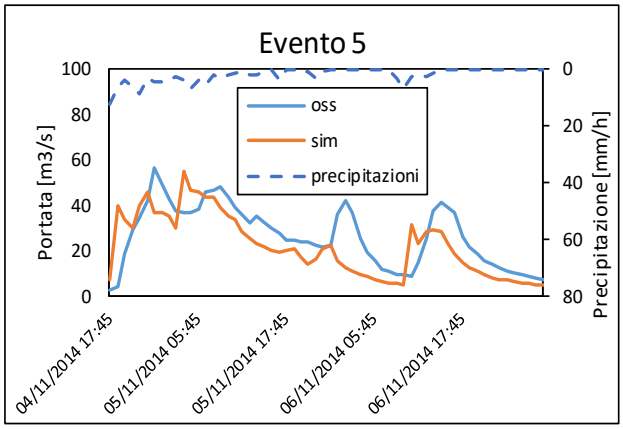
Tabella 3.71 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Palazzolo.

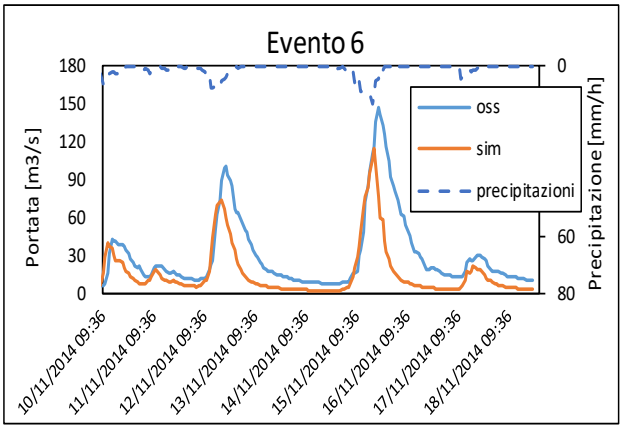

Evento 1
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
180
150
120
90
60
30
0
0
20
40
60
80
07/07/2014 21:36
08/07/2014 02:24
08/07/2014 07:12
08/07/2014 12:00
08/07/2014 16:48
08/07/2014 21:36
09/07/2014 02:24
09/07/2014 07:12

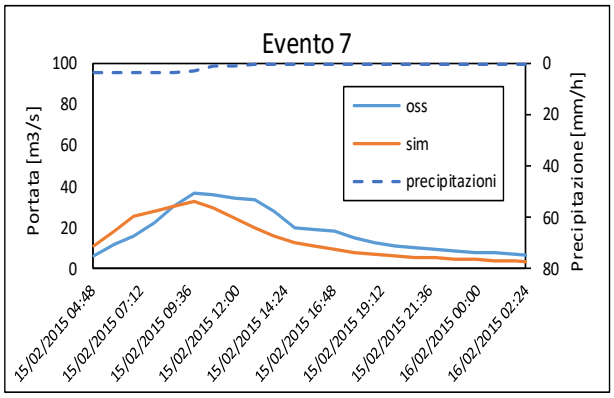

Evento 2
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
25/07/2014 22:48
26/07/2014 03:36
26/07/2014 08:24
26/07/2014 13:12
26/07/2014 18:00
26/07/2014 22:48

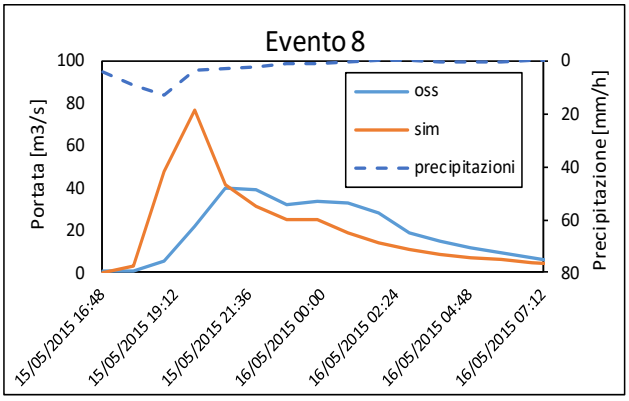

Evento 3
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
03/08/2014 08:52
03/08/2014 13:40
03/08/2014 18:28
03/08/2014 23:16
04/08/2014 04:04
04/08/2014 08:52
04/08/2014 13:40


Evento 4
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
20/08/2014 19:12
20/08/2014 20:24
20/08/2014 21:36
20/08/2014 22:48
21/08/2014 00:00
21/08/2014 01:12
21/08/2014 02:24
21/08/2014 03:36


Evento 5
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
04/11/2014 17:45
05/11/2014 05:45
05/11/2014 17:45
06/11/2014 05:45
06/11/2014 17:45


Evento 6
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
180
150
120
90
60
30
0
0
60
80
10/11/2014 09:36
11/11/2014 09:36
12/11/2014 09:36
13/11/2014 09:36
14/11/2014 09:36
15/11/2014 09:36
16/11/2014 09:36
17/11/2014 09:36
18/11/2014 09:36


Evento 7
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
15/02/2015 04:48
15/02/2015 07:12
15/02/2015 09:36
15/02/2015 12:00
15/02/2015 14:24
15/02/2015 16:48
15/02/2015 19:12
15/02/2015 21:36
16/02/2015 00:00
16/02/2015 02:24


Evento 8
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
15/05/2015 16:48
15/05/2015 19:12
15/05/2015 21:36
16/05/2015 00:00
16/05/2015 02:24
16/05/2015 04:48
16/05/2015 07:12

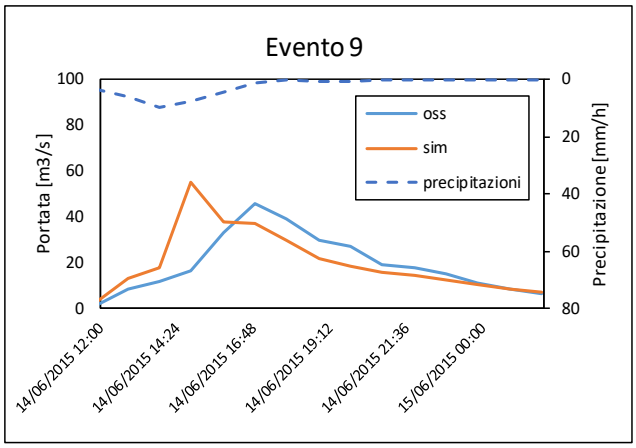


Figura 3.36 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

Per quanto riguarda le stazioni idrometriche del Lambro, è sufficiente osservare le tabelle e i grafici presentati, per convincersi di quanto detto finora, ovvero di come anche le simulazioni con GA, rispecchiano i risultati ottenuti in precedenza. Non ci sono situazioni particolari in cui un modello idrologico prevale costantemente sull'altro bensì situazioni in cui può capitare che sia meglio il CN, come per esempio per Caslino, oppure GA per Lambrugo.

Caslino

evento	inizio	fine
1	01/11/2004 13:58	02/11/2004 22:58
2	08/12/2006 19:57	10/12/2006 04:57
3	11/04/2008 09:56	13/04/2008 02:56
4	06/02/2009 04:55	08/02/2009 18:55
5	27/04/2009 18:55	30/04/2009 03:55
6	17/07/2009 03:55	18/07/2009 12:55
7	11/05/2010 02:54	14/05/2010 02:54
8	31/10/2010 14:54	02/11/2010 07:54

Tabella 3.72 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Caslino.

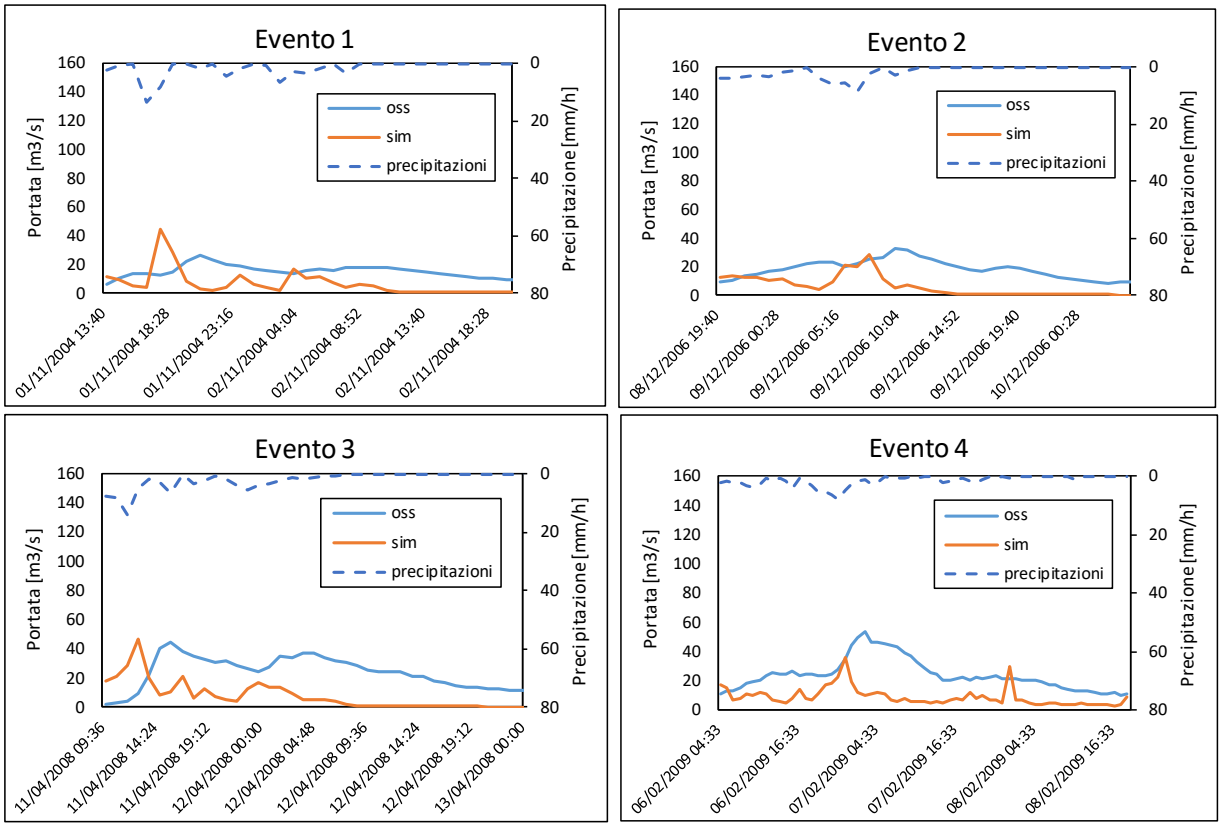
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.72	-3	-0.57	13.02	-0.88	0.72
2	-0.10	-2	-0.66	14.66	-0.14	0.10
3	0.04	-3	-0.69	21.86	-0.29	0.04
4	-0.34	-3	-0.64	18.60	0.00	0.34
5	-0.38	-2	-0.77	20.66	0.01	0.38
6	0.22	-1	-0.42	41.74	-1.78	0.22
7	0.26	-4	-0.74	19.00	-0.27	0.26
8	-0.36	-5	-0.63	24.56	-0.21	0.36
MEDIA	0.01	-2.88	-0.64	21.76	-0.45	0.30

Tabella 3.73 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Caslino.

GA	0.01	-2.88	-0.64	21.76	-0.45	0.30
PH	0.03	-2.88	-0.64	21.78	-0.45	0.32
CN	0.06	-2.88	-0.66	21.28	-0.34	0.24

GA	PH	CN
0.72	0.82	0.92
0.10	0.10	0.14
0.04	0.07	0.10
0.34	0.33	0.22
0.38	0.38	0.21
0.22	0.20	0.12
0.26	0.29	0.09
0.36	0.34	0.08
0.30	0.32	0.24

Tabella 3.74 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Caslino.



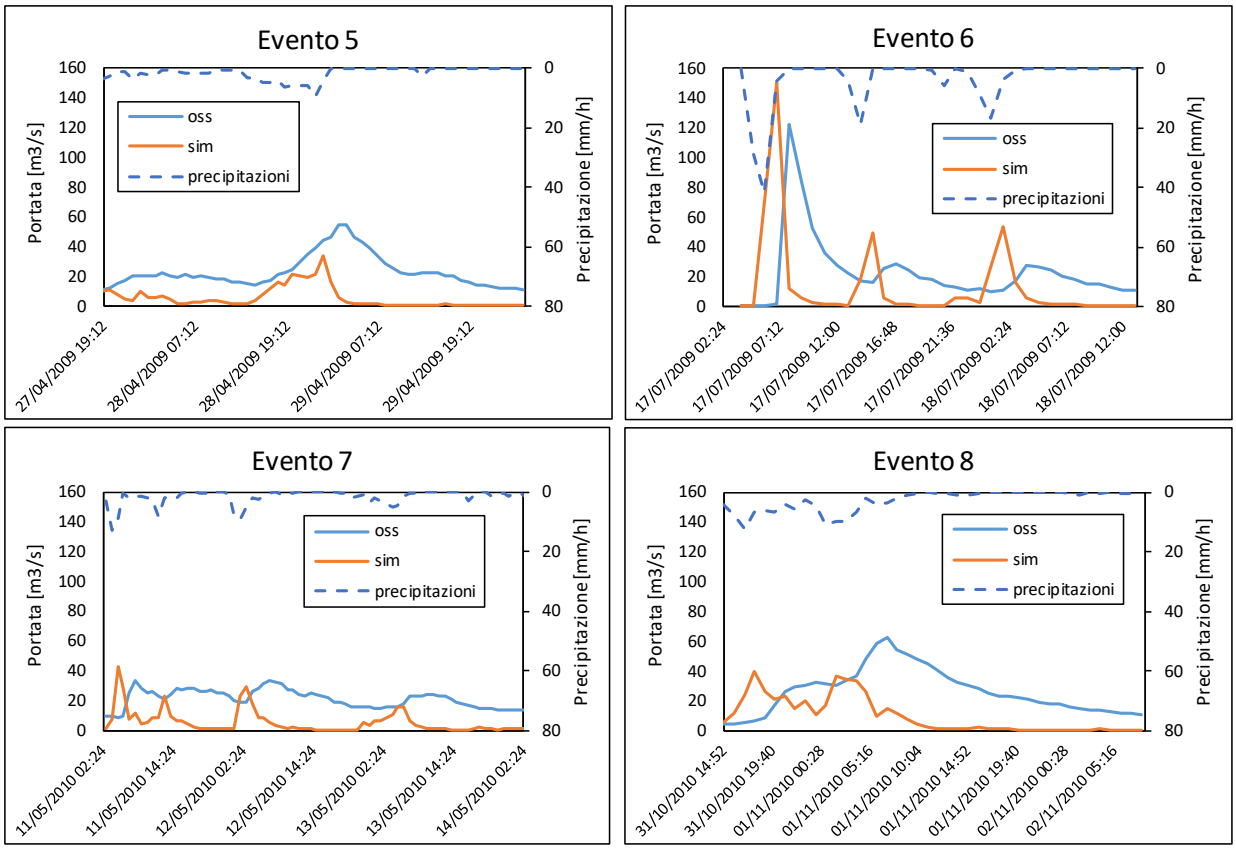


Figura 3.37 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

evento	inizio	fine
1	24/11/2003 10:59	08/12/2003 05:59
2	28/04/2004 03:59	20/05/2004 03:58
3	05/08/2004 03:58	05/08/2004 20:58
4	07/12/2006 20:57	20/12/2006 10:57
5	06/06/2007 11:56	20/06/2007 12:56
6	02/02/2009 12:55	16/02/2009 09:55
7	26/04/2009 12:55	08/05/2009 06:55
8	02/05/2010 20:54	22/05/2010 01:54
9	14/08/2010 15:54	21/08/2010 18:54

Tabella 3.75 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Lambrugo.

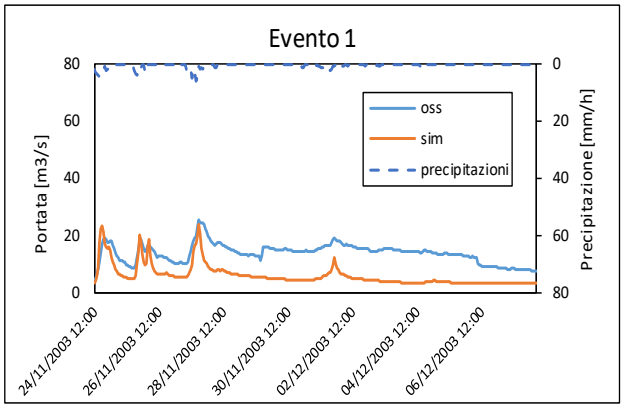
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash[-]	err assoluto
1	-0.03	0	-0.57	8.41	0.02	0.03
2	-0.34	-3	-0.71	14.49	0.09	0.34
3	0.81	0	0.04	8.70	0.35	0.81
4	-0.08	-3	-0.50	7.13	0.16	0.08
5	0.11	1	-0.56	7.10	0.08	0.11
6	-0.01	0	-0.43	9.26	0.27	0.01
7	0.06	-4	-0.53	11.45	0.13	0.06
8	-0.01	-1	-0.57	13.74	0.09	0.01
9	1.13	-2	-0.36	9.97	0.07	1.13
MEDIA	0.18	-1.33	-0.47	10.03	0.14	0.29

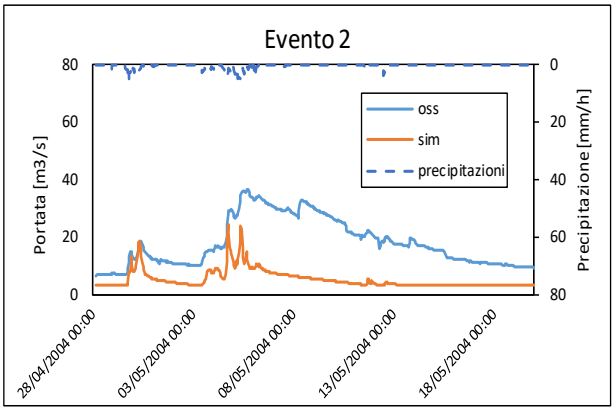
Tabella 3.76 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Lambrugo.

GA	0.18	-1.33	-0.47	10.03	0.14	0.29
PH	0.20	-1.44	-0.46	10.17	0.12	0.32
CN	0.07	-1.44	-0.53	10.89	0.12	0.35

GA	PH	CN
0.03	0.03	0.14
0.34	0.34	0.41
0.81	1.05	0.92
0.08	0.12	0.28
0.11	0.14	0.02
0.01	0.02	0.16
0.06	0.03	0.13
0.01	0.01	0.13
1.13	1.13	0.97
0.29	0.32	0.35

Tabella 3.77 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Lambrugo.





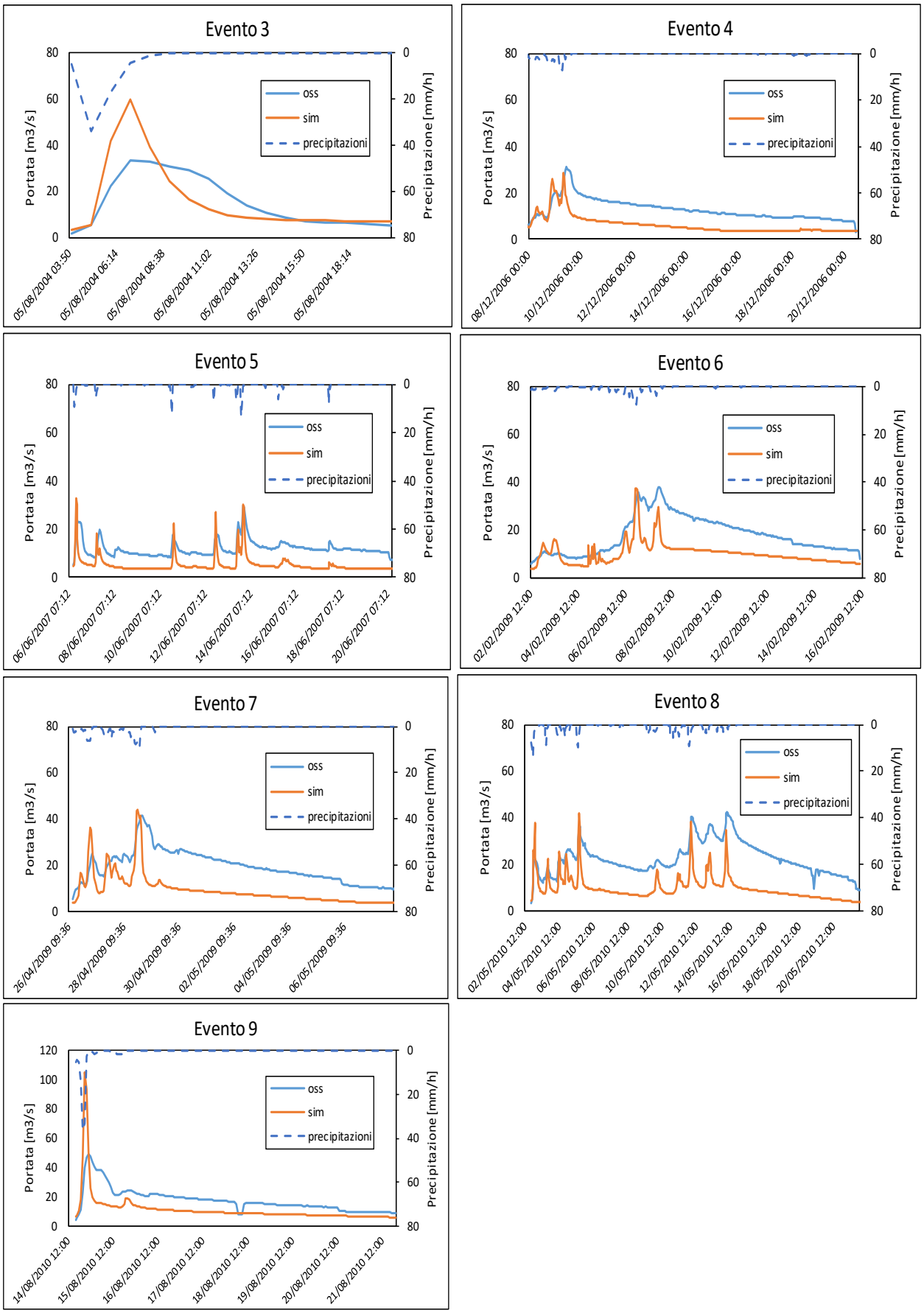


Figura 3.38 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

Peregallo

evento	inizio	fine
1	04/05/2004 14:59	10/05/2004 00:59
2	02/10/2005 12:57	03/10/2005 04:57
3	13/06/2007 15:56	16/06/2007 05:56
4	01/07/2008 01:55	01/07/2008 12:55
5	02/11/2008 23:55	15/11/2008 02:55
6	26/04/2009 16:55	06/05/2009 10:55
7	02/05/2010 21:54	21/05/2010 23:54
8	14/08/2010 14:54	21/08/2010 06:54
9	31/10/2010 11:54	27/11/2010 03:54
10	21/12/2010 23:54	31/12/2010 22:54

Tabella 3.78 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Peregallo.

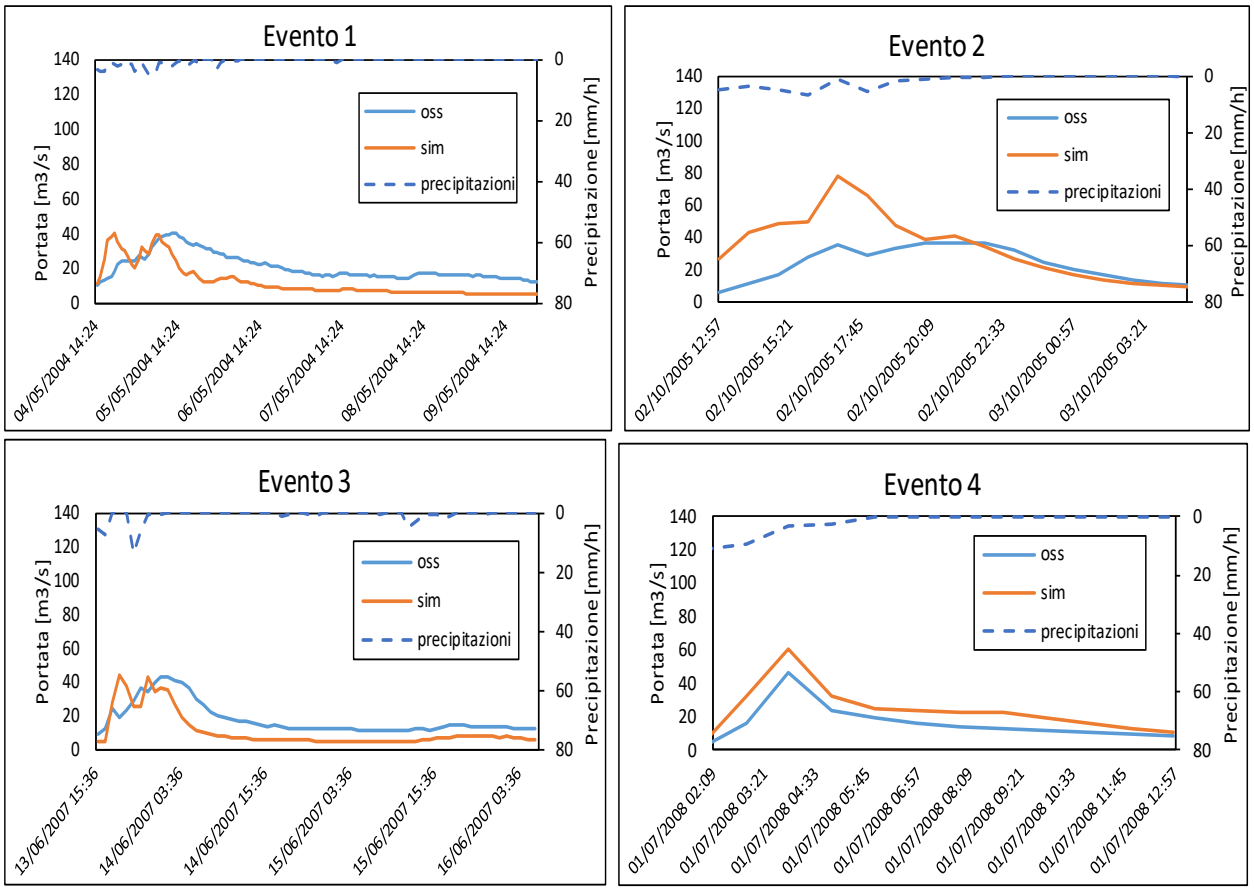
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.00	-5	-0.40	10.67	0.07	0.00
2	1.14	0	0.48	18.12	0.05	1.14
3	0.04	-3	-0.39	8.83	0.41	0.04
4	0.30	0	0.48	14.07	-0.22	0.30
5	0.13	-1	-0.33	10.31	0.46	0.13
6	-0.13	-1	-0.51	22.44	0.33	0.13
7	-0.07	-4	-0.61	24.37	0.14	0.07
8	0.47	-5	-0.52	22.33	0.24	0.47
9	0.05	1	-0.65	23.94	0.22	0.05
10	-0.05	-4	-0.50	14.71	0.15	0.05
MEDIA	0.19	-2.20	-0.30	16.98	0.19	0.24

Tabella 3.79 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Peregallo.

GA	0.19	-2.20	-0.30	16.98	0.19	0.24
PH	0.08	-2.20	-0.30	15.98	0.25	0.24
CN	0.04	-2.60	-0.34	17.23	0.22	0.27

GA	PH	CN
0.00	0.06	0.01
1.14	0.96	1.02
0.04	0.05	0.00
0.30	0.11	0.13
0.13	0.02	0.07
0.13	0.29	0.36
0.07	0.15	0.18
0.47	0.45	0.42
0.05	0.14	0.27
0.05	0.20	0.27
0.24	0.24	0.27

Tabella 3.80 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Peregallo.



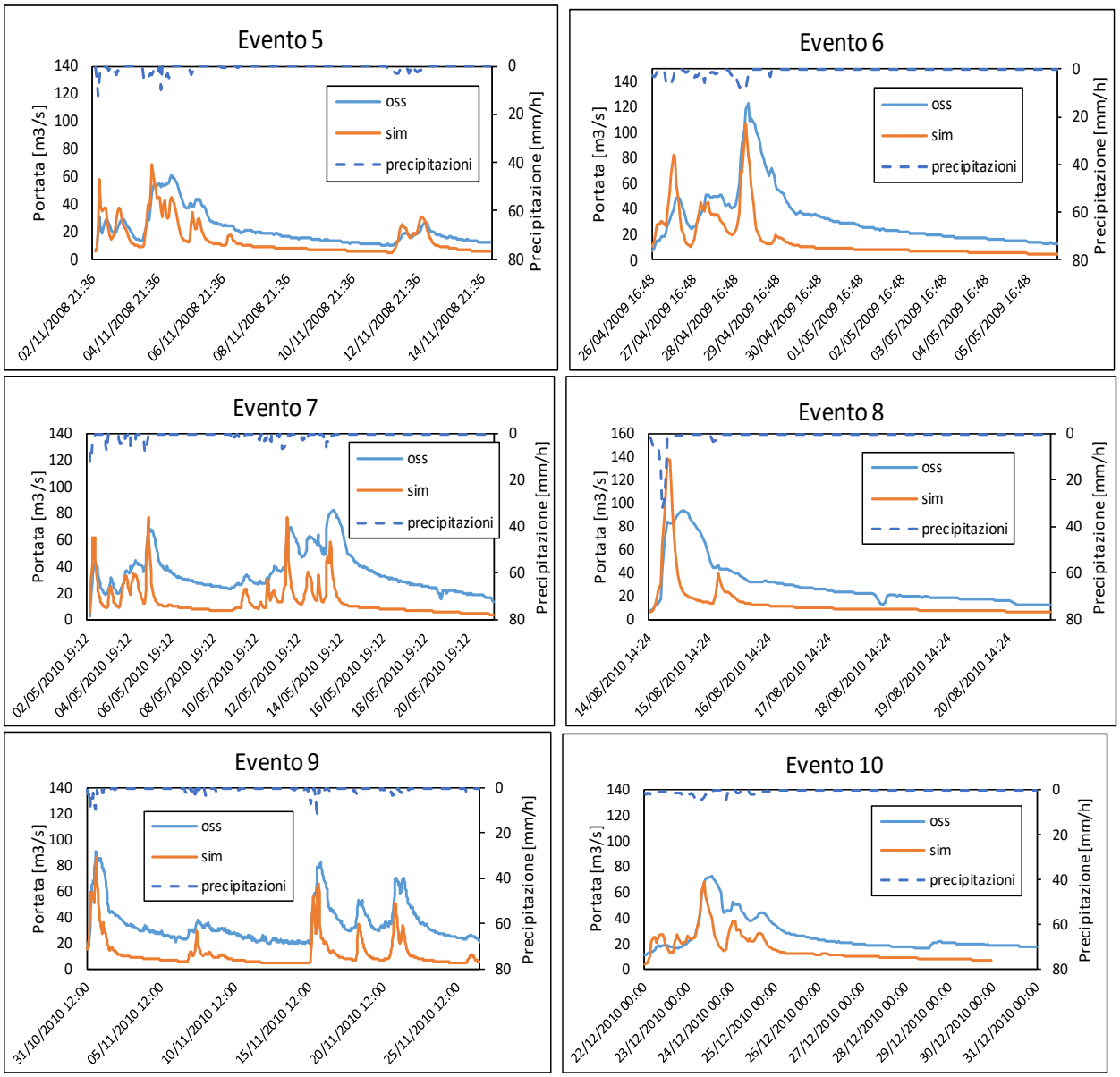


Figura 3.39 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

Milano Feltre

evento	inizio	fine
1	31/10/2003 08:59	01/11/2003 12:59
2	29/04/2004 17:59	01/05/2004 06:59
3	09/09/2005 06:58	10/09/2005 06:58
4	14/09/2006 19:57	16/09/2006 07:57
5	16/09/2007 23:56	17/09/2007 12:56
6	17/05/2008 20:56	19/05/2008 04:56
7	07/07/2009 02:55	07/07/2009 20:55
8	02/05/2010 21:54	19/05/2010 12:54
9	18/09/2010 08:54	20/09/2010 13:54
10	30/10/2010 23:54	30/11/2010 04:54

Tabella 3.81 Eventi presi in esame per la calibrazione della stazione di Milano Feltre.

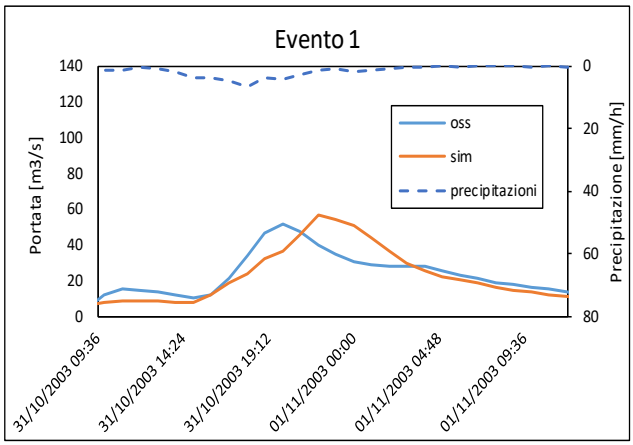
evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.09	2	-0.02	8.66	0.48	0.09
2	-0.20	1	-0.18	9.60	0.70	0.20
3	-0.16	0	-0.09	14.25	0.66	0.16
4	0.62	0	0.37	16.09	0.25	0.62
5	-0.24	0	-0.11	15.28	0.65	0.24
6	-0.34	2	-0.34	16.30	0.61	0.34
7	0.08	1	-0.13	12.56	0.68	0.08
8	-0.10	-1	-0.60	26.75	0.17	0.10
9	0.34	-3	-0.36	31.22	0.12	0.34
10	0.02	2	-0.63	23.98	0.35	0.02
MEDIA	0.01	0.40	-0.21	17.47	0.47	0.22

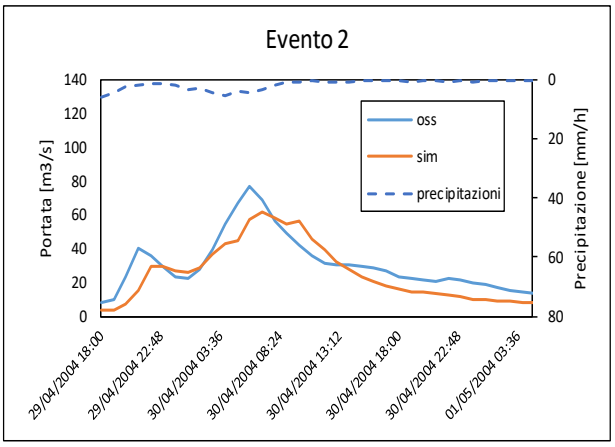
Tabella 3.82 Stima degli indici per gli eventi della stazione di Milano Feltre.

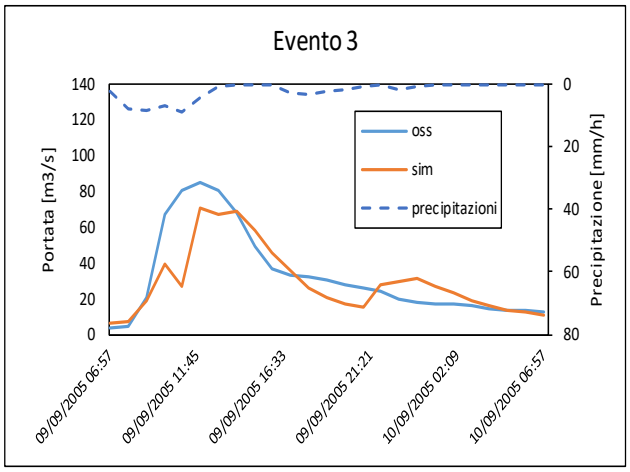
GA	0.01	0.40	-0.21	17.47	0.47	0.22
PH	-0.07	1.00	-0.20	17.13	0.49	0.22
CN	-0.06	0.60	-0.20	16.68	0.52	0.23

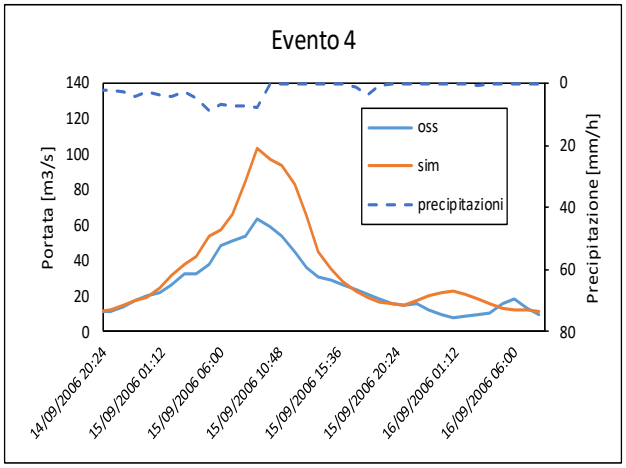
GA	PH	CN
0.09	0.09	0.02
0.20	0.26	0.28
0.16	0.25	0.19
0.62	0.41	0.35
0.24	0.30	0.17
0.34	0.38	0.40
0.08	0.06	0.20
0.10	0.16	0.14
0.34	0.22	0.28
0.02	0.12	0.24
0.22	0.22	0.23

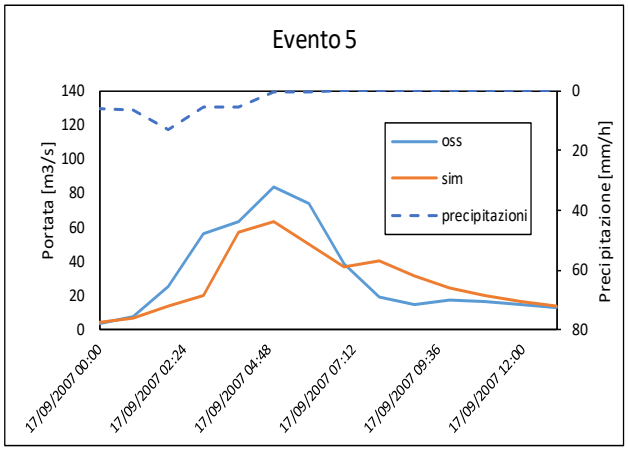
Tabella 3.83 Confronto dell'errore assoluto tra i tre modelli utilizzati per gli eventi della stazione di Milano Feltre.

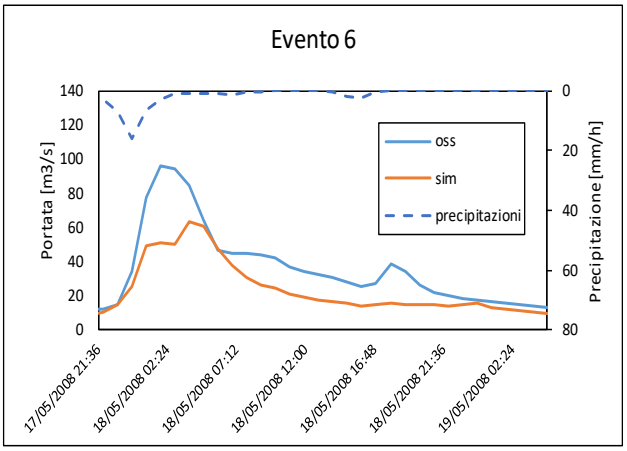

Evento 1
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
31/10/2003 09:36
31/10/2003 14:24
31/10/2003 19:12
01/11/2003 00:00
01/11/2003 04:48
01/11/2003 09:36

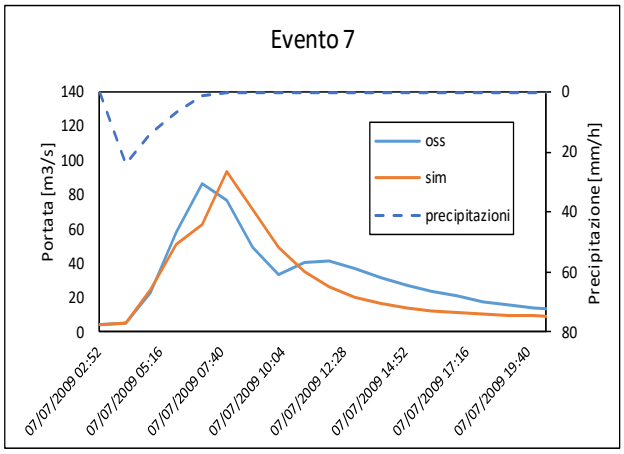

Evento 2
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
29/04/2004 18:00
29/04/2004 22:48
30/04/2004 03:36
30/04/2004 08:24
30/04/2004 13:12
30/04/2004 18:00
30/04/2004 22:48
01/05/2004 03:36

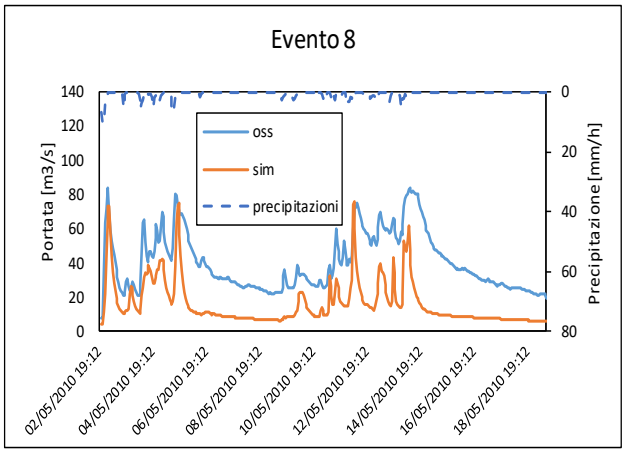

Evento 3
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
09/09/2005 06:57
09/09/2005 11:45
09/09/2005 16:33
09/09/2005 21:21
10/09/2005 02:09
10/09/2005 06:57


Evento 4
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
14/09/2006 20:24
15/09/2006 01:12
15/09/2006 06:00
15/09/2006 10:48
15/09/2006 15:36
15/09/2006 20:24
16/09/2006 01:12
16/09/2006 06:00


Evento 5
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
17/09/2007 00:00
17/09/2007 02:24
17/09/2007 04:48
17/09/2007 07:12
17/09/2007 09:36
17/09/2007 12:00


Evento 6
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
17/05/2008 21:36
18/05/2008 02:24
18/05/2008 07:12
18/05/2008 12:00
18/05/2008 16:48
18/05/2008 21:36
19/05/2008 02:24


Evento 7
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
07/07/2009 02:52
07/07/2009 05:16
07/07/2009 07:40
07/07/2009 10:04
07/07/2009 12:28
07/07/2009 14:52
07/07/2009 17:16
07/07/2009 19:40


Evento 8
Portata [m3/s]
Precipitazione [mm/h]
oss
sim
precipitazioni
02/05/2010 19:12
04/05/2010 19:12
06/05/2010 19:12
08/05/2010 19:12
10/05/2010 19:12
12/05/2010 19:12
14/05/2010 19:12
16/05/2010 19:12
18/05/2010 19:12

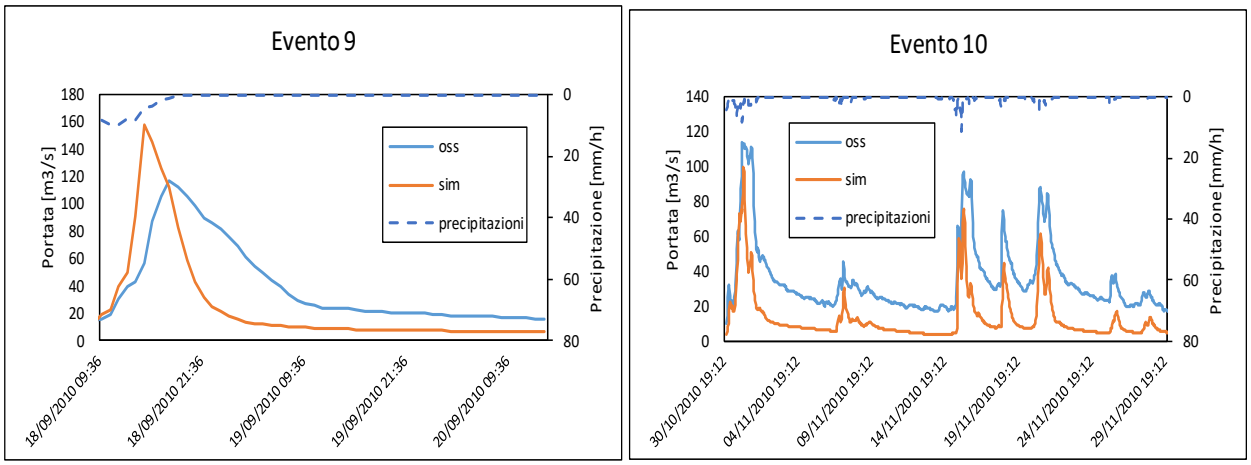


Figura 3.40 Risultati della calibrazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

Arrivati a questo punto, può dirsi definitivamente conclusa la calibrazione: sono state eseguite tutte le simulazioni necessarie, senza dare particolari problemi e ottenendo dei risultati più che soddisfacenti per quasi tutte le sezioni di interesse. Si ricorda che è la prima volta che si è svolta una calibrazione per un arco temporale così lungo, con il modello Green-Ampt in continuo. Come era già stato fatto nei casi precedenti, si riporta infine un'ulteriore tabella che individua il modo in cui sono stati calibrati i parametri per le varie stazioni di misura. Ci sono sicuramente alcune differenze rispetto a Philip, per esempio sul Θs a Lozza o sul kprof a Peregallo e Feltre, ma comunque di poco conto. Una cosa importante però da dire, riguarda il fatto che, come già successo per il metodo di Philip, è stato fondamentale ridurre la ridurre la permeabilità del terreno per tutte le stazioni, eccetto Caslino. Infatti, in fase di pre calibrazione, si notava una costante e corposa sottostima delle portate iniziali.

	Ksat	Θs	kprof	prof
Lozza	0.1	1.3	/	/
Castellanza	0.1	/	10000	/
Cantù	0.1	/	10000	/
Palazzolo	0.01	/	20000	0.1
Caslino	/	/	10000	/
Lambrugo	0.02	/	30000	0.1
Peregallo	0.02	/	30000	0.1
Feltre	0.02	/	100000	0.1

Tabella 3.84 Riassunto della calibrazione con il metodo Green Ampt con tutti i parametri utilizzati, per ogni stazione idrometrica.

3.3.2 Validazione di Green Ampt

Si conclude questa prima fase del lavoro con la validazione di GA, riportando tutte le tabelle con gli indici stimati e i grafici corrispondenti. I risultati ottenuti rivelano che per il bacino dell'Olona e del Lambro sono migliori gli indici della calibrazione che della validazione, mentre per il bacino del Seveso è il contrario. Ciò non ha un particolare significato fisico o idrologico ma del tutto casuale, come visto in precedenza con le altre validazioni. Infine si riporta il confronto della media degli indici stimati, come era già stato fatto per

la calibrazione: in alcuni casi sembra prevalere il CN, almeno per quanto riguarda l'errore medio relativo sul picco.

Lozza

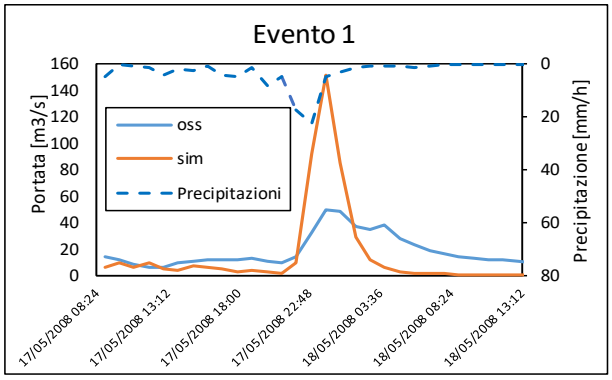
evento	inizio	fine
1	17/05/2008 08:56	18/05/2008 13:56
2	05/02/2009 20:55	09/02/2009 04:55
3	27/04/2009 00:55	30/04/2009 08:55
4	07/07/2009 02:55	07/07/2009 11:55
5	09/05/2010 07:54	15/05/2010 02:54

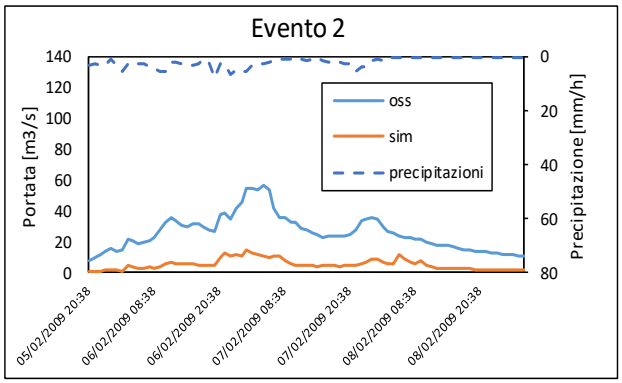
Tabella 3.85 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lozza e stima degli indici

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	2.05	-1	-0.16	25.67	0.40	2.05
2	-0.73	-4	-0.79	22.37	0.10	0.73
3	-0.61	-2	-0.90	26.14	0.07	0.61
4	0.44	-2	-0.02	10.86	0.65	0.44
5	0.60	-1	-0.81	20.62	-0.05	0.60

MEDIA	0.35	-2.00	-0.54	21.13	0.23	0.88

VALID GA	0.35	-2.00	-0.54	21.13	0.23	0.88
VALID PH	0.17	-0.80	-0.60	20.72	0.25	0.73
VALID CN	-0.004	-0.60	-0.53	16.46	0.34	0.44





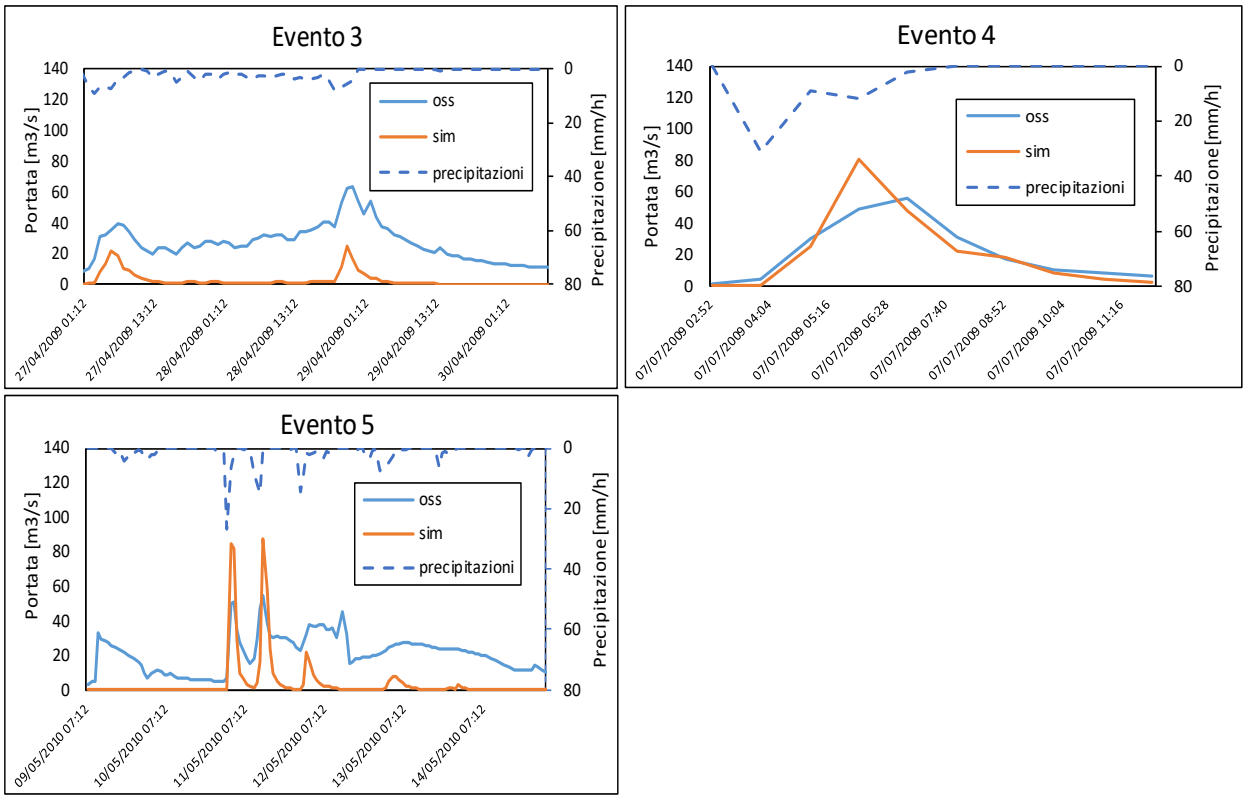


Figura 3.41 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lozza.

Castellanza

evento	inizio	fine
1	17/05/2008 02:56	19/05/2008 01:56
2	05/02/2009 18:55	11/02/2009 03:55
3	26/04/2009 13:55	02/05/2009 02:55
4	31/10/2010 01:54	03/11/2010 03:54
5	22/12/2010 09:54	26/12/2010 06:54

Tabella 3.86 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Castellanza e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	1.60	-2	-0.33	22.85	-0.79	1.60
2	-0.50	-1	-0.65	17.77	0.29	0.50
3	-0.36	3	-0.71	21.94	0.25	0.36
4	0.01	0	-0.55	15.71	0.34	0.01
5	-0.24	0	-0.63	12.78	0.17	0.24

MEDIA	0.10	0.00	-0.57	18.21	0.05	0.54

VALID GA	0.10	0.00	-0.57	18.21	0.05	0.54
VALID PH	0.16	-1.40	-0.38	14.38	0.17	0.50
VALID CN	0.16	0.60	-0.60	16.71	0.26	0.29

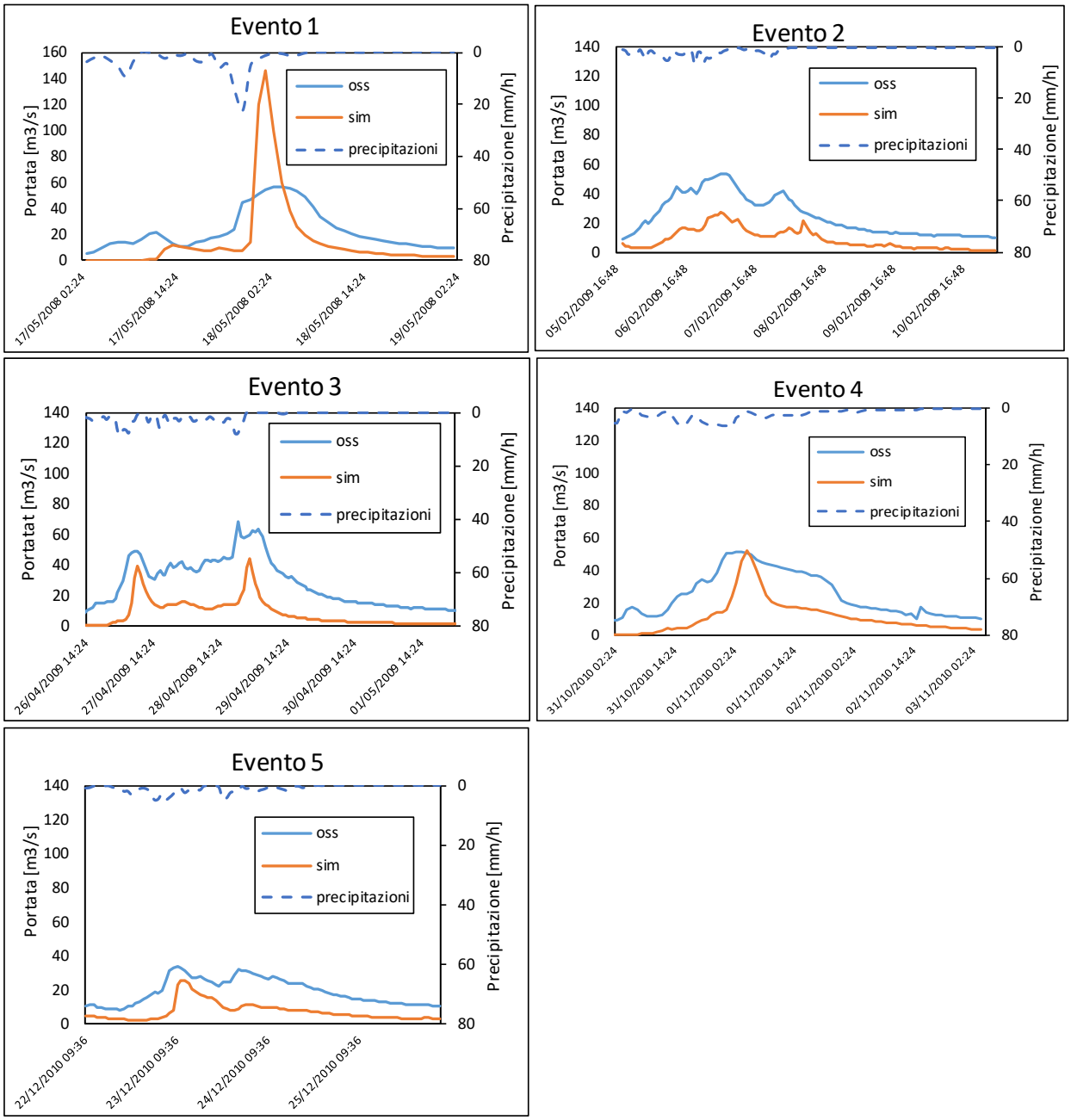


Figura 3.42 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Castellanza.

Cantù

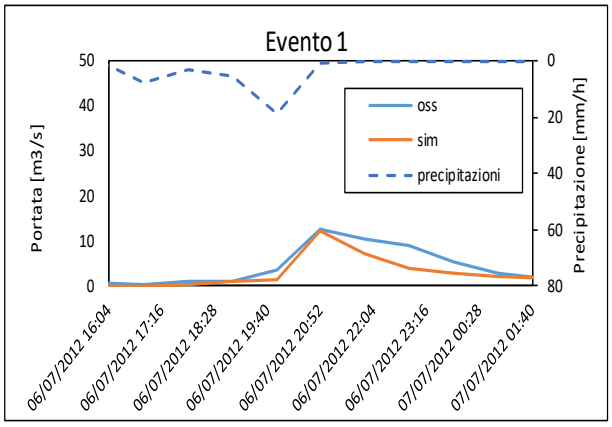
evento	inizio	fine
1	06/07/2012 15:53	07/07/2012 01:53
2	12/09/2012 08:52	12/09/2012 18:52
3	23/10/2013 09:52	23/10/2013 22:52
4	07/07/2014 20:51	08/07/2014 14:51
5	23/09/2015 05:50	23/09/2015 14:50

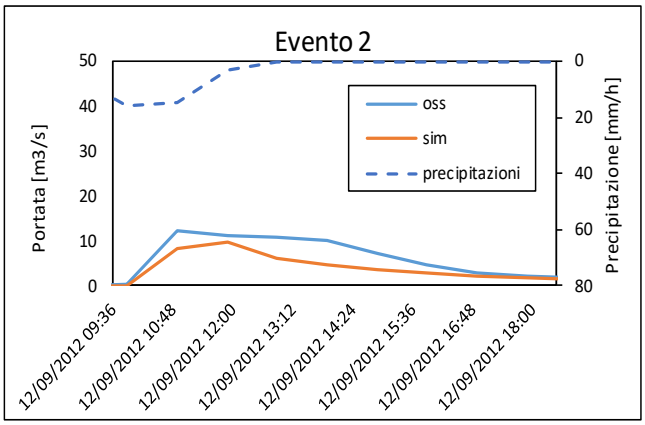
Tabella 3.87 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Cantù e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.02	0	-0.31	2.09	0.77	0.02
2	-0.21	1	-0.36	2.85	0.67	0.21
3	0.48	0	0.02	2.70	0.39	0.48
4	0.40	1	-0.13	7.33	0.00	0.40
5	0.42	-1	0.02	5.53	-1.38	0.42

MEDIA	0.21	0.20	-0.15	4.10	0.09	0.30

VALID GA	0.21	0.20	-0.15	4.10	0.09	0.30
VALID PH	0.03	-0.40	-0.45	5.33	0.24	0.19
VALID CN	0.06	-0.40	-0.54	6.39	0.05	0.25





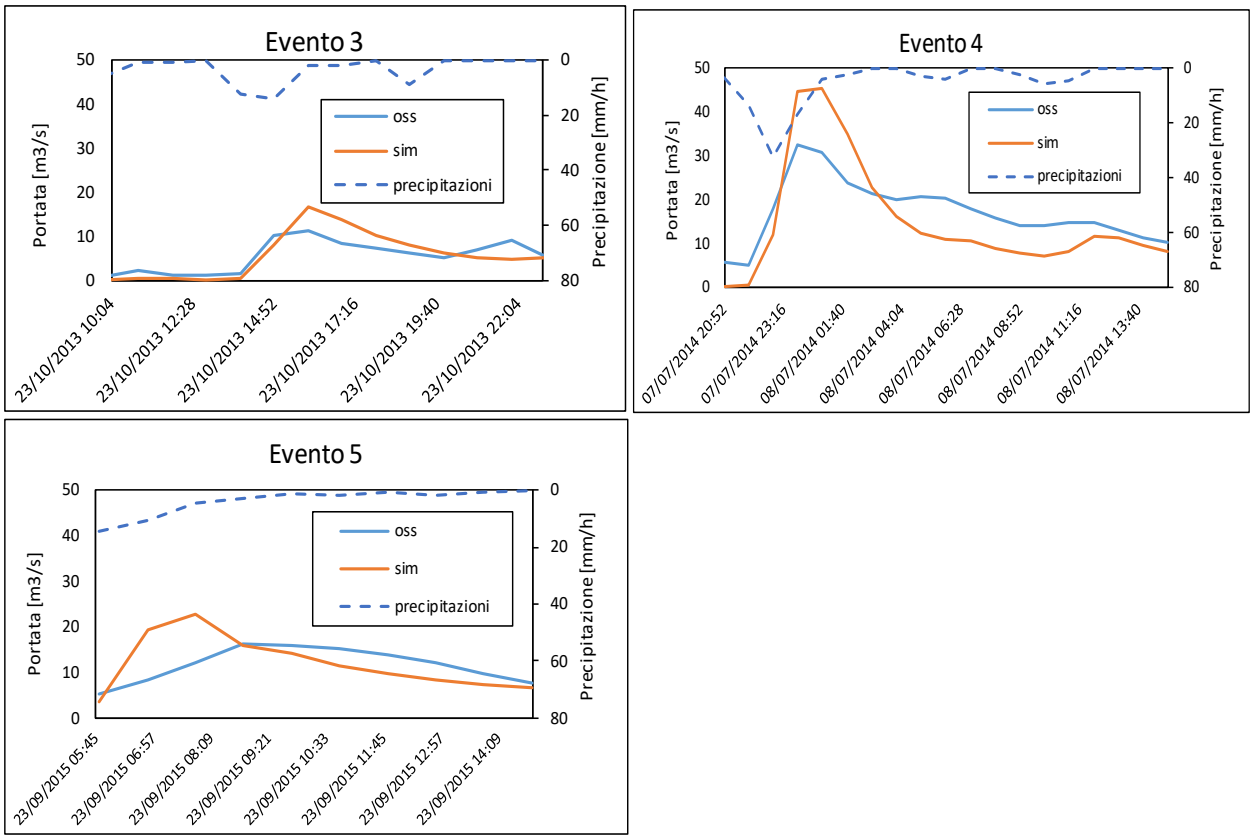


Figura 3.43 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Cantù.

Palazzolo

evento	inizio	fine
1	09/02/2016 18:50	10/02/2016 03:50
2	05/03/2016 09:50	06/03/2016 04:50
3	11/05/2016 19:50	12/05/2016 20:50
4	04/06/2016 05:50	04/06/2016 17:50
5	16/06/2016 15:50	17/06/2016 00:50

Tabella 3.88 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Palazzolo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.04	-2	0.07	9.32	-0.37	0.04
2	-0.14	-3	-0.22	19.76	0.12	0.14
3	0.03	-2	0.00	6.92	0.39	0.03
4	0.19	-4	-0.19	14.14	-0.79	0.19
5	-0.07	-1	-0.33	14.44	0.34	0.07

MEDIA	-0.01	-2.40	-0.13	12.92	-0.06	0.09

VALID GA	-0.01	-2.40	-0.13	12.92	-0.06	0.09
VALID PH	-0.03	-2.40	-0.22	14.10	-0.16	0.14
VALID CN	0.00	-2.40	-0.24	14.74	-0.26	0.15

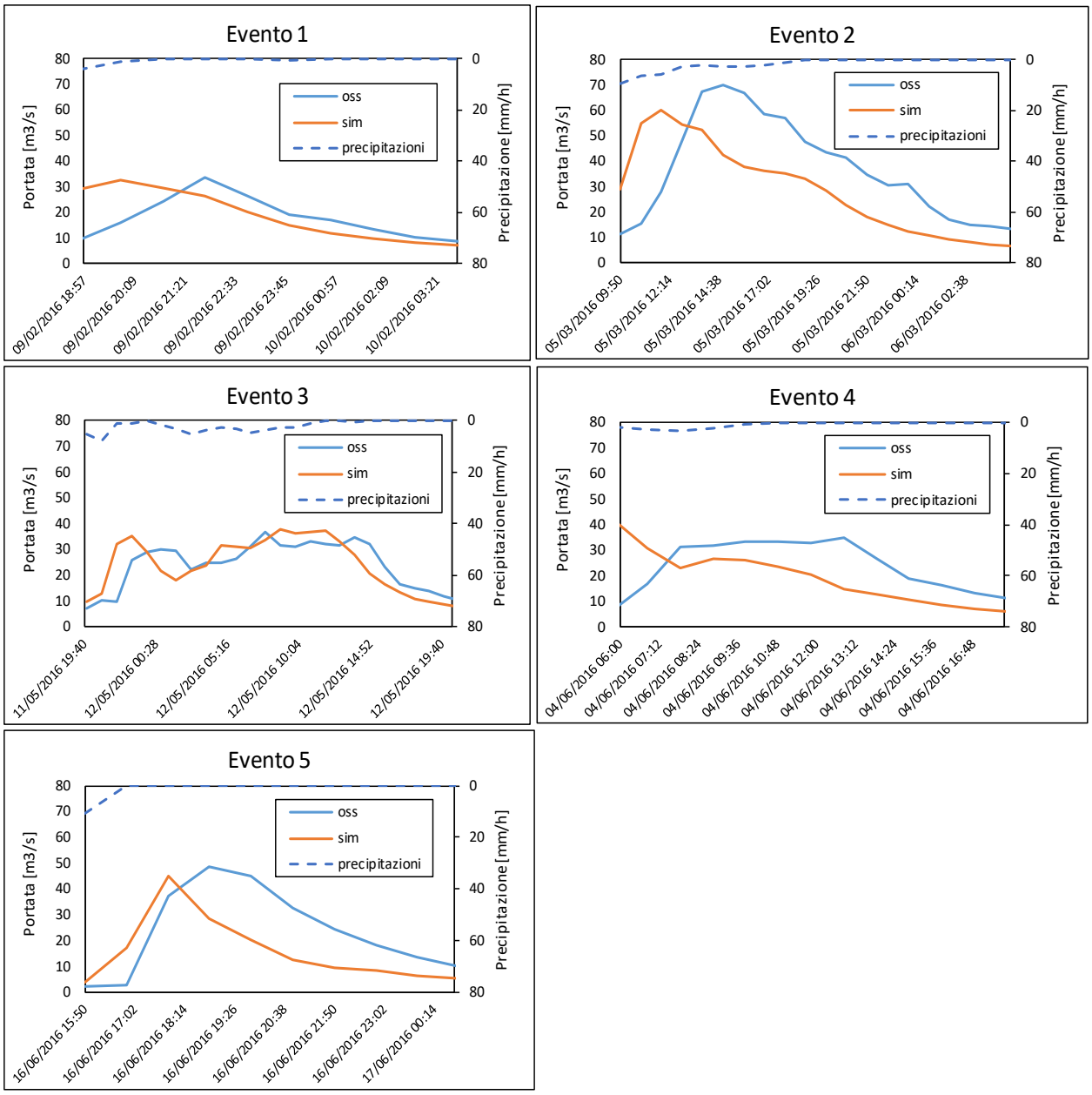


Figura 3.44 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Palazzolo.

Caslino

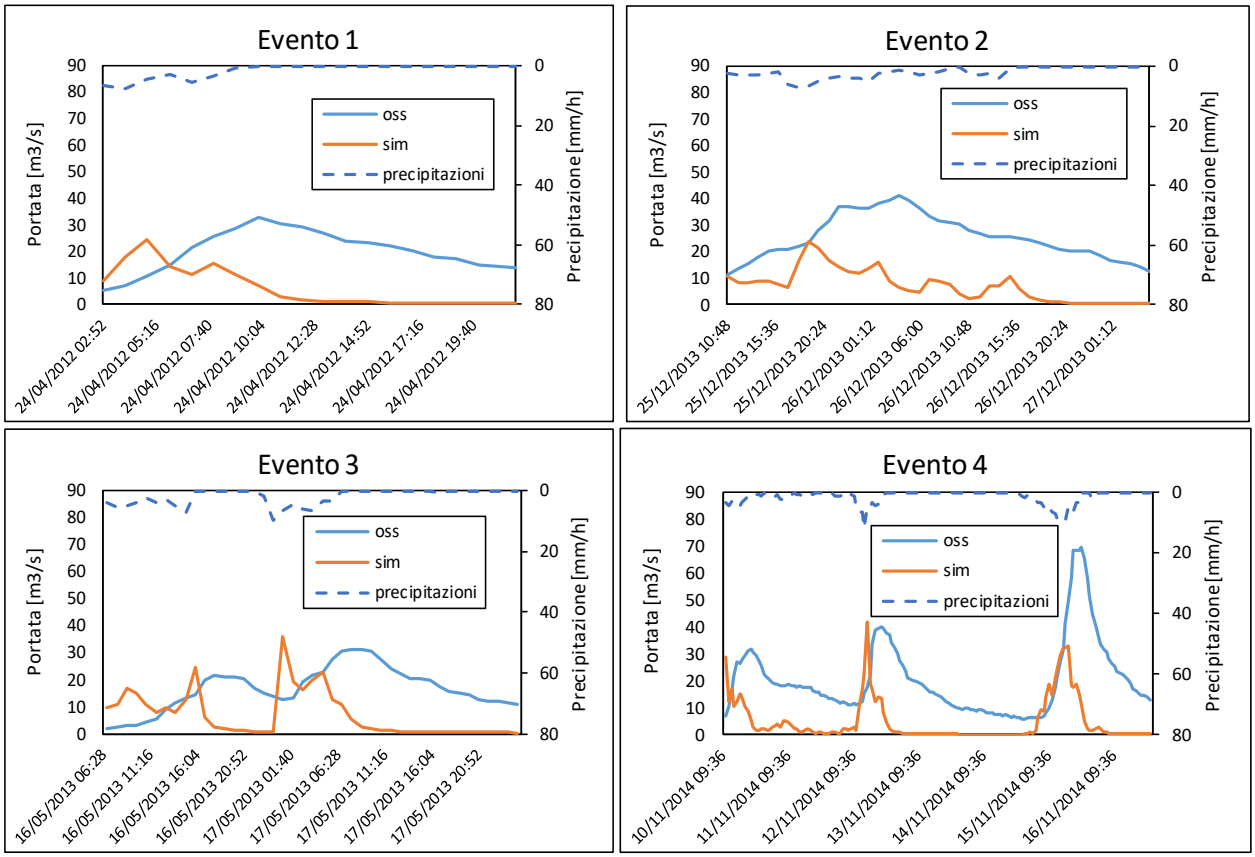
evento	inizio	fine
1	24/04/2012 02:53	24/04/2012 21:53
2	25/12/2013 10:51	27/12/2013 04:51
3	16/05/2013 06:52	18/05/2013 01:52
4	10/11/2014 10:51	16/11/2014 22:51
5	11/05/2016 19:50	12/05/2016 16:50

Tabella 3.89 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Caslino e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	-0.26	-2	-0.69	18.31	-0.33	0.26
2	-0.42	-2	-0.72	19.97	0.01	0.42
3	0.14	-4	-0.59	15.83	-0.60	0.14
4	-0.40	-3	-0.76	20.59	0.03	0.40
5	0.18	-4	-0.61	12.41	-0.45	0.18

MEDIA	-0.15	-3.00	-0.68	17.42	-0.27	0.28

VALID GA	-0.15	-3.00	-0.68	17.42	-0.27	0.28
VALID PH	-0.15	-3.00	-0.68	17.41	-0.26	0.27
VALID CN	-0.21	-2.80	-0.73	17.29	-0.13	0.22



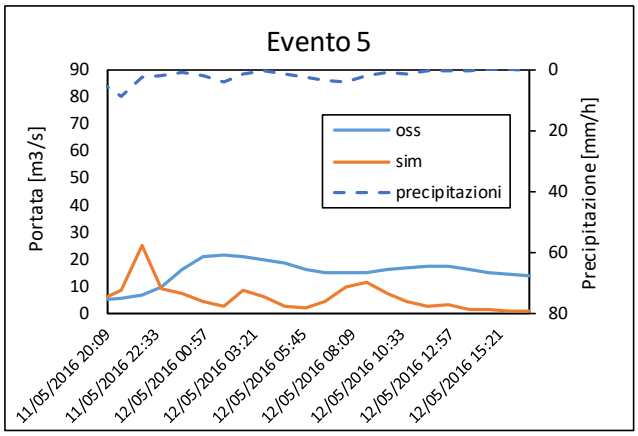


Figura 3.45 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Caslino.

Lambrugo

evento	inizio	fine
1	19/04/2012 13:53	04/05/2012 00:53
2	04/11/2012 00:52	07/11/2012 14:52
3	09/06/2013 13:52	12/06/2013 10:52
4	29/06/2014 10:51	22/07/2014 06:51
5	04/06/2016 00:50	21/06/2016 18:50

Tabella 3.90 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Lambrugo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.28	-6	-0.55	7.70	-0.01	0.28
2	0.45	-3	-0.26	4.25	0.36	0.45
3	0.58	-1	-0.16	3.89	0.39	0.58
4	0.39	-1	-0.44	7.27	0.35	0.39
5	0.48	-2	-0.51	7.09	-0.09	0.48
MEDIA	0.44	-2.60	-0.39	6.04	0.20	0.44
VALID GA	0.44	-2.60	-0.39	6.04	0.20	0.44
VALID PH	0.45	-2.60	-0.38	5.98	0.20	0.45
VALID CN	0.29	-2.60	-0.51	6.92	0.20	0.29

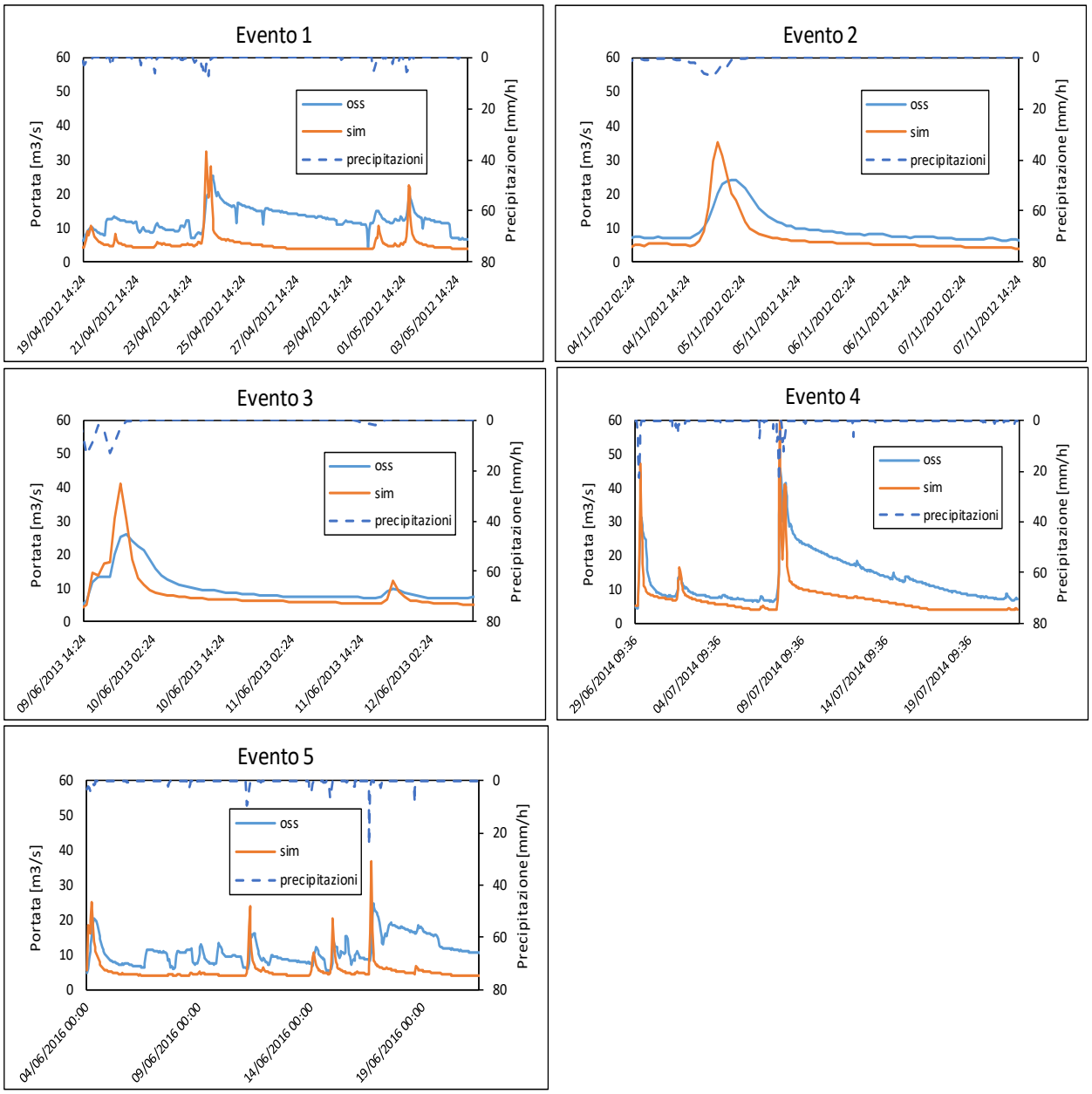


Figura 3.46 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Lambrugo.

Peregallo

evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 12:53
2	09/06/2013 14:52	10/06/2013 18:52
3	14/06/2014 16:51	15/06/2014 05:51
4	15/05/2015 15:50	16/05/2015 09:50
5	16/06/2016 14:50	19/06/2016 22:50

Tabella 3.91 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Peregallo e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.59	-1	0.22	16.99	-0.94	0.59
2	0.41	-2	-0.11	12.83	-0.09	0.41
3	0.36	-2	-0.10	24.65	-0.56	0.36
4	0.60	-5	0.30	23.16	-1.30	0.60
5	-0.08	-3	-0.63	13.96	0.11	0.08

MEDIA	0.38	-2.60	-0.06	18.32	-0.55	0.41

VALID GA	0.38	-2.60	-0.06	18.32	-0.55	0.41
VALID PH	0.31	-2.60	-0.07	16.45	-0.27	0.33
VALID CN	0.31	-2.20	-0.12	17.35	-0.41	0.32

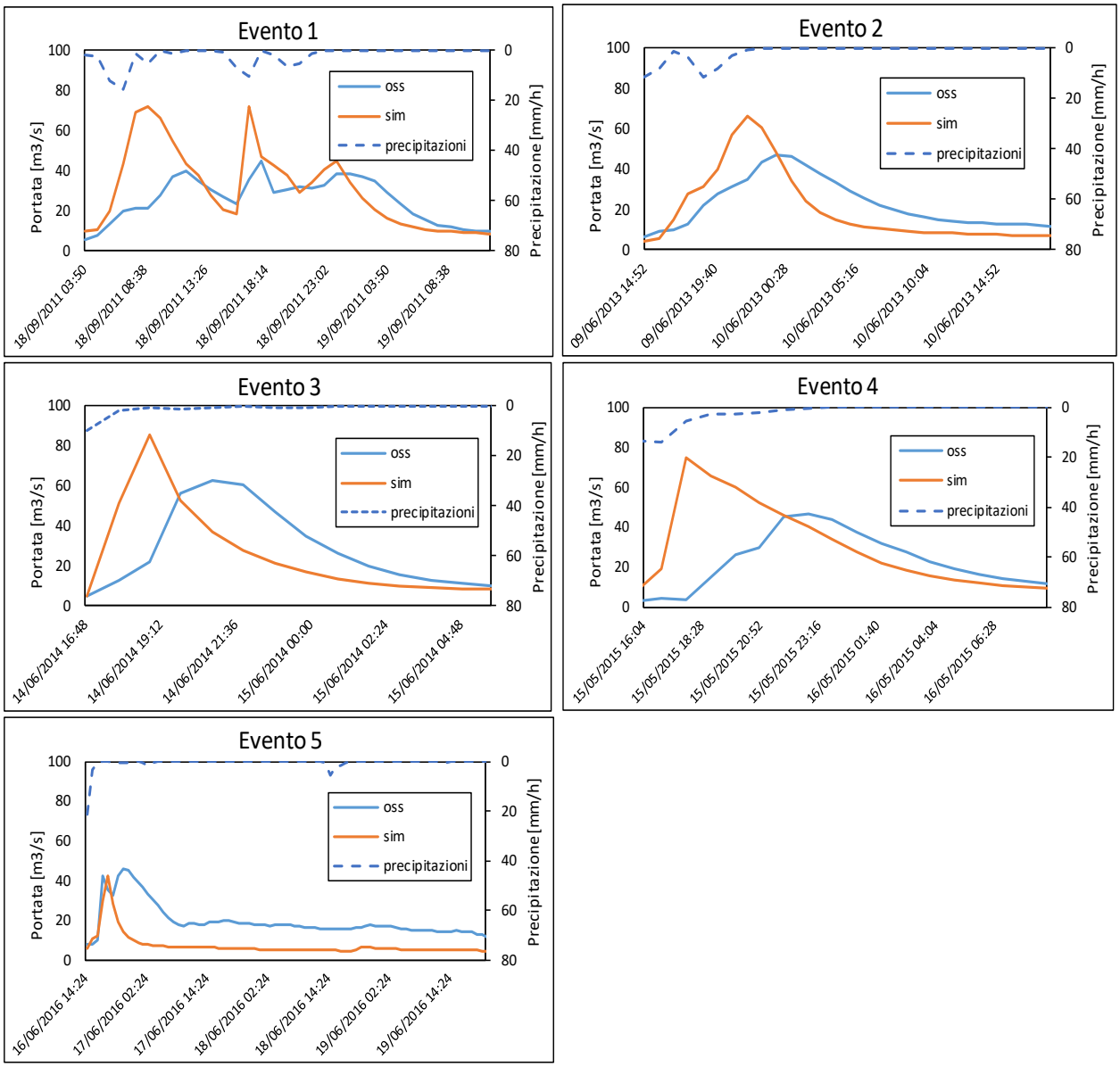


Figura 3.47 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Peregallo.

Milano Feltre

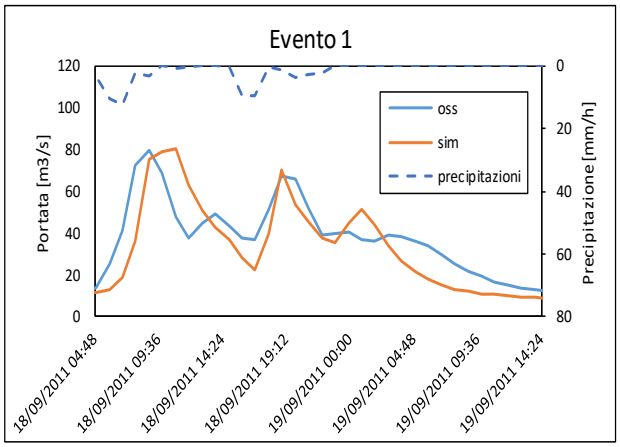
evento	inizio	fine
1	18/09/2011 03:53	19/09/2011 15:53
2	25/08/2013 11:52	27/08/2013 10:52
3	07/07/2014 21:51	17/07/2014 00:51
4	25/07/2014 20:51	08/08/2014 05:51
5	15/05/2015 18:50	16/05/2015 18:50

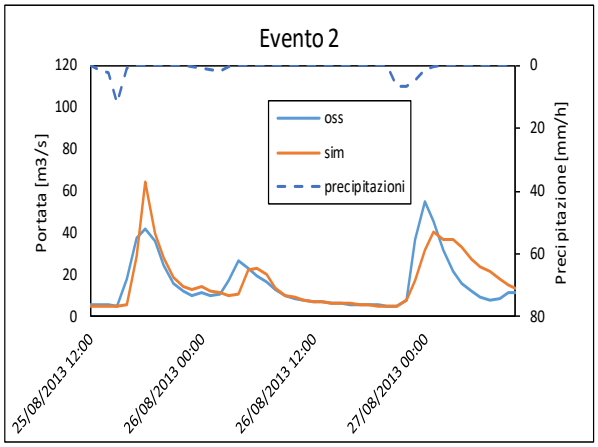
Tabella 3.92 Eventi presi in esame per la validazione della stazione di Milano Feltre e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.01	2	-0.12	12.83	0.52	0.01
2	0.18	1	0.07	8.38	0.52	0.18
3	0.29	-4	-0.60	23.36	0.33	0.29
4	-0.02	-3	-0.57	19.83	0.24	0.02
5	-0.01	-5	-0.22	21.84	-0.11	0.01

MEDIA	0.09	-1.80	-0.29	17.25	0.30	0.10

VALID GA	0.09	-1.80	-0.29	17.25	0.30	0.10
VALID PH	0.02	-1.40	-0.29	16.67	0.35	0.11
VALID CN	0.09	-1.40	-0.32	17.96	0.28	0.10





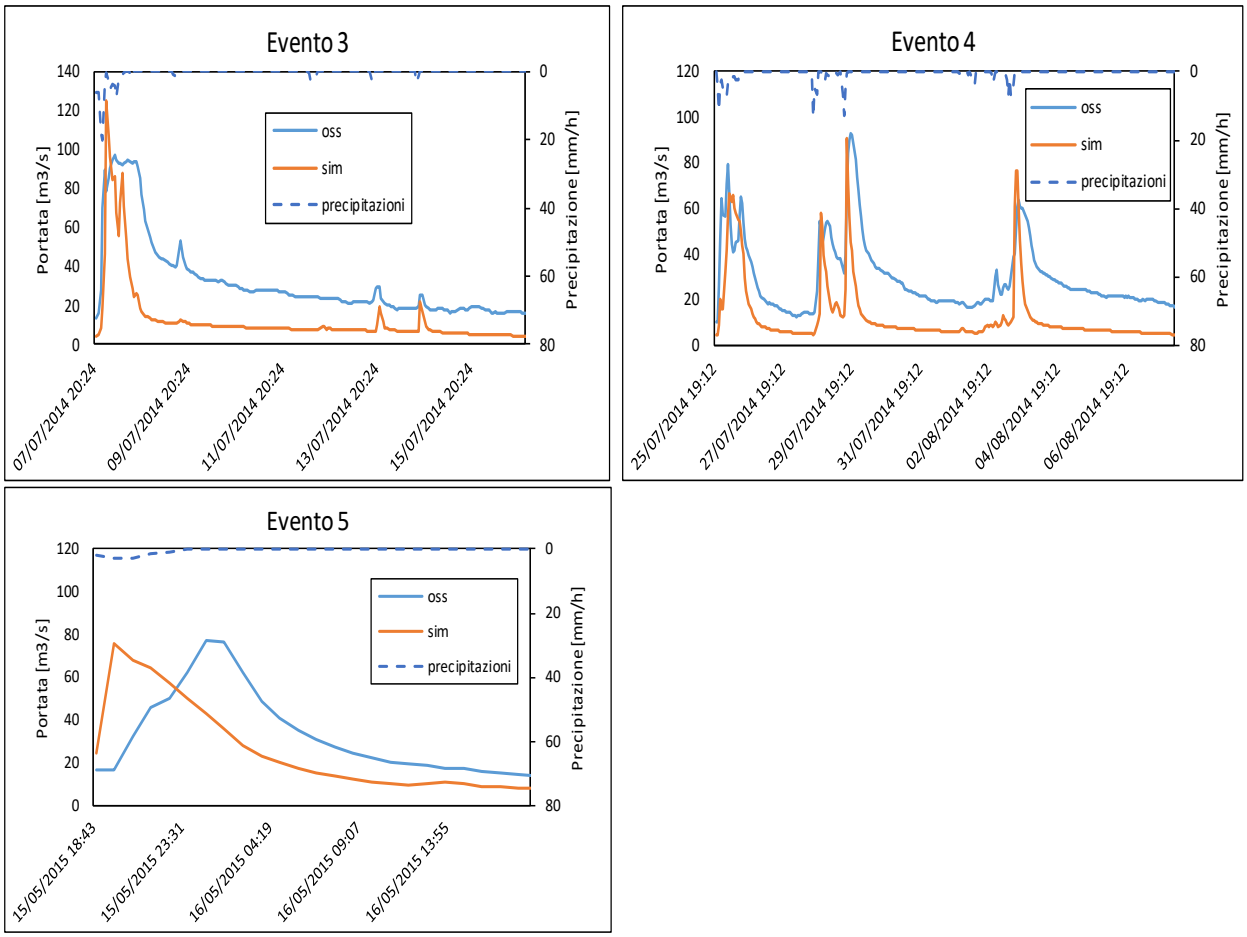


Figura 3.48 Risultati della validazione per la stazione idrometrica di Milano Feltre.

3.4 Tabelle finali di confronto

Di seguito vengono messi a confronto gli errori medi ottenuti con i diversi modelli di infiltrazione utilizzati. Si riportano delle tabelle in cui viene rappresentata globalmente la media dei tempi di propagazione, degli errori relativi e assoluti del picco simulato.

	Tempi di propagazione								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	-0.50	-0.89	-0.25	-1.67	-2.88	-1.44	-2.60	0.60	-1.20
PH	-0.75	-1.11	-0.25	-1.67	-2.88	-1.00	-2.70	1.00	-1.17
GA	-0.75	0.00	0.00	-1.78	-2.88	-1.33	-2.20	0.40	-1.07

Tabella 3.93 Confronto delle medie dei tempi di propagazione per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione.

Osservando la tabella soprastante, si evidenzia come tutti e tre i metodi si comportano nello stesso modo andando ad anticipare le portate massime mediamente di un'ora.

	Errore medio relativo sul picco simulato								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	0.05	-0.10	0.07	-0.04	0.06	0.07	0.04	-0.06	0.01
PH	0.03	0.08	0.12	-0.07	0.03	0.20	0.08	-0.07	0.05
GA	0.32	-0.04	0.35	-0.04	0.01	0.18	0.19	0.01	0.12

Tabella 3.94 Confronto delle medie degli errori relativi sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione.

Dalla media dell'errore relativo sulle portate massime si deduce che il metodo del CN abbia un leggero vantaggio, ma comunque troppo piccolo per poter dare una conclusione definitiva. È sicuramente lecito però, sottolineare come in tutti i casi si sia riuscito ad annullare quasi del tutto l'errore.

	Errore medio assoluto sul picco simulato								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	0.50	0.34	0.35	0.35	0.24	0.35	0.27	0.23	0.33
PH	0.48	0.27	0.45	0.36	0.32	0.32	0.24	0.22	0.33
GA	0.55	0.33	0.45	0.32	0.30	0.29	0.24	0.22	0.34

Tabella 3.95 Confronto delle medie degli errori assoluti sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di calibrazione.

Stesso discorso vale per l'errore medio assoluto: sono praticamente identici ed intorno al 30%. I risultati migliori vengono forniti dalle stazioni idrometriche del Lambro, ovvero quelle che hanno richiesto una maggior accuratezza durante la calibrazione. Lozza e Cantù invece, sono le stazioni più critiche, con degli errori piuttosto alti da aumentare la media complessiva.

	Tempi di propagazione								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	-0.60	0.60	-0.40	-2.40	-2.80	-2.60	-2.20	-1.40	-1.48
PH	-0.80	-1.40	-0.40	-2.40	-3.00	-2.60	-2.60	-1.40	-1.83
GA	-2.00	0.00	0.20	-2.40	-3.00	-2.60	-2.60	-1.80	-1.78

Tabella 3.96 Confronto delle medie dei tempi di propagazione per i tre modelli utilizzati in fase di validazione.

	Errore medio relativo sul picco simulato								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	0.00	0.16	0.06	0.00	-0.21	0.29	0.31	0.09	0.09
PH	0.17	0.16	0.03	-0.03	-0.15	0.45	0.31	0.02	0.12
GA	0.35	0.10	0.21	-0.01	-0.15	0.44	0.38	0.09	0.18

Tabella 3.97 Confronto delle medie degli errori relativi sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di validazione.

	Errore medio assoluto sul picco simulato								
	Lozza	Castellanza	Cantù	Palazzolo	Caslino	Lambrugo	Peregallo	Milano_Feltre	MEDIA
CN	0.44	0.29	0.25	0.15	0.22	0.29	0.32	0.10	0.26
PH	0.73	0.50	0.19	0.14	0.27	0.45	0.33	0.11	0.34
GA	0.88	0.54	0.30	0.09	0.28	0.44	0.41	0.10	0.38

Tabella 3.98 Confronto delle medie degli errori assoluti sul picco per i tre modelli utilizzati in fase di validazione.

Le corrispondenti tabelle della validazione invece, forniscono elementi oggettivi per affermare che il metodo del CN possa essere il migliore. Tutti e tre gli indici infatti, affermano come ci sia sempre, seppur

lievemente, un errore più basso. La differenza dagli altri metodi è poco visibile nelle prime due tabelle, mentre è un po' più marcata sull'errore medio assoluto.

Successivamente, un altro step importante ai fini della nostra analisi è verificare se la combinazione dei tre metodi possa portare ad ulteriori miglioramenti. Per questo motivo, nel seguente paragrafo viene tratto il tema del multimodel.

3.5 Multimodel

Il seguente obiettivo, consiste nel determinare se una combinazione di questi modelli idrologici possa portare ad un'ulteriore riduzione dell'errore. Per questo motivo, si decide di valutare l'andamento medio di ogni evento studiato, per ciascuna stazione. Si possono verificare situazioni dove un metodo, come per esempio il CN, sovrastimi la portata osservata per uno specifico evento, mentre il metodo di Philip e Green Ampt la sottostimino, o viceversa. Di conseguenza, la presenza di una loro combinazione in questo caso può sicuramente risultare utile per compensare i valori. Così facendo, ci si può avvicinare il più possibile ai dati osservati e quindi, al nostro scopo. Si può già anticipare che, probabilmente, l'idea di combinare insieme i vari metodi, non sia particolarmente efficiente per il bacino del Lambro: infatti, come si è potuto constatare una volta terminate le calibrazioni, i risultati conseguiti siano molto simili tra loro. Se si confrontassero invece, gli errori relativi sul picco delle stazioni dell'Olona, si noterebbero i diversi segni dei valori, positivi e negativi, dando così una conferma sulla previsione citata in precedenza.

Lozza presenta un solo evento sugli 8 disponibili in cui l'errore relativo tra CN, PH e GA mantiene lo stesso segno, mentre a Castellanza questo risultato si è verificato per la metà degli eventi. Questo significa che ci sono molti casi in cui la combinazione tra sottostime e sovrastime provenienti da metodi diversi, possa portare ad una situazione in cui la curva nera, rappresentante la media generale, si adagi eventualmente sempre di più a quella blu delle osservate. Qui di seguito vengono proposti due esempi in cui ci si può rendere conto di quanto detto finora: il primo in cui la multi modellazione risulta particolarmente utile ed il secondo in cui questa tecnica risulta meno efficace.

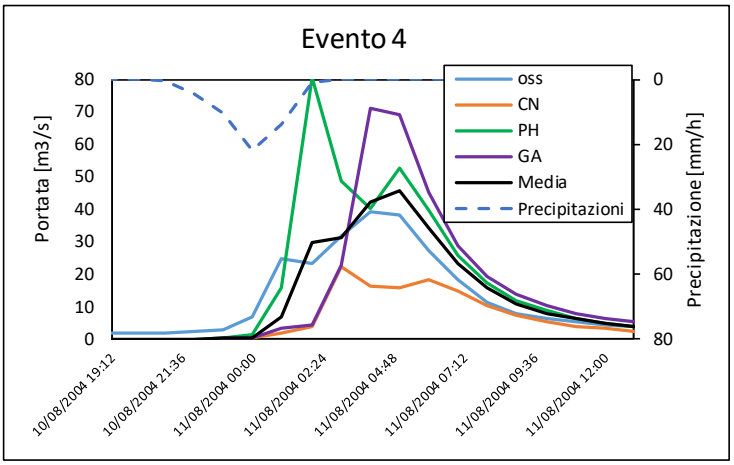


Figura 3.49 Multi modellazione dell'evento 4 per la stazione di Castellanza.

Un esempio concreto sull'utilità del multimodel è dato dall'evento numero 4 per la stazione di Castellanza. Se si osservano i tre idrogrammi colorati, si può notare come ogni simulazione idrologica si comporti in modo molto diverso tra un modello e l'altro. Per esempio il CN sottostima mentre il GA (in viola)

sovrastima la portata massima. Philip (in verde) invece, oltre che sovrastimare il picco, presenta un forte anticipo. La loro combinazione, rappresentata in nero, appare quasi perfetta poiché l'idrogramma medio è molto simile a quello reale.

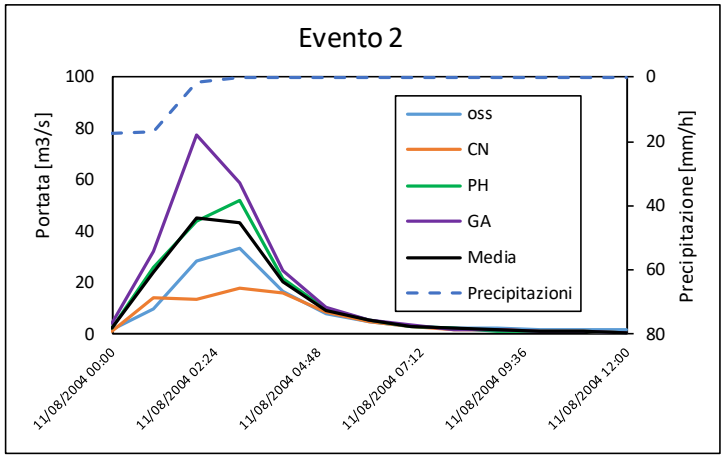


Figura 3.50 Multi modellazione dell'evento 2 per la stazione di Lozza.

L'evento 2 per la stazione di Lozza rappresenta invece un caso in cui la tecnica del multimodel non funziona. La presenza di una forte sovrastima dovuta alla simulazione con il metodo di GA è tale da allontanare l'idrogramma medio simulato dalle portate osservate nonostante ci sia una netta sottostima del metodo del CN.

Per le sezioni del Seveso e del Lambro, non ci sono grandi miglioramenti offerti dalla multi modellazione, poiché, come era già stato detto più volte, i risultati sono molto simili. Ciò significa che, nel caso in cui tutti e tre i metodi presentino delle sottostime/sovrastime, la media si comporterebbe di conseguenza nella stessa maniera. Palazzolo e Lambrugo non hanno nessun evento in cui ci sono differenze di segno nell'errore relativo. Cantù e le altre stazioni del Lambro hanno giusto un paio di eventi di con i segni alternati. A titolo di esempio si riportano l'evento numero 5 della stazione di Cantù, come rappresentante del bacino del Seveso, e l'evento numero 4 di Peregallo, come rappresentante del bacino del Lambro.

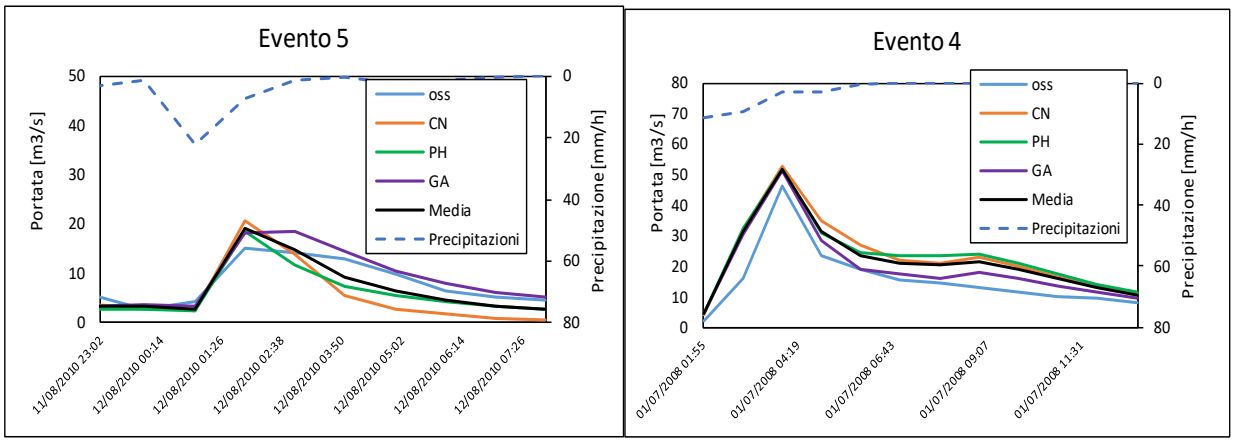


Figura 3.51 Multi modellazione dell'evento 5 per la stazione di Cantù e dell'evento 4 per la stazione di Peregallo.

Sia a Cantù che a Peregallo, il picco simulato da tutti e tre i modelli idrologici risulta leggermente sovrastimato rispetto al caso reale. L'idrogramma medio si comporta ovviamente allo stesso modo però adagiandosi piuttosto bene a quello delle portate osservate.

A questo punto si può concludere che, l'obiettivo di migliorare la simulazione con questa tecnica non è stato propriamente raggiunto, però è un'ennesima conferma del fatto che è piuttosto indifferente la scelta di un metodo o l'altro per la simulazione degli eventi di piena (almeno per le stazioni del Seveso e del Lambro). Può convenire utilizzarlo invece, in certi casi per il bacino dell'Olona, in cui le simulazioni sono più discordanti fra loro.

Si possono commentare brevemente i risultati offerti dalla multi modellazione per la fase precedente la calibrazione. Sicuramente non potrà dare risultati significativi poiché la maggior parte delle simulazioni iniziali di Philip e Green Ampt sono praticamente nulle. Quindi è lecito aggiungere che, se in fase di post calibrazione è difficile poter dire se un metodo è più efficace di un altro, non ci sono dubbi che, in fase di pre calibrazione, l'unico modello che offre delle certezze in termini di previsione, è il CN. Per capire maggiormente quanto detto in quest'ultimo paragrafo, viene mostrato l'andamento delle simulazioni per l'evento numero 8 della stazione di Castellanza. La simulazione in viola di GA è completamente nulla, quella in verde di Philip è molto bassa, mentre l'unica che fornisce risultati discreti, e per questo evento lo si nota chiaramente, è appunto il CN.

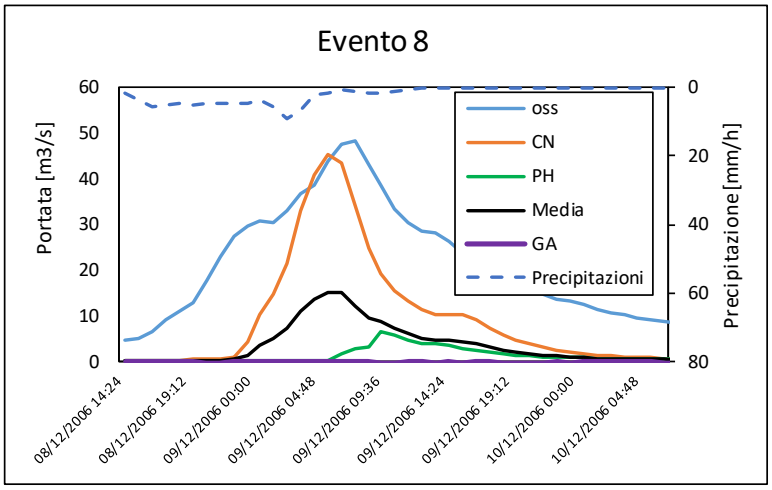


Figura 3.52 Multi modellazione dell'evento 8 per la stazione di Castellanza (in fase di pre calibrazione).

3.6 Tabelle di contingenza

Terminata la multi modellazione, sia in fase di pre che post calibrazione, un ultimo step per completare il lavoro su questi bacini, consiste nella realizzazione di una tabella di contingenza. Si tratta di un particolare tipo di tabella a doppia entrata, utilizzata in statistica per rappresentare ed analizzare le relazioni tra due o più variabili. Nel nostro caso significa che andremo a definire il rapporto che sussiste tra le portate osservate e quelle simulate dai tre metodi e dalla loro combinazione, sotto una chiave differente rispetto a quanto fatto finora. Ai fini di protezione civile, è molto importante conoscere le soglie di criticità e le fasi di allerta per ogni tipo di evento idro-meteorologico. Per questo motivo, l'Arpa Lombardia fornisce le cosiddette soglie di portata per ogni stazione idrometrica, in modo tale da definire il livello di criticità idrologica a seconda delle portate presente nell'alveo fluviale.

	Soglie di portata		
Castellanza	39.9	52.1	65.3
Cantù	13	18.5	24.5
Lambrugo	25.5	39.9	59.1
Peregallo	45.4	77.6	94
Milano_Feltre	65.8	95.1	127.8

Tabella 3.99 Soglie di portata di protezione civile, complete ed aggiornate per alcune stazioni idrometriche di studio

Le soglie di portate si distinguono in livelli di criticità ordinaria, moderata ed elevata, a cui corrispondono le tre fasi di allerta, gialla, arancione e rossa. Purtroppo queste soglie non sono sempre aggiornate o comunque disponibili per tutte le 8 stazioni idrometriche di studio, di conseguenza andremo ad analizzare solo quelle di cui abbiamo i dati completi ed attuali. La tabella qui accanto ci dice che abbiamo una sola stazione per l'Olona e per il Seveso, mentre ben 3 per il Lambro. Come si può vedere per queste ultime 3, i valori di soglia aumentano spostandosi verso valle, coerentemente con il deflusso della piena. I colori rappresentano appunto le tre fasi di allerta corrispondenti. Dai dati osservati di portata, si confrontano i valori massimi, ovvero quelli di piena, con le soglie di riferimento in modo da determinare per ogni evento studiato, il livello di criticità atteso. Nel caso in cui i picchi di piena osservati fossero minori anche delle soglie in giallo, vengono colorate in verde come a simboleggiare che il livello di criticità sia nullo. Nelle tabelle successive, una per ogni bacino di studio, si può comprendere quanto spiegato finora. Sono presenti sia gli eventi analizzati durante la fase di calibrazione che quelli durante la fase di validazione, in modo da rendere il più completo possibile il loro studio. Alle portate osservate vengono affiancate le portate simulate con i tre modelli ed infine il risultato del multimodel. Queste tabelle riportano la corrispondenza che c'è tra quello che quello che è successo realmente e quello che dicono i modelli. L'importanza dei colori permette di quantificare rapidamente il numero di eventi simulati correttamente, da ogni modello, per ogni stazione.

CASTELLANZA							
evento	inizio	fine	Qmax oss	QsimCN	QsimPH	QsimGA	Multimodel
1	23/11/2003 18:59	03/12/2003 04:59	57.2	73.3	55	67.5	65.27
2	18/04/2004 13:59	20/04/2004 21:59	44.2	33.1	41.4	47.5	40.67
3	29/04/2004 16:59	10/05/2004 11:59	71.5	44	41.9	36.8	40.90
4	10/08/2004 18:58	11/08/2004 12:58	39	22.5	80.7	71	58.07
5	31/10/2004 21:58	03/11/2004 05:58	49.6	34	48.9	48.8	43.90
6	10/04/2006 11:57	11/04/2006 14:57	32	33	27.6	15.9	25.50
7	14/09/2006 16:57	16/09/2006 11:57	28.4	50.4	36	35.6	40.67
8	08/12/2006 14:57	10/12/2006 10:57	48.5	45.5	43.8	32.7	40.67
9	28/05/2007 06:56	29/05/2007 02:56	35.3	16.6	31.2	24.4	24.07
10	17/05/2008 02:56	19/05/2008 01:56	56.2	97.4	136	146	126.47
11	05/02/2009 18:55	11/02/2009 03:55	53.6	48	35.4	27	36.80
12	26/04/2009 13:55	02/05/2009 02:55	68.1	73.2	45.1	43.8	54.03
13	31/10/2010 01:54	03/11/2010 03:54	51.6	68.3	42.2	52	54.17
14	22/12/2010 09:54	26/12/2010 06:54	33.6	26.7	41.1	25.4	31.07

Tabella 3.100 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Castellanza con eventi calibrati e validati.

Per esempio a Castellanza, su un totale di 14 eventi, tra calibrazione e validazione, quelli simulati correttamente dal CN sono 6, da Philip 8, dal Green Ampt 7 come anche dalla loro combinazione. Il fatto di raggiungere e superare il 50% degli eventi corretti da 2 modelli su 3 è comunque un buon risultato.

CANTU'							
evento	inizio	fine	Qmax oss	QsimCN	QsimPH	QsimGA	Multimodel
1	09/09/2005 11:58	10/09/2005 03:58	17.5	25.6	39.8	44.2	36.53
2	02/10/2005 09:57	03/10/2005 00:57	12.2	18.9	14.6	17.8	17.10
3	17/05/2008 21:56	18/05/2008 08:56	14.1	14.1	16.1	17.5	15.90
4	10/05/2010 19:54	15/05/2010 03:54	27.6	15.8	19	32.3	22.37
5	11/08/2010 22:54	12/08/2010 07:54	15	20.5	18.5	18.3	19.10
6	18/09/2010 06:54	18/09/2010 16:54	18.6	24.3	26.5	23.7	24.83
7	31/10/2010 09:54	02/11/2010 10:54	24.9	18	13.3	22.9	18.07
8	15/11/2010 09:54	17/11/2010 08:54	23.8	11.5	9.5	16.1	12.37
9	06/07/2012 15:53	07/07/2012 01:53	12.7	11	12.4	12.4	11.93
10	12/09/2012 08:52	12/09/2012 18:52	12.4	8.11	7.71	9.83	8.55
11	23/10/2013 09:52	23/10/2013 22:52	11.2	14.8	12.6	16.5	14.63
12	07/07/2014 20:51	08/07/2014 14:51	32.5	41.7	46.1	45.4	44.40
13	23/09/2015 05:50	23/09/2015 14:50	16.2	19	19	22.9	20.30

Tabella 3.101 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Cantù con eventi calibrati e validati.

Cantù invece, come era facile prevedere, visti i problemi riscontrati nei capitoli precedenti, rappresenta la stazione con i risultati peggiori: su un totale di 13 eventi solo il GA supera il 50% con ben 7 eventi, mentre il CN e PH si fermano a 5.

PEREGALLO							
evento	inizio	fine	Qmax oss	QsimCN	QsimPH	QsimGA	Multimodel
1	04/05/2004 14:59	10/05/2004 00:59	40	33.7	39.3	39.4	37.47
2	02/10/2005 12:57	03/10/2005 04:57	35	73.6	71.2	77.9	74.23
3	13/06/2007 15:56	16/06/2007 05:56	42.9	42.8	41	43.2	42.33
4	01/07/2008 01:55	01/07/2008 12:55	46.5	52.5	51.6	60.2	54.77
5	02/11/2008 23:55	15/11/2008 02:55	61	40	42.4	45.4	42.60
6	26/04/2009 16:55	06/05/2009 10:55	123.6	79	87.4	107	91.13
7	02/05/2010 21:54	21/05/2010 23:54	82.8	49.8	55.1	58.3	54.40
8	14/08/2010 14:54	21/08/2010 06:54	94.2	134	136	137	135.67
9	31/10/2010 11:54	27/11/2010 03:54	90.7	58.6	70.2	86.3	71.70
10	21/12/2010 23:54	31/12/2010 22:54	72.8	53	58	68.9	59.97
11	18/09/2011 03:53	19/09/2011 12:53	45.4	70.9	72.3	71.9	71.70
12	09/06/2013 14:52	10/06/2013 18:52	47.1	57.9	59.6	66.6	61.37
13	14/06/2014 16:51	15/06/2014 05:51	62.9	79.1	76.4	85.6	80.37
14	15/05/2015 15:50	16/05/2015 09:50	46.9	66.5	71.5	74.9	70.97
15	16/06/2016 14:50	19/06/2016 22:50	45.8	44	43.2	42.2	43.13

Tabella 3.102 Confronto tra le fasi di allerta simulate ed osservate per la stazione di Peregallo con eventi calibrati e validati.

Peregallo rappresenta la stazione idrometrica migliore, non soltanto del Lambro ma di tutte e 5 le sezioni analizzate in questo modo. In totale gli eventi sono 15 e tutti e 3 i modelli superano largamente il 50 % degli eventi corretti: il CN ne possiede 8, PH 9 e GA addirittura 11.

Queste tabelle danno solo un'idea di quella che è la situazione generale offerta dai vari metodi di simulazione. Lo scopo delle tabelle di contingenza, che qui di seguito verranno proposte, consiste nel conteggiare non solo il numero di eventi corretti ma anche il numero dei falsi allarme e dei mancati allarme. I risultati ottenuti saranno fondamentali per poter valutare l'efficacia e l'efficienza dei tre modelli.

Dopo aver calcolato il numero di eventi corretti, i falsi allarme e i mancati allarme per ogni stazione e per ogni modello, si è eseguita la somma di tutte le 5 stazioni disponibili, così da poter ricavare un quadro più completo per ogni modello idrologico. Così facendo, sparisce l'informazione sulla portata e rimane solo il tipo di allerta. A sinistra ci sono le portate osservate mentre in alto quelle simulate; la bontà del modello consiste non solo nel prevedere una determinata fase di criticità ma anche quando questa è assente. In ogni casellina si trova il conteggio totale delle 5 stazioni: sulla diagonale principale ci sono gli eventi simulati correttamente, superiormente i falsi allarme, ovvero quando viene simulata una fase di allerta maggiore di quella reale e infine, inferiormente troviamo i mancati allarme, cioè quando viene simulata una fase di allerta minore di quella reale.

		simulazione-CN			
		G	Y	O	R
osservata	G	10	7	1	
	Y	9	15	4	3
	O	2	6	3	4
	R		3	1	3

		simulazione-PH			
		G	Y	O	R
osservata	G	10	7		1
	Y	8	17	4	2
	O	3	4	3	5
	R		3	2	2

		simulazione-GA			
		G	Y	O	R
osservata	G	10	5	2	1
	Y	7	19	3	2
	O	2	3	5	5
	R	1	1	1	4

Tabella 3.103 Tabelle di contingenza per ogni singolo modello (post calibrazione e validazione)

Il numero totale di eventi considerati è 71, quelli corretti del CN rappresentano quasi il 44% (31/71), i falsi allarme il 27% (19/71) mentre i mancati allarme il 29% (21/71), quindi un numero sicuramente non trascurabile. La situazione è molto simile per Philip, poiché hanno lo stesso numero di falsi allarme, un evento corretto in più (45%) e un mancato allarme in meno (28%).

I risultati migliori li offre sicuramente il GA in quanto rappresenta l'unico modello che supera il 50% di eventi corretti. Sono 38/71, ovvero il 54% circa, mentre i falsi allarme sono 18/71 (25%) ed i mancati allarme solo 15/71 (21%).

Per completezza si riporta i risultati del multimodel, anche se è facile intuire che non si possa avere un risultato migliore rispetto a quanto fornito dal Green Ampt. Gli eventi corretti sono 33, quindi il 47% circa, il numero di falsi allarme 20 ed i mancati 19, quindi comunque inferiore ai modelli del CN e di PH presi singolarmente.

		multimodel			
		G	Y	O	R
osservata	G	11	8	1	
	Y	7	17	4	2
	O	3	4	3	5
	R		2	3	1

Tabella 3.104 Tabella di contingenza per la multi modellazione (post calibrazione e validazione).

Si è così giunti alla conclusione che, mentre tramite la multi modellazione era difficile poter dire quale fosse il modello più affidabile, grazie a queste tabelle di contingenza, è lecito affermare che il modello idrologico che fornisce i risultati più soddisfacenti è il Green Ampt. Questo non significa che gli altri due modelli vadano trascurati poiché i loro risultati non sono così negativi. Inoltre, non bisogna dimenticarci di quanto avevamo ottenuto in precedenza con la multi modellazione in fase di pre calibrazione. L'unico modello che poteva dare delle certezze era il CN, e dalle tabelle di contingenza, realizzate anche in fase di pre calibrazione, si può giungere alle stesse conclusioni. Per capire appunto la sua importanza, si riporta la sua tabella corrispondente in modo da confrontare i risultati. Paragonando ovviamente solo gli eventi utilizzati per la calibrazione, che sono in totale 46, si può constatare come non cambi più di tanto la situazione tra le due fasi. Infatti, se dopo aver calibrato, il numero di eventi corretti era 16/46, in questo caso sono comunque 15 (33% circa) che è comunque un buon numero, considerando che si tratta di un modello appunto senza alcuna calibrazione. Il numero di falsi allarme è 10/46 (22% circa) e i mancati allarme sono 21/46 (45% circa).

		simulazione-CN			
		G	Y	O	R
osservata	G	7	2	1	
	Y	11	3	5	1
	O	5	1	3	1
	R	1	2	1	2

Tabella 3.105 Tabella di contingenza per il metodo CN in fase di pre calibrazione.

4 CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO SUL FIUME SERPIS

La calibrazione del modello è focalizzata sul picco di portata, sui tempi di propagazione e sul volume del run off, i quali sono fortemente dipendenti dall'infiltrazione. Nella Spagna mediterranea semi arida la vegetazione sparsa, insieme alla precipitazione convettiva torrenziale che eccede facilmente la capacità iniziale dell'infiltrazione del suolo, favorisce il deflusso Hortoniano e la velocità lungo il fiume durante il periodo più caldo. L'eterogeneità nell'idraulica della risposta del bacino alle piene fluviali, aumenta come conseguenza di un decremento sistematico della reazione del bacino all'incremento delle precipitazioni. I due principali fattori che regolano queste eterogeneità sono l'espansione della rete fluviale agli elementi topografici non canalizzati durante la piena e l'incremento della velocità di flusso con la portata. Per questo motivo la prima cosa da fare consiste nella calibrazione del parametro di Strickler ks. I suoli inizialmente asciutti e l'alta capacità d'infiltrazione aumentano la risposta non lineare del run off con le abbondanti ed intense precipitazioni sul bacino del Serpis. Comportano una notevole mitigazione della grandezza del deflusso superficiale e del volume corrispondente. Queste alte perdite di infiltrazione iniziale e le capacità di immagazzinamento dell'umidità del suolo, sono associate alla presenza predominante di materiale calcareo e carbonatico.

A causa delle risposte altamente non lineari di questi bacini semiaridi, è stato necessario considerare anche i parametri So e λ, rappresentanti la capacità d'infiltrazione del suolo, che solitamente sono fissati rispettivamente a 254 mm (10 pollici nella forma americana) e a 0.2, come ulteriori parametri di calibrazione. L'unico metodo che è stato utilizzato finora per studiare questi bacini semi aridi è l'SCS-CN e si è notato che non conviene più utilizzare questi valori standard per i due parametri citati. Invece non verrà più modificato il parametro del CN, il cui valore dipenderà solamente dalle condizioni iniziali di umidità del suolo.

Anche dalla letteratura, si vede come la risposta del bacino non dipende solo dall'intensità della precipitazione ma anche dal volume di essa. Ad esempio, se una precipitazione intensa di 300 mm o più in pochissime ore colpisce un territorio che vive in una situazione di siccità da diversi mesi, è difficile che si possa instaurare repentinamente un collegamento idraulico. In poche parole, è necessario che il suolo assorba lentamente l'acqua in modo tale che il processo d'infiltrazione si possa svolgere in modo naturale. L'impossibilità di assorbire l'acqua piovana in un tempo duraturo, a causa appunto dell'evento calamitoso improvviso e consistente, crea una sorta di idrorepellenza del suolo e, quindi, la conseguente formazione di un deflusso superficiale veloce. Invece, paradossalmente, se si avesse a disposizione un volume d'acqua molto più grande ma distribuito su un arco temporale più ampio, si potrebbe avere una generazione di deflusso diverso, quindi con una proporzione differente. Per questo motivo si giustifica la volontà di cambiare in primis il parametro So. Prendendo spunto dalla tesi di De Fazio A., 2015: "Modeling of river floods in semiarid basins", si può notare come esista una certa relazione con la quantità di precipitazione. Tanto più grande è la quantità di precipitazione, tanto maggiore è il parametro So, quindi maggiore è la capacità di assorbimento del terreno.

La prima volta in cui si è pensato di calibrare separatamente questi parametri idrologici del suolo, risale alla terribile alluvione del 29 agosto 2003 che ha colpito la zona superiore del bacino del Tagliamento. Borga M., et al., 2006, all'interno di "Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Floos in the Eastern Italian Alps" tratta appunto questo evento, come esempio significativo della violenza delle precipitazioni responsabili della maggior parte delle piene repentine di quell'area. La regione alpina friulana ovviamente non è da considerarsi una zona semi arida ma, le caratteristiche di un'estate tra le

più calde e siccitose di sempre come quella del 2003, hanno fatto sì che si potessero comparare. 400 mm di pioggia caddero al suolo, causando due morti, centinaia di sfollati e moltissimi smottamenti in diversi comuni per un ammontare di danni di quasi un miliardo di euro. Uno dei tributari del Tagliamento, che è stato particolarmente colpito dall'alluvione, è il fiume Fella che si è reso purtroppo protagonista con piene dominate da fango e roccia.

Il modello idrologico utilizzato per lo studio di questo evento si è basato sull'applicazione del metodo SCS-CN però, data l'eccezionalità dell'evento in cui le condizioni iniziali di umidità del suolo erano molto basse, il fattore di proporzionalità tra il parametro S e l'imbibimento iniziale (Ia) sono stati considerati come ulteriori parametri di studio. Ciò è dovuto ad una risposta del bacino differente a causa di una relazione fortemente non lineare tra la precipitazione ed il runoff. La combinazione della capacità di immagazzinamento dell'umidità del suolo e delle scarse condizioni precedenti di umidità è un fattore importante per determinare le risposte superficiali alle precipitazioni estreme. In aggiunta alla non linearità nel bilancio idrico dell'evento si manifestano anche eterogeneità nell'idraulica della risposta del bacino.

Per questo motivo, una calibrazione in cui si cambia ad ogni evento il valore del parametro, non può permettere di costruire un modello robusto. L'applicazione di questa tecnica però può risultare utile in fase previsionale ovvero, nota la precipitazione attesa per quel dato evento, grazie al modello meteorologico, permette di gestire la simulazione idrologica. Di conseguenza, in caso di precipitazioni elevate, si aumenterà il valore del parametro e viceversa. Oltre a So (storativity) non è da trascurare nemmeno il parametro λ, per il quale si potrebbe seguire lo stesso ragionamento, in quanto influenza direttamente il processo d'infiltrazione.

Il FEST-WB è stato soggetto alla calibrazione tramite il confronto del runoff osservato e simulato per un set indipendente di eventi di piena. Con questo obiettivo, la serie di portate orarie osservate è stato prima esaminato per un periodo tra il 2002 e il 2012. Anche in questo caso è stata applicata la calibrazione manuale adottando l'approccio trial and error, usando un set di funzioni obiettivo, con lo scopo di minimizzare la discrepanza nel picco di portata simulato, il volume del run off e il tempo di picco.

Potrebbe essere necessario l'approccio multimodel per poter comprendere meglio la risposta del bacino del Serpis. Avendo caratteristiche fisiche ed idrologiche simili a quelle di molti altri bacini mediterranei, questo metodo di calibrazione potrebbe essere esteso ad ulteriori test ed applicazioni. Ovviamente questo singolo caso di studio non permette di formulare delle conclusioni generali sulla prevedibilità di questo tipo di evento o riguardo la strategia ottima di previsione idrometeorologica. Non si conosce esattamente la pioggia reale che effettivamente cade al suolo, però è lecito ritenere che l'errore sulla previsione meteo non sia così dominante da influenzare negativamente le simulazioni delle portate.

Rimane comunque molto importante in quanto indica un aspetto rilevante da tenere in considerazione per gli studi statistici futuri. L'evento di piena del 12/10/2007 è un prototipo di un caso di lunga durata in cui i sistemi convettivi, influenzati dall'orografia presente, sono responsabili della maggior parte degli eventi più pericolosi dell'area mediterranea.

Date le premesse si è deciso di eseguire la calibrazione come segue: per quanto riguarda il metodo del CN si è appunto deciso di calibrare evento per evento, modificando i parametri caratteristici S0 e lambda in funzione delle proprietà del suolo. La calibrazione di Philip e Green Ampt invece, è stata realizzata allo stesso modo dei bacini milanesi, ovvero sull'intero periodo temporale. L'obiettivo rimane sempre il medesimo, cioè ridurre il più possibile l'errore sul picco, con un occhio di riguardo anche per l'errore sui

volumi. Da un lato si vuole dimostrare che, se si volesse applicare il metodo del SCS, sarebbe necessario calibrare evento per evento e definire i parametri idrologici in funzione delle precipitazioni cumulate previste dai modelli meteorologici. Dall'altro lato invece, si vuole valutare se l'utilizzo degli altri due modelli d'infiltrazione possa essere un'alternativa efficace ed efficiente al metodo tradizionale del CN. Infine, si vuole comparare i risultati che si otterranno dalla calibrazione individuale del CN, quindi sfruttando solo S0 e lambda, e da quella globale agendo quindi sulla permeabilità e appunto sul parametro CN.

Beniarrès, a causa della sua presenza in un bacino semi arido, non possiede un gran numero di eventi di precipitazione, come invece poteva essere più facile trovare per le stazioni idrometriche del complesso SOL. Per questo motivo sono stati individuati solo 5 eventi utili per la calibrazione, ed essendo così pochi si è trascurata la fase di validazione. La procedura qui riportata è identica a quella utilizzata nella prima parte della tesi, quindi si mostrano le tabelle con tutti gli indici stimati, le medie ottenute e i grafici corrispondenti.

4.1 Calibrazione con il metodo del Curve Number evento per evento

La tabella sottostante mostra i 5 eventi analizzati e già si può notare una prima differenza con i bacini milanesi: gli eventi sono di breve durata, mentre si ricorda che per esempio per il Lambro ci sono stati eventi molto lunghi, anche di quasi un mese. La breve durata di questi eventi a Beniarrès è una caratteristica tipica di queste zone aride in cui le precipitazioni sono piuttosto scarse e concentrate in periodi ristretti. Inoltre, le date degli eventi corrispondono a periodi primaverili e principalmente autunnali.

evento	inizio	fine
1	15/04/2003 00:57	20/04/2003 17:57
2	11/10/2007 20:54	15/10/2007 08:54
3	08/10/2008 23:53	11/10/2008 13:53
4	21/11/2011 03:51	26/11/2011 21:51
5	13/11/2012 12:50	15/11/2012 06:50

Tabella 4.1 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo CN evento per evento e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.67	-6	0.10	16.06	-0.81	0.67
2	-0.09	0	-0.10	34.69	0.63	0.09
3	0.57	0	0.20	29.75	-0.50	0.57
4	0.05	-4	-0.28	21.39	0.50	0.05
5	0.23	0	0.06	28.30	-0.11	0.23
MEDIA	0.29	-2.0	0.00	26.04	-0.06	0.32

Analizzando gli indici stimati è lecito constatare che i risultati siano abbastanza confortanti per questo tipo di calibrazione particolare: l'errore medio relativo sul picco non è troppo alto, anche quello assoluto è simile poiché quasi tutti gli eventi sovrastimano le portate, eccetto il numero 2 che mostra delle leggere

sottostime. Per quanto riguarda i tempi di propagazione ci sono due eventi con anticipi del picco piuttosto consistente, che però si compensano abbastanza con gli altri eventi che simulano correttamente l'arrivo della piena. Gli indici di forma non sono molto positivi, come del resto era facile aspettarsi, mentre il risultato più confortante è sicuramente dato dall'errore medio relativo sul volume che viene completamente annullato. Di seguito si riportano i grafici che mostrano l'andamento delle simulazioni rispetto alle portate osservate. Un'altra differenza che si può notare rispetto agli studi precedenti riguarda i valori piuttosto alti delle portate osservate: eccetto il primo evento che in periodo primaverile presenta il massimo di portata di circa 50 m3/s, tutti gli altri eventi mostrano portate superiori ai 100 m3/s, se non di circa 250 m3/s come per l'evento 2.

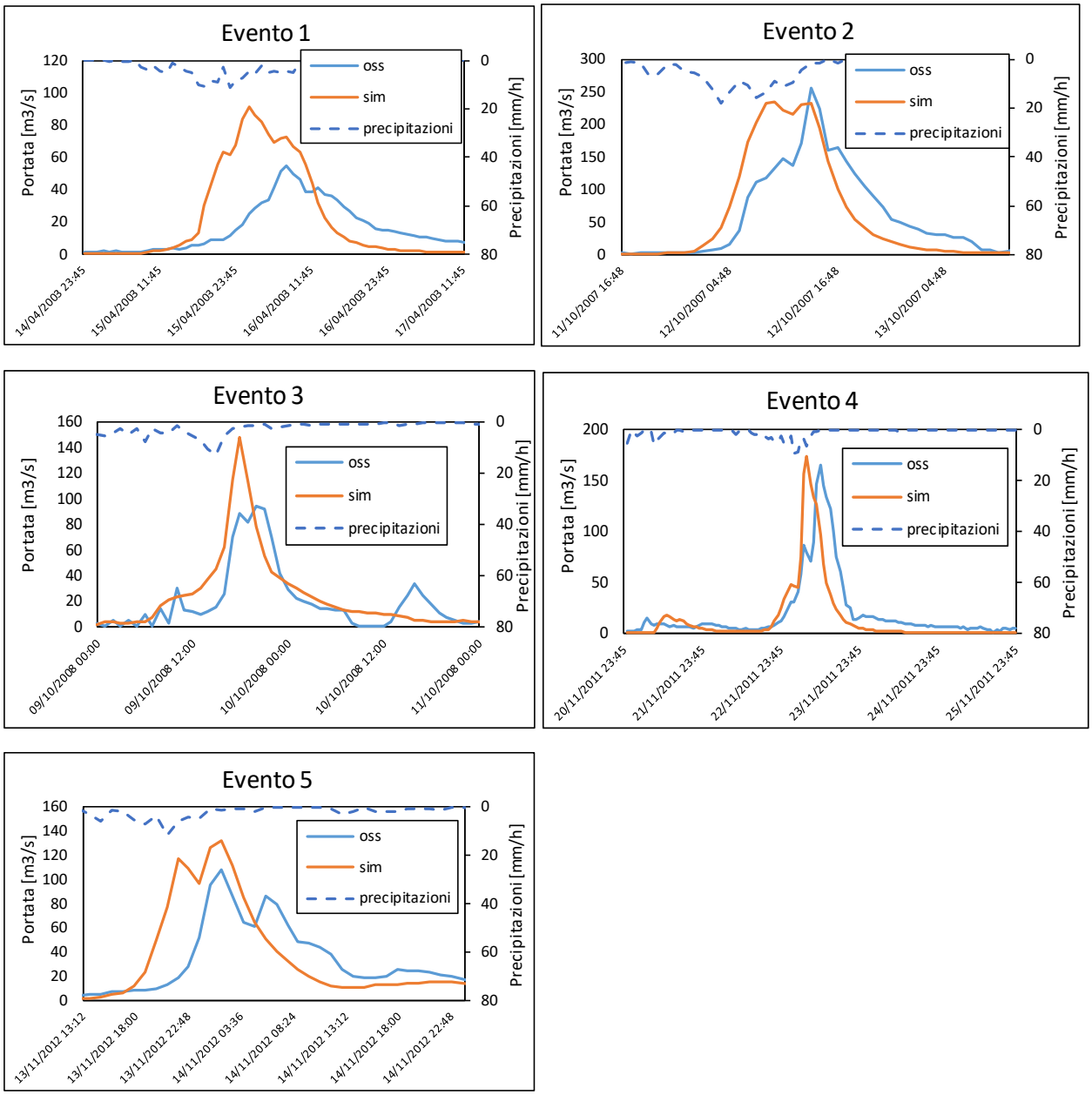


Figura 4.1 Risultati della calibrazione con il metodo del CN evento per evento per la stazione idrometrica di Beniarrés.

Il vantaggio di questa calibrazione, evento per evento, viene mostrato dalla relazione che sussiste tra i parametri idrologici qui presentati e la precipitazione cumulata. Come era già stato spiegato in precedenza, e grazie ai vari studi come quelli relativi all'articolo di (Amengual et al.: A Comparison of

Ensemble Strategies for Flash Flood Forecasting: The 12 October 2007 Case Study in Valencia, Spain), esiste una proporzione lineare.

evento	Precipitazione cum [mm]	So [mm]	λ [-]
1	146.65	1100	0.55
2	159.97	800	0.4
3	116.23	750	0.4
4	105.65	600	0.25
5	77.80	400	0.15
	MEDIA	730	0.35

Tabella 4.2 Confronto tra la precipitazione cumulata e i parametri idrologici S0 e lambda per gli eventi studiati.

I parametri S0 e lambda, i cui valori standard sono 254mm e 0.2, quindi crescono in funzione delle precipitazioni. Ciò significa che ad un amento delle precipitazioni si ha un aumento della capacità d'infiltrazione del suolo, come si può constatare anche dai grafici sotto riportati. In entrambi i casi il coefficiente di correlazione R^2 è pari a 0.7, a conferma quindi di quanto detto finora. Le linee di tendenza risultano piuttosto inclinate, quindi le equazioni vengono applicate a partire dai 20/30 mm di precipitazione. Ovviamente il numero di punti, e quindi di eventi, a disposizione è limitato; purtroppo non ci sono altri eventi di precipitazione significativi ma comunque i risultati sono comunque soddisfacenti.

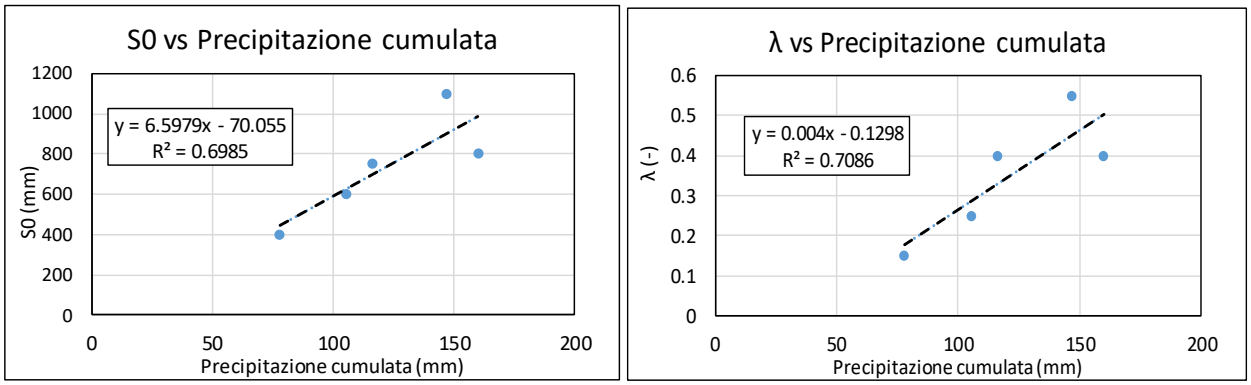


Figura 4.2 Correlazione lineare crescente tra la precipitazione cumulata e i parametri idrologici del suolo S0 e λ a Beniarrés.

4.2 Calibrazione con il metodo globale del Curve Number

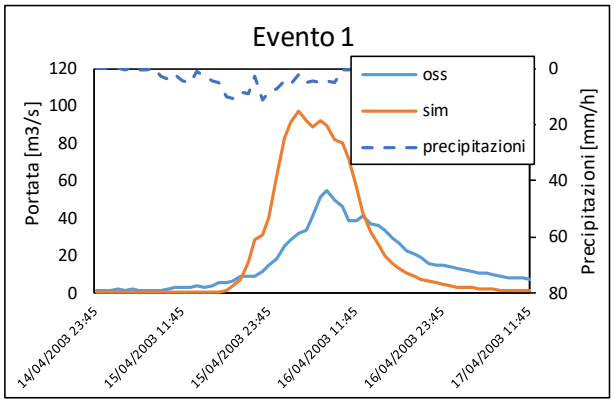
Per completare l'analisi del modello SCS, si riportano i risultati ottenuti con la calibrazione standard, ovvero unica su tutto il periodo di studio, senza dover modificare i parametri ad ogni evento. Si è modificato la permeabilità e il CN al massimo delle loro possibilità fisiche: partendo da sovrastime iniziali molto elevate si è moltiplicato il parametro ksat x100 e si è sottratto 10 unità al CN. Per ridurre ulteriormente l'errore sul picco sono stati calibrati anche S0 e lambda, però sfruttando questa volta i valori medi ottenuti nel paragrafo precedente, cioè 730 mm e 0.35. I risultati migliori si ottengono però con la combinazione S0 pari a 500 mm e lambda a 0.3; di conseguenza si mostrano gli esiti ricavati con quest'ultima modifica.

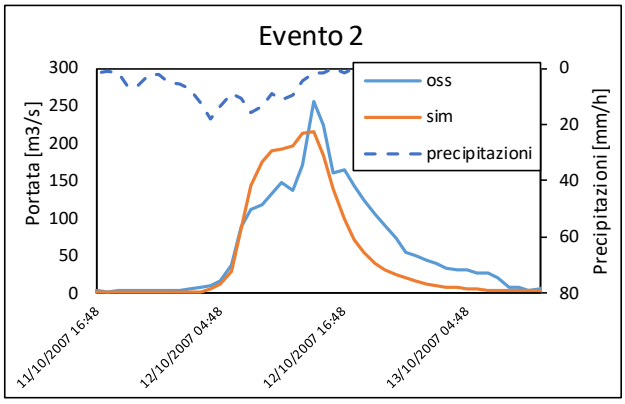
evento	inizio	fine
1	15/04/2003 00:57	20/04/2003 17:57
2	11/10/2007 20:54	15/10/2007 08:54
3	08/10/2008 23:53	11/10/2008 13:53
4	21/11/2011 03:51	26/11/2011 21:51
5	13/11/2012 12:50	15/11/2012 06:50

Tabella 4.3 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo globale del CN e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.79	-4	0.06	14.89	-0.54	0.79
2	-0.15	0	-0.29	25.35	0.80	0.15
3	0.00	-2	-0.26	21.66	0.21	0.00
4	-0.60	-3	-0.75	24.20	0.37	0.60
5	-0.79	-2	-0.78	32.43	0.20	0.79
MEDIA	-0.15	-2.2	-0.41	23.71	0.21	0.47

La cosa più importante da sottolineare riguarda il fatto che, nonostante una lunga calibrazione, non si è potuto ridurre più di tanto l'errore medio assoluto sul picco, come era lecito aspettarsi. È presente una forte sovrastima fornita dall'evento 1, e due sottostime elevate rappresentate dagli eventi 4 e 5. La sottostima dei volumi è piuttosto evidente, si attesta intorno al 40% ed è in contrapposizione con quanto successo con la calibrazione evento per evento in cui l'errore si annullava. Questi risultati ci permettono quindi di affermare come la calibrazione con il metodo del CN evento per evento sia migliore rispetto a quella globale. Dai grafici sottostanti si mostra come solamente gli eventi 2 e 3 abbiano un idrogramma simulato simile a quello osservato.





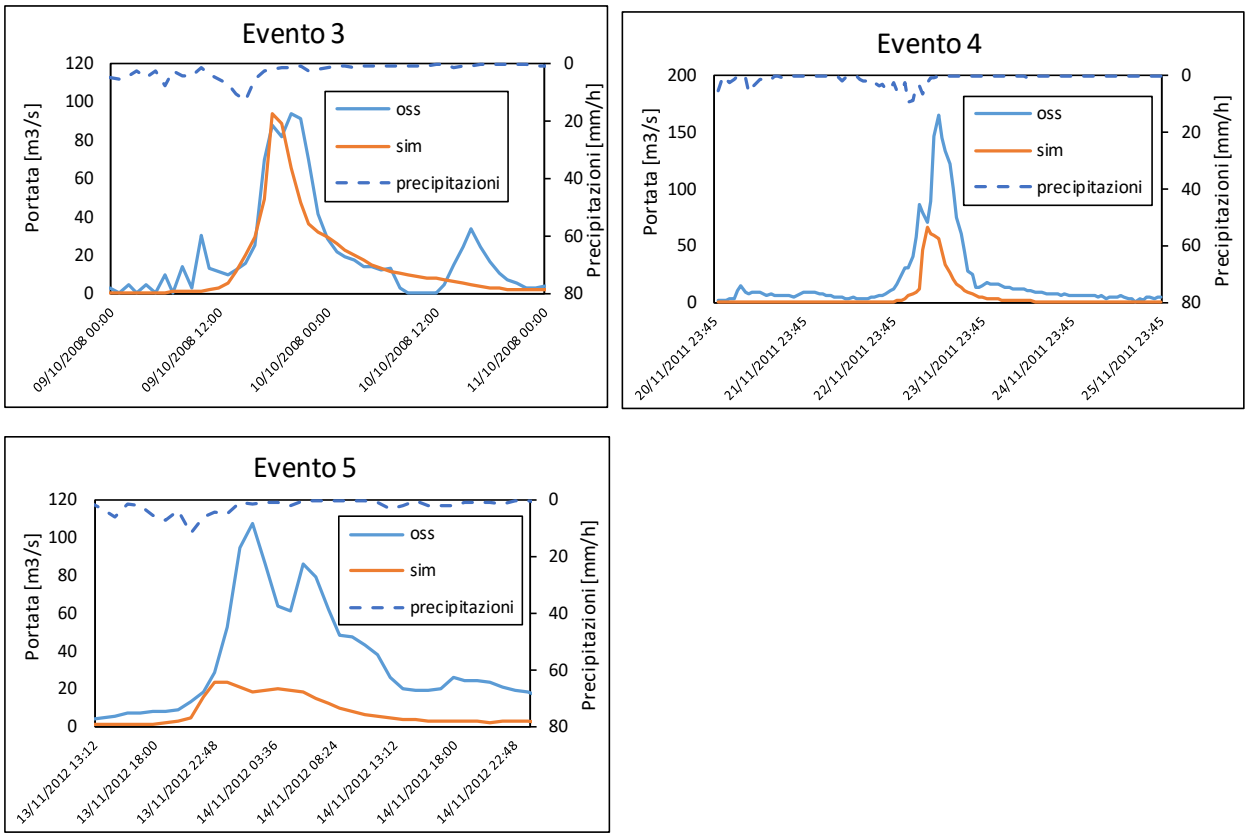


Figura 4.3 Risultati della calibrazione con il metodo globale del CN per la stazione idrometrica di Beniarrés.

4.3 Calibrazione con il metodo di Philip

Concluso la fase di calibrazione con il primo metodo, ora l'obiettivo consiste nel valutare se, utilizzando gli altri due modelli d'infiltrazione, sia possibile ottenere dei risultati soddisfacenti senza dover calibrare ogni evento in modo indipendente. Il periodo simulato è dal 2003 al 2012 ed è stata sufficiente una minima calibrazione della permeabilità per ottenere risultati simili a quelli del caso precedente. I risultati finali sono stati ottenuti moltiplicando la permeabilità x0.8 così da ridurre le sottostime iniziali.

evento	inizio	fine
1	15/04/2003 00:57	20/04/2003 17:57
2	11/10/2007 20:54	15/10/2007 08:54
3	08/10/2008 23:53	11/10/2008 13:53
4	21/11/2011 03:51	26/11/2011 21:51
5	13/11/2012 12:50	15/11/2012 06:50

Tabella 4.4 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo di Philip e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.41	-6	-0.19	14.13	-0.30	0.41
2	-0.13	-5	-0.34	38.56	0.54	0.13
3	0.28	0	-0.22	26.00	-0.14	0.28
4	-0.44	-4	-0.68	25.61	0.29	0.44
5	-0.30	-3	-0.57	32.48	-0.01	0.30

MEDIA	-0.04	-3.6	-0.40	27.35	0.08	0.31

Se volessimo confrontare le due calibrazioni globali, si potrebbe affermare che l'errore sui volumi è lo stesso però l'errore medio assoluto sul picco è inferiore con il modello di Philip. Inoltre è paragonabile a quello ottenuto con la calibrazione del CN evento per evento. In questo caso ci sono maggiori sottostime e l'errore medio relativo lo conferma. Non è da sottovalutare il fatto che i risultati siano simili perché questo ci fa capire come esista un'alternativa alla calibrazione evento per evento, che appare allo stesso modo efficace e sicuramente più rapida.

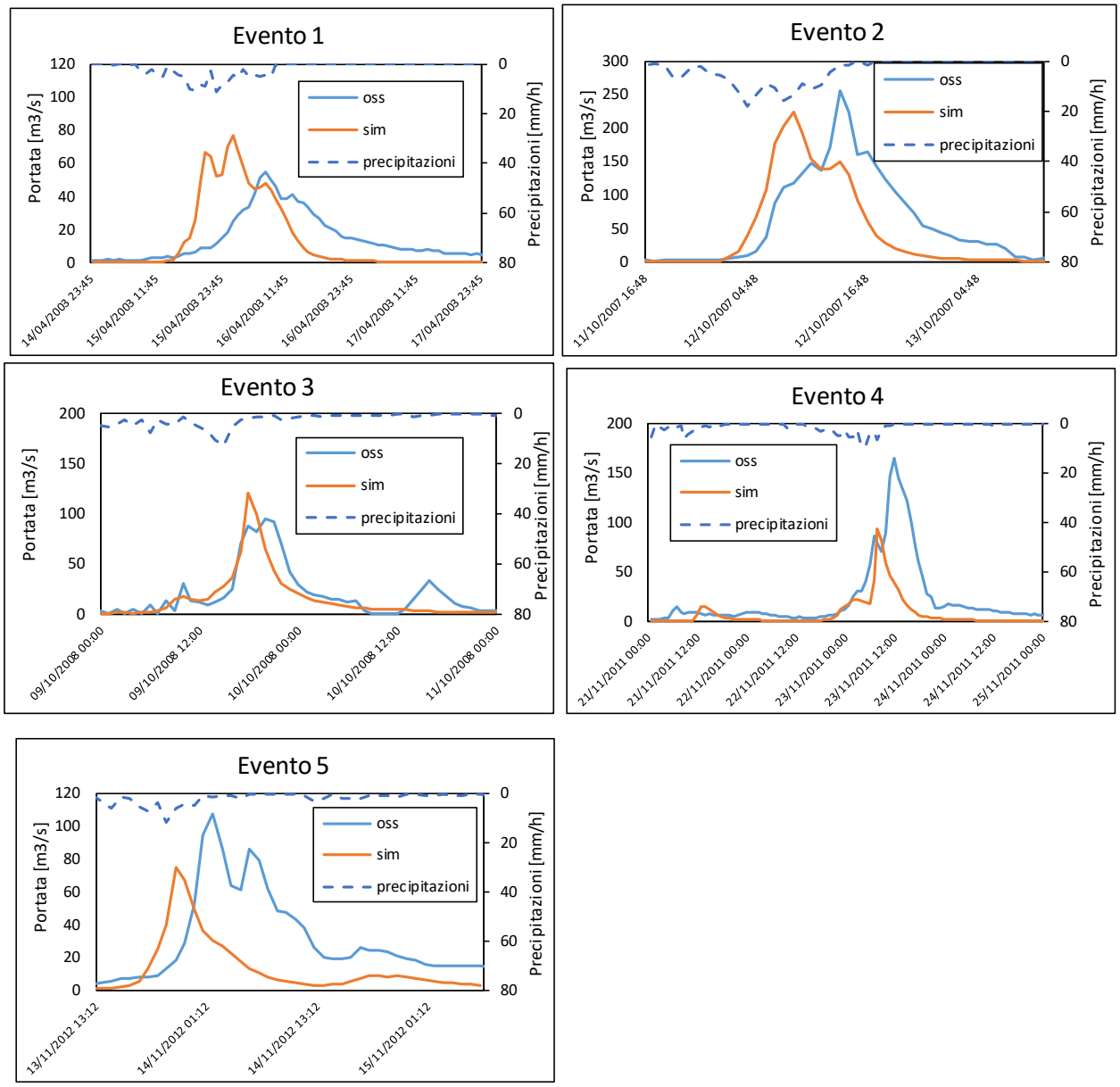


Figura 4.4 Risultati della calibrazione con il metodo di Philip per la stazione idrometrica di Beniarrés.

4.4 Calibrazione con il metodo di Green Ampt

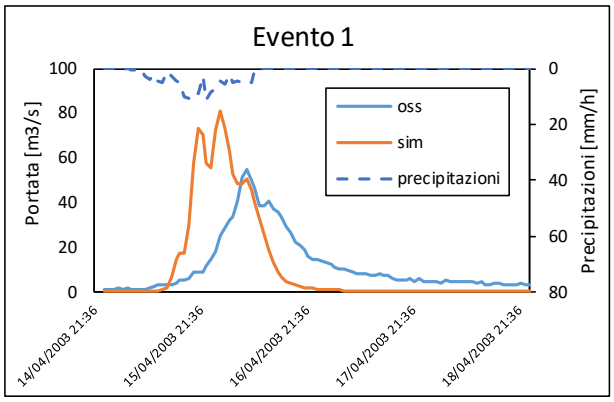
Infine, si riportano i risultati ottenuti dalla calibrazione dell'ultimo modello così da ottenere un confronto più completo e preciso. Come per Philip, anche in questo caso la calibrazione è stata rapida poiché è stato sufficiente moltiplicare x0.7 la permeabilità per ricavare i valori qui di seguito.

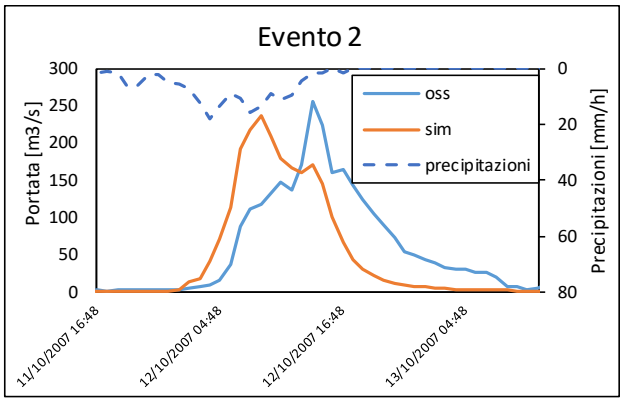
evento	inizio	fine
1	15/04/2003 00:57	20/04/2003 17:57
2	11/10/2007 20:54	15/10/2007 08:54
3	08/10/2008 23:53	11/10/2008 13:53
4	21/11/2011 03:51	26/11/2011 21:51
5	13/11/2012 12:50	15/11/2012 06:50

Tabella 4.5 Eventi presi in esame per la calibrazione con il metodo di Green Ampt e stima degli indici.

evento	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
1	0.49	-6	-0.12	15.33	-0.56	0.49
2	-0.07	-5	-0.26	39.10	0.53	0.07
3	0.35	0	-0.18	26.87	-0.22	0.35
4	-0.50	-4	-0.70	26.29	0.25	0.50
5	-0.32	-3	-0.57	32.26	-0.01	0.32
MEDIA	-0.01	-3.6	-0.37	27.97	0.00	0.34

L'errore medio relativo sul picco è praticamente nullo grazie alla compensazione tra sovrastime e sottostime delle portate osservate. Il valore dell'errore medio assoluto sul picco e dell'errore sui volumi è molto simile a quello ottenuto in precedenza con Philip. Ciò permette di utilizzare uno o l'altro modello in modo del tutto equivalente. Gli eventi 4 e 5 vengono sempre sottostimati da tutti i modelli, eccetto per la calibrazione individuale del CN.





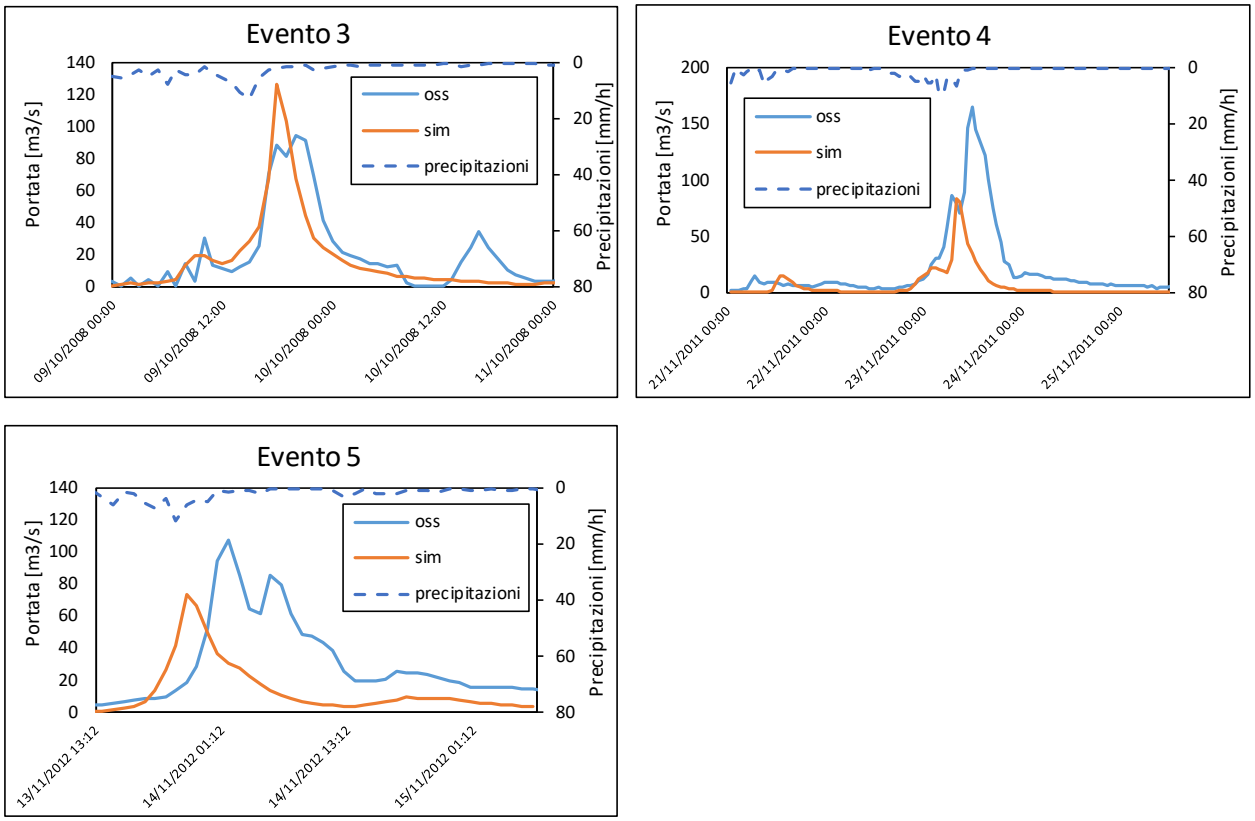


Figura 4.5 Risultati della calibrazione con il metodo di Green Ampt per la stazione idrometrica di Beniarrés.

	Ksat	CN	S0	λ
CN individuale	/	/	730	0.35
CN globale	x100	-10	500	0.3
PH	x0.8	/	/	/
GA	x0.7	/	/	/

Tabella 4.6 Riassunto della calibrazione per il bacino del Serpis con tutti i metodi e i parametri utilizzati.

Questa tabella rappresenta il riassunto delle calibrazioni che sono state eseguite per l'analisi del bacino del Serpis tramite la stazione idrometrica di Beniarrès. Lungo la prima riga che caratterizza l'applicazione del CN evento per evento, viene riportato il valore medio dei parametri idrologici sui 5 eventi a disposizione. È l'unico caso in cui non vengono modificati né il parametro CN ma soprattutto la permeabilità del suolo. Per poter confrontare le medie degli indici stimati ottenuti con i diversi metodi di calibrazione, si riporta la tabella 4.7.

	err Qmax [-]	err tmax[h]	err Vol [-]	RMSE [m3/s]	Nash [-]	err assoluto
CN individuale	0.29	-2.00	0.00	26.04	-0.06	0.32
CN globale	-0.15	-2.20	-0.41	23.71	0.21	0.47
PH	-0.04	-3.60	-0.40	27.35	0.08	0.31
GA	-0.01	-3.60	-0.37	27.97	0.00	0.34

Tabella 4.7 Confronto delle medie degli indici stimati dei diversi metodi di calibrazione per il bacino del Serpis.

La calibrazione del CN globale risulta essere la peggiore, sia per i risultati visti in precedenza sia per il fatto che necessiti di molto tempo per giungere a compimento, a causa di tutti i parametri che sono stati presi

in considerazione. Si può concludere dicendo che il modello di Philip e quello di Green Ampt sono un'ottima alternativa alla calibrazione individuale del CN poiché, con una calibrazione molto rapida, permettono di ottenere dei risultati equivalenti. Sicuramente il metodo del CN consente di annullare la media dell'errore sui volumi, però al tempo stesso l'errore medio assoluto sul picco è praticamente identico mentre quello relativo è addirittura peggiore. Calibrare un evento per volta e basarsi sulle previsioni meteorologiche per determinare i parametri idrologici del terreno, richiederebbe un carico computazionale molto più elevato.

Sorge spontaneo domandarsi cosa succerebbe se si decidesse di fare una calibrazione evento per evento anche per i bacini pre alpini milanesi. È stato dimostrato che per i bacini semi aridi, se si volesse calibrare il modello del CN, la soluzione più efficiente sarebbe quella di analizzare singolarmente gli eventi di piena. Per questo motivo si prende come esempio la stazione idrometrica di Castellanza per verificare l'eventuale funzionalità di questa tecnica. Non è stata scelta in modo completamente casuale poiché rappresenta una stazione con una media dell'errore relativo ed assoluto piuttosto bassa ed inoltre si è deciso di trascurare le stazioni del Lambro in quanto influenzate dalla presenza del lago di Pusiano. Partendo da una simulazione iniziale senza alcun tipo di calibrazione, ci si è accorti che non esiste una vera correlazione lineare tra la precipitazione cumulata e i parametri caratteristici del suolo. Il coefficiente di correlazione R^2 tra la pioggia e S0 è 0.3 mentre tra la pioggia e λ è praticamente nullo. Questo risultato ci fa capire che per i bacini umidi la calibrazione evento per evento non funziona e ciò non deve sorprendere. Tra i motivi principali risiede sicuramente il fatto che, essendo terreni umidi con una grande capacità d'infiltrazione, non si manifesta quella disconnessione idraulica che si era notata per i bacini semi aridi. Sarebbe utile in futuro valutarlo per tutte le stazioni idrometriche a disposizione in modo da possedere ulteriori confronti a supporto di questa tesi.

Infine si ritiene che non sia conveniente nemmeno utilizzare il multimodel in quanto questa tecnica non può migliorare l'idrogramma delle portate simulate. Dovendo confrontare il metodo del CN globale con il modello di Philip e di Green Ampt non si otterrebbe alcun tipo di vantaggio. Come detto prima, il primo modello presenta i risultati peggiori ed inoltre è inutile combinare gli altri due metodi perché forniscono risultati equivalenti. La situazione è differente rispetto a quanto visto nella prima parte del lavoro di tesi, in cui poteva essere utile la multi modellazione almeno per il bacino dell'Olona. Qui non ci sono particolari sovrastime e sottostime in cui si possa sfruttare la loro combinazione per ridurre le incertezze. Di conseguenza sarebbe necessario analizzare altre stazioni idrometriche dello stesso bacino ed eventualmente altri bacini semi aridi per poter arricchire questo tipo di analisi.

5 CONCLUSIONI

Con l'analisi del bacino del Serpis si è conclusa la calibrazione dei diversi modelli d'infiltrazione per i bacini pre alpini dell'area urbanizzata milanese e per i bacini semi-aridi dell'area mediterranea spagnola. Per quanto riguarda la prima parte, tutti e tre i modelli si sono dimostrati efficaci sia in fase di calibrazione che di validazione. Si è riusciti a ridurre il più possibile gli errori di simulazione tramite i parametri di calibrazione a disposizione. L'errore relativo sul picco di piena mediato sulle 8 stazioni idrometriche è praticamente nullo per ogni modello idrologico utilizzato. L'errore medio assoluto si attesta sempre intorno al 30% con valori intorno al 20% per alcuni stazioni del Lambro. Questi indici sono leggermente più elevati in fase di validazione: in particolare l'errore medio assoluto sul bacino dell'Olona fornisce dei risultati superiori al 50%.

La tecnica della multi modellazione non è necessaria per i bacini del Seveso e del Lambro in quanto le simulazioni dei modelli sono equivalenti fra loro. Può essere invece utile per l'analisi del bacino dell'Olona nel quale sono maggiori le discordanze tra le diverse simulazioni, in termini di sottostime e sovrastime.

Dalle tabelle di contingenza si evince che il modello idrologico più efficiente è il Green Ampt in quanto presenta il maggior numero di eventi corretti, superiore al 50% su un campione di 71 eventi di piena tra la fase di calibrazione e di validazione. Gli altri due modelli si attestano intorno al 45% con un numero piuttosto significativo di mancati allarmi, poco inferiore al 30%.

Dall'approccio del multimodel e dalle tabelle di contingenza in fase di pre calibrazione però si evince che l'unico modello che potrà dare certezze è il Curve Number. Mentre le simulazioni iniziali del modello di Philip e di Green Ampt sono praticamente sempre nulle, il CN presenta già 15 eventi corretti su un totale di 46 eventi considerati.

L'applicazione di questi modelli d'infiltrazione risulta utile anche per bacini semi-aridi in cui il numero degli eventi meteorologici è sicuramente inferiore rispetto alle precipitazioni molto più frequenti sui bacini pre alpini.

La calibrazione del SCS-CN evento per evento è sicuramente migliore a quella standard su tutto l'orizzonte temporale. L'errore assoluto è intorno al 30% mentre l'errore sui volumi si è completamente annullato. L'utilizzo del metodo di Philip e di Green Ampt è un'alternativa molto valida ed efficiente in quanto essi forniscono un errore medio assoluto molto simile ed un errore medio relativo sul picco quasi nullo, senza la necessità di calibrare ogni evento di piena in modo indipendente.

La calibrazione con il metodo del Curve Number evento per evento può risultare efficace all'interno della previsione meteorologica grazie alla correlazione lineare che sussiste tra il parametro S0 e la precipitazione cumulata. È una caratteristica tipica dei bacini semi-aridi che infatti non trova riscontro nei bacini pre alpini, come si è visto per la stazione idrometrica di Castellanza.

Infine, la tecnica del multimodel per i bacini semi-aridi non comporta alcun vantaggio poiché le simulazioni sono equivalenti fra loro, eccetto per quelle del CN (globale), e in particolar modo concordi di segno.

BIBLIOGRAFIA

1. Ali S., Islam A., Mishra P., Sikka A., 2016. Green-Ampt approximations: A comprehensive analysis. Journal of Hydrology.
2. Amengual A., Carrió S., Ravazzani G., 2017. A Comparison of Ensemble Strategies for Flash Flood Forecasting: The 12 October 2007 Case Study in Valencia, Spain.
3. Amengual A., Romero R., 2006. A Hydrometeorological Modeling Study of a Flash-Flood Event over Catalonia, Spain. Journal of Hydrometeorology.
4. Amengual A., Romero R., Alonso S., 2008. Hydrometeorological ensemble simulations of flood events over a small basin of Majorca Island, Spain.
5. Autorità di Bacino del fiume Po. Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino del Lambro. Relazione tecnica.
6. Autorità di Bacino del fiume Po. Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino dell'Olona. Relazione tecnica.
7. Baratti E., 2014. Stima dei parametri di modelli idrologici mediante ottimizzazione dell'utilità.
8. Bartholomes J.C., Thielen J., Ramos M., Gentilini S., 2009. The european flood alert System EFAS-Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. Hydrology and Earth System Sciences.
9. Bocchiola D., De Michele C., Rosso R., 2003. Review of recent advances in index flood estimation. HAL.
10. Borga M., Boscolo P., Zanon F., Sangati M., 2006. Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps.
11. Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M., 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. Journal of Hydrology.
12. Burkham D.E., 1970. A method for relating infiltration rates to streamflow rates in perched streams US.
13. Chahinian N., Moussa R., Andrieux P., Voltz M., 2004. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. Journal of Hydrology.
14. Daeryong P., Momcilio M., 2014. Analysis of a changing hydrologic flood regime using the Variable Infiltration Capacity model. Journal of Hydrology.
15. De Fazio A., 2015. Modeling of river floods in semiarid basins.
16. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology.
17. Fereshte H. Forood S., Koorosh K., 2014. Modelling infiltration and geostatical analysis of spatial variability of sorptivity and trasmissivity in a flood spreading area.
18. Feki M, 2013-2016. Uncertainty reduction of soil moisture simulations based on combined improvement approach of model structure and parametrization.
19. Furnari S. Modello idrogeologico di un'area campione del territorio italiano in relazione ai dati raccolti con la L. 464/84.
20. Gabellani S., Silvestro F., Rudari R., Boni G., 2008. General calibration metholodgy for a combined Horton-SCS infiltration scheme in flash flood modeling. Natural Hazard and Earth System Sciences.
21. Jeon J., Park C., Engel B., 2014. Comparison of Performance between Genetic Algorithm and SCE-UA for calibration of SCS-CN Surface Runoff Simulation.
22. Jumadar A., Pathirana A., Gersonius B., Zevenbergen C., 2008. Incorpoating infiltration modelling in urban flood management. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.

23. LegaAmbiente. L'Italia delle alluvioni. Gli impatti degli eventi estremi di pioggia nelle città italiane.
24. Lenhart T., Eckhardt K., Fohrer N., Frede H., 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth.
25. Lombardi G., 2016. La potenzialità di previsioni probabilistiche idro-meteorologiche sull'area urbana di Milano.
26. Lombardi L., 2011. Calibrazione di modelli idrologici con algoritmi multiobiettivo.
27. Mancini M., 1990. La modellazione distribuita della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento. Tesi di dottorato.
28. Montaldo N., Ravazzani G., Mancini M.,2007. On the prediction of the Toce alpine basin floods with distribuited hydrologic models.
29. Moretti G., Montanari A., 2008. Inferring the flood frequency distribution for an ungauged basin using a spatially distribuited rainfall-runoff model. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
30. Pastor F., Gòmez L., Estrela M., 2010. Numerical study of the October 2007 flash flood in the Valencia región (Eastern Spain): the role of orography. Natural Hazard and Earth System Sciences.
31. Provincia di Milano. Sperimentazione di modelli progettuali-tipo per la riqualificazione fluviale: il caso del F. Olona a Nerviano. Dicembre 2008.
32. Rabuffetti D., Ravazzani G., Barbero S., Mancini M., 2009. Operational flood-forecasting in the Piemonte Region-development and verification of a fully distribuited physically-oriented hydrological model. Advances in Geosciences.
33. Ravazzani G., Bocchiola D., Groppelli B., Soncini A., Rulli M.C., Colombo F., Mancini M.,2015. Continuous stream flow simulation for index flood estimation in an Alpine basin of Northern Italy.
34. Ravazzani G., Gianoli P., Meucci S., Mancini M., 2014. Assessing downstream impacts of detention basins in urbanized river basins using a distribuited hydrological model.
35. Ravazzani G., Gianoli P., Meucci S., Mancini M., 2012. Indirect Estimation of Design Flood in Urbanized River Basins Using a Distribuited Hydrological Model.
36. Reggiani P., Todini E., Meibner D., 2016. On mass and momentum conservation in the variable-parameter Muskingum method. Journal of Hydrology.
37. Rojas R., Zambrano M., 2012. Tutorial for interfacing hydroPSO with SWAT-2005 and MODFLOW-2005.
38. Rosso R., Rulli M.C., 2002. An integrated simulation method for flash-flood risk assessment. Effects of changes in land-use under a historical perspective. HAL.
39. Wang L., Chen D., Li J., Zhao N., 2001. Coupling Green-Ampt infiltration method and two-dimensional kinematic wave theory for flood forecast in semi-arid catchment. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
40. Zhang X., Srinivasan R., Zhao K., Van Liew M., 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model.