# POLITECNICO DI MILANO

**Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale**

**Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE -IDRAULICA**

# VALIDAZIONE DI UN MODELLO IDROLOGICO DISTRIBUITO PER IL BACINO LOMBARDO DI SEVESO – OLONA - LAMBRO

**Relatore: Prof. Ing. Giovanni RAVAZZANI**

**Tesi di Laurea di:**
**Alessandro PAGANI**
**Matr. 864841**

**Anno Accademico 2018-2019**

# Sommario

*INDICE DELLE FIGURE* ..... *3*

*INDICE DELLE TABELLE* ..... *6*

*Introduzione* ..... *8*

*1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO* ..... *10*

**1.1 Olona** ..... **11**

**1.2 Seveso** ..... **13**

**1.3 Lambro** ..... **15**

**1.4 Dati a disposizione** ..... **17**

**1.5 Tessitura del suolo** ..... **23**

*2 IL MODELLO IDROLOGICO FEST-WB* ..... *26*

**2.1 I dati in ingresso** ..... **28**

**2.2 L'infiltrazione** ..... **29**

2.2.1 Metodo del Curve Number ..... 29

2.2.2 Metodo di Philip ..... 31

2.2.3 Metodo di Green Ampt ..... 32

*3 CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO SUI FIUMI SEVESO, OLONA E LAMBRO* ..... *34*

**3.1 Calibrazione dei parametri del modello** ..... **35**

3.1.1 Analisi di sensitività ..... 35

3.1.2 Calibrazione ..... 38

**3.2 Validazione del modello idrologico** ..... **43**

3.2.1 Validazione CURVE NUMBER ..... 47

3.2.2 Validazione Green – Ampt ..... 77

**3.3 Confronto tra metodi** ..... **105**

*4 CONCLUSIONI* ..... *107*

*BIBLIOGRAFIA* ..... *108*

# 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.* ..... 10
*Figura 1-2 Individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi.* ..... 12
*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.* ..... 13
*Figura 1-4 .Individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi.* ..... 14
*Figura 1-5 Individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi.* ..... 16
*Figura 1-6 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento delle precipitazioni e del livello idrometrico.* ..... 18
*Figura 1-7 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento della temperatura dell'aria.* ..... 19
*Figura 2-1 Illustrazione schematica del ciclo idrologico.* ..... 26
*Figura 2-2 Schema concettuale del modello FEST-WB.* ..... 28
*Figura 2-3 Contenuto idrico lungo il profilo del suolo.* ..... 33
Figura 3-1 Evento meteorologico scartato dall'analisi di validazione ..... 48
Figura 3-2 Castglione - Lozza: Evento 2 ..... 49
Figura 3-3 Castglione - Lozza: Evento 3 ..... 49
Figura 3-4 Castglione - Lozza: Evento 5 ..... 50
Figura 3-5 Castglione - Lozza: Evento 6 ..... 50
Figura 3-6 Castglione - Lozza: Evento 7 ..... 51
Figura 3-7 Castglione - Lozza: Evento 8 ..... 51
Figura 3-8 Castellanza: evento 2 ..... 53
Figura 3-9 Castellanza: evento 3 ..... 53
Figura 3-10 Castellanza: evento 5 ..... 54
Figura 3-11 Castellanza: evento 6 ..... 54
Figura 3-12 Castellanza: evento 7 ..... 55
Figura 3-13 Cantù - Asnago: evento 1 ..... 57
Figura 3-14 Cantù - Asnago: evento 2 ..... 57
Figura 3-15 Cantù - Asnago: evento 3 ..... 58
Figura 3-16 Cantù - Asnago: evento 6 ..... 58
Figura 3-17 Cantù - Asnago: evento 8 ..... 59
Figura 3-18 Caslino d'Erba: evento 1 ..... 60
Figura 3-19 Caslino d'Erba: evento 2 ..... 61
Figura 3-20 Caslino d'Erba: evento 3 ..... 61
Figura 3-21 Caslino d'Erba: evento 6 ..... 62
Figura 3-22 Caslino d'Erba: evento 7 ..... 62
Figura 3-23 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 1 ..... 64
Figura 3-24 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 2 ..... 64
Figura 3-25 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 3 ..... 65
Figura 3-26 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 5 ..... 65
Figura 3-27 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 6 ..... 66
Figura 3-28 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 7 ..... 66
Figura 3-29 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 8 ..... 67
Figura 3-30 Lesmo - Peregallo: evento 1 ..... 68
Figura 3-31 Lesmo - Peregallo: evento 2 ..... 69
Figura 3-32 Lesmo - Peregallo: evento 3 ..... 69
Figura 3-33 Lesmo - Peregallo: evento 5 ..... 70

Figura 3-34 Lesmo - Peregallo: evento 6 ..... 70
Figura 3-35 Lesmo - Peregallo: evento 7 ..... 71
Figura 3-36 Lesmo - Peregallo: evento 8 ..... 71
Figura 3-37 Milano - via Feltre: evento 1 ..... 73
Figura 3-38 Milano - via Feltre: evento 2 ..... 73
Figura 3-39 Milano - via Feltre: evento 3 ..... 74
Figura 3-40 Milano - via Feltre: evento 5 ..... 74
Figura 3-41 Milano - via Feltre: evento 6 ..... 75
Figura 3-42 Milano - via Feltre: evento 7 ..... 75
Figura 3-43 Milano - via Feltre: evento 8 ..... 76
Figura 3-44 Castiglione - Lozza: evento 2 ..... 78
Figura 3-45 Castiglione - Lozza: evento 3 ..... 78
Figura 3-46 Castiglione - Lozza: evento 5 ..... 79
Figura 3-47 Castiglione - Lozza: evento 6 ..... 79
Figura 3-48 Castiglione - Lozza: evento 7 ..... 80
Figura 3-49 Castiglione - Lozza: evento 8 ..... 80
Figura 3-50 Castellanza: evento 3 ..... 82
Figura 3-51 Castellanza: evento 6 ..... 82
Figura 3-52 Castellanza: evento 8 ..... 83
Figura 3-53 Cantù - Asnago: evento 1 ..... 84
Figura 3-54 Cantù - Asnago: evento 2 ..... 85
Figura 3-55 Cantù - Asnago: evento 3 ..... 85
Figura 3-56 Cantù - Asnago: evento 5 ..... 86
Figura 3-57 Cantù - Asnago: evento 6 ..... 86
Figura 3-58 Cantù - Asnago: evento 8 ..... 87
Figura 3-59 Caslino d'Erba: evento 1 ..... 88
Figura 3-60 Caslino d'Erba: evento 2 ..... 88
Figura 3-61 Caslino d'Erba: evento 3 ..... 89
Figura 3-62 Caslino d'Erba: evento 6 ..... 89
Figura 3-63 Caslino d'Erba: evento 7 ..... 90
Figura 3-64 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 1 ..... 91
Figura 3-65 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 2 ..... 92
Figura 3-66 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 3 ..... 92
Figura 3-67 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 5 ..... 93
Figura 3-68 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 6 ..... 93
Figura 3-69 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 7 ..... 94
Figura 3-70 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 8 ..... 94
Figura 3-71 Lesmo - Peregallo: evento 1 ..... 96
Figura 3-72 Lesmo - Peregallo: evento 2 ..... 96
Figura 3-73 Lesmo - Peregallo: evento 3 ..... 97
Figura 3-74 Lesmo - Peregallo: evento 5 ..... 97
Figura 3-75 Lesmo - Peregallo: evento 6 ..... 98
Figura 3-76 Lesmo - Peregallo: evento 7 ..... 98
Figura 3-77 Lesmo - Peregallo: evento 8 ..... 99
Figura 3-78 Milano - via Feltre: evento 1 ..... 100
Figura 3-79 Milano - via Feltre: evento 2 ..... 101
Figura 3-80 Milano - via Feltre: evento 3 ..... 101
Figura 3-81 Milano - via Feltre: evento 5 ..... 102
Figura 3-82 Milano - via Feltre: evento 6 ..... 102

Figura 3-83 Milano - via Feltre: evento 7 ..... 103
Figura 3-84 Milano - via Feltre: evento 8 ..... 103

# INDICE DELLE TABELLE

*Tabella 1-1 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Olona.* ..... 12
*Tabella 1-2 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del torrente Seveso.* ..... 14
*Tabella 1-3 Caratteristiche morfologiche dei sottobacini del fiume Lambro.* ..... 16
*Tabella 1-4 Descrizione delle stazioni idrometriche di interesse.* ..... 18
*Tabella 1-5 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Olona.* ..... 20
*Tabella 1-6 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Seveso.* ..... 20
*Tabella 1-7 Scale di deflusso delle stazioni idrometriche presenti sul fiume Lambro.* ..... 20
*Tabella 1-8 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Maidment, 2001).* ..... 23
*Tabella 1-9 Riclassificazione della mappa della tessitura del suolo.* ..... 24
*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.* ..... 24
*Tabella 3-1 Riassunto delle classi di indici di sensibilità.* ..... 37
Tabella 3-2 Riassunto della calibrazione con il metodo del CN con i parametri utilizzati per ogni stazione idrometrica ..... 41
Tabella 3-3 Calibrazione con il metodo PH per stazione idrometrica ..... 42
Tabella 3-4 Calibrazione con il metodo GA per stazione idrometrica ..... 42
Tabella 3-5 Castiglione – Lozza ..... 44
Tabella 3-6 Castellanza ..... 44
Tabella 3-7 Cantù - Asnago ..... 45
Tabella 3-8 Caslino d'Erba ..... 45
Tabella 3-9 Costa Masnaga - Lambrugo ..... 46
Tabella 3-10 Lesmo - Peregallo ..... 46
Tabella 3-11 Milano - Via Feltre ..... 47
Tabella 3-12 Castiglione – Lozza ..... 48
Tabella 3-13 Errori stimati sezione Castiglione – Lozza ..... 52
Tabella 3-14 Castellanza ..... 52
Tabella 3-15 Errori stimati sezione Castellanza ..... 55
Tabella 3-16 Cantù - Asnago ..... 56
Tabella 3-17 Errori stimati sezione Cantù - Asnago ..... 60
Tabella 3-18 Caslino d'Erba ..... 60
Tabella 3-19 Errori stimati sezione Caslino d'Erba ..... 63
Tabella 3-20 Costa Masnaga - Lambrugo ..... 64
Tabella 3-21 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo ..... 67
Tabella 3-22 Lesmo - Peregallo ..... 68
Tabella 3-23 Errori stimati sezione Lesmo - Peregallo ..... 72
Tabella 3-24 Milano - Via Feltre ..... 72
Tabella 3-25 Errori stimati sezione Milano – via Feltre ..... 76
Tabella 3-26 Media degli indici di valutazione del metodo CN per il bacino di Seveso - Olona – Lambro ..... 77
Tabella 3-27 Errori stimati sezione Castiglione - Lozza ..... 81
Tabella 3-28 Errori stimati sezione Castellanza ..... 83
Tabella 3-29 Errori stimati sezione Cantù - Asnago ..... 87
Tabella 3-30 Errori stimati sezione Caslino d'Erba ..... 90
Tabella 3-31 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo ..... 95
Tabella 3-32 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo ..... 99
Tabella 3-33 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo ..... 104
Tabella 3-34 Media degli indici di valutazione del metodo GA per il bacino di Seveso - Olona – Lambro ..... 104
Tabella 3-35 Confronto indici medi per la valutazione dei metodi utilizzati ..... 105

Tabella 3-36 Media CN delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento ..... 106
Tabella 3-37 Media GA delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento ..... 106
Tabella 3-38 Media CN delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento ..... 106
Tabella 3-39 Media GA delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento ..... 106

# Introduzione

Più che mai negli ultimi anni, si sente parlare di rischio idrogeologico dovuto all'esondazione di corsi d'acqua (in ambito urbano e non), rendendo la problematica di interesse pubblico.
Svariati esempi di recenti alluvioni dovute ad eventi meteorologici estremi sono noti anche per nostra recente esperienza, come ad esempio l'alluvione del 15 novembre 2014 che interessò Milano ed il suo Hinterland in Lombardia, la provincia di Alessandria in Piemonte e Genova, Savona ed Imperia in Liguria.

L'evidente incremento delle precipitazioni ad alta intensità, a scala regionale e locale, supporta 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 (Sonvico, 2016).
Una stima accurata e ben distribuita dei parametri idrologici coinvolti nel bilancio si rivela dunque essenziale al fine di intervenire con le dovute precauzioni.

A questo proposito si esplora la possibilità di sviluppare un modello idrologico distribuito che risolva l'equazione di bilancio idrologico del suolo, con funzionamento in continuo, fisicamente basato su un bilancio di massa: il modello idrologico si chiama Flash-flood Event-based Spatially-distributed-rainfall-runoff Transformation Water Balance (FEST-WB, Mancini 1990).

Essendo il modello FEST-WB distribuito, esso richiede una calibrazione per ogni stazione idrometrica del bacino, in modo da avere un'accuratezza ottimale nella stima delle variabili idrologiche.
Infatti, una sovrastima od una sottostima dei valori di deflusso porterebbero a gravi conseguenze.
Con il passare del tempo, le condizioni atmosferiche variano ed è necessario che i modelli utilizzati per descrivere gli afflussi ed i deflussi vengano validati, in modo da rendere sempre affidabile la stima di tali fenomeni.

Nell'anno 2016, Sonvico ha condotto uno studio finalizzato all'applicazione di diversi metodi per la stima dell'infiltrazione nel suolo, utili a migliorare la previsione delle piene.

L'infiltrazione svolge un ruolo fondamentale all'interno dei processi idrologici, poiché influenza in modo rilevante la formazione dei deflussi.

Essa è definita come il movimento dell'acqua dalla superficie del terreno all'interno del suolo, passando attraverso la zona insatura (detta anche zona vadosa); filtrazione, invece, è il nome dato al moto in terreno saturo.
L'infiltrazione dipende fortemente dalla matrice solida del suolo (composizione granulometrica ed aggregazione dei singoli granuli), che è caratterizzata tra le altre cose, da porosità, conducibilità e ritenzione di volume idrico.
La modellazione di tali fenomeni è basata sulla legge di Darcy e sull'equazione di bilancio di massa.

Si presentano tre metodi per la stima dell'infiltrazione: il metodo empirico del SCS-CN (1972) ed i due metodi fisicamente basati di Philip (1957) e Green-Ampt (1911); gli ultimi due metodi sono stati implementati per la prima volta a scala di bacino all'interno del modello idrologico distribuito FEST. Inoltre, a scopo di compensazione delle incertezze intrinseche dei singoli modelli, Sonvico valuta l'efficienza di un approccio *multimodel.*

Questa tesi si propone l'obiettivo di validare il modello FEST-WB per il bacino di Seveso-Olona-Lambro, il quale sottende l'area urbana di Milano e del suo Hinterland (altamente urbanizzata), estendendo l'analisi effettuata da Sonvico nel 2016 fino ad oggi: infatti, alla luce dei netti cambiamenti climatici ed ambientali avvenuti recentemente, si rende necessario confermare sia quali modelli utilizzare, sia i dati estrapolati dalla loro applicazione.

# 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. Vengono analizzati i bacini pre alpini interessati dal nostro studio, quali il Seveso, l'Olona e il Lambro.

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.

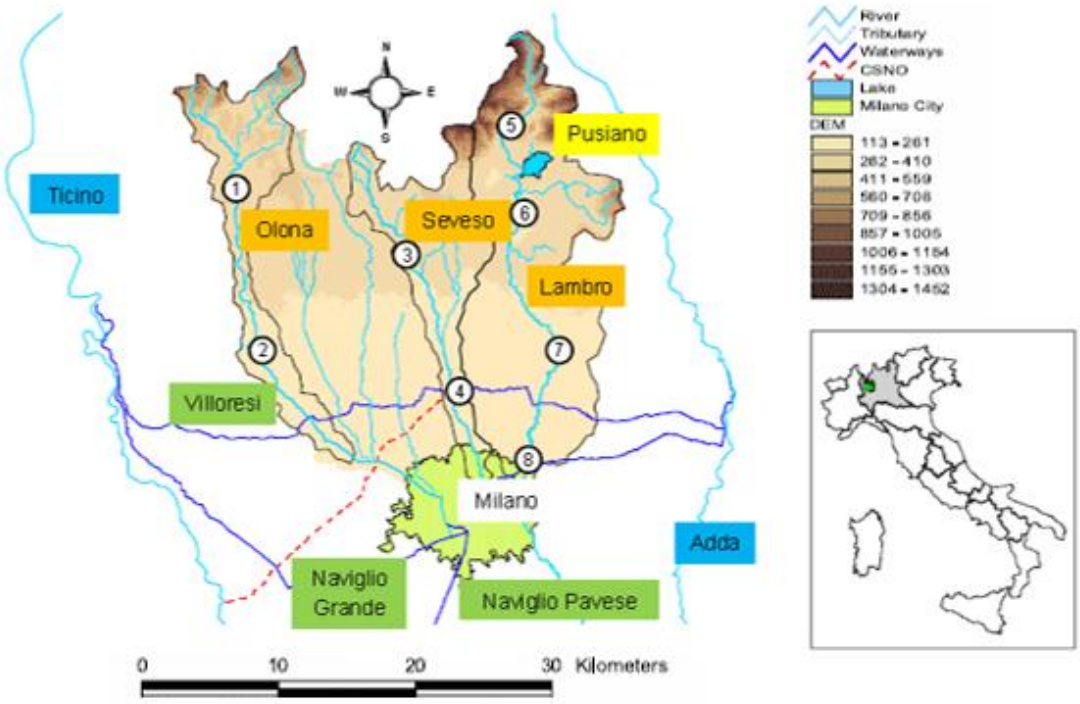


*Figura 1-1 Bacini idrografici che convogliano le loro acque a Milano. I cerchi bianchi indicano le stazioni idrometriche: 1) Lozza, 2) Castellanza, 3) Cantù, 4) Palazzolo, 5) Caslino, 6) Lambrugo, 7) Peregallo, 8) Milano Feltre.*

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 $km^2$, ubicato per il 99% circa (902 $km^2$) 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.

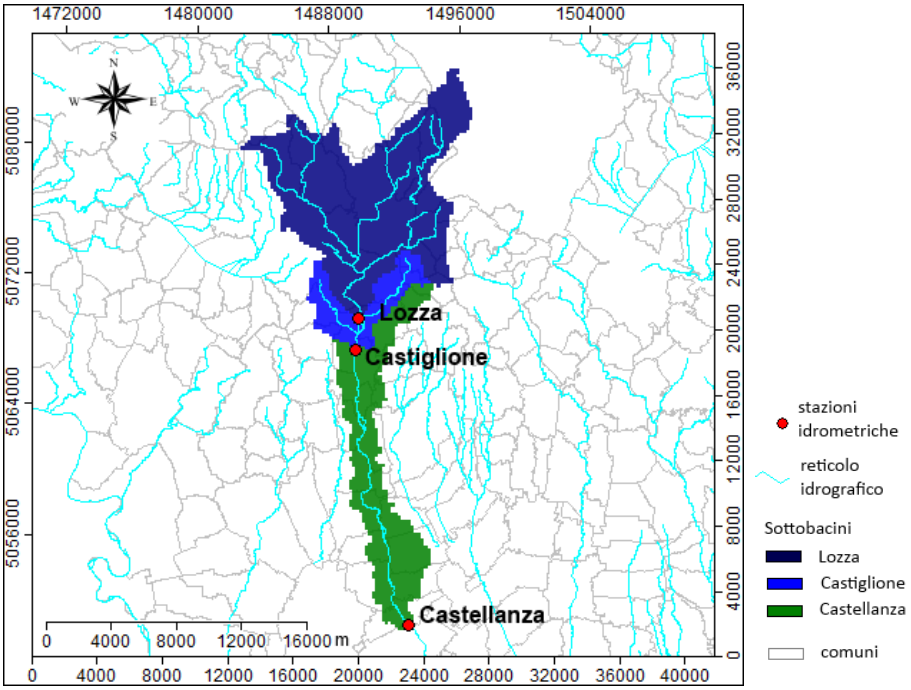


*Figura 1-2 Individuazione del bacino del fiume Olona analizzato nel lavoro di tesi.*

| | Lozza | Castiglione | Castellanza |
|---|---|---|---|
| Area bacino [km2] | 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 km2, altitudine media 472 m s.l.m.) ha funzionato nel periodo dal 1939 al 1956; la portata media risulta essere di 2.3 m3/s mentre la massima registrata e stata di 59 m3/s il 12 novembre 1951. A Legnano la portata media aumenta a 4 m3/s, mentre a Rho, dopo che il fiume riceve gli apporti di Bozzente e Lura, si toccano i 6.9 m3/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 km2 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.

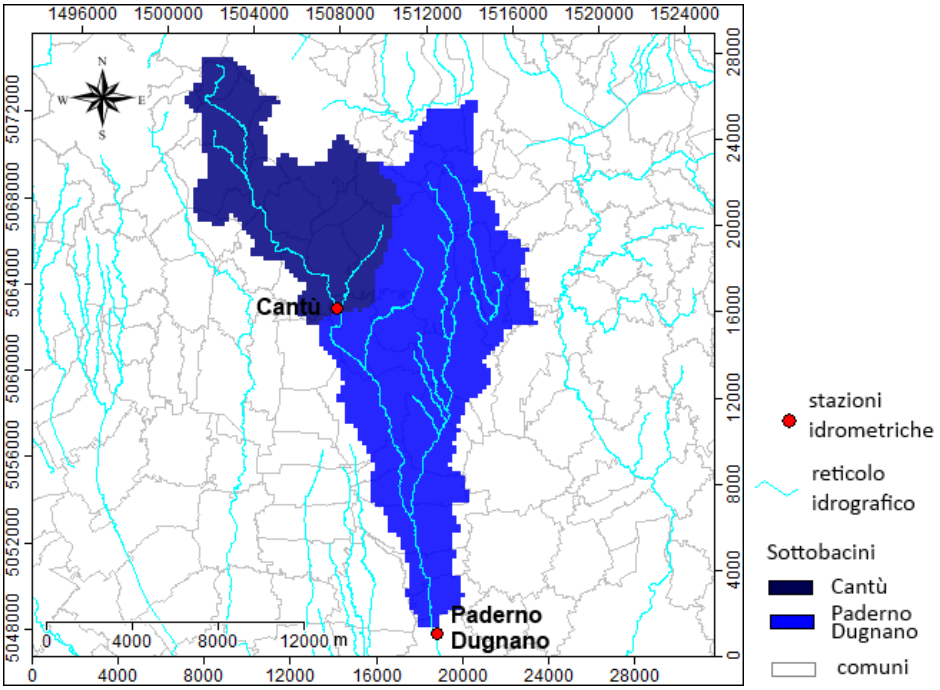


*Figura 1-4 .Individuazione del bacino del torrente Seveso analizzato nel lavoro di tesi.*

| | Cantù | Paderno Dugnano |
|---|---|---|
| Area bacino [km2] | 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 km2 ) 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.

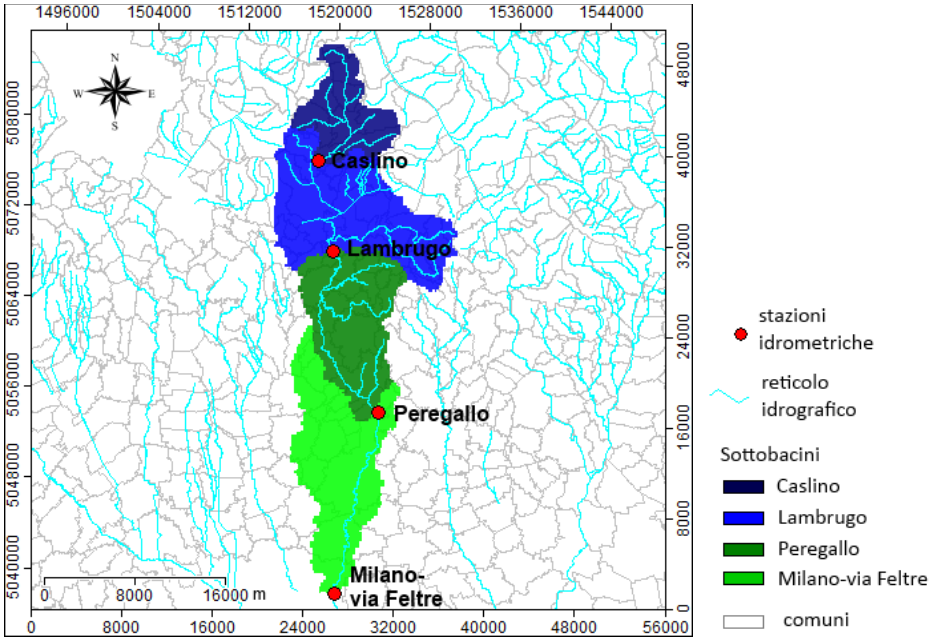


*Figura 1-5 Individuazione del bacino del fiume Lambro analizzato nel lavoro di tesi.*

| | Caslino | Lambrugo | Peregallo | Milano-via Feltre |
|---|---|---|---|---|
| Area bacino [km2] | 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 i dati per gli anni dal 2003 al 2019.
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 7 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 |
| 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.*

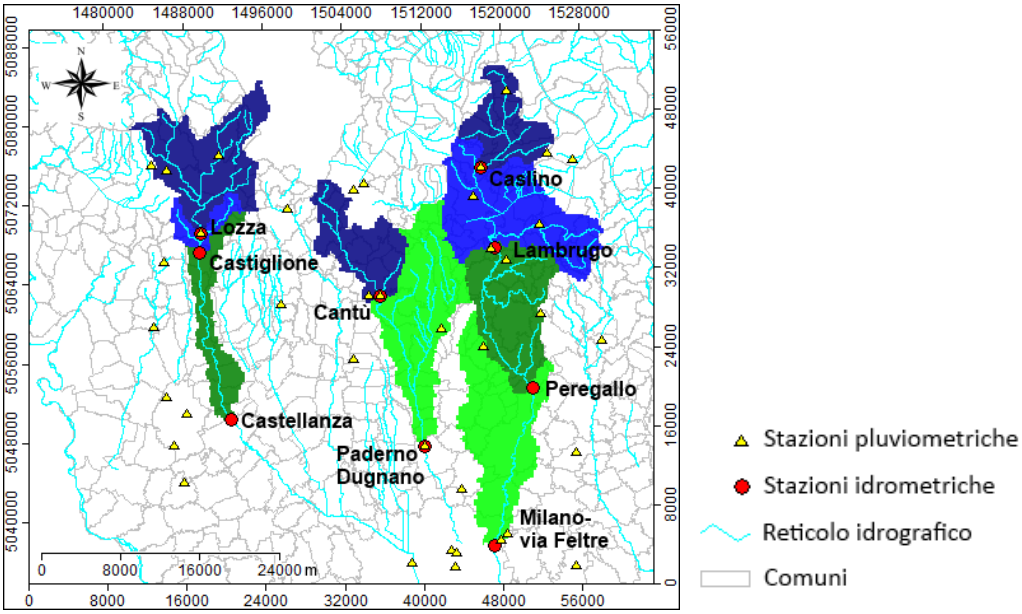


*Figura 1-6 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento delle precipitazioni e del livello idrometrico.*

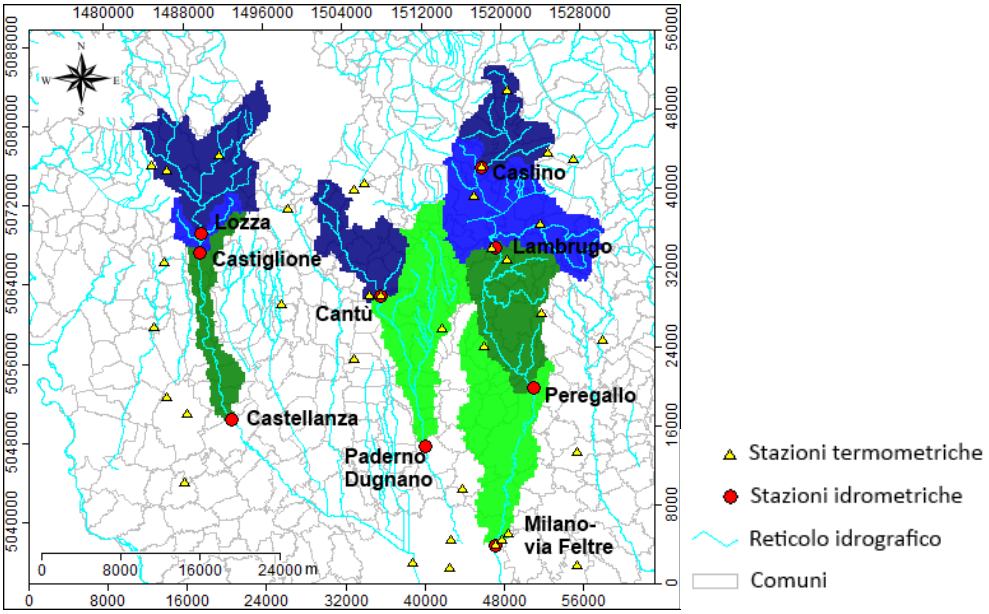


*Figura 1-7 Distribuzione geografica delle stazioni di rilevamento della temperatura dell'aria.*

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.

Si è preferito non includere la stazione nell'elaborato.

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 |
|---|---|---|---|---|
| Castiglione - Lozza | Q=11.704*(h-0.198)^1.95 | 0.50 < h < 1.175 | 27/03/2013 - 10/02/2014 | storica |
| Castiglione - Lozza | transizione | 0.47 < h< 1.015 | 10/02/2014 - 14/01/2015 | storica |
| Castiglione - Lozza | Q=12.291*(h-0.307)^1.334 | 0.7 < h < = 0.85 | 14/01/2015 - ad oggi | 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 |
| Cantù | Q=14.09*(h-0.272)^1.335 | 0.38 < h < 1.41 | 26/10/2015 – 01/01/2017 | 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=24.261*(h-0.348)^0.992 | 0.38 < h < 1.41 | dal 01/01/2001 – ad oggi | attiva |
| Peregallo | Q=14.1235*(H+0.1192) ^2.4924 | 0 < h < 3 | dal 1/1/1988 | storica |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | al 31/12/2004 | |
| 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 al 12/12/2017 | Storica |
| Peregallo | Q = 93.151*(h-1.168)^0.2903 | 1.3 <= h < 1.85 | 03/05/2010 al 12/12/2014 | Attiva |
| Peregallo | Q = 27.032*(h+0.212)^1.633 | -0.06 < h <= 1.34 | 12/12/2014 – ad oggi | Attiva |
| Peregallo | Q = 93.151*(h-1.168)^0.2903 | 1.34 <= h < 1.85 | 12/12/2014 – ad oggi | 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 | Storica |
| Milano- via Feltre | Q = 108.481*(h-1.922) ^0.276 | 2.33 < h < 3.85 | 06/08/2014 - ad oggi | Storica |
| Milano- via Feltre | Q=23.981*(h-0.206)^1.247 | 0.38 < h(m) < =0.8 | 01/01/2015 - ad oggi | Attiva |
| Milano- via Feltre | Q=27.743*(h-0.215)^1.491 | 0.8 < h(m) <=2.33 | 01/01/2015 - ad oggi | Attiva |
| Milano- via Feltre | Q=108.481*(h-1.922)^0.276 | 2.33 < h(m) <=3.85 | 01/01/2015 - 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 di eventi di piena (dal 2013 al 2019).

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 ($Q = 8.24*(h-0.02)^{2.548}$, $0.28 < h < 1.055$).

**- 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 da Davide Sonvico (2016) 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, Sonvico ha 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 è 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.

# 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.

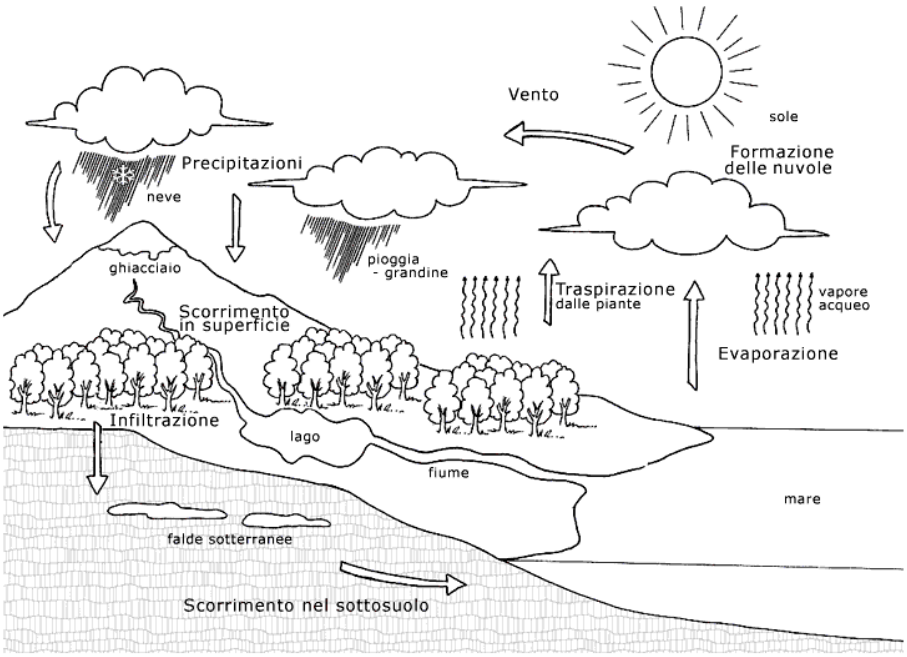


*Figura 2-1 Illustrazione schematica del ciclo idrologico.*

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.

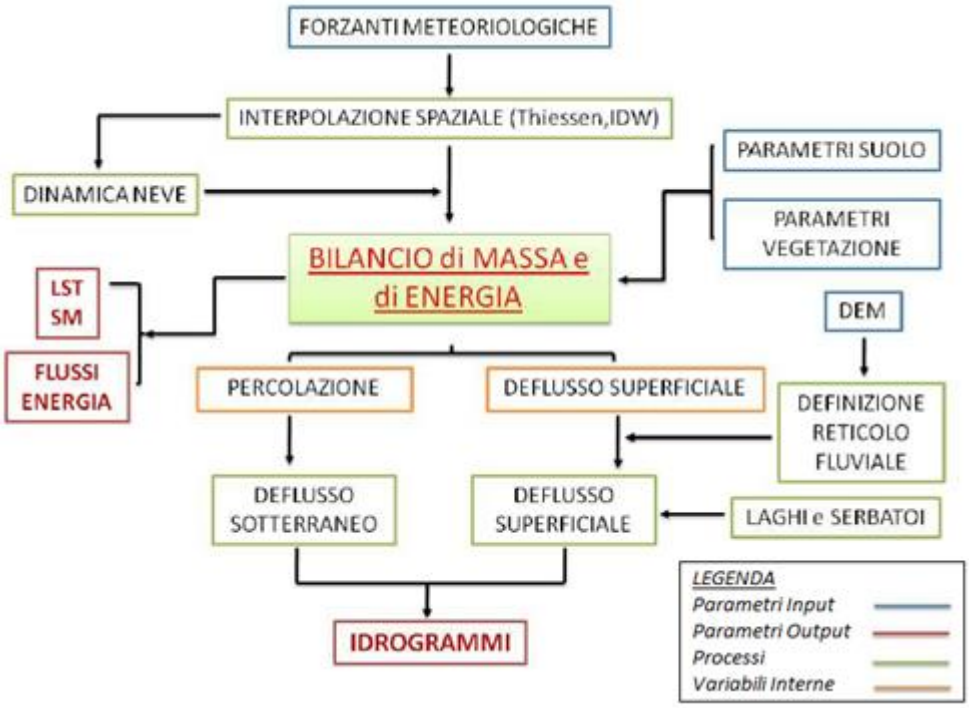


*Figura 2-2 Schema concettuale del modello FEST-WB.*

## 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 umidità 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:

$$CN_I = \frac{4.2 \cdot CN_{II}}{10 - 0.058 \cdot CN_{II}} \qquad (2.1)$$

e successivamente si ottiene il valore di $S_I$ con la formula

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

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

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \qquad (2.3)$$

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

$$S_t = S_I(1 - \varepsilon_t) \qquad (2.4)$$

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 $\theta=\theta_{res}$ ($\varepsilon_t=0$).

### 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:

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

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:

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

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 $\theta i$, 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 $\eta$ 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.

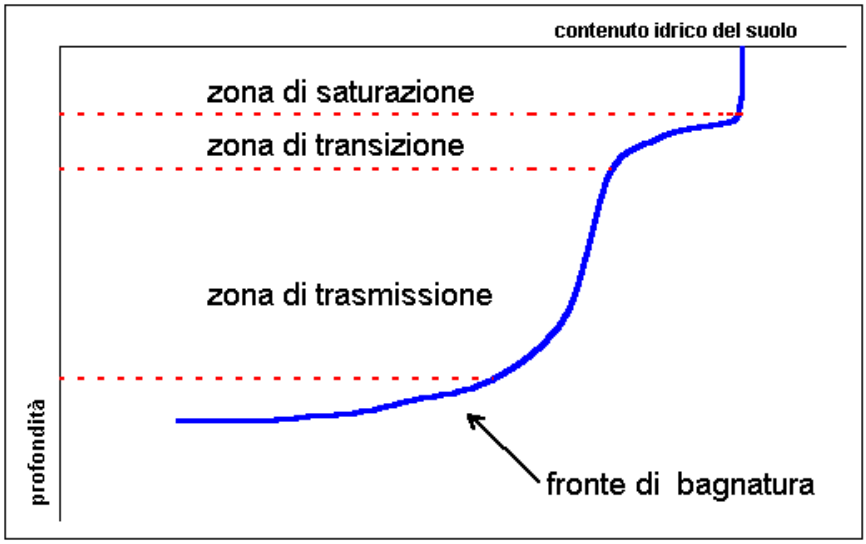


*Figura 2-3 Contenuto idrico lungo il profilo del suolo.*

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.

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

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 – 2016 e la validazione negli anni seguenti 2016-2019.

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 Calibrazione dei parametri del modello

### 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. Sonvico si è concentrato 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. In questo caso specifico non è stato necessario eseguire un'analisi di sensitività in quanto si sono sfruttati i risultati provenienti dalla tesi precedente "Implementazione di un modello idrologico per la protezione idraulica della città di Milano" (Bocus e Di Luccio, 2013).

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 lo studio, Sonvico ha portato 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 $\Delta x$ 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- $\Delta x$ e x2=x0+ $\Delta x$. Gli output del modello provenienti dall'implementazione di questi valori sono y1 e y2. L'indice di sensitività è calcolato come segue:

$$I = \frac{(y2 - y1)/yo}{2\Delta \mathrm{x}} \qquad (3.1)$$

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 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.

Per i dettagli relative all'analisi di sensitività, si rimanda all'elaborato di tesi svolto da Davide Sonvico (2016).

### 3.1.2 Calibrazione

Per l'elaborato presente, sono stati utilizzati i parametri calibrati da Sonvico nel 2016, poiché il lavoro svolto è incentrato sulla validazione dei parametri per gli anni dal 2016 al 2019; di seguito, citando Sonvico, viene illustrato nel dettaglio i passaggi seguiti per la calibrazione e la descrizione dei parametri che entrano in gioco.

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 di Sonvico 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.

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.

La calibrazione del metodo Philip 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 è direttamente presente all'interno di quella di Philip.

Infine, sfruttando le conoscenze ed i dati raccolti durante la calibrazione dei primi due metodi, in modo analogo si è passati al metodo Green-Ampt, ultimo tra i tre modelli di infiltrazione applicati.

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:

$$err\ Q_{max} = \frac{Q_{sim} - Q_{oss}}{Q_{oss}} \tag{3.2}$$

$$err\ Vol = \frac{V_{sim} - V_{oss}}{V_{oss}} \tag{3.3}$$

$$err\ t_{max} = t_{sim} - t_{oss} \tag{3.4}$$

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

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}^{i} - Q_{oss}^{i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{Q}sim - Q_{oss}^{i})^2} \tag{3.6}$$

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.
Per approfondimenti sul lavoro di calibrazione effettuato per i parametri del bacino, si rimanda alla tesi di Davide Sonvico (2016).
Ad ogni modo, per conoscenza, si riportano in seguito le tabelle con i parametri calibrati, utilizzati per la procedura di validazione.

| | Ksat | CN | kprof | prof |
|---|---|---|---|---|
| Lozza | 30 | -5 | / | / |
| Castellanza | 10 | / | / | / |
| Cantù | 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 3-2 Riassunto della calibrazione con il metodo del CN con i parametri utilizzati per ogni stazione idrometrica

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

Tabella 3-3 Calibrazione con il metodo PH per stazione idrometrica

| | 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 3-4 Calibrazione con il metodo GA per stazione idrometrica

## 3.2 Validazione del modello idrologico

In questo paragrafo, si concentra il lavoro di tesi svolto: la validazione del modello idrologico per il bacino di Seveso, Olona e Lambro tra gli anni 2016 e 2019.
Infatti, è necesario verificare che i parametri del modello calibrati da Davide Sonvico nel 2016 siano, o meno, coerenti con le condizioni ambientali ed idrologiche attuali.

Negli ultimi anni, citando un articolo di Repubblica, l'ISPRA ha certificato che nel 2017 la media regionale di consumo del suolo in Lombardia è stata di 2.4 ettari al giorno; il 15% del territorio lombardo è urbanizzato.
Con la crescente urbanizzazione, diminuisce la capacità di infiltrazione, ritenzione e drenaggio del terreno (Behzad Jamali et al., 2018).
La conseguenza di ciò, a livello idrologico, è che i volumi che defluiscono sono maggiori, con maggior variabilità di portate e maggior rapidità, perché si riduce il tempo di lag del bacino (Olivia M. Wright et al., 2018).

Per portare a termine la fase di validazione, si sono individuati otto eventi per ognuna delle sette sezioni considerate: Castiglione-Lozza, Castellanza, Cantù-Asnago, Caslino d'Erba, Costa Masnaga-Lambrugo, Lesmo-Peregallo e Milano-via Feltre (le stesse stazioni prese in esame nell'elaborato di Davide Sonvico nel 2016).

Gli eventi per la validazione sono stati individuati eseguendo un'analisi sui dati osservati di altezza idrometrica presenti sul portale regionale di ARPA Lombardia per le stazioni disponibili; tali altezze sono state convertite in portate utilizzando la scala di deflusso relativa a ciascuna sezione, per il relativo periodo e range di validità.
La scala di deflusso è un'equazione a due parametri, del tipo

$$Q = a\,h^b$$

In cui $a$ e $b$ sono due parametri che minimizzano l'errore di interpolazione tra la curva di interpolazione e la scala di deflusso ricavata dal modello idraulico.

Le sezioni scelte sono due per il fiume Olona, una per il fiume Seveso e quattro per il fiume Lambro, in base alla disponibilità delle scale di deflusso.

I dati estrapolati dall'analisi delle portate osservate per ciascuna sezione sono quei dati che sono risultati superiori al 95° percentile del campione studiato; di seguito, nelle tabelle, si illustrano gli eventi meteorologici con relativa durata e valore della soglia scelta.

**OLONA**

CASTIGLIONE – LOZZA

Q = 4.72 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13/07/16 | 16:00 | 14/07/16 | 13:00 |
| 2 | 15/09/16 | 23:00 | 17/09/16 | 08:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-5 Castiglione – Lozza

CASTELLANZA

Q = 5.57 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13/07/16 | 16:00 | 14/07/16 | 13:00 |
| 2 | 15/09/16 | 23:00 | 17/09/16 | 08:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-6 Castellanza

**SEVESO**

CANTU' - ASNAGO

Q = 3.57 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 23/07/16 | 09:00 | 24/07/16 | 08:00 |
| 2 | 21/09/16 | 06:00 | 22/09/16 | 01:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-7 Cantù - Asnago

**LAMBRO**

CASLINO D'ERBA

Q = 3.11 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | - | - | - | - |

Tabella 3-8 Caslino d'Erba

COSTA MASNAGA - LAMBRUGO

Q = 12.49 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 27/12/17 | 04:00 | 29/12/17 | 02:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-9 Costa Masnaga - Lambrugo

LESMO - PEREGALLO

Q = 17.37 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-10 Lesmo - Peregallo

MILANO – VIA FELTRE

Q = 22.85 [m^3/s]

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-11 Milano - Via Feltre

### 3.2.1 Validazione CURVE NUMBER

Una volta individuati gli eventi meteorologici utili alla validazione, si è passati al confronto tra i dati osservati ed i dati simulati dal modello idrologico distribuito FEST-WB, per ogni modello di infiltrazione analizzato.

In questo paragrafo, si presenta la validazione secondo il metodo del Curve Number, per ogni sezione studiata; per verificare la bontà delle simulazioni effettuate, si valutano gli indici precedentemente descritti (RMSE, Nash, errore al colmo di portata, errore sui volumi cumulati, ritardo sul picco): il primo ed il terzo devono essere prossimi a zero ed il secondo almeno positivo, per simulare in modo ottimale la forma dell'idrogramma, mentre il ritardo deve rimanere nell'intorno di poche ore.

**CASTIGLIONE – LOZZA**

Si analizza la sezione di Castiglione – Lozza, sul fiume Olona.

In questa, come in altre stazioni, alcuni degli eventi considerati non sono stati utilizzati per la validazione poiché i dati relativi alle portate simulate dal modello non hanno registrato l'evento meteorologico, probabilmente a causa di una lacuna nei dati di pioggia o nella loro parziale registrazione.

A titolo di esempio si riporta l'evento n°1, non considerato nella validazione per i problemi precedentemente citati

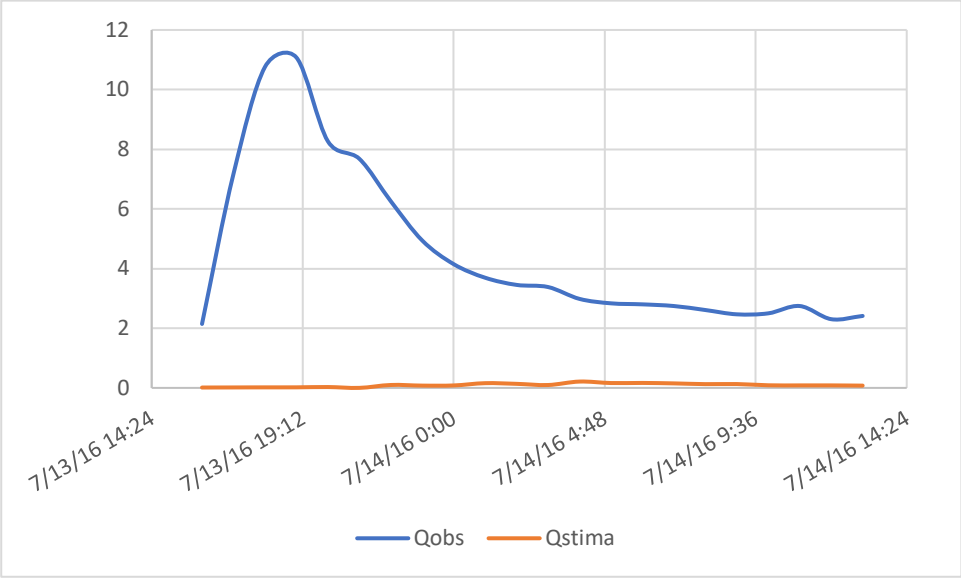


Figura 3-1 Evento meteorologico scartato dall'analisi di validazione

Come si può osservare dalla figura, i dati simulati non registrano nessuna variazione relativa all'evento meteorologico osservato, per cui questo evento (come alcuni altri in seguito), sono stati rimossi.

Si riporta, per completezza, la tabella relativa agli eventi considerati, evidenziando in rosso gli eventi scartati dall'analisi:

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13/07/16 | 16:00 | 14/07/16 | 13:00 |
| 2 | 15/09/16 | 23:00 | 17/09/16 | 08:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-12 Castiglione – Lozza

Per l'analisi in ogni sezione, come precedentemente anticipato, si sono studiati diversi tipi di errore (RMSE, indice di Nash, max[Q], volumi cumulati e ritardo del picco).

Di seguito, si riportano i grafici relativi ai singoli eventi e, successivamente, gli errori stimati per ogni evento.

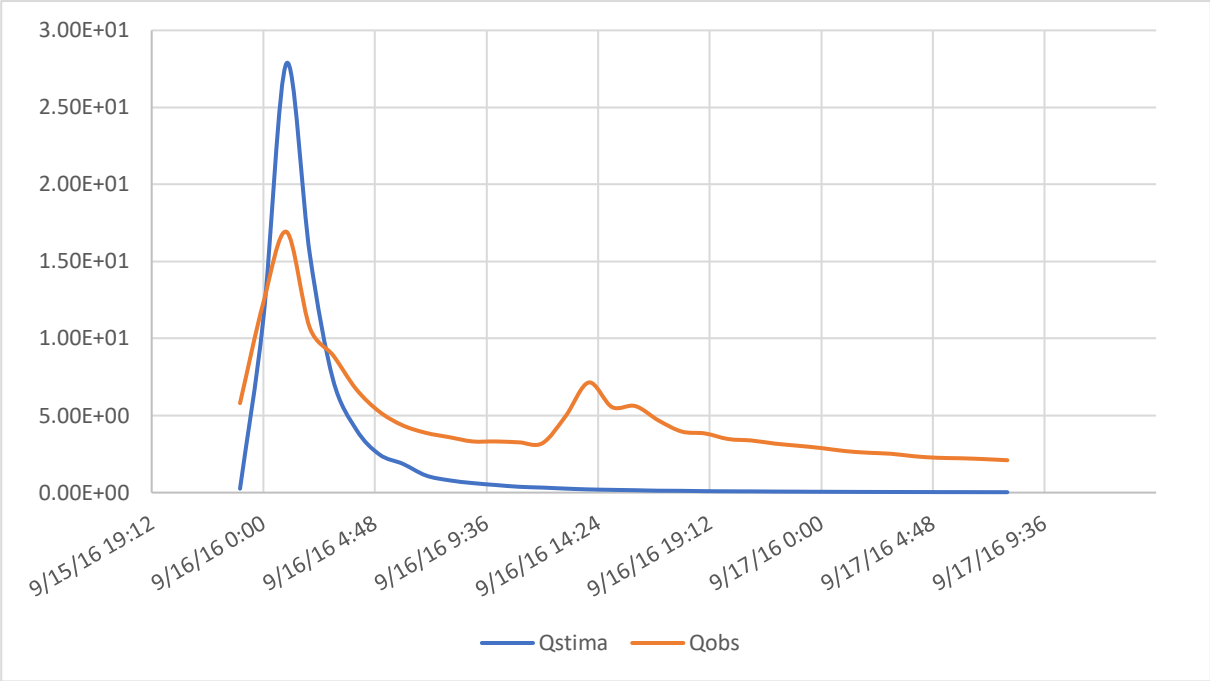


Figura 3-2 Castglione - Lozza: Evento 2

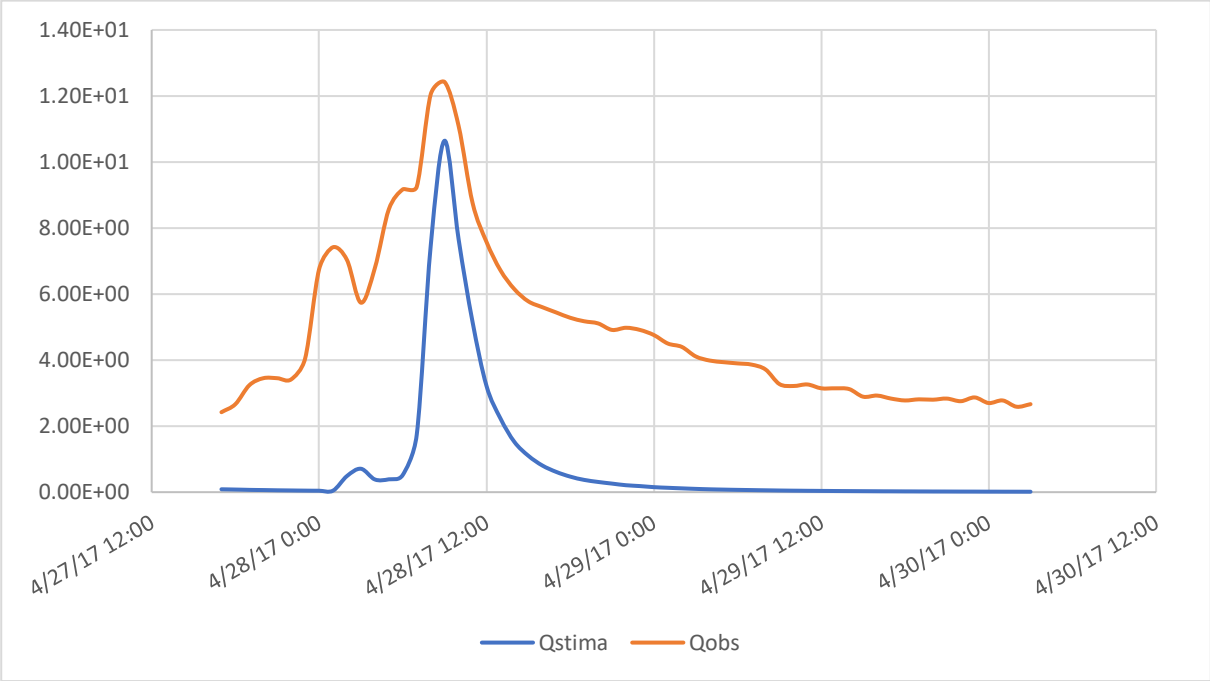


Figura 3-3 Castglione - Lozza: Evento 3

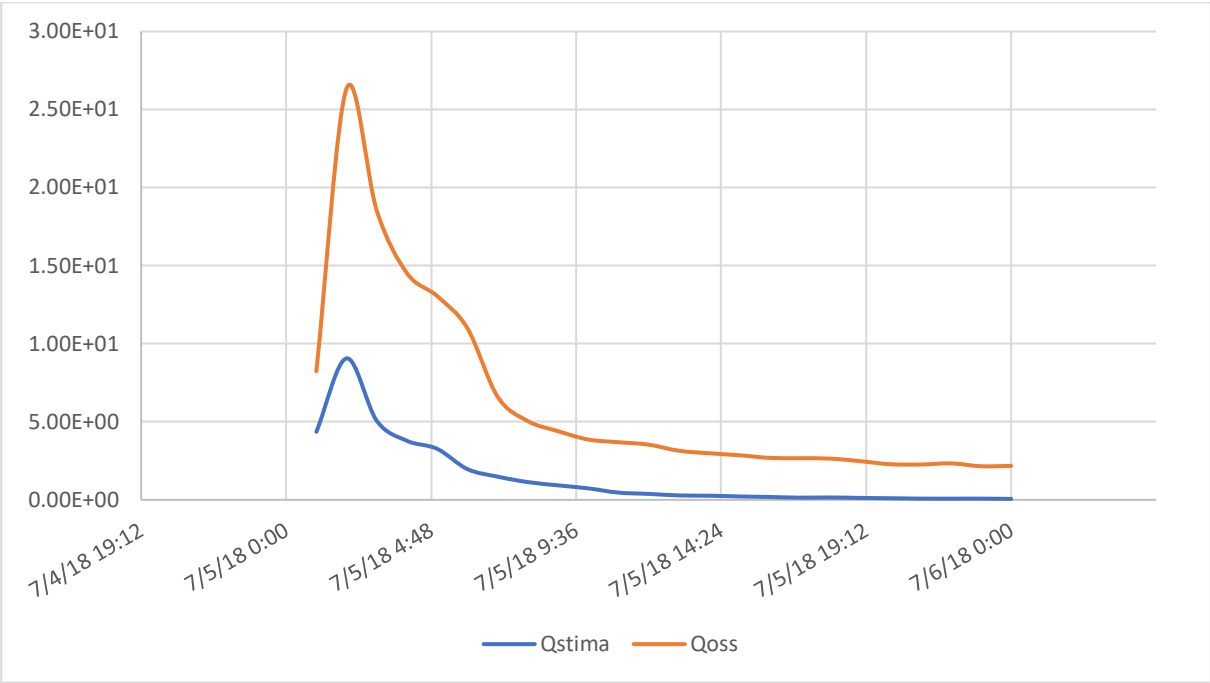


Figura 3-4 Castglione - Lozza: Evento 5

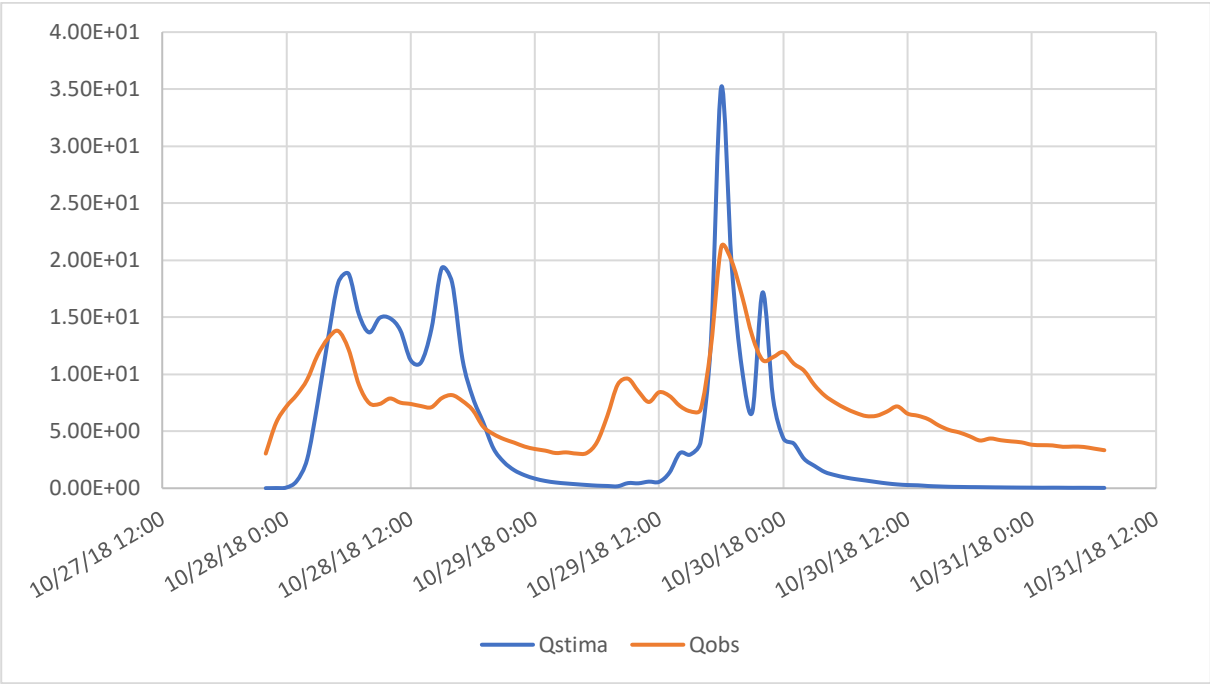


Figura 3-5 Castglione - Lozza: Evento 6

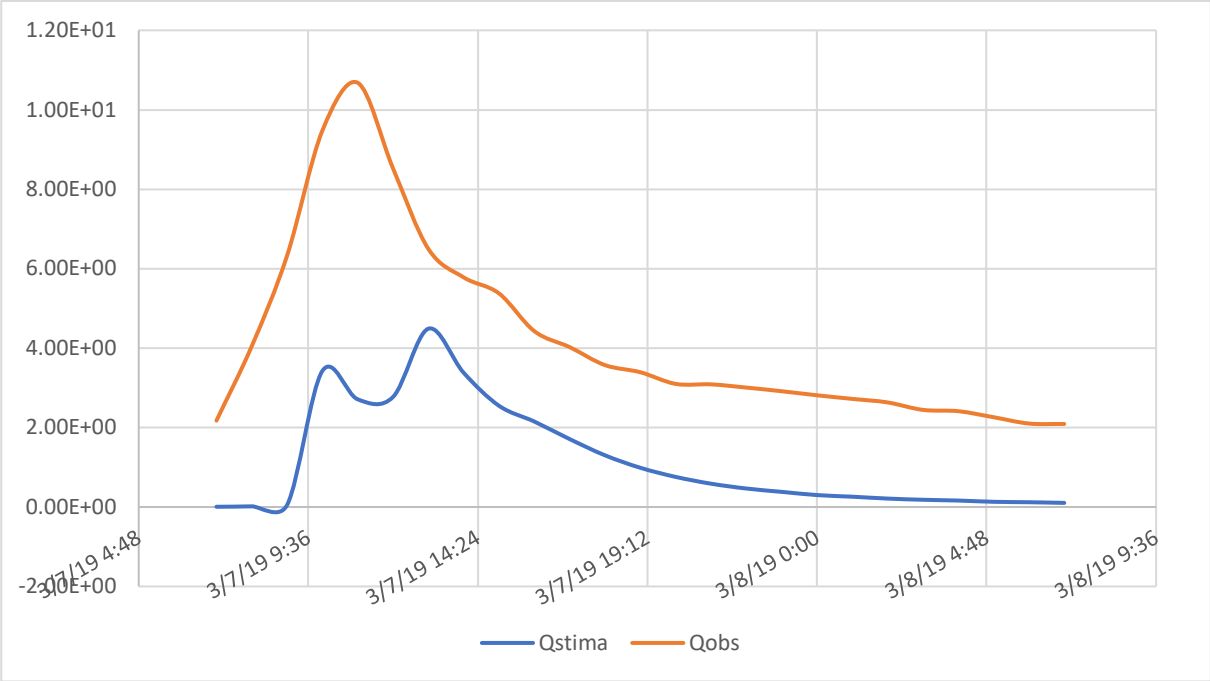


Figura 3-6 Castglione - Lozza: Evento 7

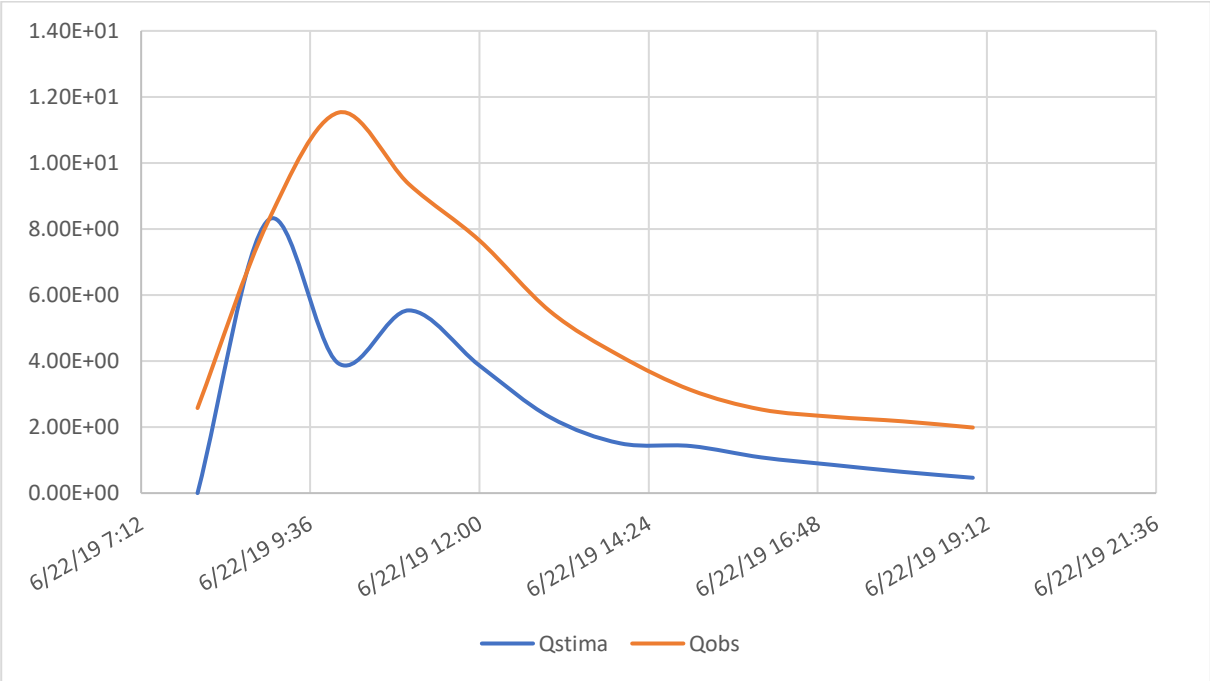


Figura 3-7 Castglione - Lozza: Evento 8

Come si può osservare dai grafici riportati, la tendenza è una sovrastima del picco di portata da parte del modello, mentre il ritardo è mediamente inferiore all'unità, in termini di ore.

Si riporta la tabella con gli errori calcolati

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | 3.89736538 | 0.07609675 | 0.64645582 | -0.5309437 |
| 3 | 4.3173896 | 0.16688548 | -0.1431126 | -0.8320783 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 6.26360527 | 0.34482879 | -0.6560393 | -0.7699536 |
| 6 | 5.63717251 | -0.6291393 | 0.6622244 | -0.3452235 |
| 7 | 3.45432218 | 0.20155267 | -0.5796315 | -0.7242011 |
| 8 | 0.92176492 | 0.39138901 | -0.2830491 | -0.5112662 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 4.08193664 | 0.09193557 | -0.0588587 | -0.6189444 |

Tabella 3-13 Errori stimati sezione Castiglione – Lozza

RMSE si mantiene relativamente bassa, con una buona stima sul picco di portata ed un indice di Nash di poco superiore allo zero, indice di buona approssimazione della forma dell'idrogramma.

## CASTELLANZA

Nella sezione di Castellanza sono disponibili cinque eventi sugli otto individuati; si riporta la tabella degli eventi considerati

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13/07/16 | 16:00 | 14/07/16 | 13:00 |
| 2 | 15/09/16 | 23:00 | 17/09/16 | 08:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-14 Castellanza

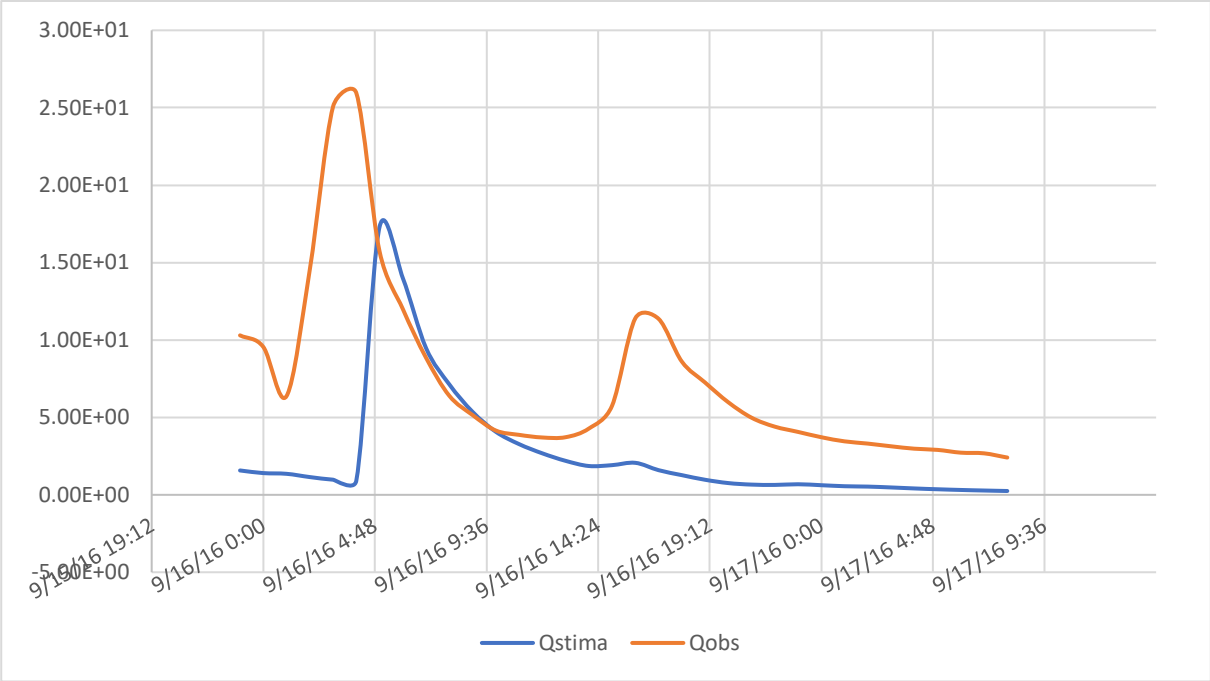


Figura 3-8 Castellanza: evento 2

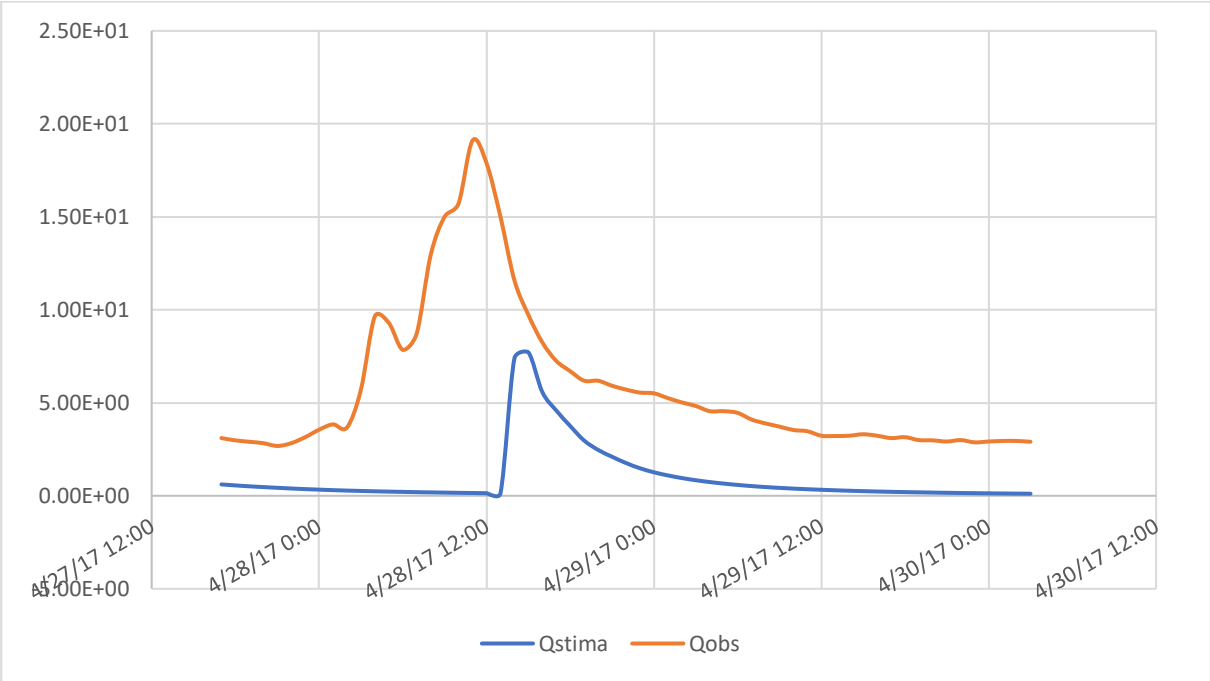


Figura 3-9 Castellanza: evento 3

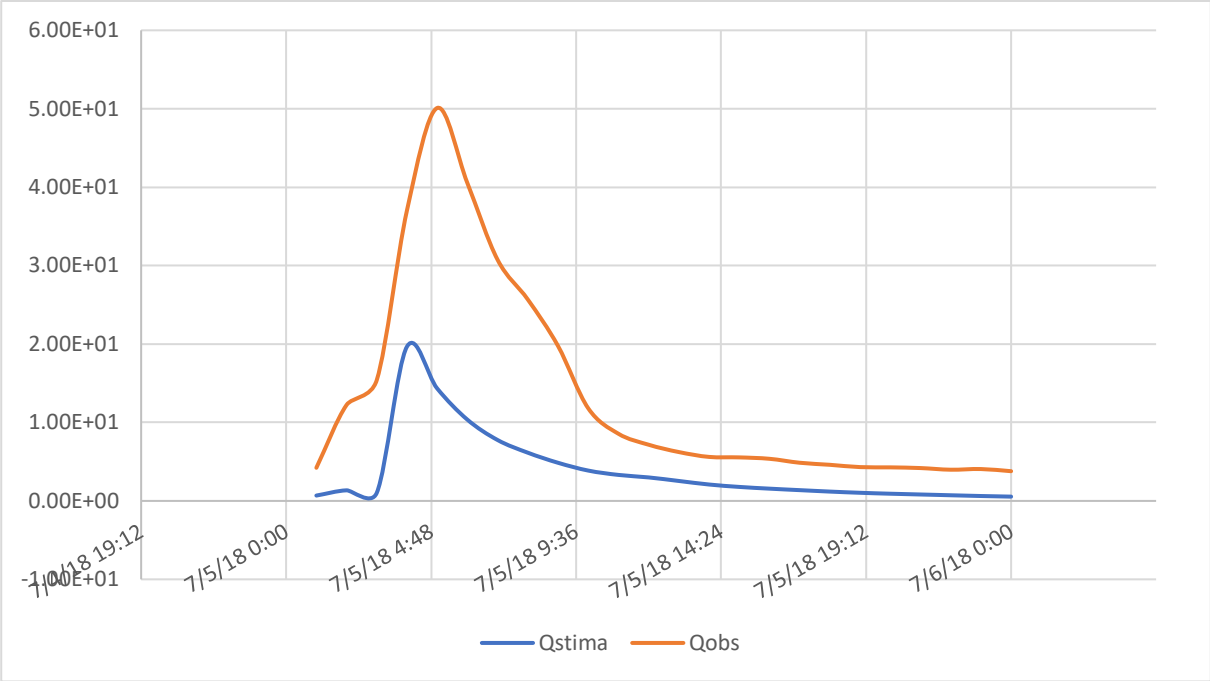


Figura 3-10 Castellanza: evento 5

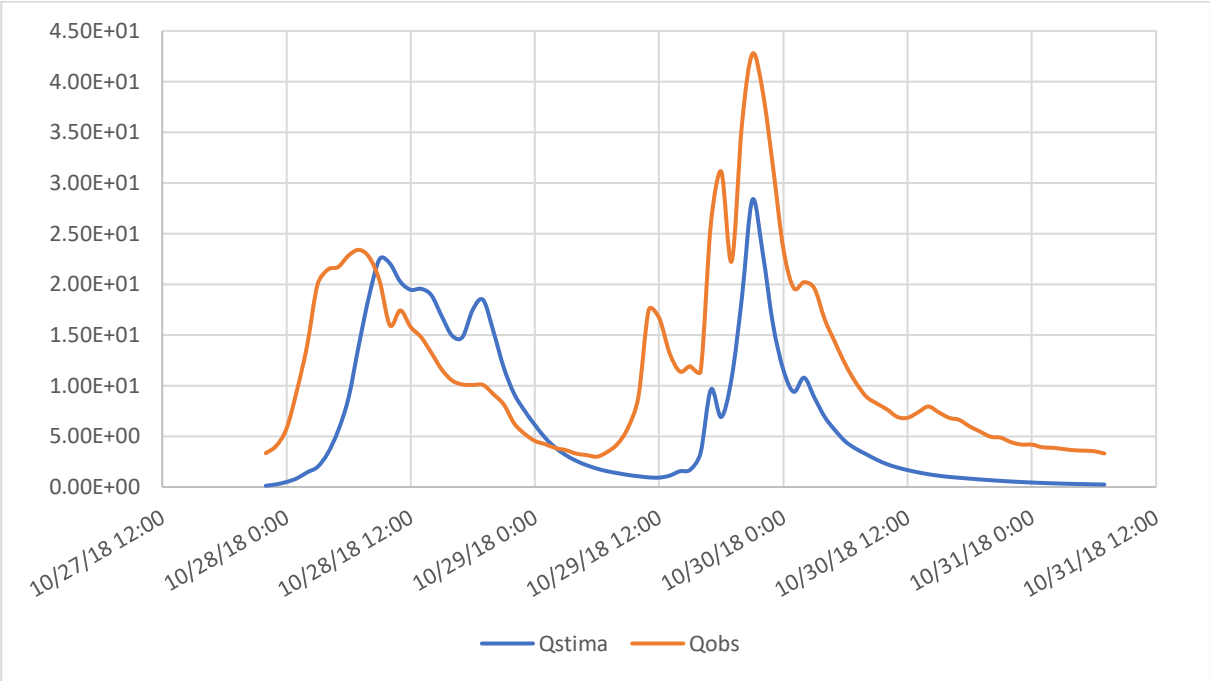


Figura 3-11 Castellanza: evento 6

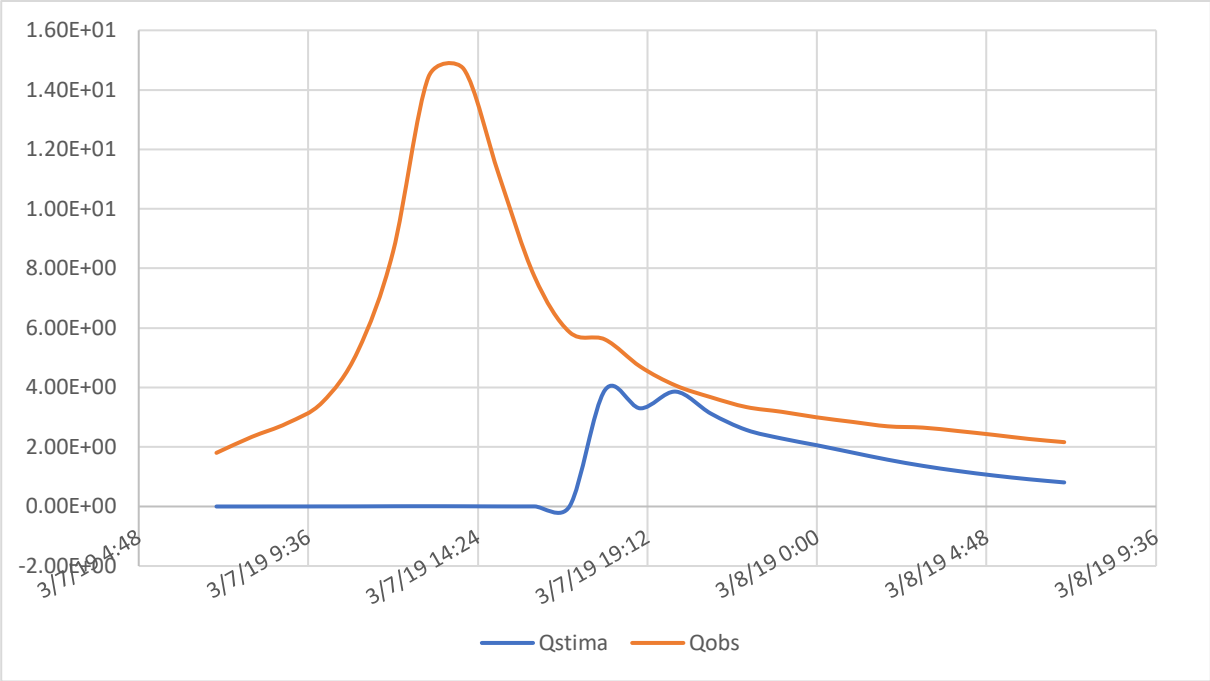


Figura 3-12 Castellanza: evento 7

Come si può osservare dai grafici riportati, il modello sottostima il picco di portata nella sezione di Castellanza; inoltre, è registrato con un ritardo medio di una-due ore rispetto alle portate osservate.

Si riporta la tabella con gli errori calcolati

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | 7.66226083 | -0.0585319 | -0.3334362 | -0.6446697 |
| 3 | 6.30325364 | 0.00088074 | -0.5961497 | -0.8326704 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 13.2491981 | 0.33870103 | -0.6073039 | -0.7138451 |
| 6 | 8.65480993 | 0.29813043 | -0.3369951 | -0.4438963 |
| 7 | 5.61867565 | -0.1762808 | -0.733715 | -0.75756 |
| 8 | - | - | - | - |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.29763963 | 0.08057988 | -0.52152 | -0.6785283 |

Tabella 3-15 Errori stimati sezione Castellanza

L'errore sul picco, minore di zero, dimostra quanto affermato sulla sottostima del valore della portata massima, che si attesta attorno al 50%.

**CANTU' – ASNAGO**

Si passa ora all'analisi di una sezione lungo il fiume Seveso, l'unica considerata; la sezione di Paderno Dugnano infatti non è dotata di una misurazione idrometrica valida e di scala di deflusso attiva, a causa delle recenti modifiche idrauliche apportate con il canale scolmatore; inoltre la sezione di Palazzolo, che potrebbe sostituirla nell'analisi, è dotata di un misuratore di portata, di cui però non è stato possibile scaricare alcun dato.
Nella sezione di Cantù-Asnago, sono stati scartati gli eventi 4, 5 e 7; di seguito la tabella degli eventi considerati

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 23/07/16 | 09:00 | 24/07/16 | 08:00 |
| 2 | 21/09/16 | 06:00 | 22/09/16 | 01:00 |
| 3 | 27/04/17 | 17:00 | 30/04/17 | 03:00 |
| 4 | 05/11/17 | 05:00 | 07/11/17 | 11:00 |
| 5 | 05/07/18 | 01:00 | 06/07/18 | 00:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 07/03/19 | 07:00 | 08/03/19 | 07:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-16 Cantù - Asnago

Ci sono dunque cinque eventi disponibili per l'analisi effettuata

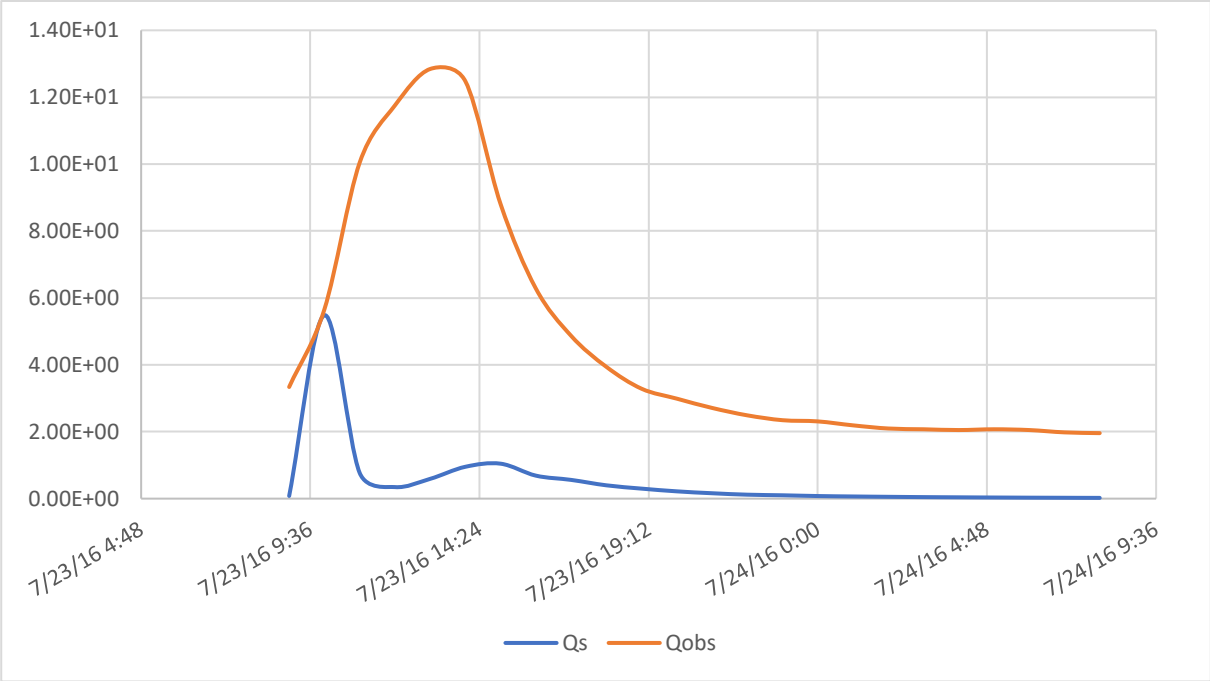


Figura 3-13 Cantù - Asnago: evento 1

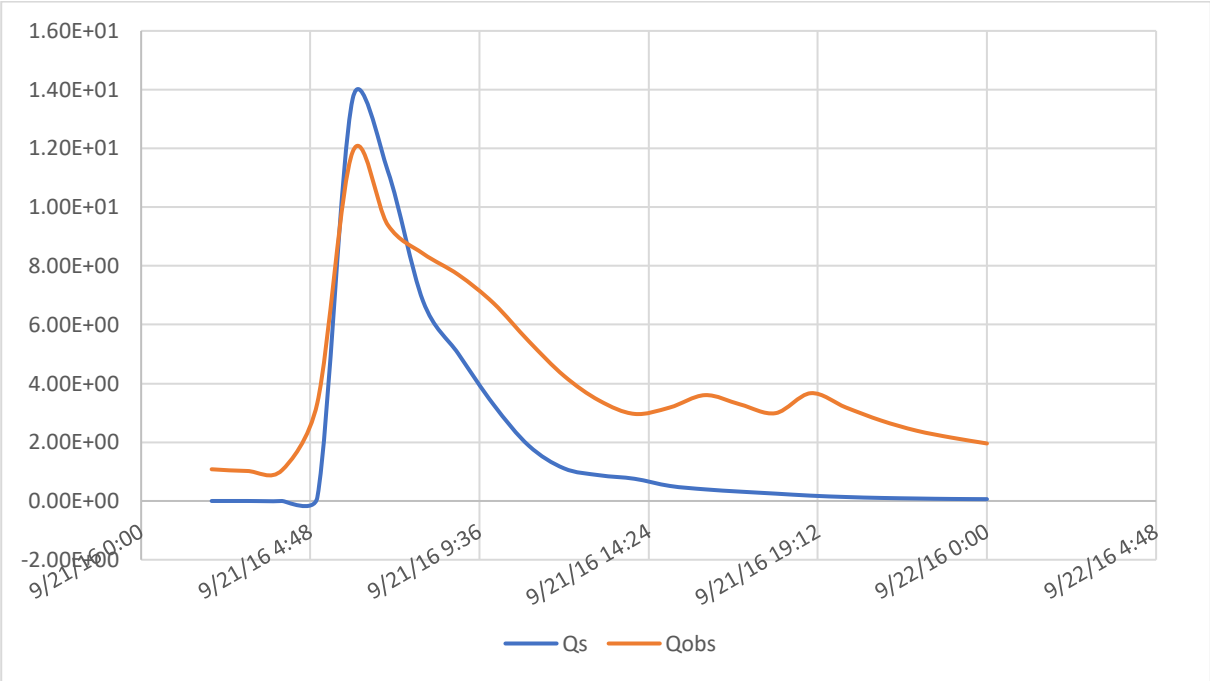


Figura 3-14 Cantù - Asnago: evento 2

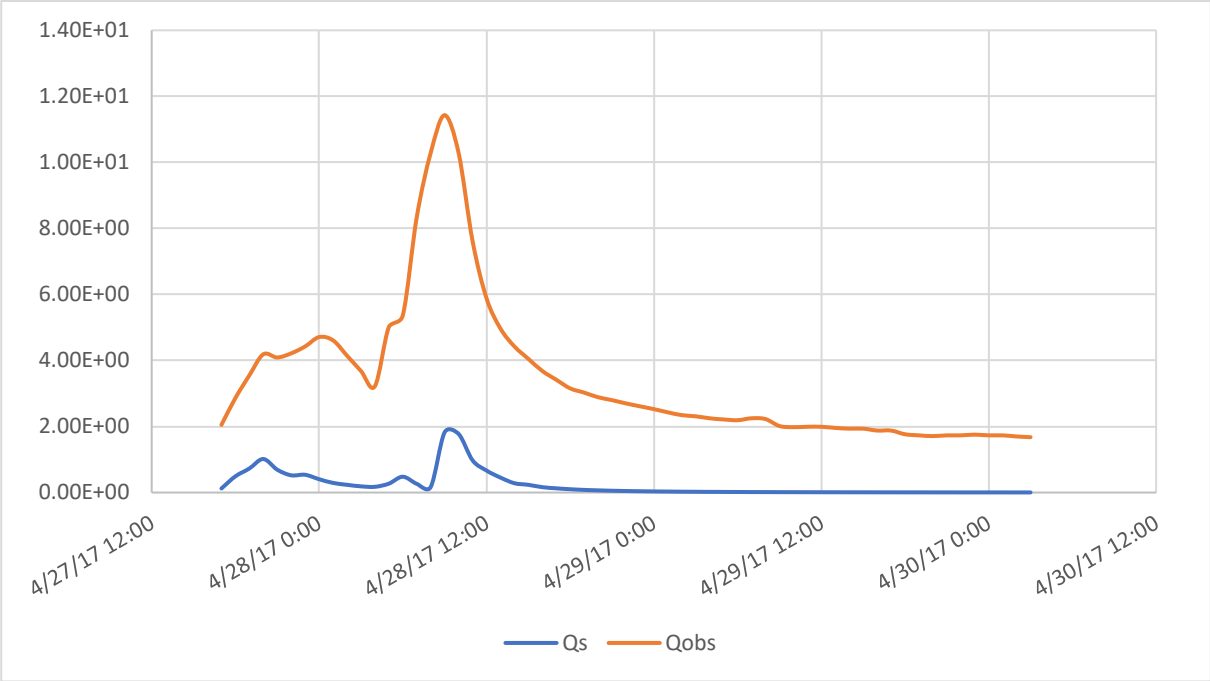


Figura 3-15 Cantù - Asnago: evento 3

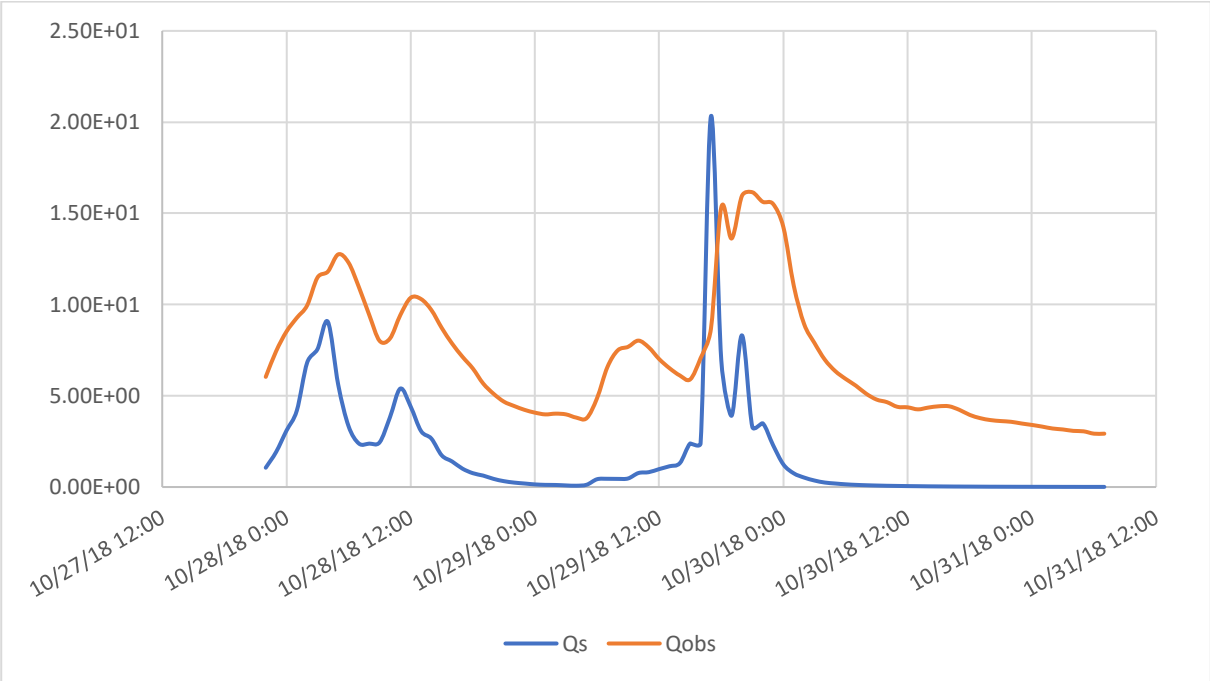


Figura 3-16 Cantù - Asnago: evento 6

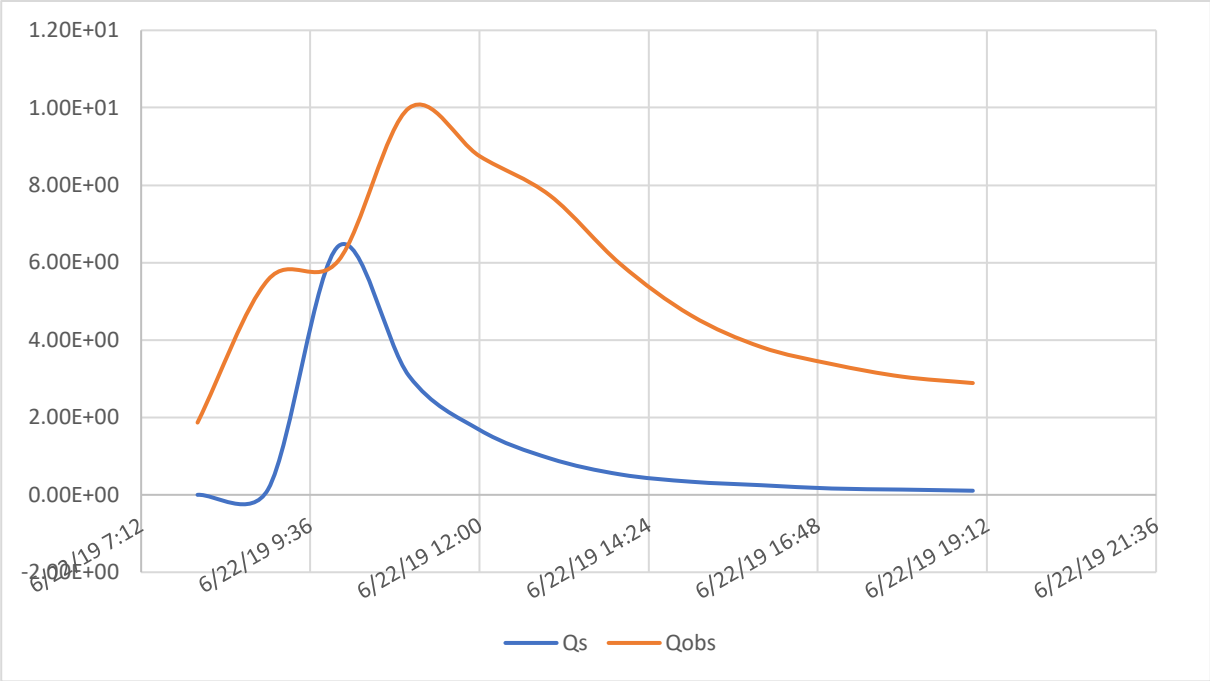


Figura 3-17 Cantù - Asnago: evento 8

Non vi è ritardo sul picco, fatto salvo per gli eventi 1 ed 8, e si ha una generale sottostima dei volumi cumulati.

Si riporta la tabella con gli errori stimati

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.41497709 | 0.03438523 | -0.5731329 | -0.8916747 |
| 2 | 2.5647839 | 0.46065042 | 0.15155758 | -0.5111282 |
| 3 | 3.73870315 | 0.07852983 | -0.8403727 | -0.9321303 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | 6.13237875 | 0.39600212 | 0.25730597 | -0.756292 |
| 7 | - | - | - | - |
| 8 | 4.69325499 | 0.04737174 | -0.3567483 | -0.7836599 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 4.50881958 | 0.20338787 | -0.2722781 | -0.774977 |

Tabella 3-17 Errori stimati sezione Cantù - Asnago

Analizzando i risultati ottenuti, si osserva che il picco è mediamente sottostimato del 27%, così come sono sottostimati anche i volumi cumulati; l'indice RMSE si mantiene basso e l'indice di Nash si avvicina di più all'unità rispetto alle sezioni precedenti.

## CASLINO D'ERBA

Caslino d'Erba è la prima sezione analizzata sul fiume Lambro; sono state escluse dallo studio le sezioni 4, 5 ed 8.

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | - | - | - | - |

Tabella 3-18 Caslino d'Erba

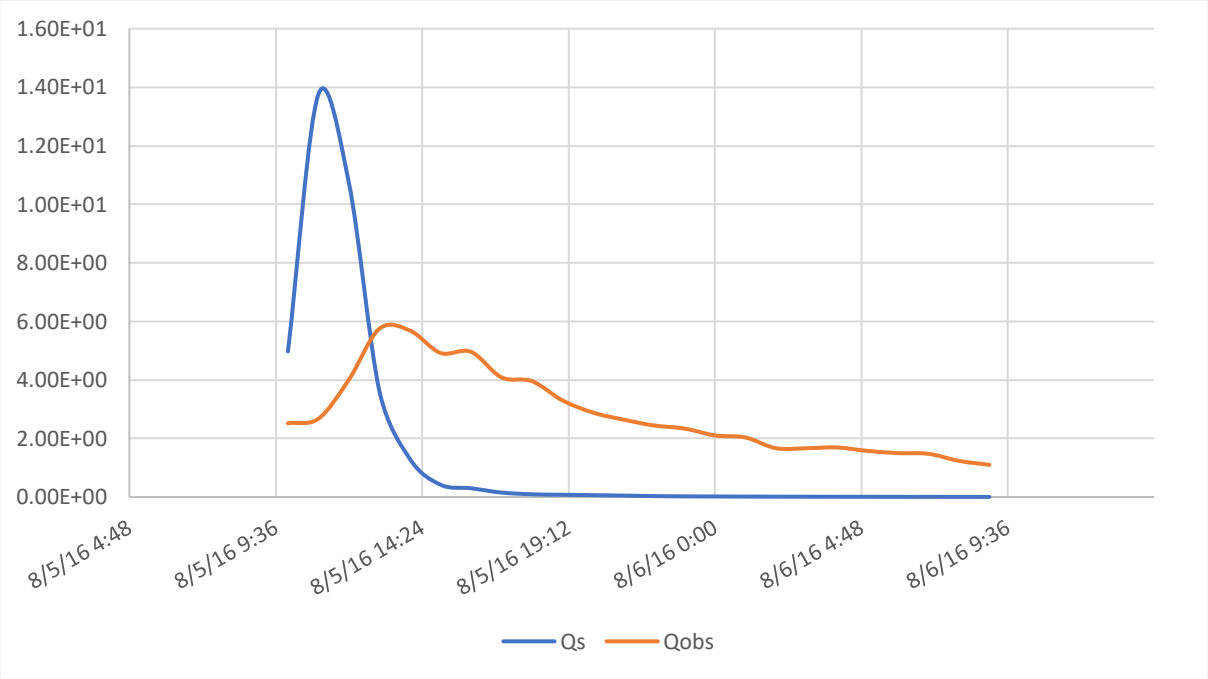


Figura 3-18 Caslino d'Erba: evento 1

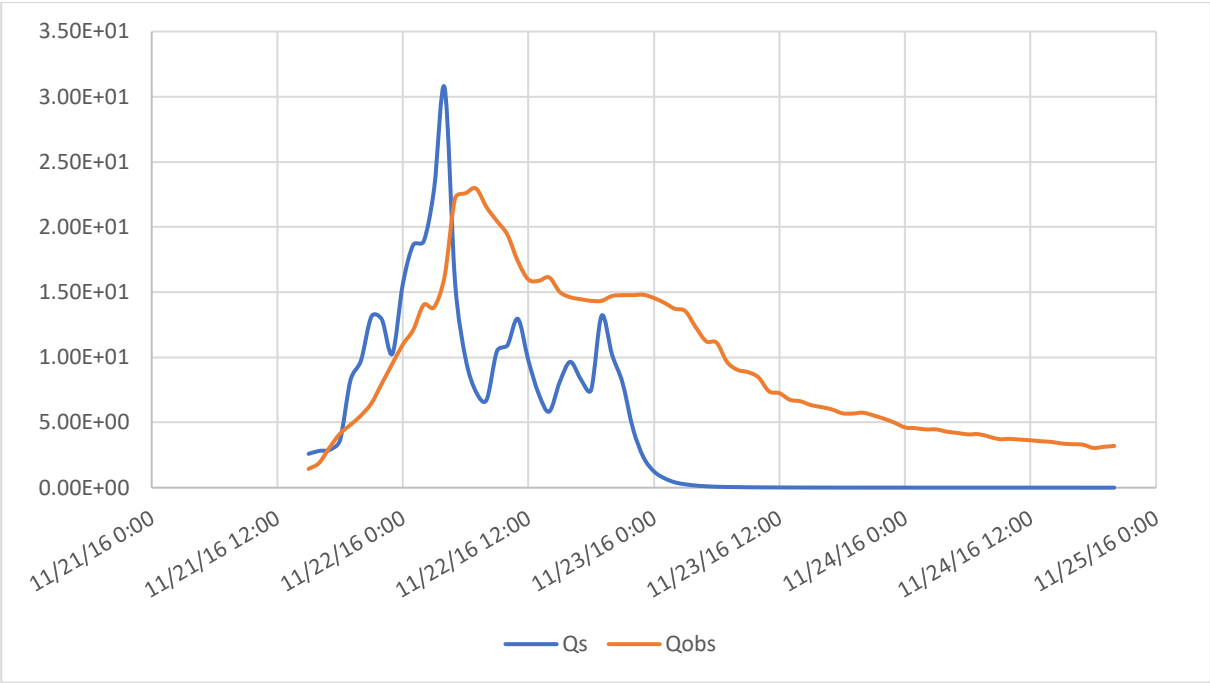


Figura 3-19 Caslino d'Erba: evento 2

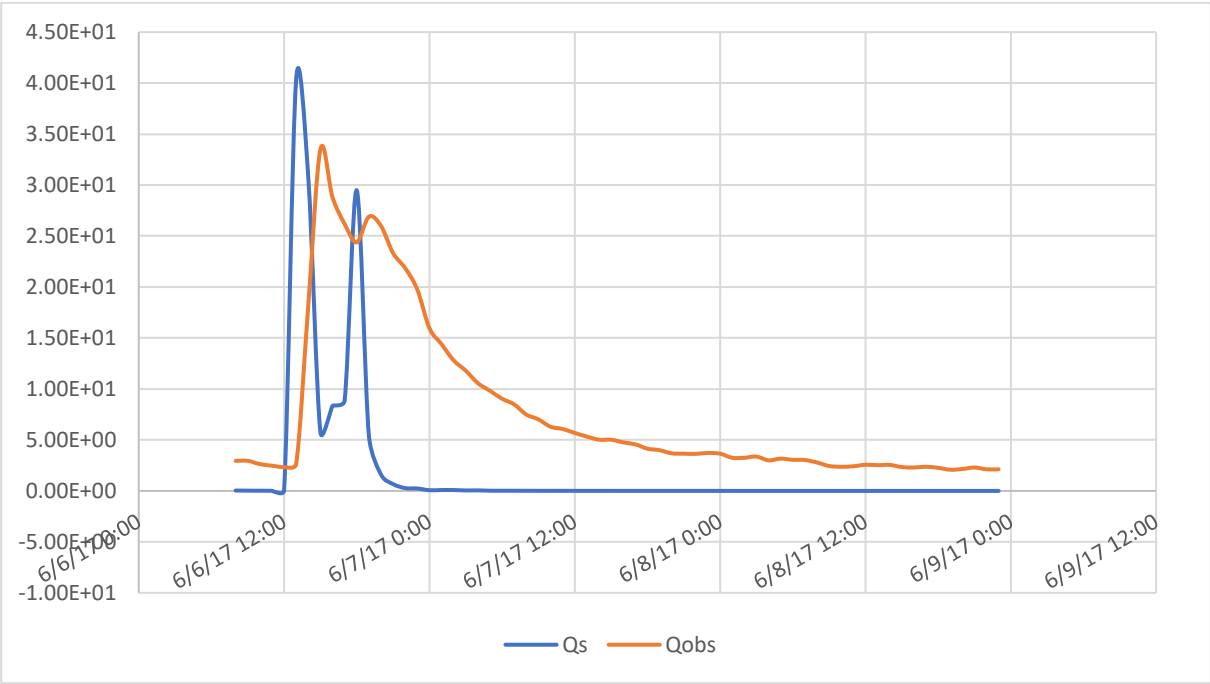


Figura 3-20 Caslino d'Erba: evento 3

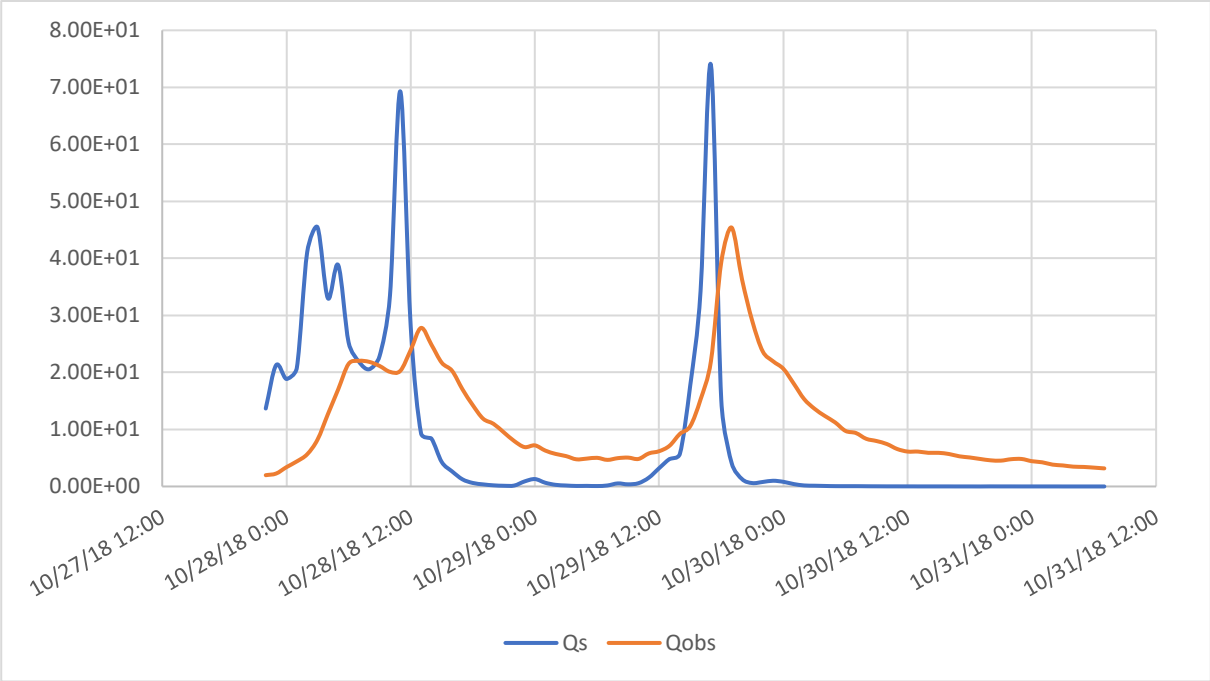


Figura 3-21 Caslino d'Erba: evento 6

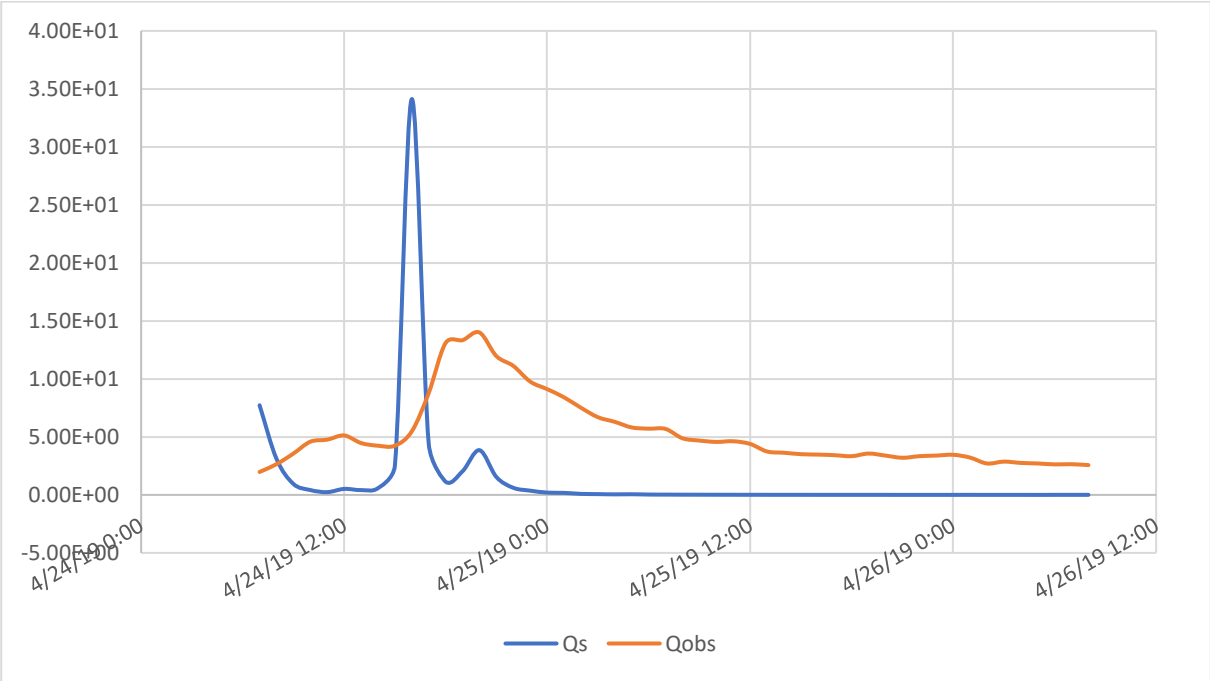


Figura 3-22 Caslino d'Erba: evento 7

A differenza delle sezioni analizzate sui fiumi Olona e Seveso, a Caslino d'Erba i picchi sono sovrastimati ed anticipano quelli delle portate osservate.

| Evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.72449547 | -2.670189 | 1.39406218 | -0.4771247 |
| 2 | 7.39770109 | 0.0341964 | 0.33644979 | -0.5237681 |
| 3 | 10.6474476 | -0.1445058 | 0.20536391 | -0.7357451 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | 15.7031293 | -1.6156331 | 0.62803235 | -0.3081359 |
| 7 | 6.85141575 | -0.8592529 | 1.4369814 | -0.7534181 |
| 8 | - | - | - | - |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.86483783 | -1.0510769 | 0.80017793 | -0.5596384 |

Tabella 3-19 Errori stimati sezione Caslino d'Erba

Dai dati sugli errori medi, si nota un incremento dell'RMSE ed un sensibile peggioramento dell'indice di Nash, che risulta negativo, dati non positivi quanto quelli riscontrati nelle sezioni precedenti. Inoltre, il picco è sovrastimato mediamente dell'80%, mentre i volumi cumulati sono sottostimati.

## COSTA MASNAGA – LAMBRUGO

Altra sezione analizzata sul Lambro, il cui unico evento scartato è il numero 4; le portate sono maggiori rispetto a quelle delle precedenti sezioni di Olona e Seveso.

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 27/12/17 | 04:00 | 29/12/17 | 02:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-20 Costa Masnaga - Lambrugo

Figura 3-23 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 1

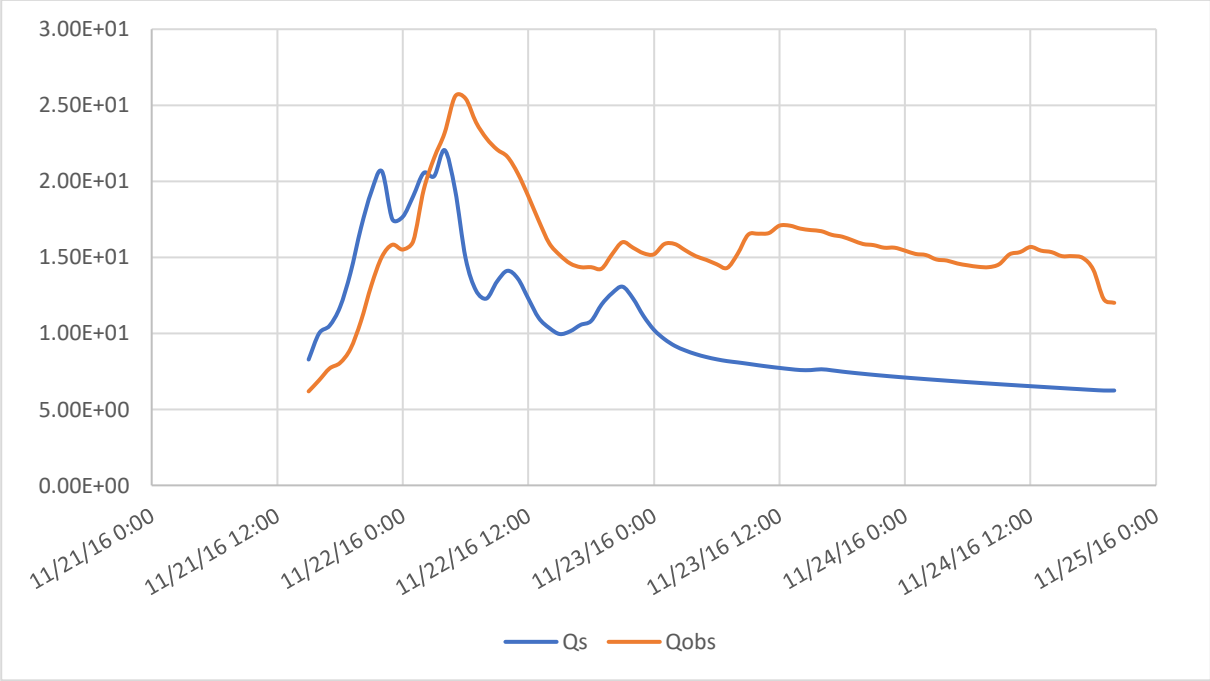


Figura 3-24 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 2

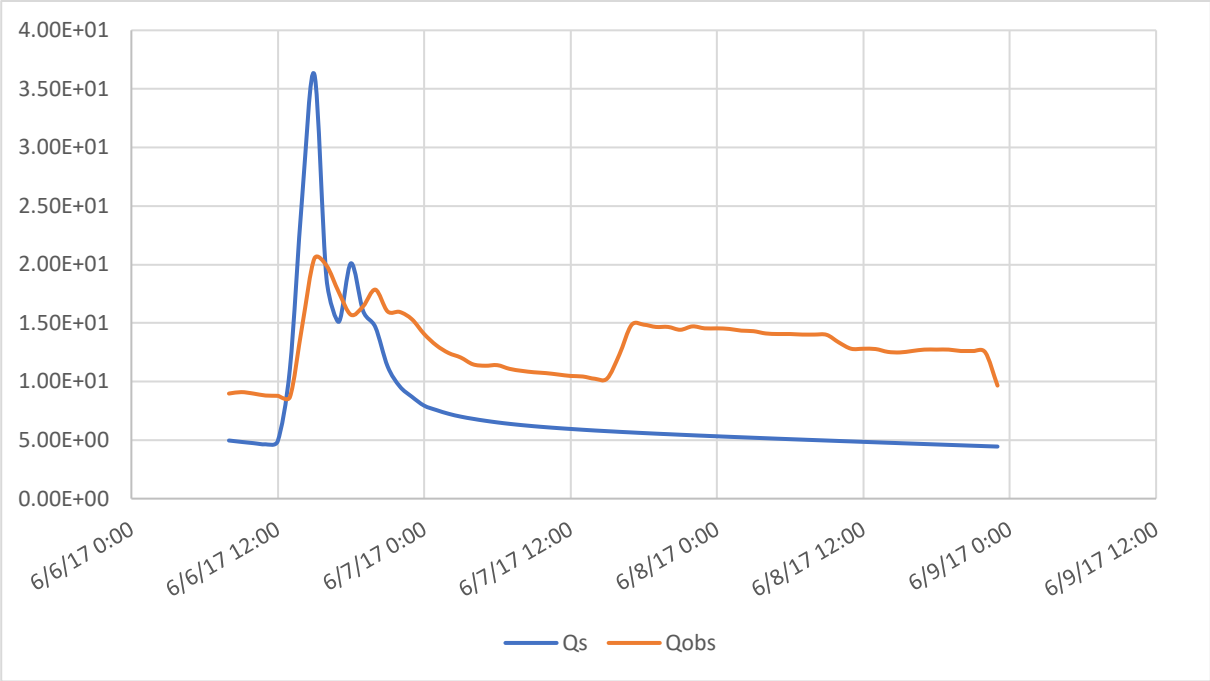


Figura 3-25 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 3

Figura 3-26 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 5

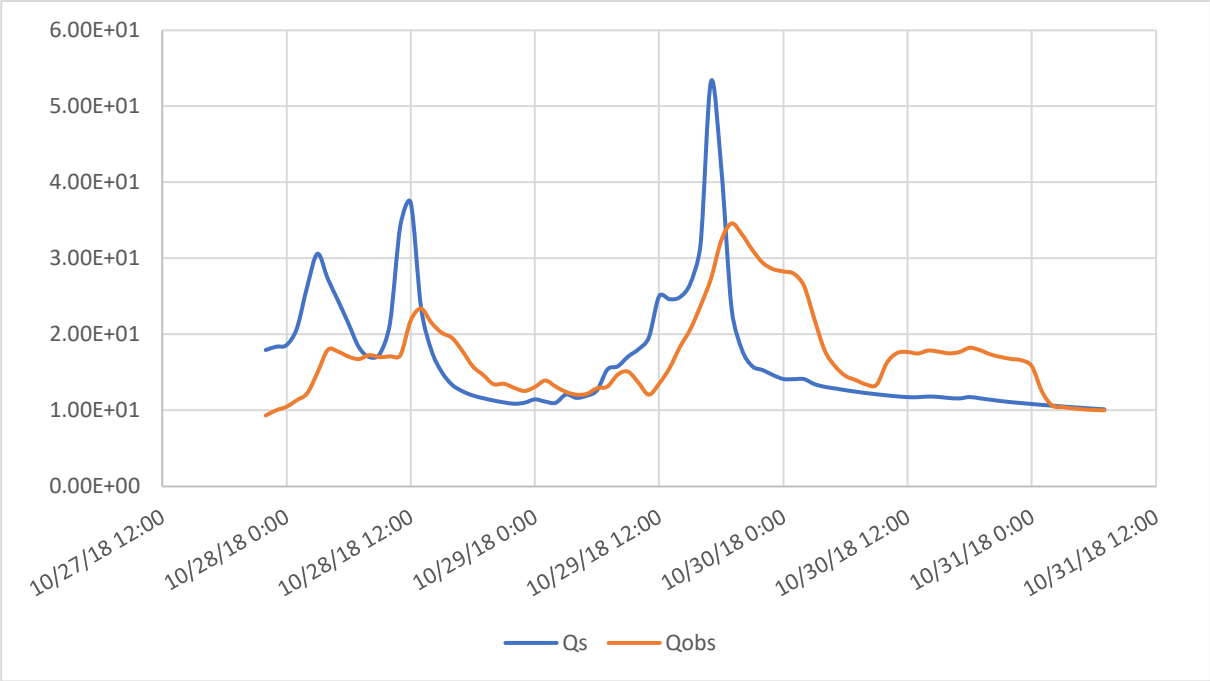


Figura 3-27 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 6

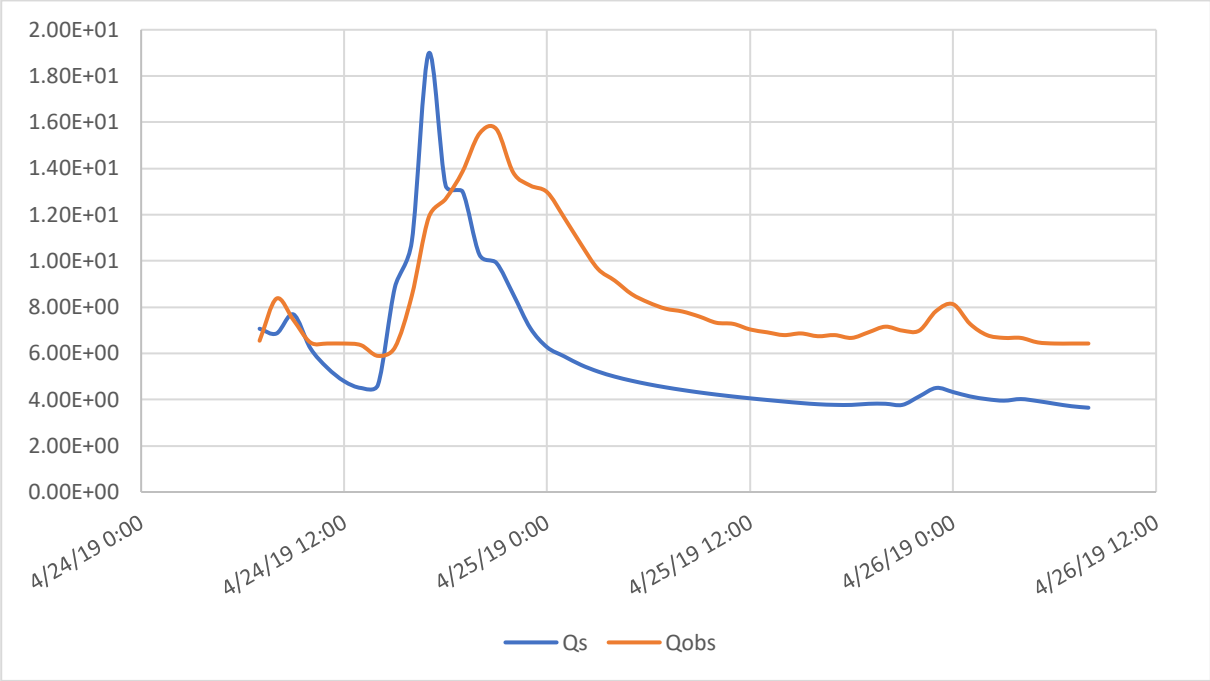


Figura 3-28 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 7

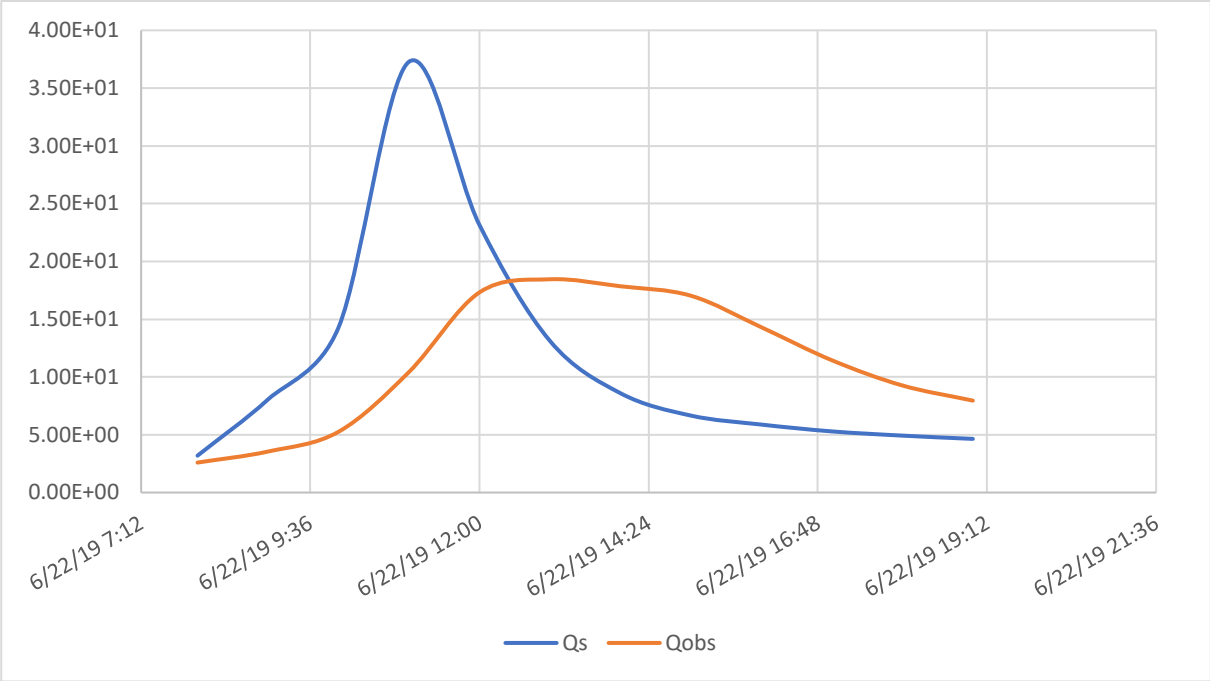


Figura 3-29 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 8

Come si può osservare dai grafici, il picco delle portate simulate anticipa mediamente di un'ora quello delle portate osservate, fatta eccezione per l'evento 5.

| Evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8.33235281 | -0.3027491 | 0.95385485 | -0.291262 |
| 2 | 7.0760203 | -0.1697816 | -0.1382094 | -0.3509563 |
| 3 | 7.17117532 | -0.3558428 | 0.76721268 | -0.4300728 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 13.67181 | -0.0718396 | -0.2968604 | -0.7134391 |
| 6 | 7.77467097 | -0.7905256 | 0.53853312 | -0.0323647 |
| 7 | 3.5019378 | 0.09876672 | 0.20880363 | -0.3095338 |
| 8 | 10.0721967 | -2.3746427 | 1.02014538 | -0.002773 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.22859486 | -0.5666592 | 0.43621141 | -0.3043431 |

Tabella 3-21 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo

Dall'analisi sull'errore, possiamo notare un indice di Nash ancora negativo ed una sovrastima del picco dell'40%, mentre i volumi cumulati continuano ad essere sottostimati.

## LESMO – PEREGALLO

La sezione di Lesmo – Peregallo si trova sul fiume Lambro ed è stato scartato soltanto l'evento 4.

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-22 Lesmo - Peregallo

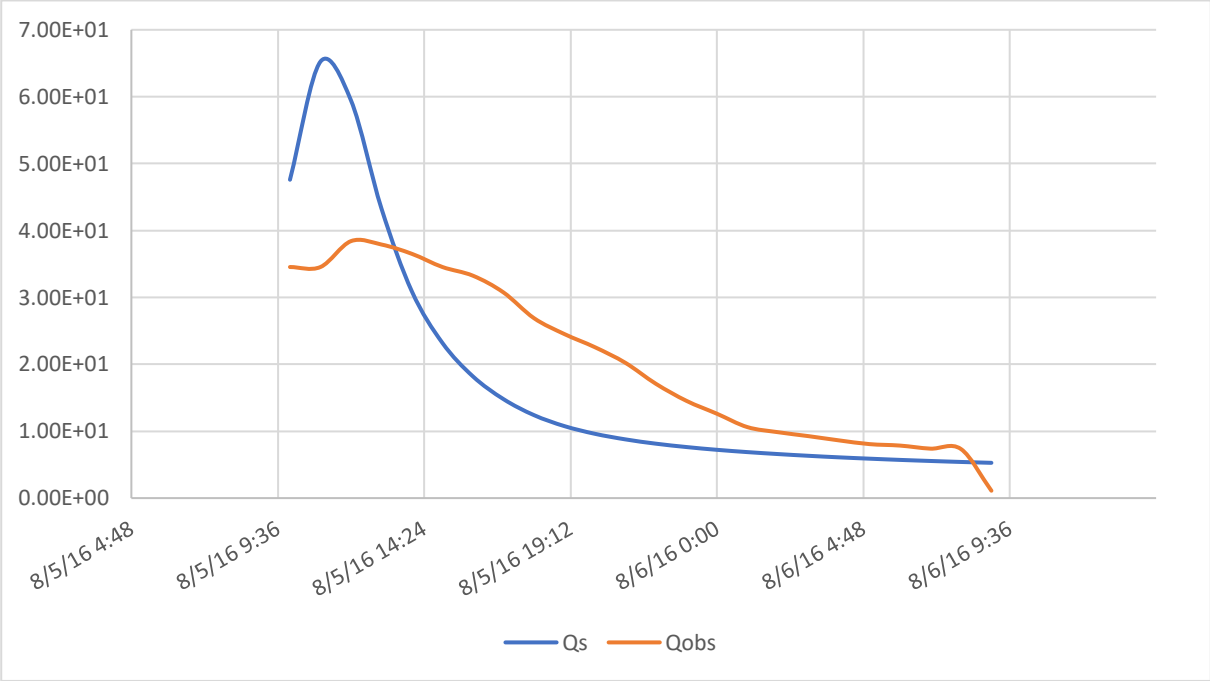


Figura 3-30 Lesmo - Peregallo: evento 1

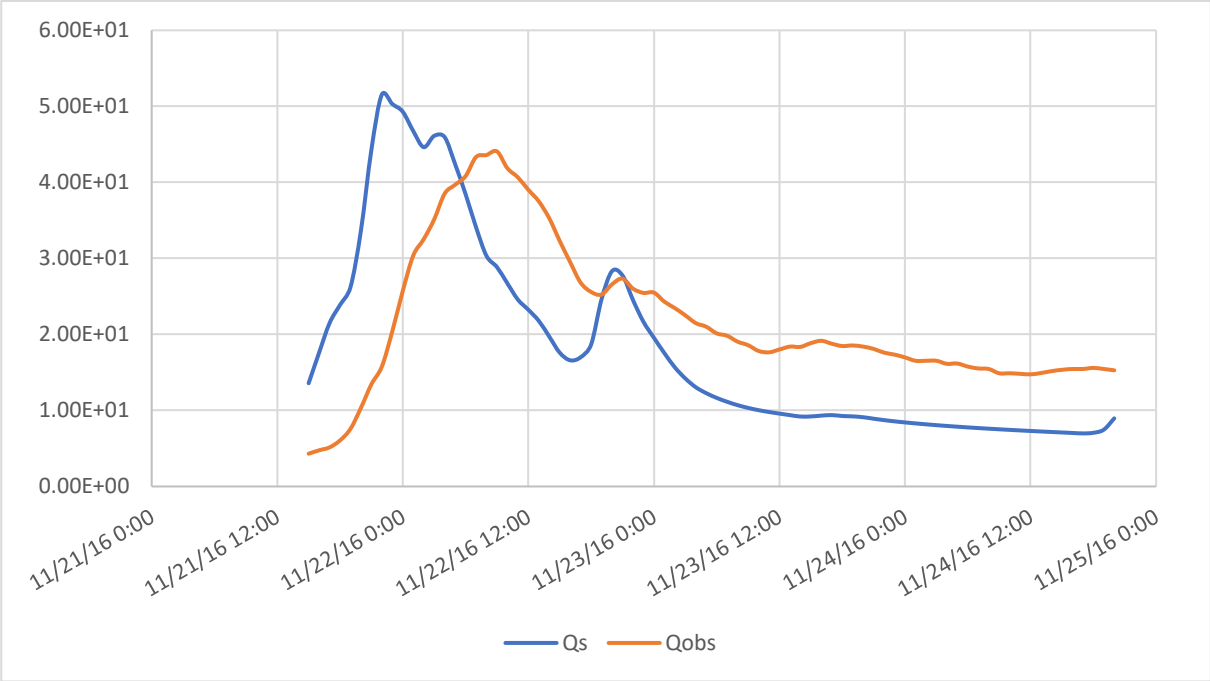


Figura 3-31 Lesmo - Peregallo: evento 2

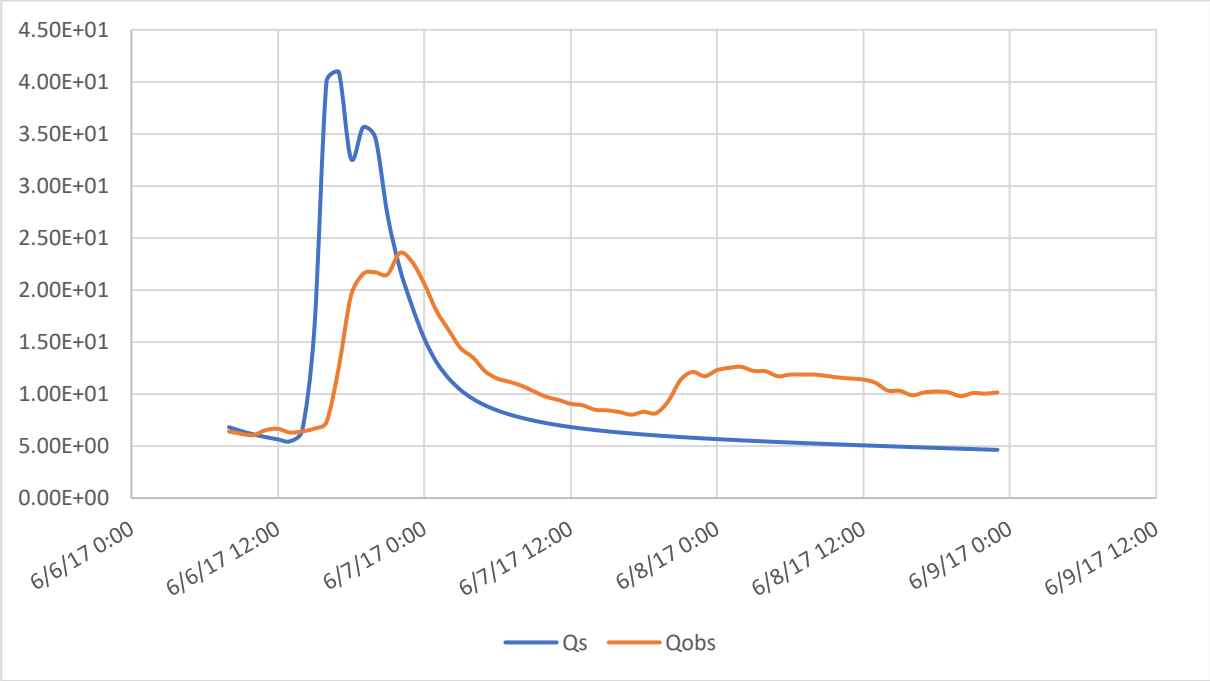


Figura 3-32 Lesmo - Peregallo: evento 3

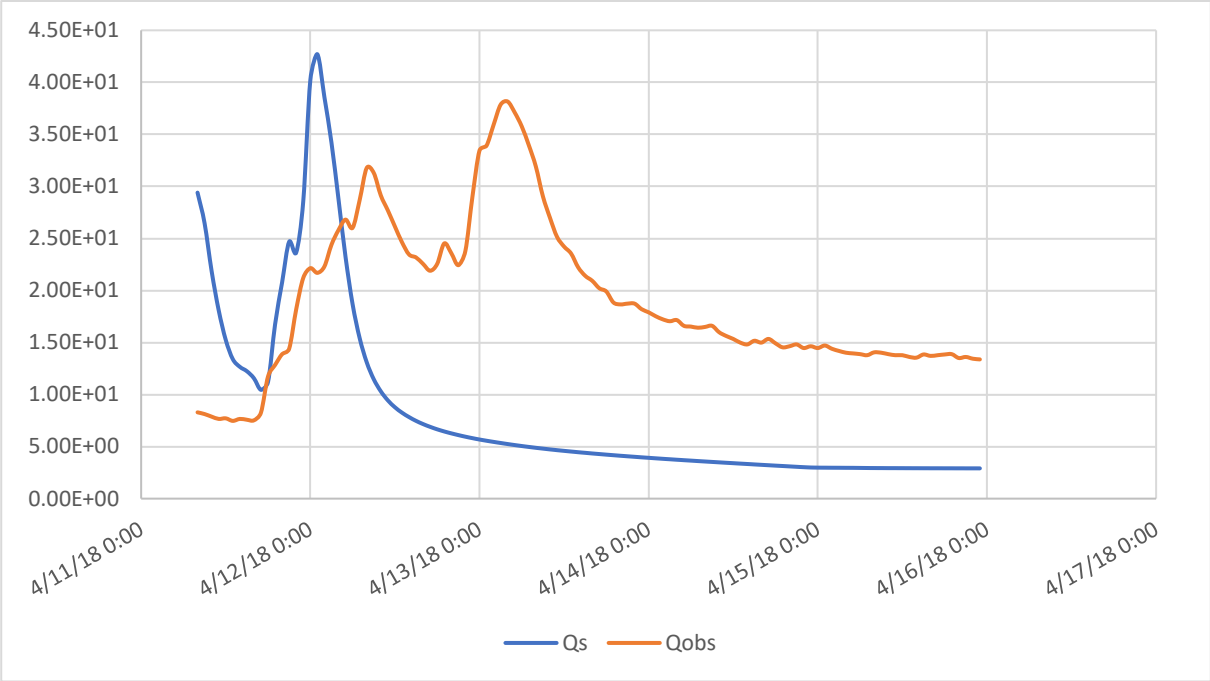


Figura 3-33 Lesmo - Peregallo: evento 5

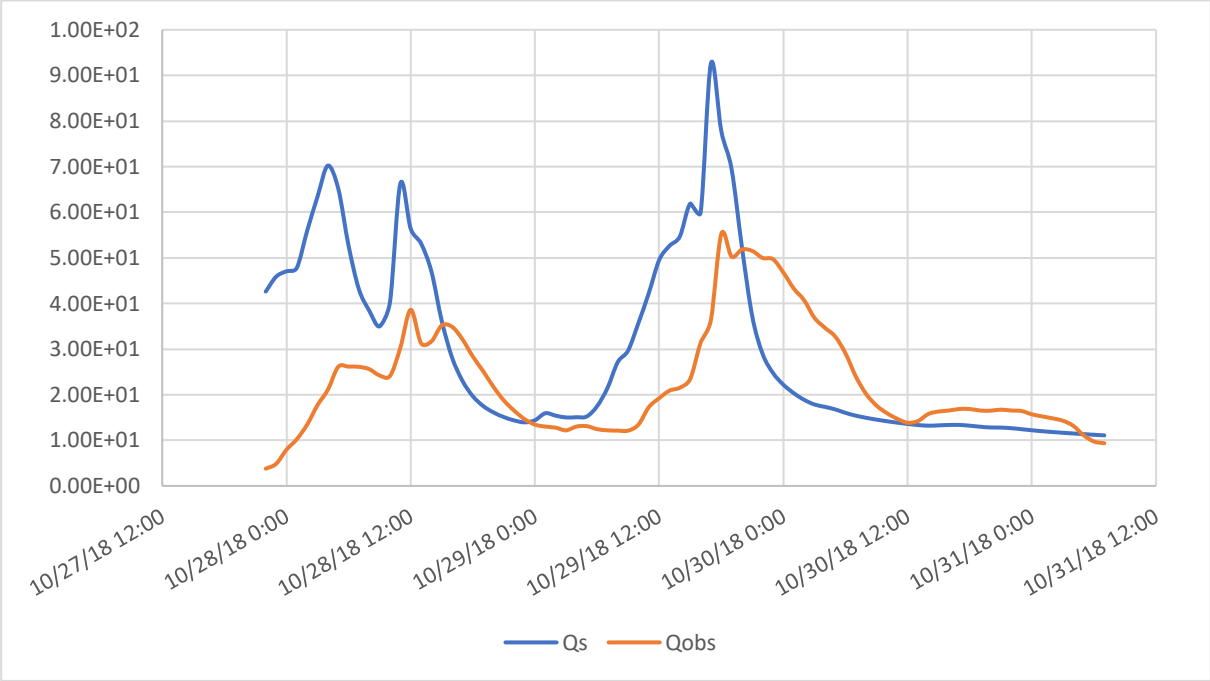


Figura 3-34 Lesmo - Peregallo: evento 6

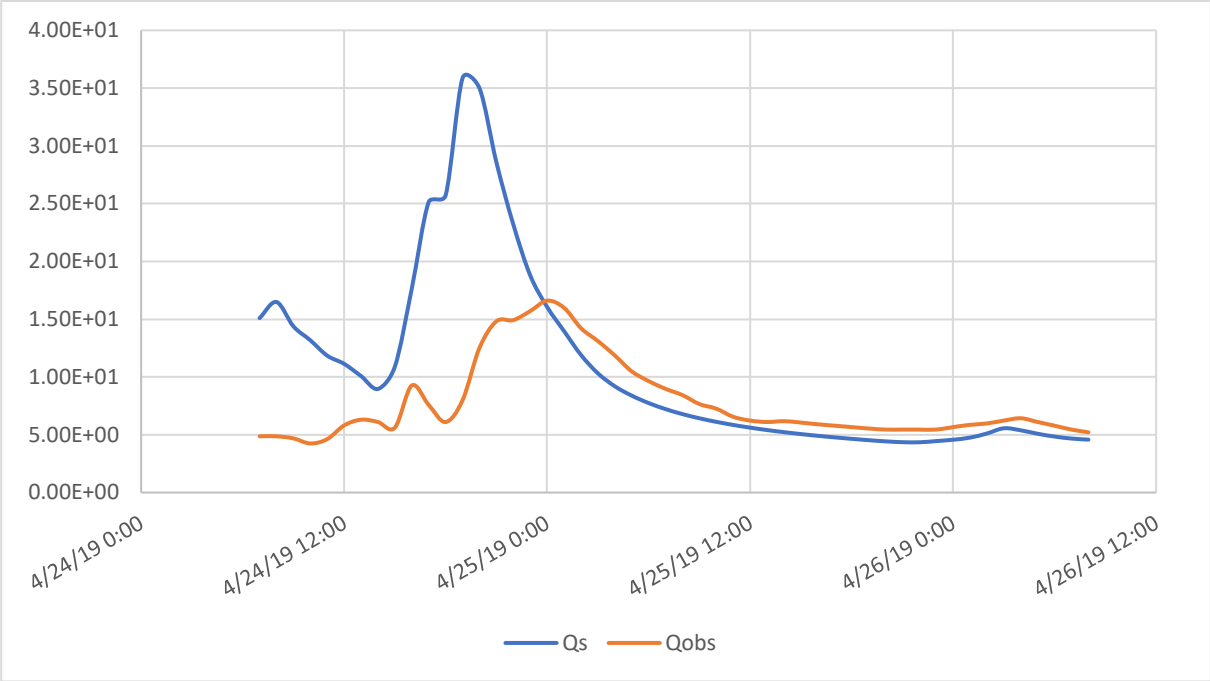


Figura 3-35 Lesmo - Peregallo: evento 7

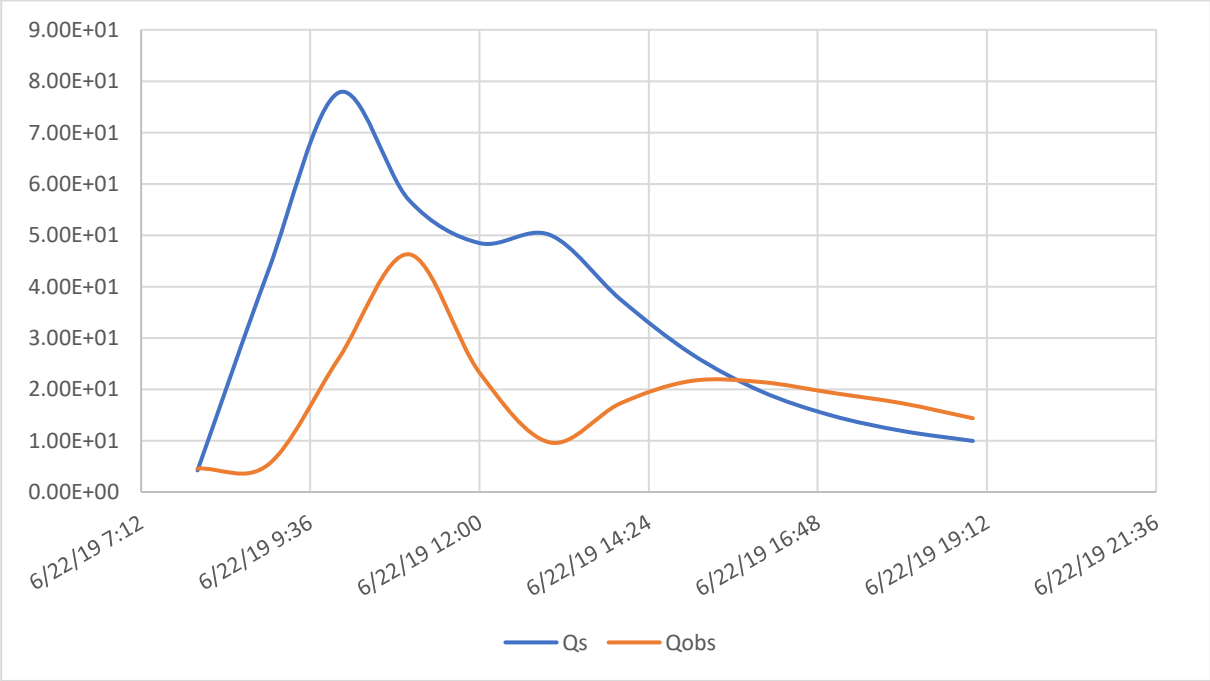


Figura 3-36 Lesmo - Peregallo: evento 8

Si osserva che il picco è anticipato nelle simulazioni rispetto alle portate osservate.

Di seguito, la tabella che riporta gli indici di valutazione utilizzati finora.

| Evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 11.4047767 | 0.08685836 | 0.69869902 | -0.1140675 |
| 2 | 12.0851587 | -0.4038088 | 0.16968825 | -0.1595144 |
| 3 | 7.66989046 | -1.785592 | 0.73905625 | -0.1576549 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 15.606647 | -0.4331387 | 0.11914023 | -0.5630218 |
| 6 | 20.2259252 | -1.112476 | 0.67649457 | 0.30649663 |
| 7 | 7.64078334 | -1.8972243 | 1.15993598 | 0.37445036 |
| 8 | 24.1322906 | -0.8020896 | 0.67977135 | 0.77230103 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 14.1093531 | -0.9067816 | 0.60611224 | 0.06556991 |

Tabella 3-23 Errori stimati sezione Lesmo - Peregallo

Da quanto si può osservare, l'indice RMSE è notevolmente aumentato rispetto ai casi precedenti e l'indice di Nash è negativo; inoltre, il picco di portata è sovrastimato mediamente dell'60%.
La sezione, fatta eccezione per un errore sui volumi cumulati contenuto (sovrastima del 6.5%), presenta indici sensibilmente peggiorati rispetto alle prime analizzate.

**MILANO – VIA FELTRE**

L'ultima sezione che si analizza per questa validazione, per quanto riguarda il metodo del Curve Number, è la sezione di Milano – via Feltre, sul fiume Lambro.
Anche in questo caso, l'unico evento escluso dall'analisi è l'evento 4.

| N° evento | Inizio | hh:mm | Fine | hh:mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 05/08/16 | 10:00 | 06/08/16 | 09:00 |
| 2 | 21/11/16 | 15:00 | 24/11/16 | 20:00 |
| 3 | 06/06/17 | 08:00 | 08/06/17 | 23:00 |
| 4 | 11/12/17 | 18:00 | 14/12/17 | 01:00 |
| 5 | 11/04/18 | 08:00 | 05/04/18 | 23:00 |
| 6 | 27/10/18 | 22:00 | 31/10/18 | 07:00 |
| 7 | 24/04/19 | 07:00 | 26/04/19 | 08:00 |
| 8 | 22/06/19 | 08:00 | 22/06/19 | 19:00 |

Tabella 3-24 Milano - Via Feltre

In questa sezione si osservano le portate maggiori, essendo l'ultima sezione a valle del bacino considerato. Di seguito, gli idrogrammi per ciascun evento.

Figura 3-37 Milano - via Feltre: evento 1

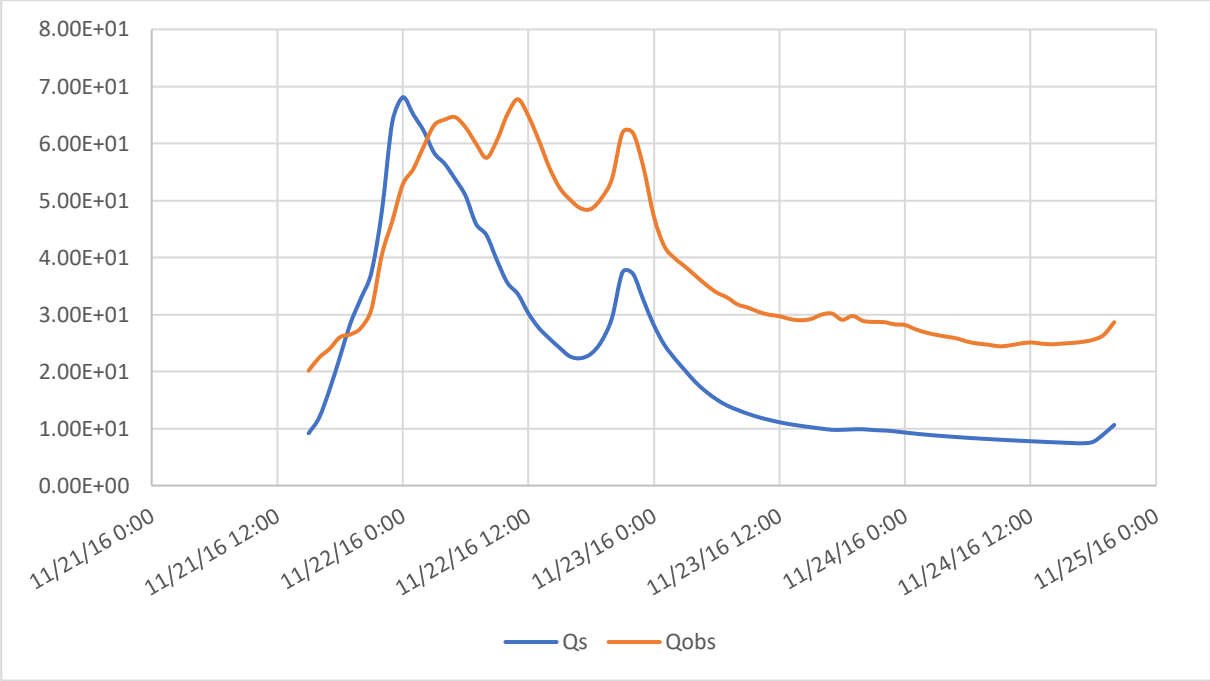


Figura 3-38 Milano - via Feltre: evento 2

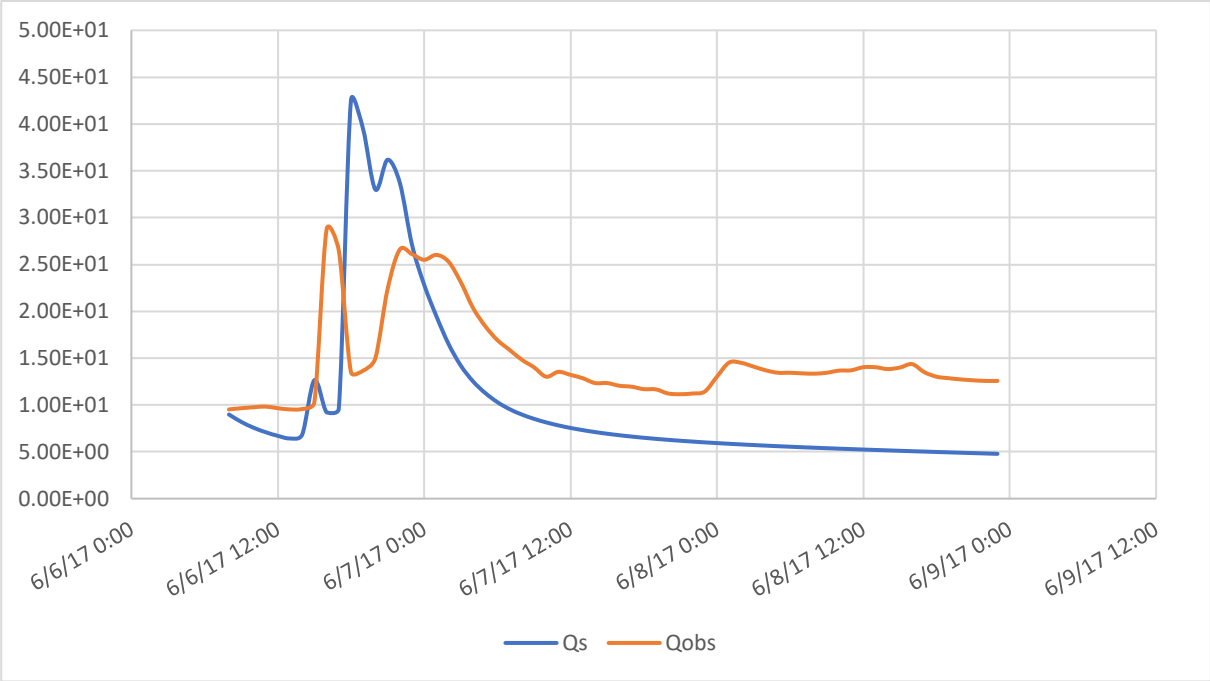


Figura 3-39 Milano - via Feltre: evento 3

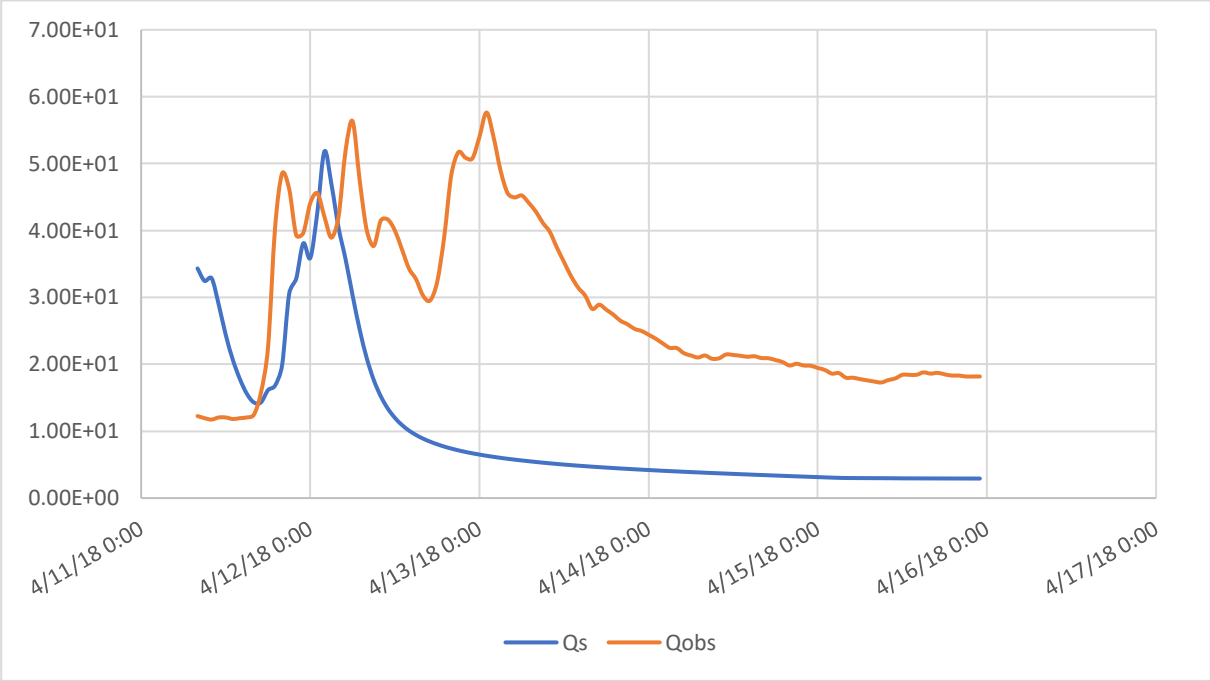


Figura 3-40 Milano - via Feltre: evento 5

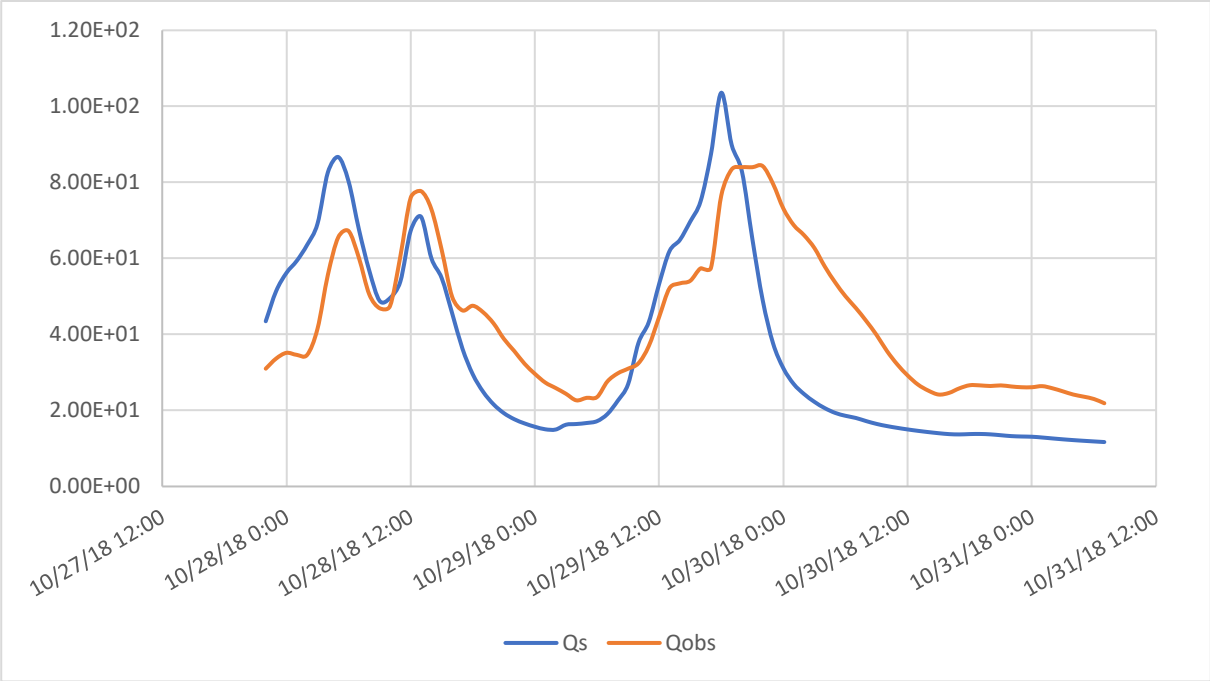


Figura 3-41 Milano - via Feltre: evento 6

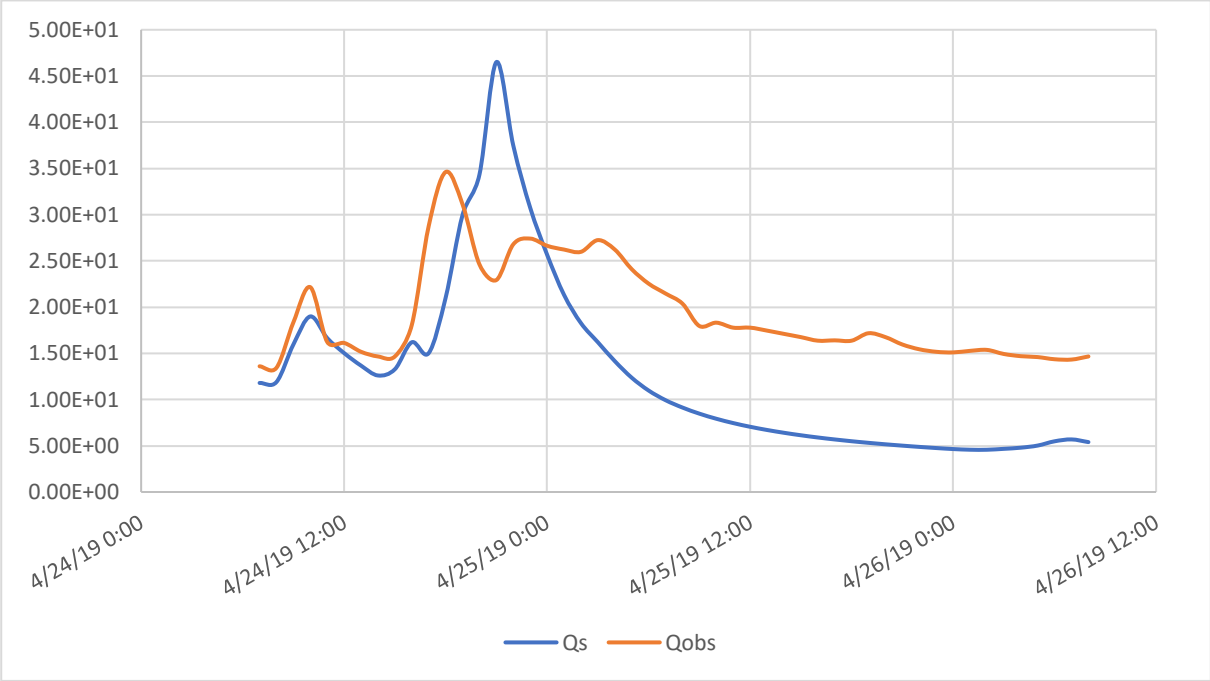


Figura 3-42 Milano - via Feltre: evento 7

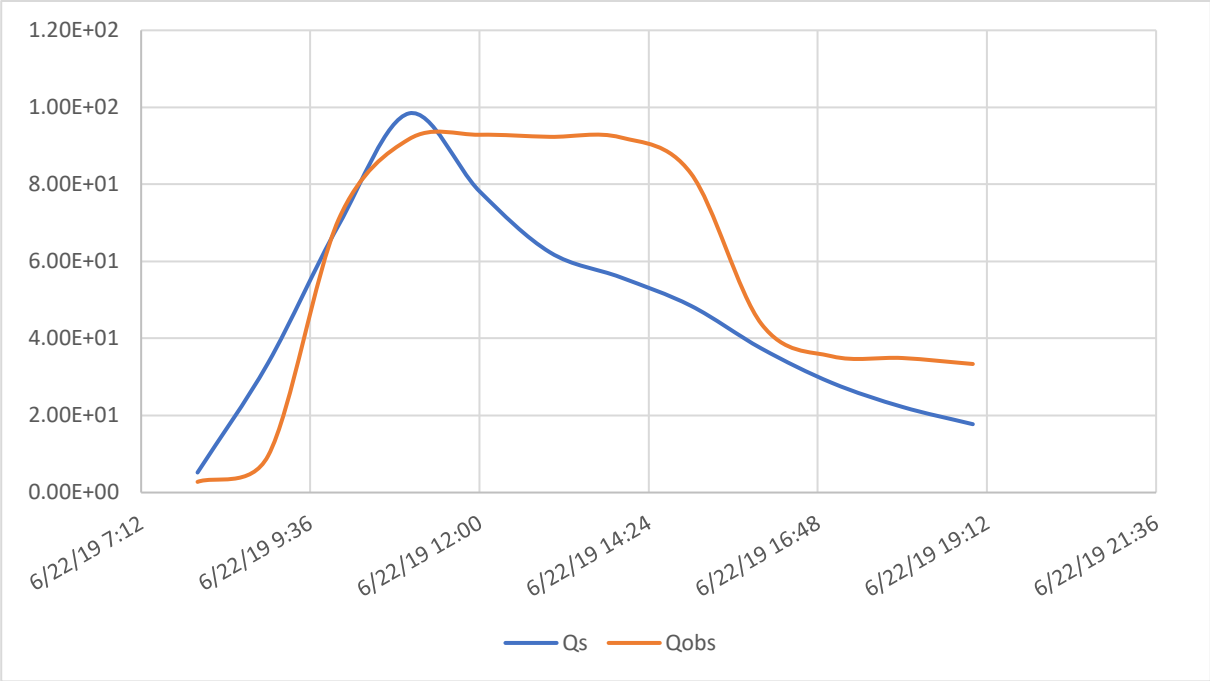


Figura 3-43 Milano - via Feltre: evento 8

Dagli idrogrammi riportati, si osserva che il picco delle portate simulate con il modello è pressoché coincidente, con buona stima anche dell'entità dello stesso e dei volumi cumulati. Di seguito la tabella che riassume gli indici caratteristici della sezione

| Evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14.8072974 | 0.61122915 | -0.0846444 | -0.3615317 |
| 2 | 19.0006497 | 0.23076608 | 0.00515179 | -0.4213869 |
| 3 | 9.07570597 | -0.8650776 | 0.48111541 | -0.3095272 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 23.2515618 | -0.0906518 | -0.100976 | -0.6418127 |
| 6 | 19.1965557 | 0.08729871 | 0.22889377 | -0.1764343 |
| 7 | 9.65619585 | -0.3193865 | 0.34349022 | -0.3409403 |
| 8 | 19.8796575 | 0.6621081 | 0.05967262 | -0.1834018 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 16.4096606 | 0.04518374 | 0.13324335 | -0.3478621 |

Tabella 3-25 Errori stimati sezione Milano – via Feltre

L'indice RMSE è il più alto tra quelli stimati nel bacino, per quanto riguarda il metodo CN; l'indice di Nash è positivo e l'errore sul picco mostra una sovrastima del 13%, il minore finora registrato.

I volumi cumulati invece presentano una sottostima del 34%.

Analizzando i valori mediati di tutte le sezioni finora studiate, si giunge ai risultati mostrati nella seguente tabella, che illustra gli indici medi del metodo Curve Number per la stima degli idrogrammi di piena.

| | RMSE | Nash | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| Bacino S-O-L | 9.21440603 | -0.3004901 | 0.16044116 | -0.4598176 |

Tabella 3-26 Media degli indici di valutazione del metodo CN per il bacino di Seveso - Olona – Lambro

Si può notare che il metodo CN mediamente sovrastima il picco di portata del 19%, mantenendo un RMSE discretamente basso, mentre i volumi cumulati sono sottostimati del 46% e l'indice di Nash risulta negativo.

### 3.2.2 Validazione Green – Ampt

Il secondo metodo che si presenta per l'analisi è il metodo Green – Ampt, descritto precedentemente nel paragrafo 2.2.3.
Gli eventi considerati per la validazione sono i medesimi del metodo Curve Number, per ciascuna sezione analizzata; per brevità non verranno ripresentate le tabelle che illustrano gli eventi, con rispettive date di inizio e fine, ma vi verrà fatto riferimento nell'esposizione del lavoro svolto per ogni sezione al fine di indicare quali eventi sono stati scartati dallo studio.

**CASTIGLIONE – LOZZA**

Per la sezione di Castiglione – Lozza, sul fiume Olona, sono stati scartati gli eventi meteorologici 1 e 4. Di seguito vengono presentati gli idrogrammi ricavati da simulazioni ed osservazioni.

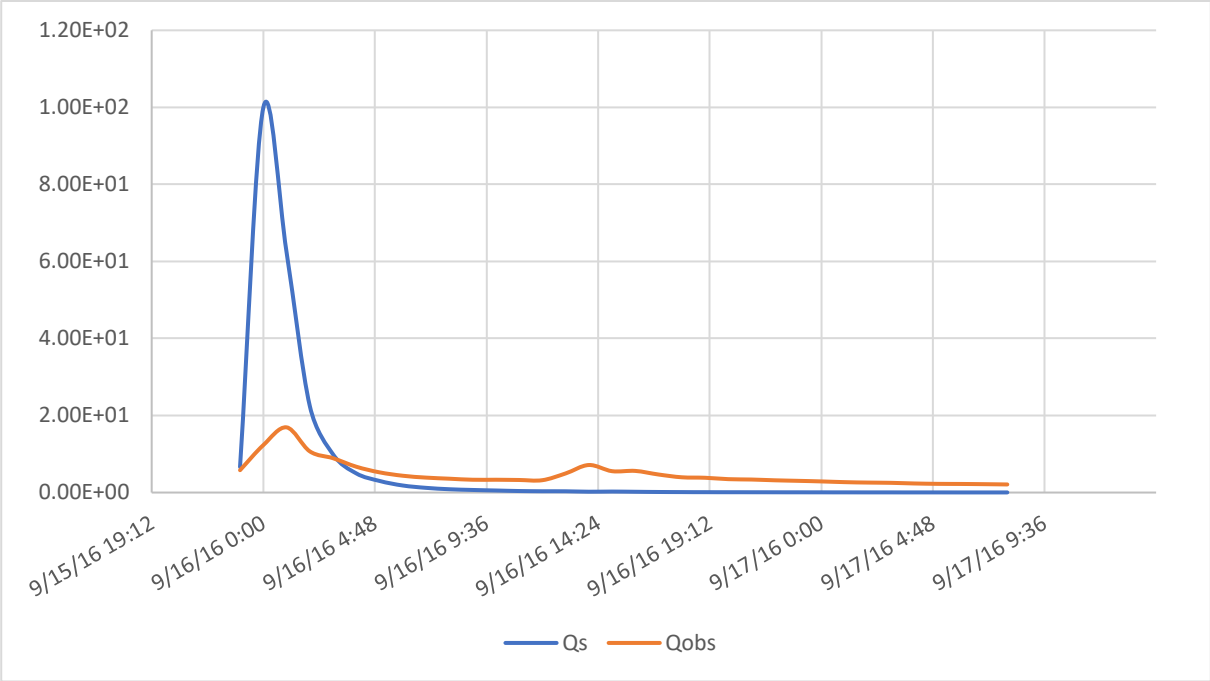


Figura 3-44 Castiglione - Lozza: evento 2

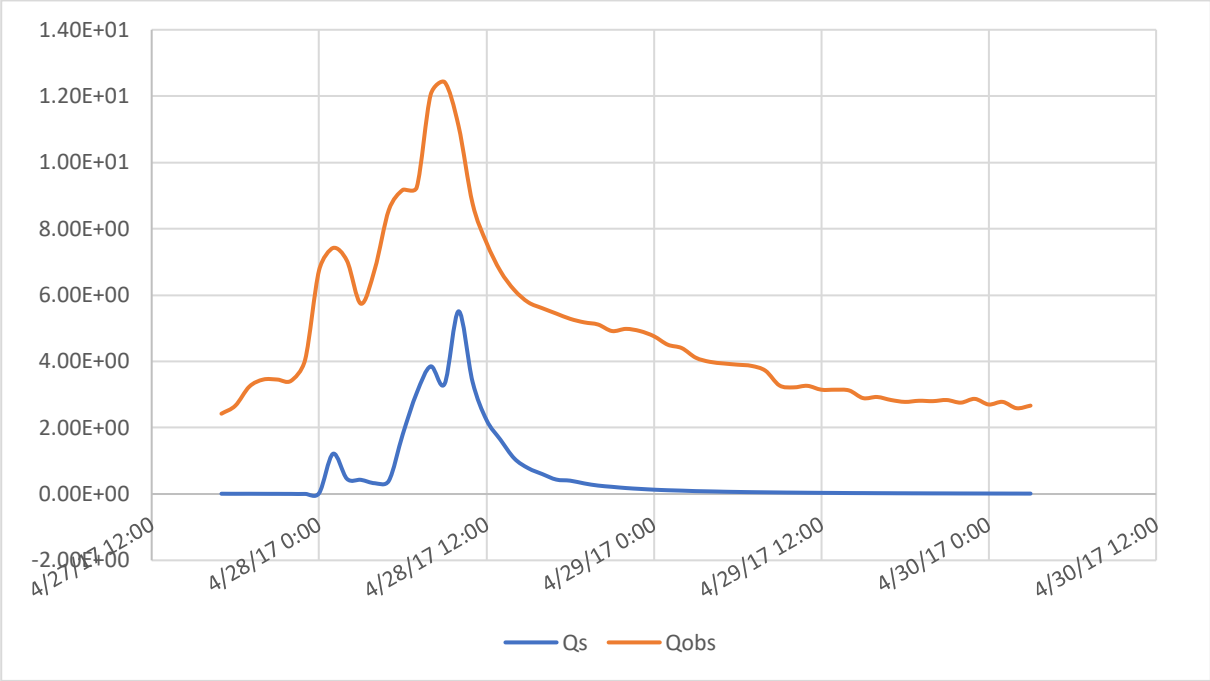


Figura 3-45 Castiglione - Lozza: evento 3

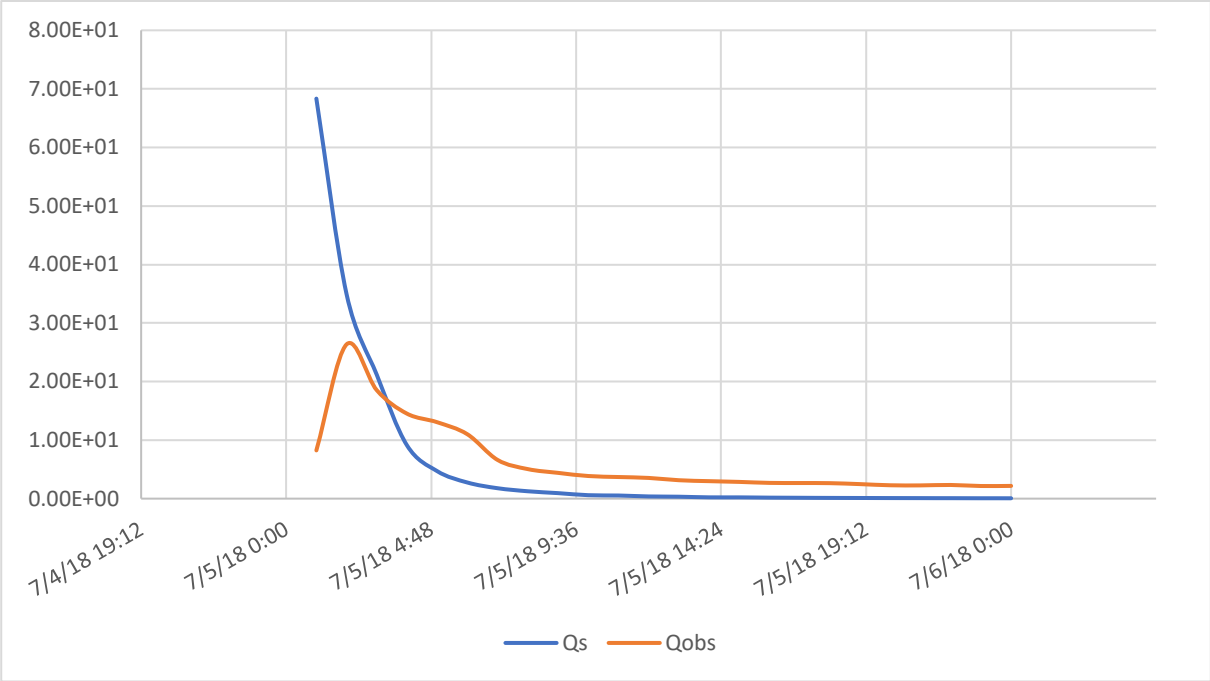


Figura 3-46 Castiglione - Lozza: evento 5

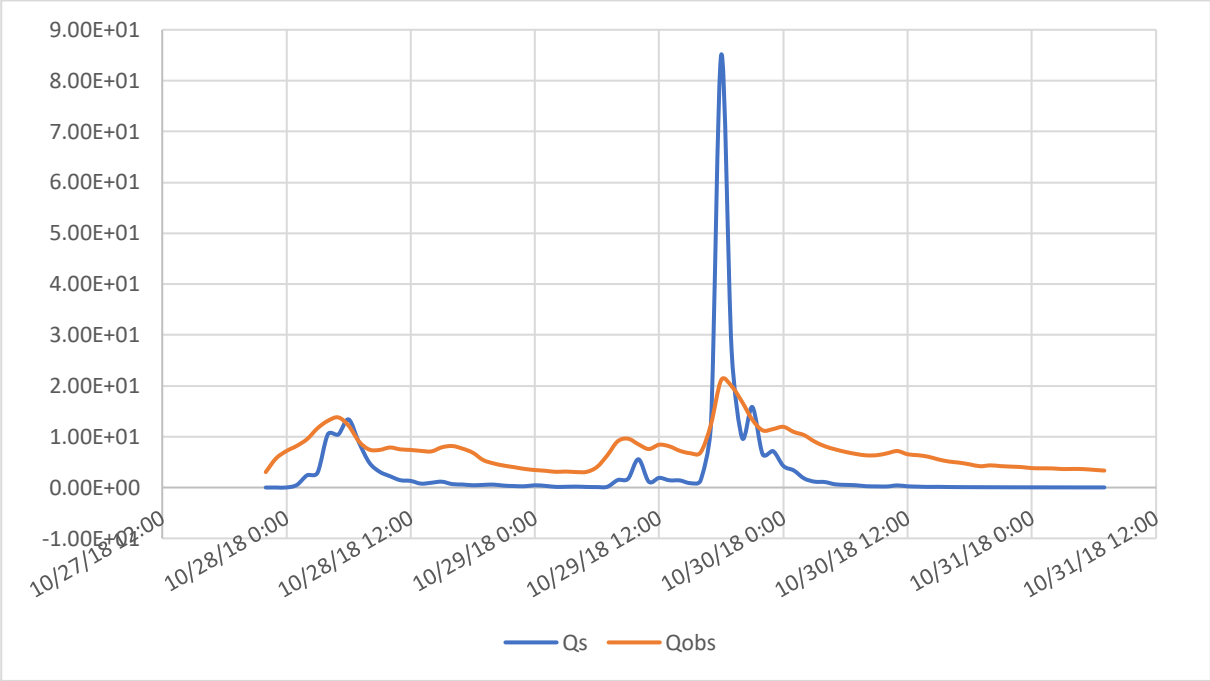


Figura 3-47 Castiglione - Lozza: evento 6

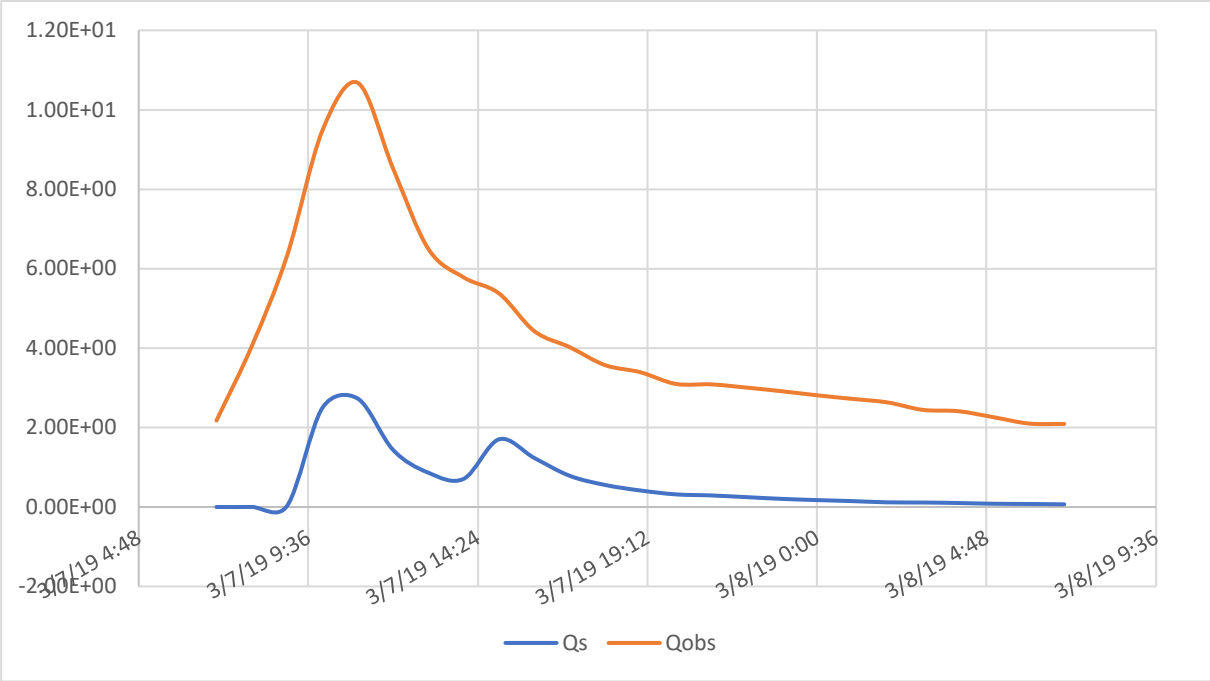


Figura 3-48 Castiglione - Lozza: evento 7

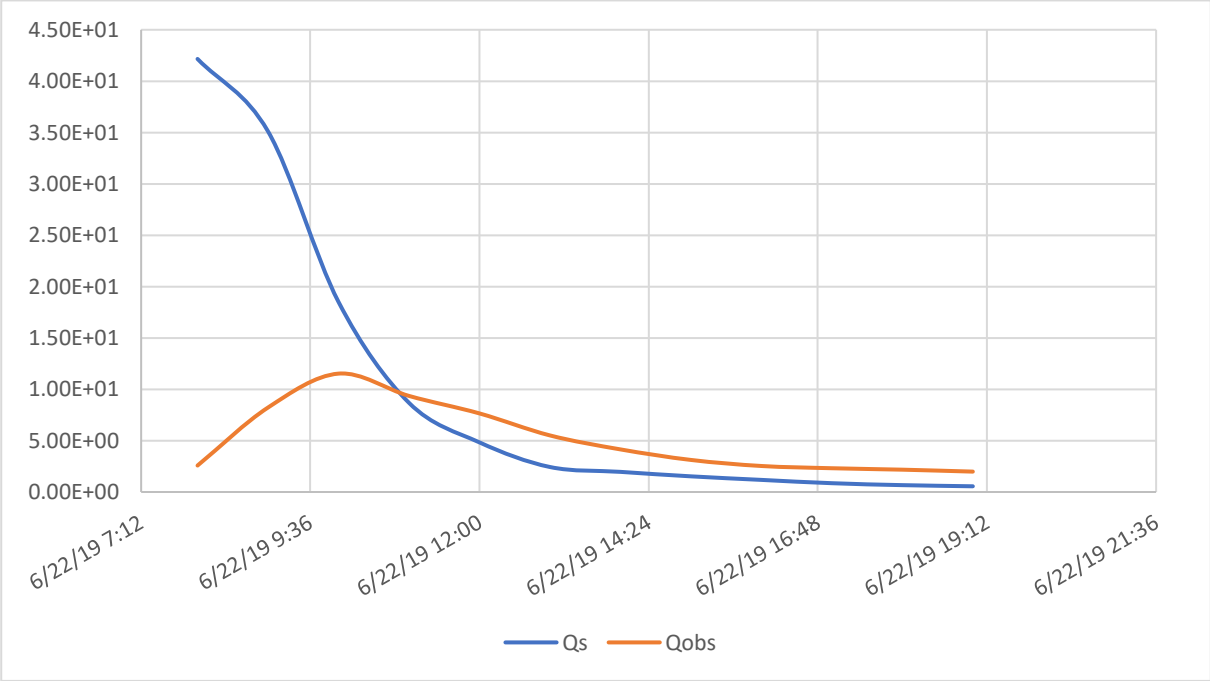


Figura 3-49 Castiglione - Lozza: evento 8

Da quanto si evince da questi idrogrammi, la stima dell'istante del picco di portata è accurata, mentre si osserva un discreto equilibrio tra sottostime e sovrastime. Ci si può aspettare, invece, un errore sul picco di portata non di trascurabile entità.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | 17.3306349 | -22.763718 | 4.90200696 | 0.33889322 |
| 3 | 4.59096175 | 0.14009571 | -0.5563965 | -0.884342 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 12.9266578 | -3.5302926 | 1.5937704 | -0.008933 |
| 6 | 8.8843123 | -1.7079221 | 3.02100188 | -0.5508805 |
| 7 | 4.03317549 | 0.13391672 | -0.7443938 | -0.859301 |
| 8 | 14.0594595 | -5.0232068 | 2.65791522 | 0.93840251 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 10.3042003 | -5.4585212 | 1.81231736 | -0.1710268 |

Tabella 3-27 Errori stimati sezione Castiglione - Lozza

Come anticipato, l'errore sul picco di portata è notevole (sovrastima del 180%); un dato che evidenzia il peggioramento della stima inoltre è l'indice di Nash, che si attesta a -5.45.
Un dato positivo è invece una leggera sottostima dei volumi cumulati, del 17%.

## CASTELLANZA

La sezione successiva è quella di Castellanza, situata sul fiume Olona, di cui sono disponibili per le analisi soltanto tre eventi meteorologici; infatti sono stati scartati gli eventi 1, 2, 4, 5 e 7.

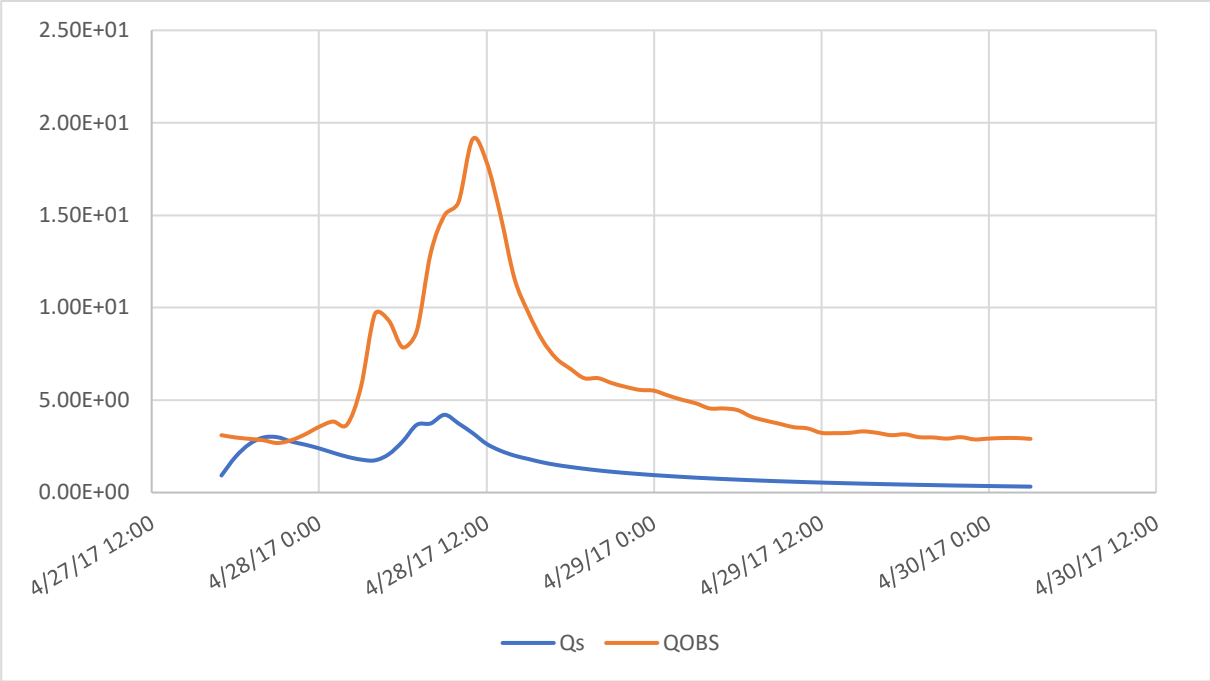


Figura 3-50 Castellanza: evento 3

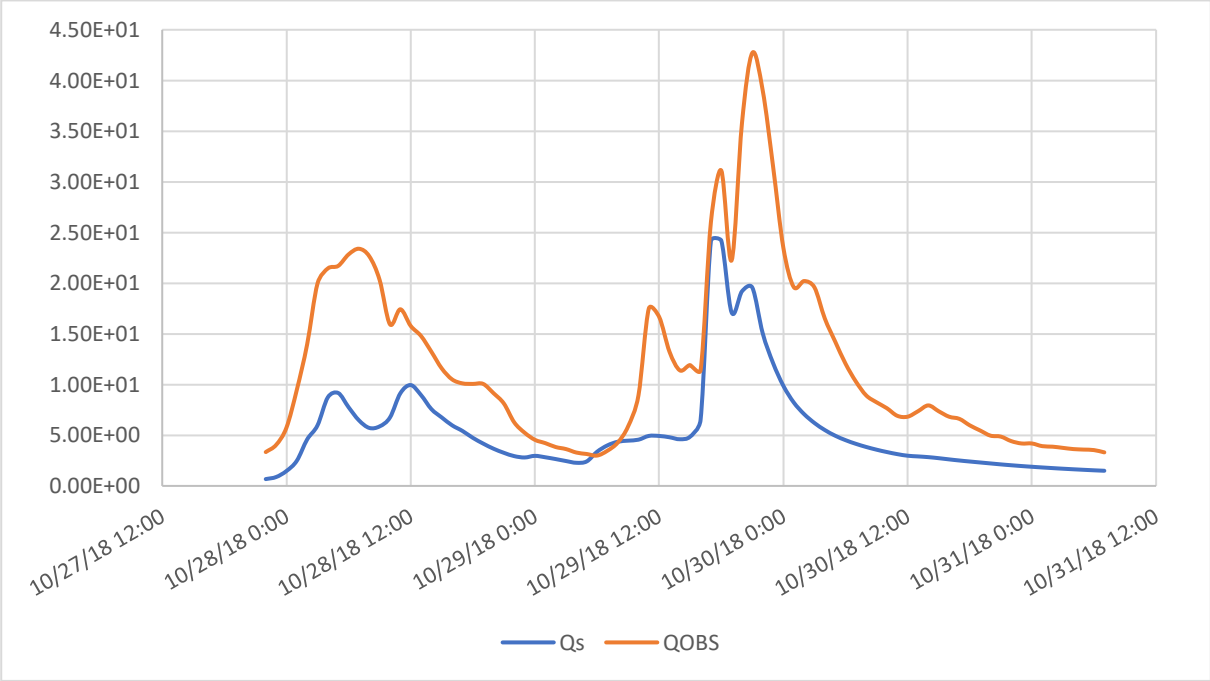


Figura 3-51 Castellanza: evento 6

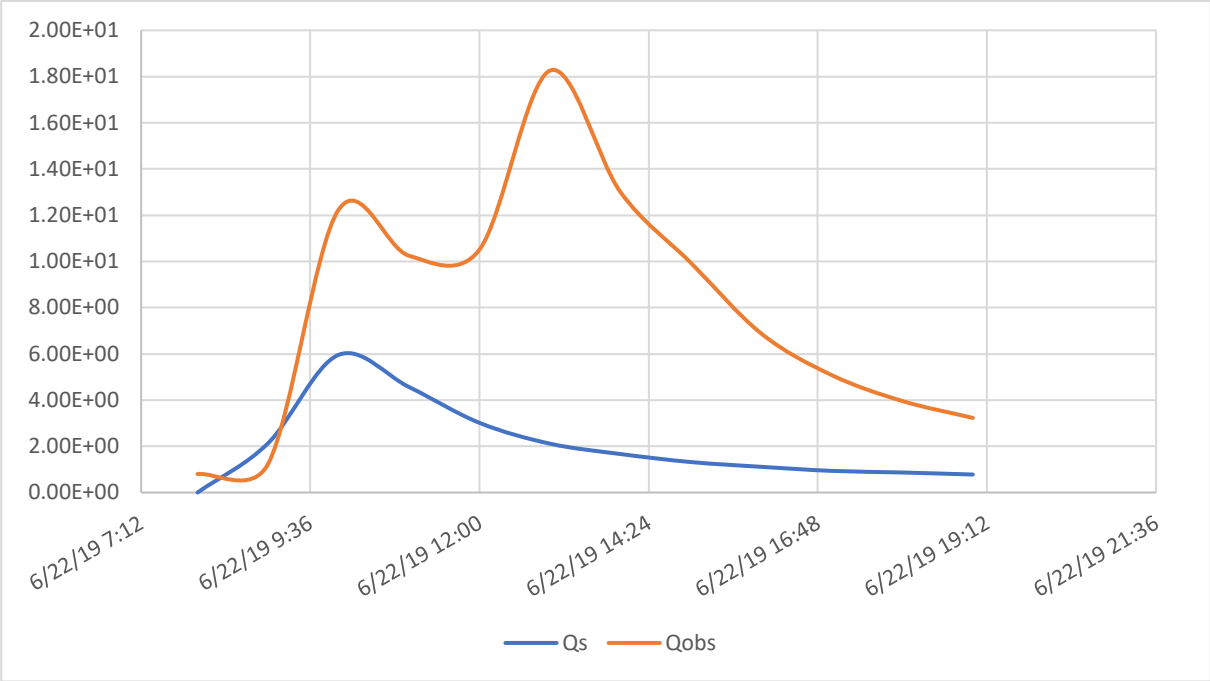


Figura 3-52 Castellanza: evento 8

Dagli idrogrammi degli eventi 3 e 6 si evince che il picco è anticipato nella simulazione di circa due ore e la tendenza generale è la sottostima sia del picco, sia dei volumi cumulati.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | - |
| 3 | 5.58362637 | 0.12258069 | -0.7799484 | -0.7538851 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | 8.37766005 | 0.4167472 | -0.4333396 | -0.5412987 |
| 7 | - | - | - | - |
| 8 | 7.40810844 | 0.09610806 | -0.6737553 | -0.7434076 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 7.12313162 | 0.21181198 | -0.6290144 | -0.6795305 |

Tabella 3-28 Errori stimati sezione Castellanza

Da quanto riporta la tabella, il picco è sottostimato del 62%, così come i volumi cumulati (del 67%); gli indici di Nash ed RMSE sono positivi. Tuttavia, il campione presenta solo tre eventi per lo studio, in quanto gli altri non sono stati registrati dal modello.

## CANTU' – ASNAGO

La sezione di Cantù – Asnago viene analizzata utilizzando 6/8 eventi meteorologici (vengono esclusi gli eventi 4 e 7).

Di seguito si riportano i relativi idrogrammi ricavati e osservati.

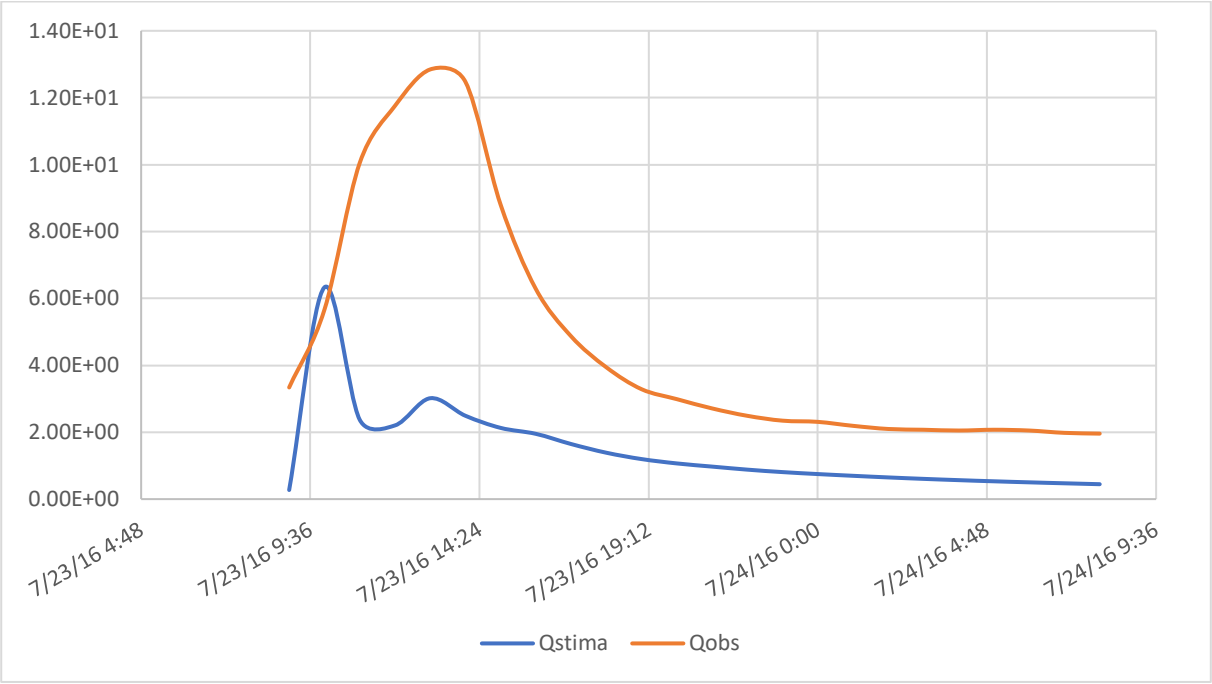


Figura 3-53 Cantù - Asnago: evento 1

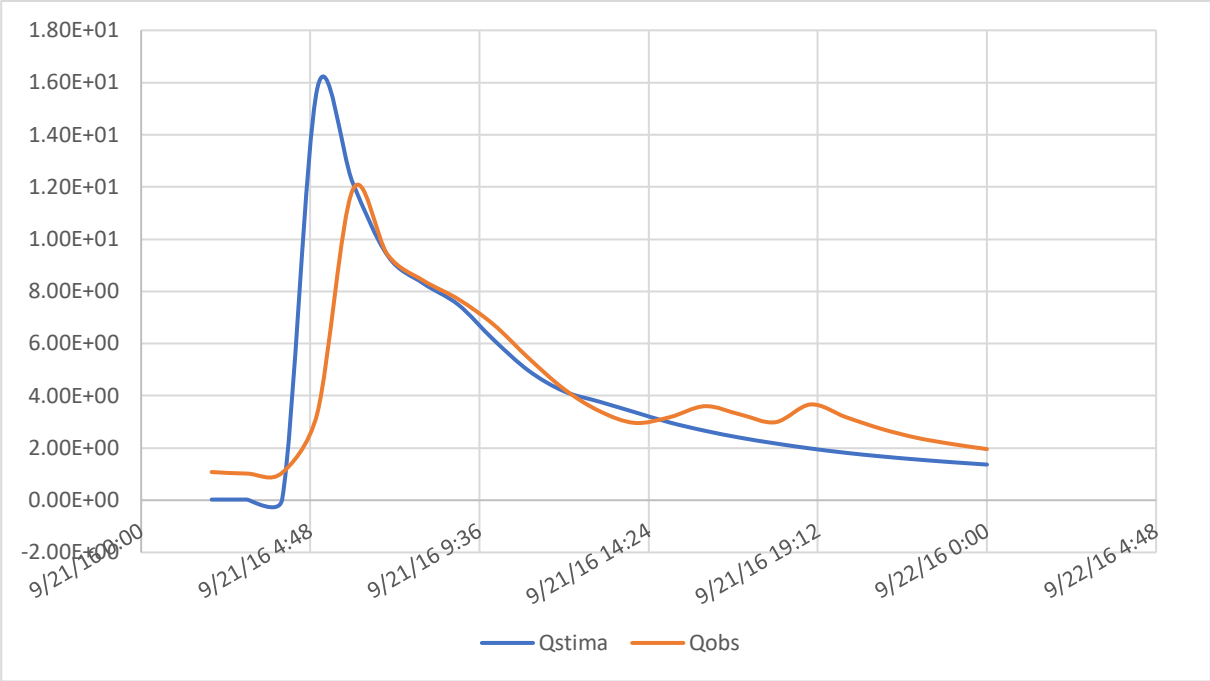


Figura 3-54 Cantù - Asnago: evento 2

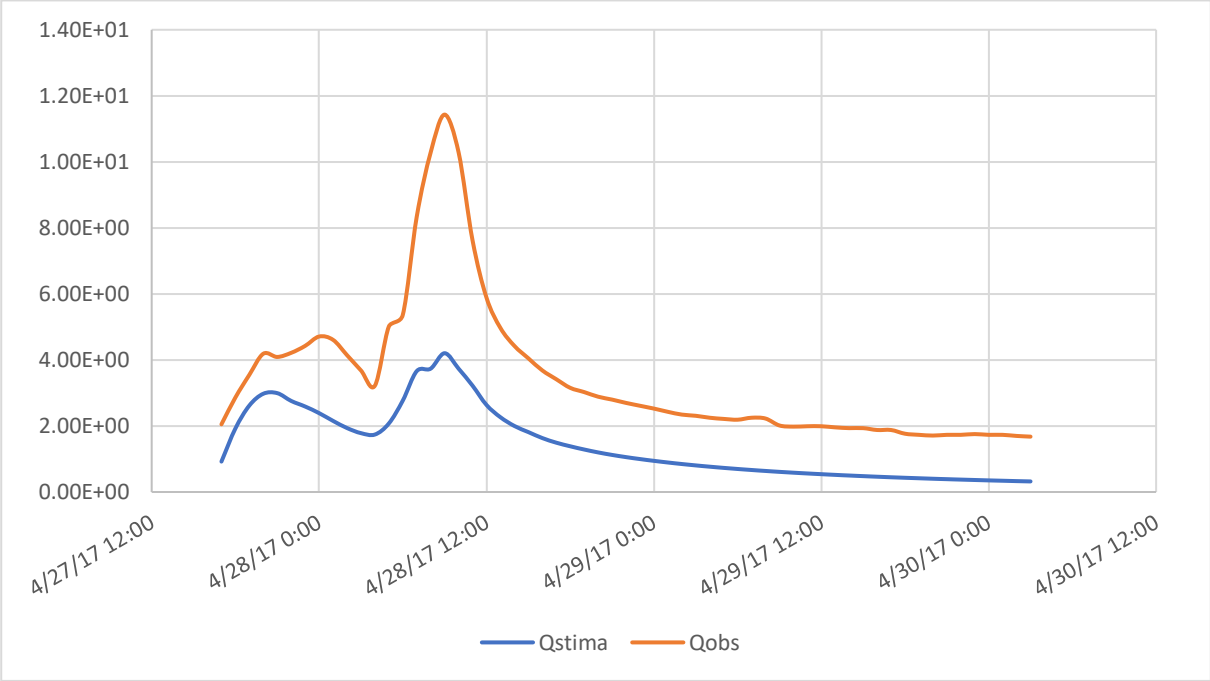


Figura 3-55 Cantù - Asnago: evento 3

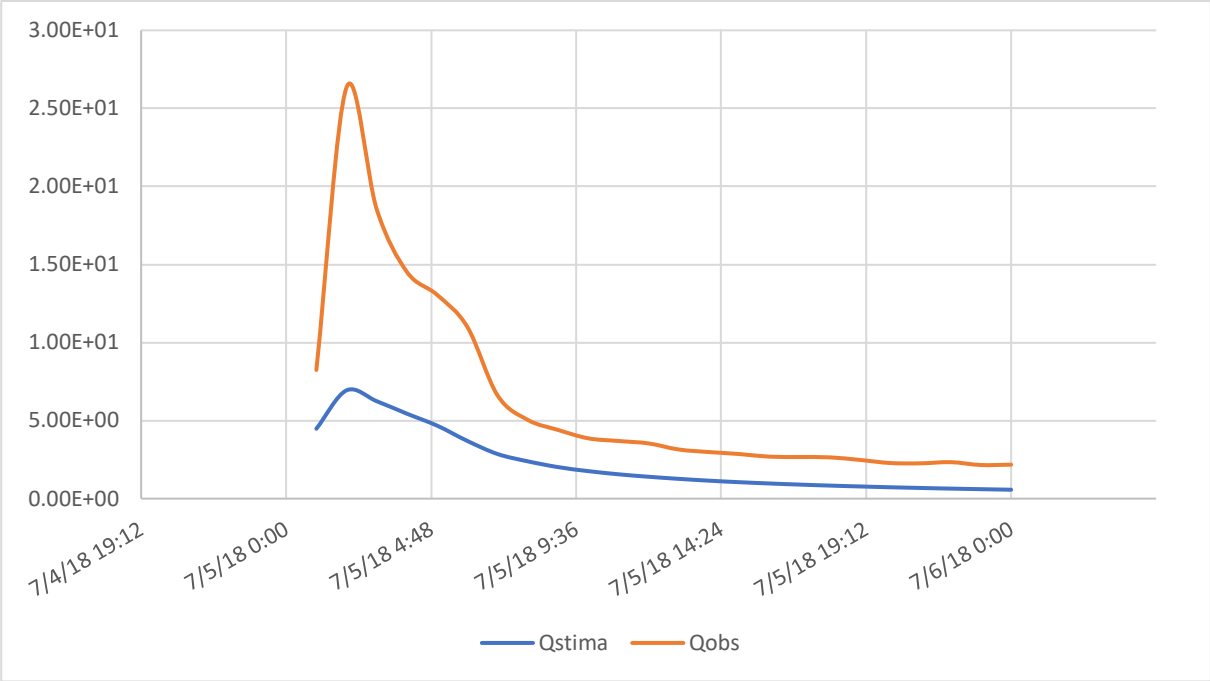


Figura 3-56 Cantù - Asnago: evento 5

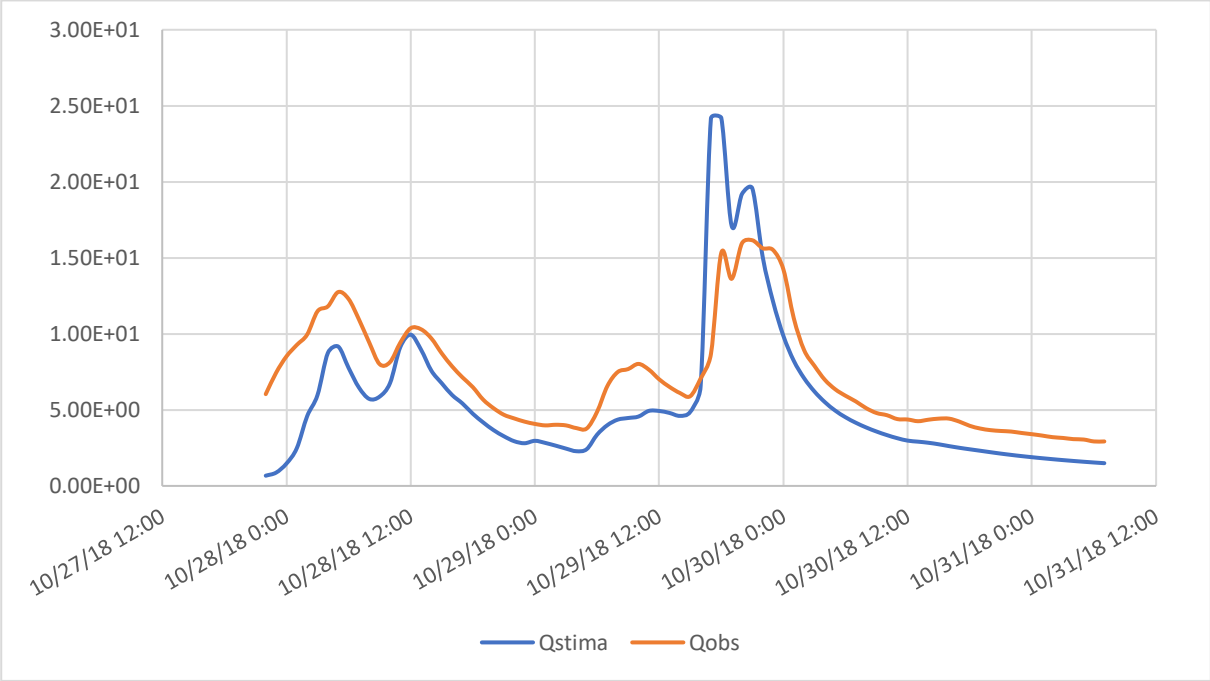


Figura 3-57 Cantù - Asnago: evento 6

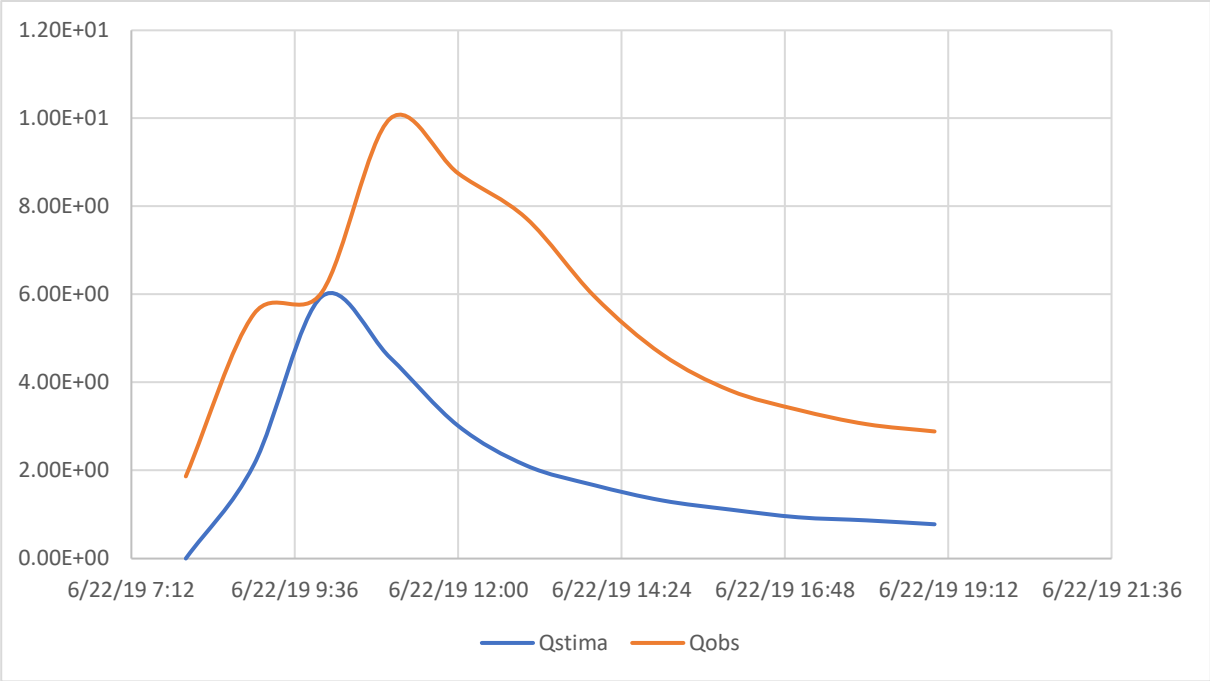


Figura 3-58 Cantù - Asnago: evento 8

Il picco negli idrogrammi simulati mediamente anticipa il picco degli idrogrammi osservati, mentre i volumi cumulati sono sottostimati.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.43853255 | 0.1654083 | -0.5070857 | -0.6985459 |
| 2 | 2.7084475 | 0.58562049 | 0.32829511 | -0.0016568 |
| 3 | 2.39821207 | 0.35437284 | -0.632228 | -0.5842326 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 5.85663211 | 0.3508097 | -0.7367199 | -0.641254 |
| 6 | 3.25542002 | 0.2975629 | 0.49850685 | -0.2260126 |
| 7 | - | - | - | - |
| 8 | 3.66348423 | 0.18685031 | -0.4038413 | -0.6157764 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.16548148 | -0.0126248 | -0.1454797 | -0.7937103 |

Tabella 3-29 Errori stimati sezione Cantù - Asnago

I dati ottenuti dimostrano una buona stima sul massimo della portata, con una sottostima media del 14.5%, mentre l'indice di Nash è prossimo ma inferiore allo zero. I volumi cumulati si confermano sottostimati (del 79%).

## CASLINO D'ERBA

Passando alla prima sezione del fiume Lambro, sono stati scartati tre eventi meteorologici (4, 5, 8), per cui l'analisi dispone di cinque eventi sugli otto individuati.

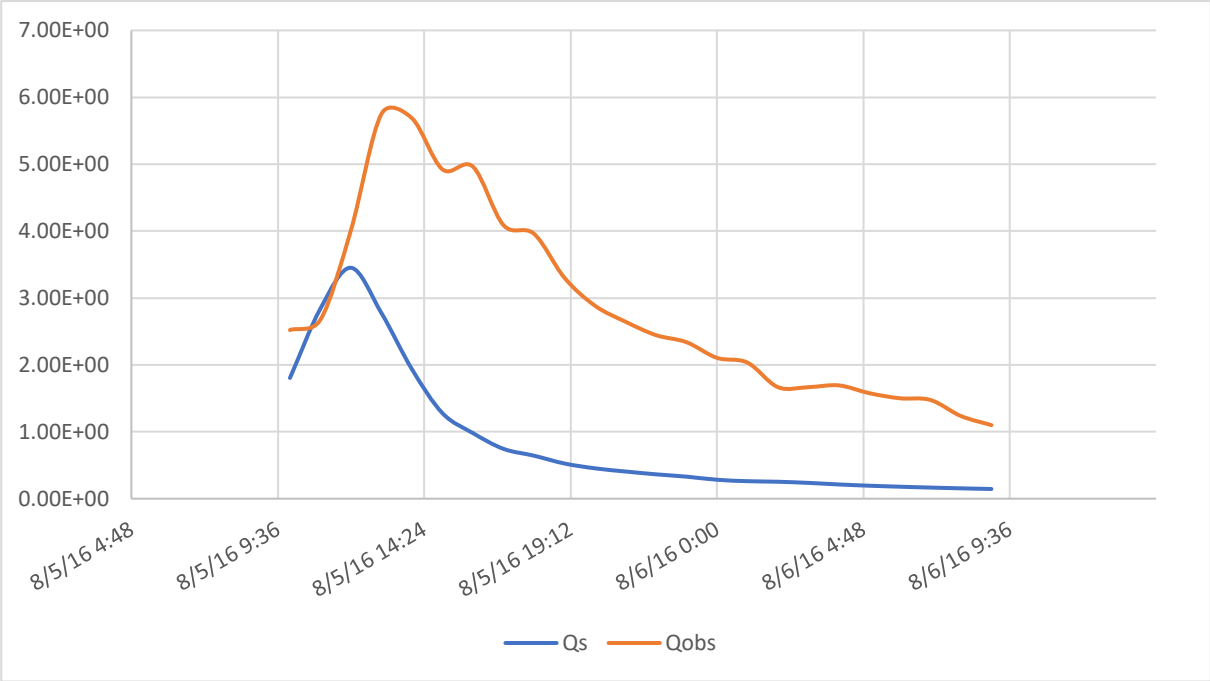


Figura 3-59 Caslino d'Erba: evento 1

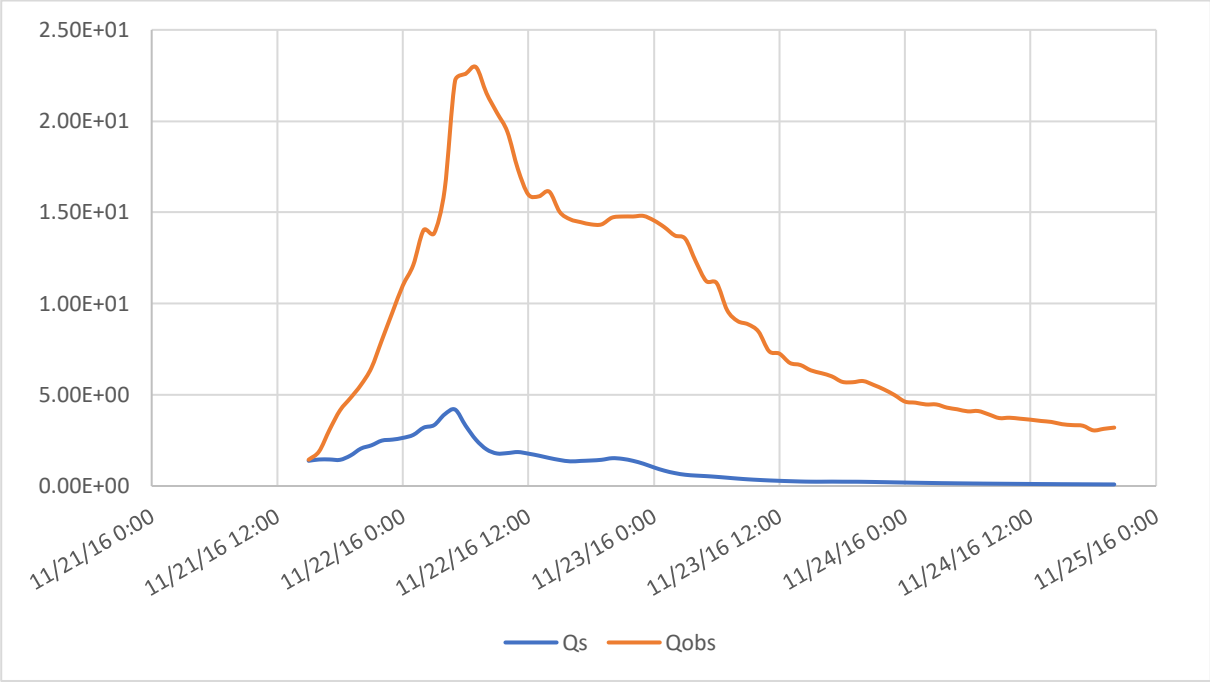


Figura 3-60 Caslino d'Erba: evento 2

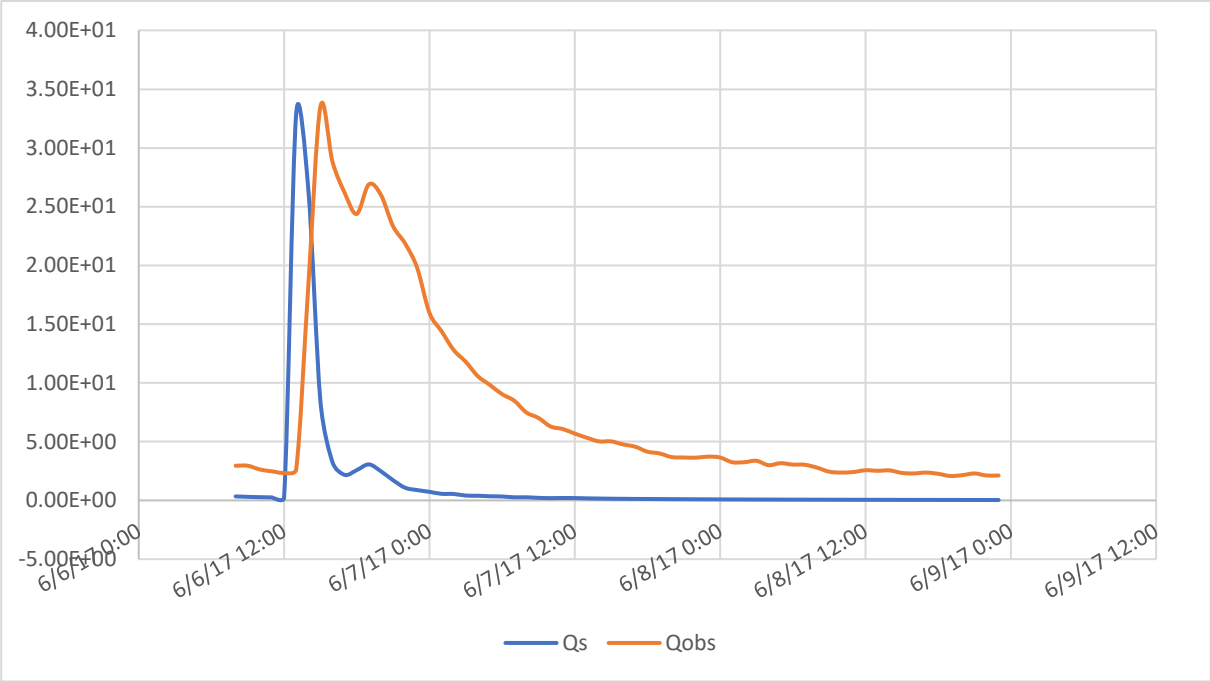


Figura 3-61 Caslino d'Erba: evento 3

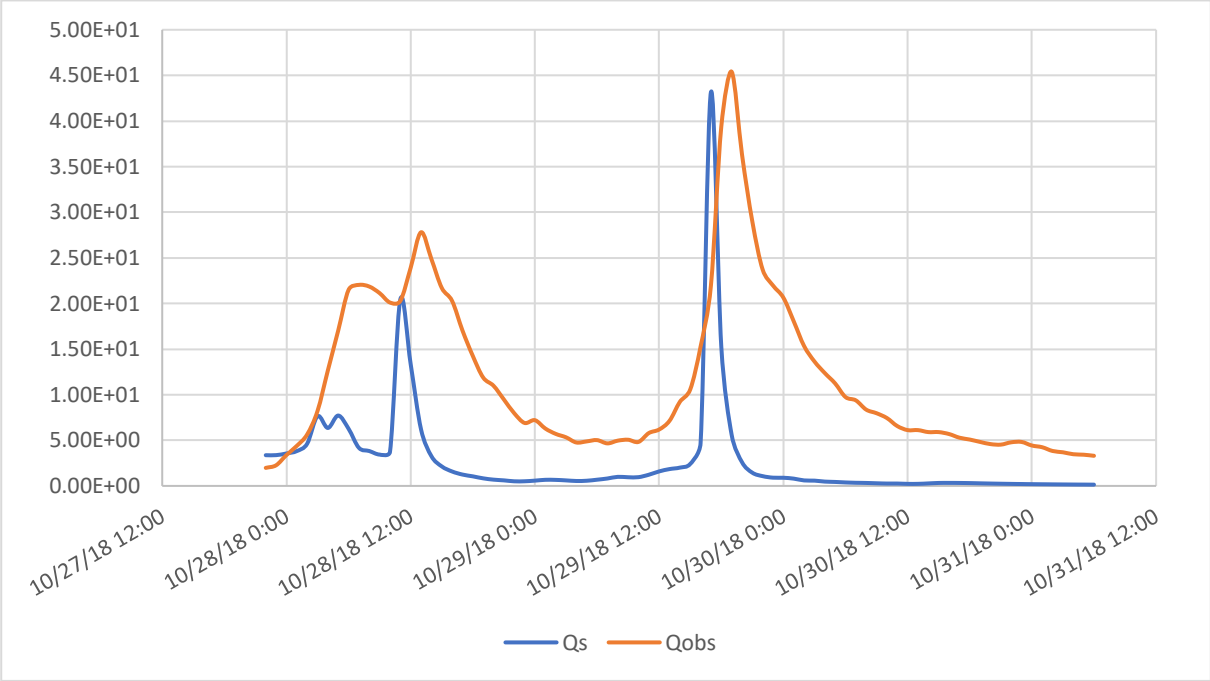


Figura 3-62 Caslino d'Erba: evento 6

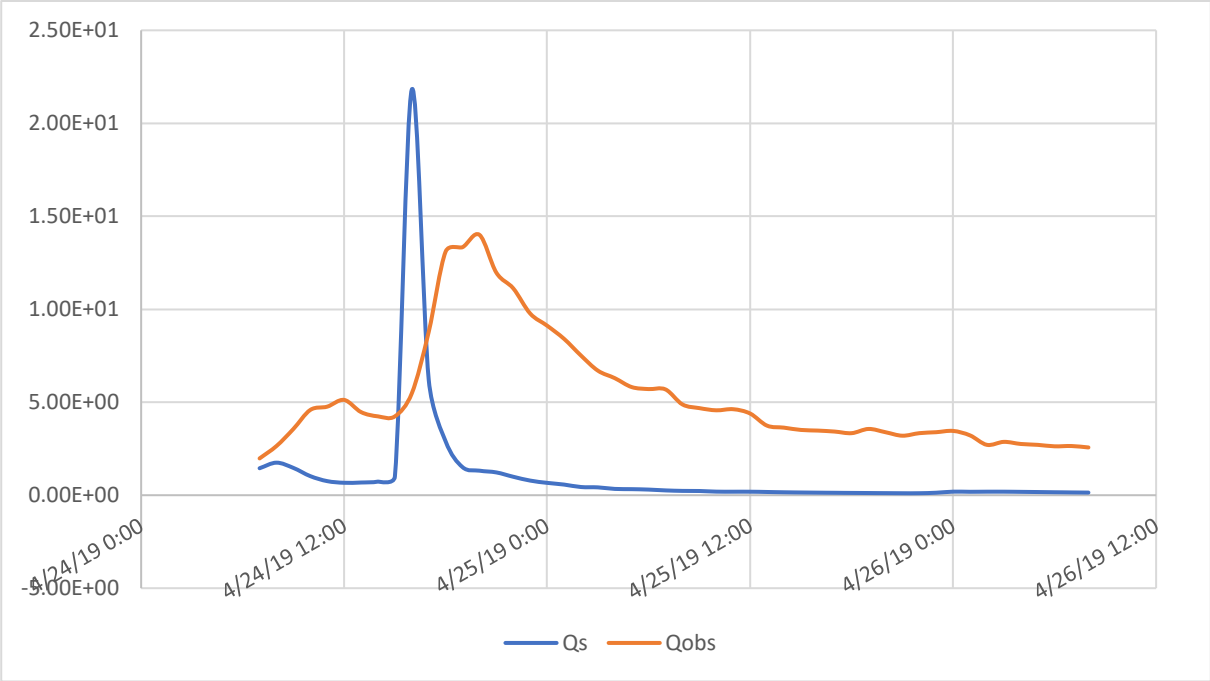


Figura 3-63 Caslino d'Erba: evento 7

Il picco di portata è anticipato di mediamente due ore negli idrogrammi simulati; inoltre si osserva come il picco si presenti per una durata inferiore rispetto al caso osservato, nel quale i volumi tendono ad attenuarsi più gradualmente fino a raggiungere il valore di portata media della sezione.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.25727848 | 0.13322492 | -0.399866 | -0.6979373 |
| 2 | 9.71365194 | 0.06893438 | -0.8175698 | -0.8899517 |
| 3 | 10.6968229 | -0.0756381 | -0.0182355 | -0.8127983 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | 12.3300531 | 0.06072841 | -0.0495639 | -0.7701537 |
| 7 | 5.82960096 | -0.2503733 | 0.55783666 | -0.7977107 |
| 8 | - | - | - | - |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.16548148 | -0.0126248 | -0.1454797 | -0.7937103 |

Tabella 3-30 Errori stimati sezione Caslino d'Erba

Così come osservato per la sezione precedente di Cantù – Asnago, il picco di portata è simulato con sufficiente precisione, mostrando una sottostima del 14.5% e l'indice di Nash si mantiene di poco inferiore allo zero. I volumi cumulati sono sottostimati del 79%.

## COSTA MASNAGA - LAMBRUGO

La quinta sezione analizzata è quella di Costa Masnaga – Lambrugo, sul fiume Lambro, per la quale è stato scartato il solo evento meteorologico numero 4.

Figura 3-64 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 1

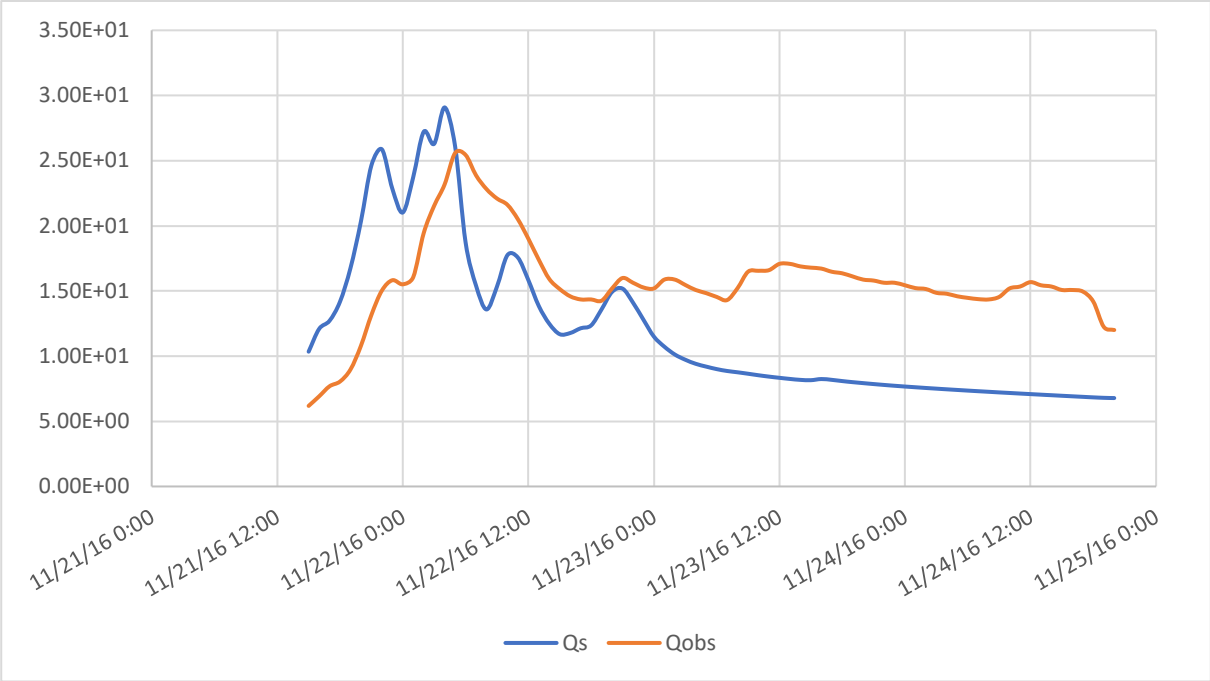


Figura 3-65 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 2

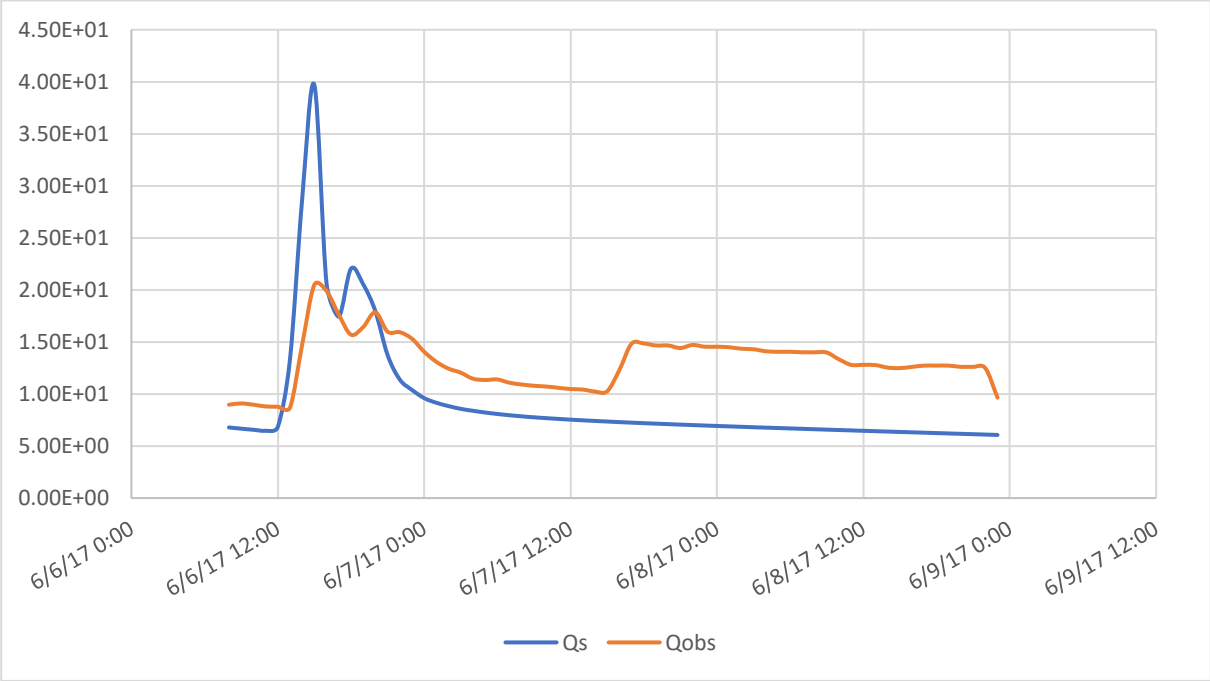


Figura 3-66 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 3

Figura 3-67 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 5

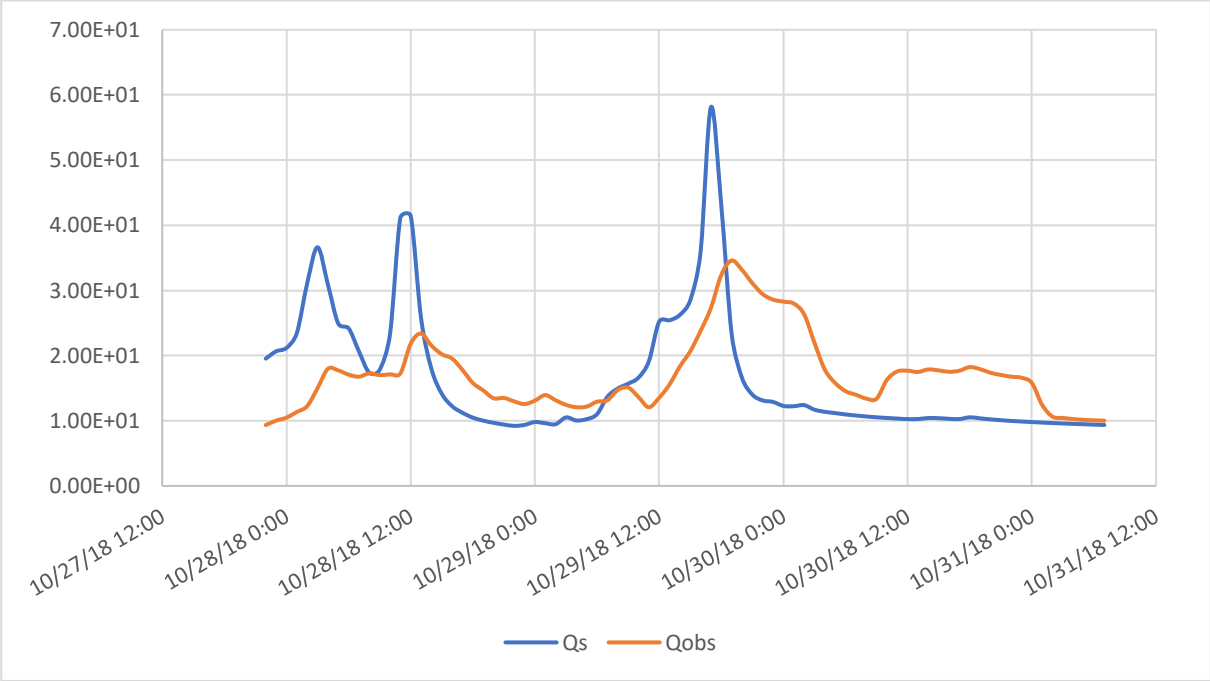


Figura 3-68 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 6

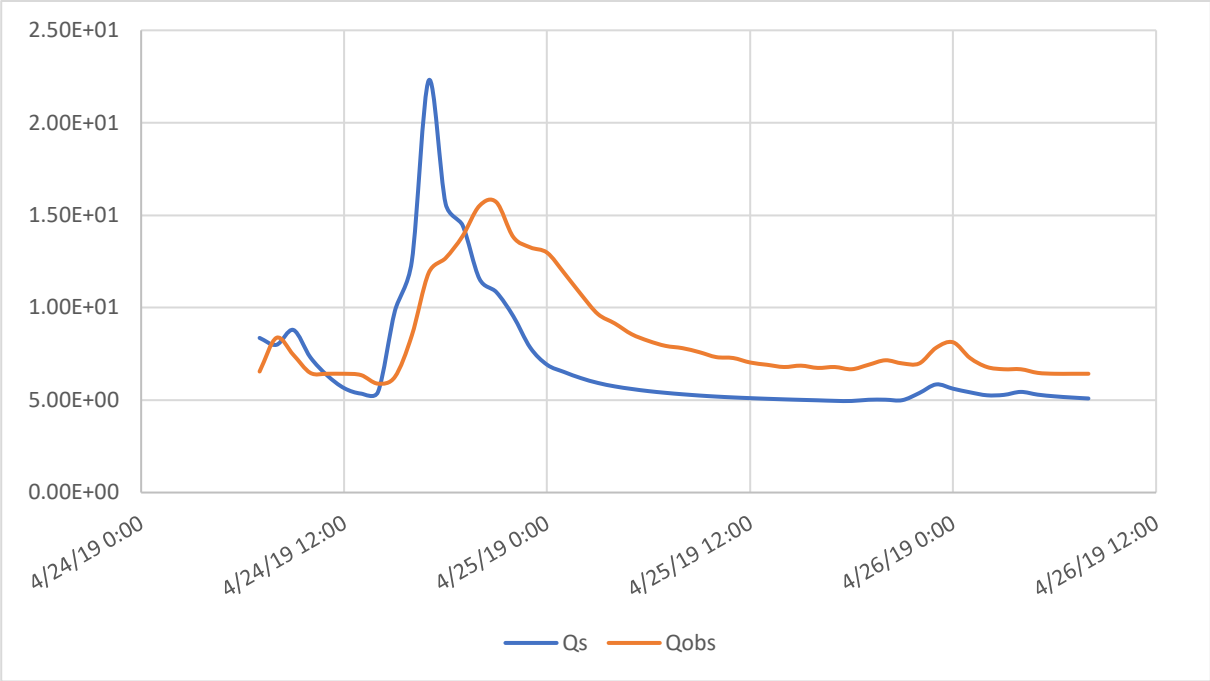


Figura 3-69 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 7

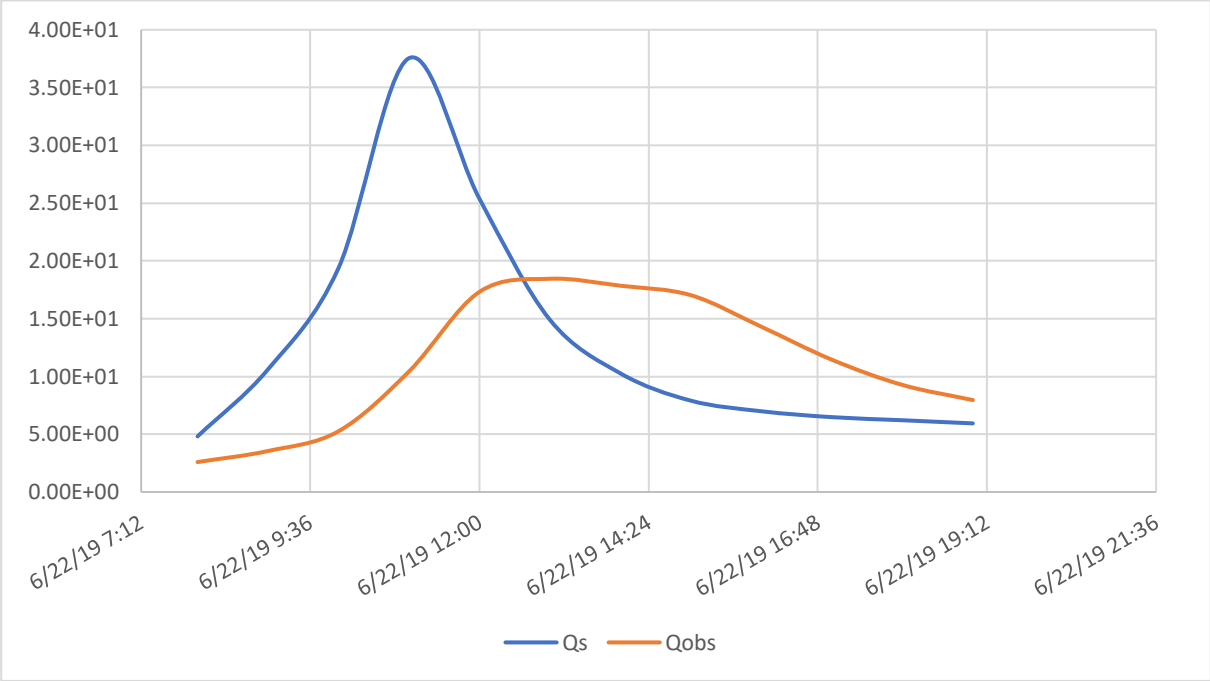


Figura 3-70 Costa Masnaga - Lambrugo: evento 8

Il picco di portata, così come nelle precedenti sezioni, è anticipato di due ore in media, mentre la tendenza per quanto riguarda volumi cumulati e portata massima è la sovrastima.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8.01747695 | -0.5160729 | 1.12862309 | -0.1227625 |
| 2 | 6.79019163 | -0.734123 | 0.1368352 | -0.2403432 |
| 3 | 6.13974697 | -0.7966979 | 0.93575324 | -0.2928608 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 12.2252544 | -0.1093384 | -0.1671281 | -0.6189727 |
| 6 | 9.49755708 | 1.64462096 | 0.67998932 | -0.0472669 |
| 7 | 3.03029471 | 0.02783126 | 0.41959705 | -0.1714348 |
| 8 | 10.4067155 | 2.27076571 | 1.03446309 | 0.1547172 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 8.01531961 | 0.25528367 | 0.59544755 | -0.1912748 |

Tabella 3-31 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo

Nella sezione di Costa Masnaga – Lambrugo si nota un miglioramento rispetto alle sezioni precedenti: infatti l'indice di Nash è positivo, con un RMSE contenuto; la portata massima è, come anticipato, sovrastimata del 59%, mentre i volumi cumulati sono sottostimati del 19%.

**LESMO – PEREGALLO**

La sezione di Lesmo – Peregallo è la penultima analizzata per questo processo di validazione per il metodo Green – Ampt.
Nello studio di questa sezione, è stato trascurato l'evento 4.

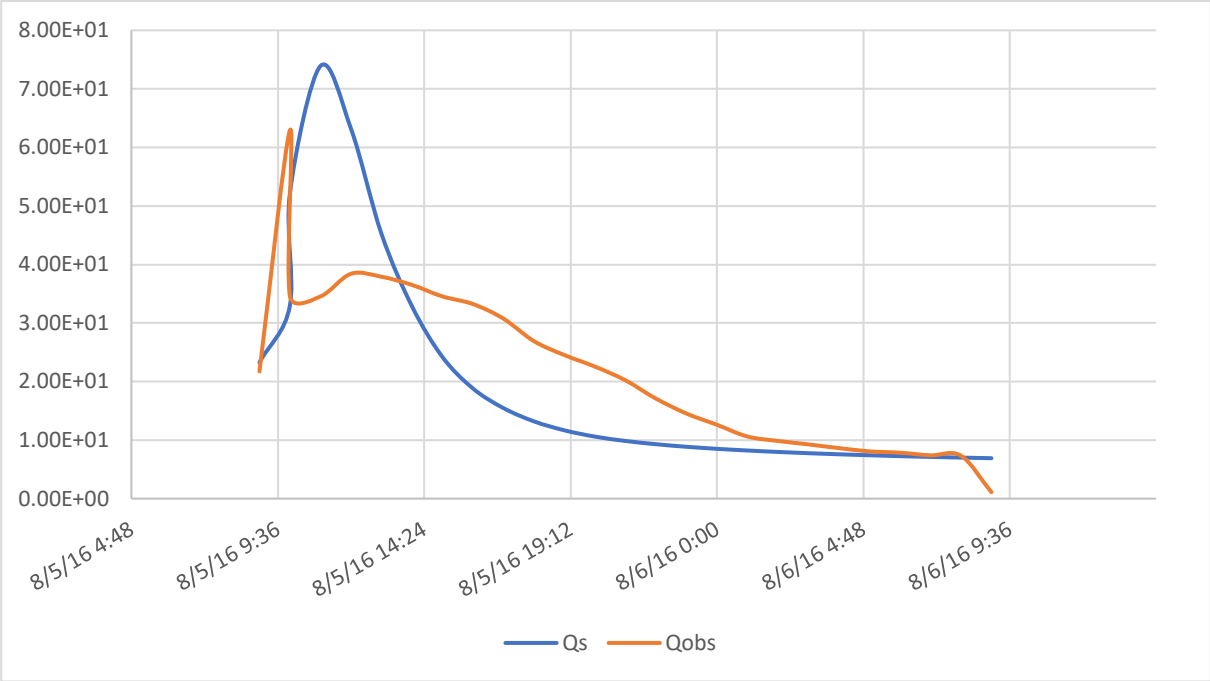


Figura 3-71 Lesmo - Peregallo: evento 1

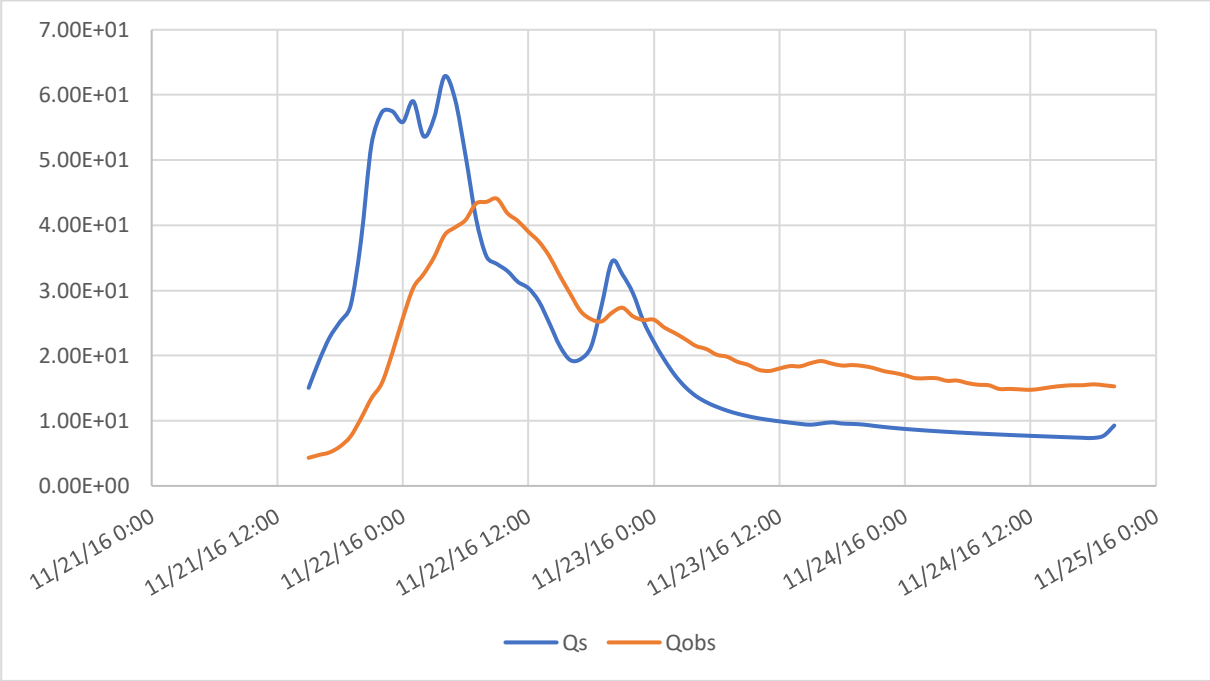


Figura 3-72 Lesmo - Peregallo: evento 2

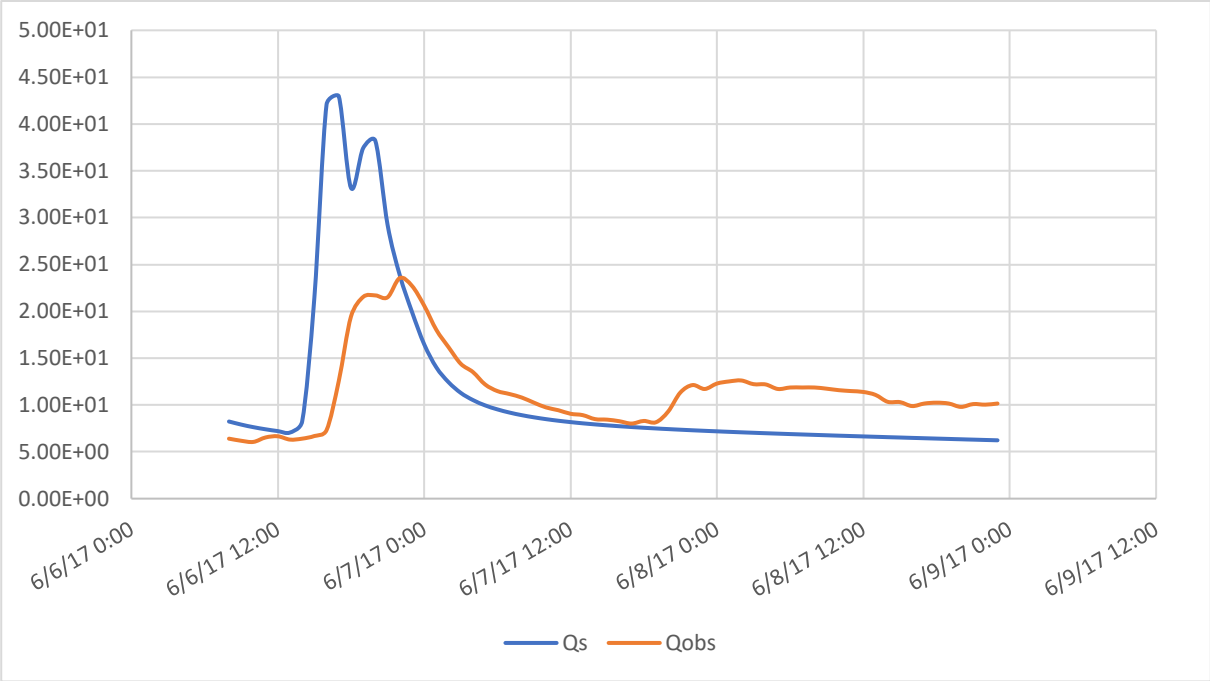


Figura 3-73 Lesmo - Peregallo: evento 3

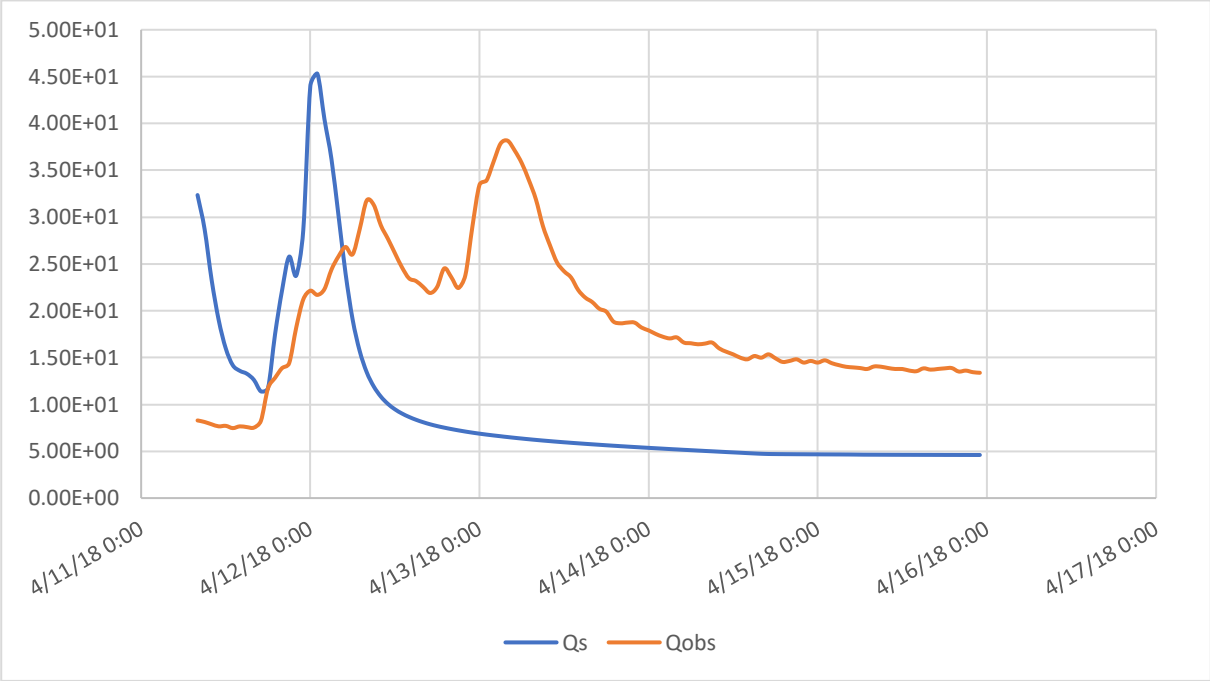


Figura 3-74 Lesmo - Peregallo: evento 5

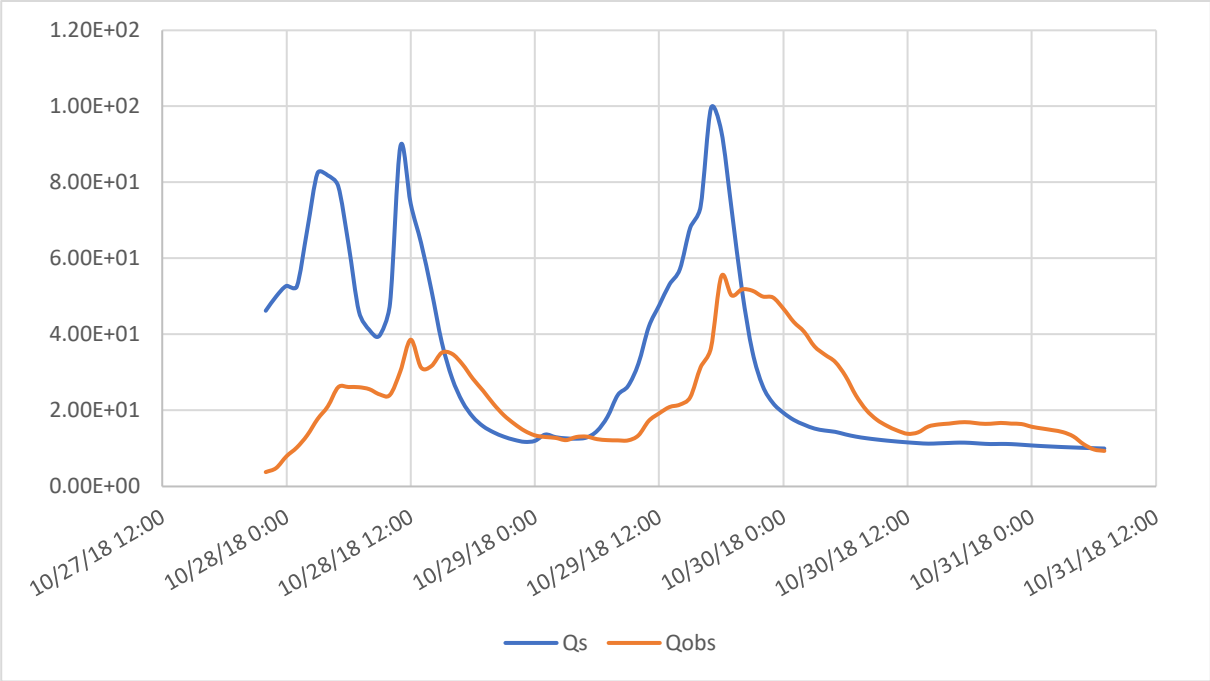


Figura 3-75 Lesmo - Peregallo: evento 6

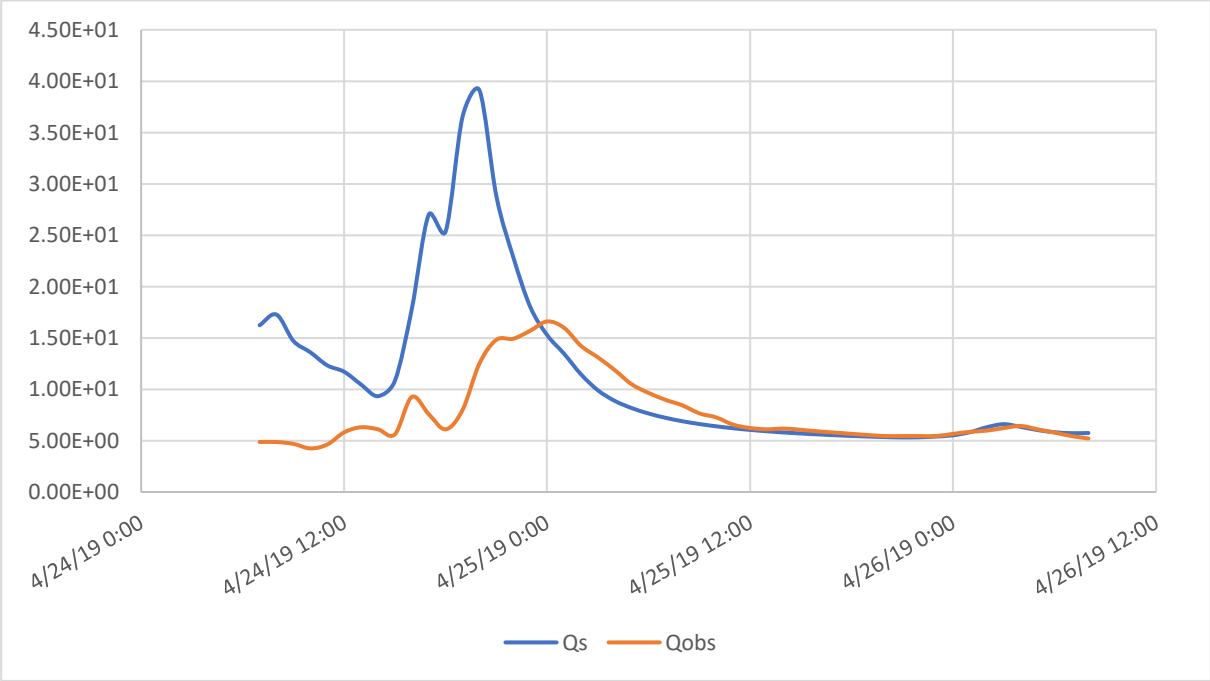


Figura 3-76 Lesmo - Peregallo: evento 7

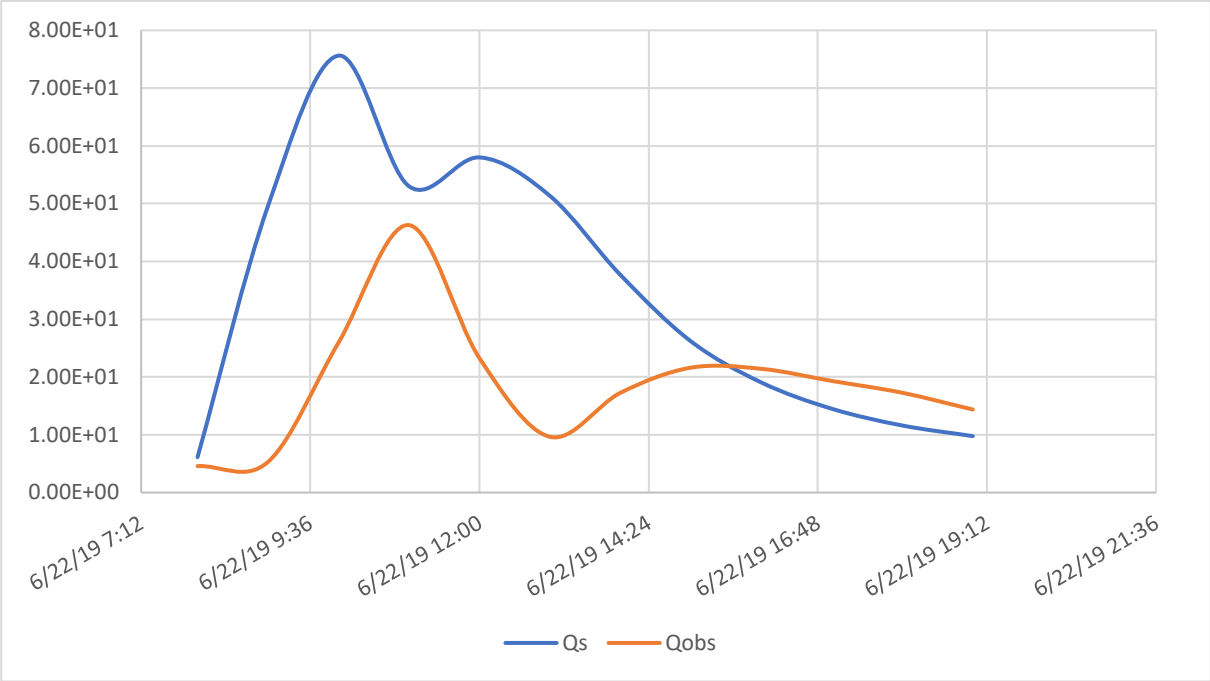


Figura 3-77 Lesmo - Peregallo: evento 8

Il picco, come nelle altre sezioni secondo il metodo Green – Ampt, anticipa l'idrogramma osservato e lo sovrastima.

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13.5165838 | 0.09814821 | 0.17443123 | -0.0909766 |
| 2 | 13.5217115 | -0.9793871 | 0.42640908 | -0.0295263 |
| 3 | 7.69660901 | -2.3136747 | 0.82467646 | -0.0230962 |
| 4 | | | | |
| 5 | 14.804334 | -0.5377216 | 0.18763863 | -0.4913634 |
| 6 | 24.8445212 | -1.9126808 | 0.80051792 | 0.35966517 |
| 7 | 8.10047016 | -1.7897358 | 1.35516776 | 0.44266772 |
| 8 | 25.7300687 | -0.8809588 | 0.63382488 | 0.82309224 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 15.4591855 | -1.1880015 | 0.62895228 | 0.14149466 |

Tabella 3-32 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo

Nella sezione di Lesmo – Peregallo si osserva un RMSE che è più alto rispetto alle precedenti e si attesta a 15.46; l'indice di Nash è notevolmente peggiorato rispetto ai casi precedenti ed il picco di portata è sovrastimato del 62.9%, mentre i volumi cumulati sono sovrastimati del 14.1%.

**MILANO – VIA FELTRE**

L'ultima sezione analizzata per GA è Milano – via Feltre, a valle del bacino di Seveso, Olona e Lambro.

Anche in questo caso, l'evento meteorologico che è stato scartato è il numero 4.

Figura 3-78 Milano - via Feltre: evento 1

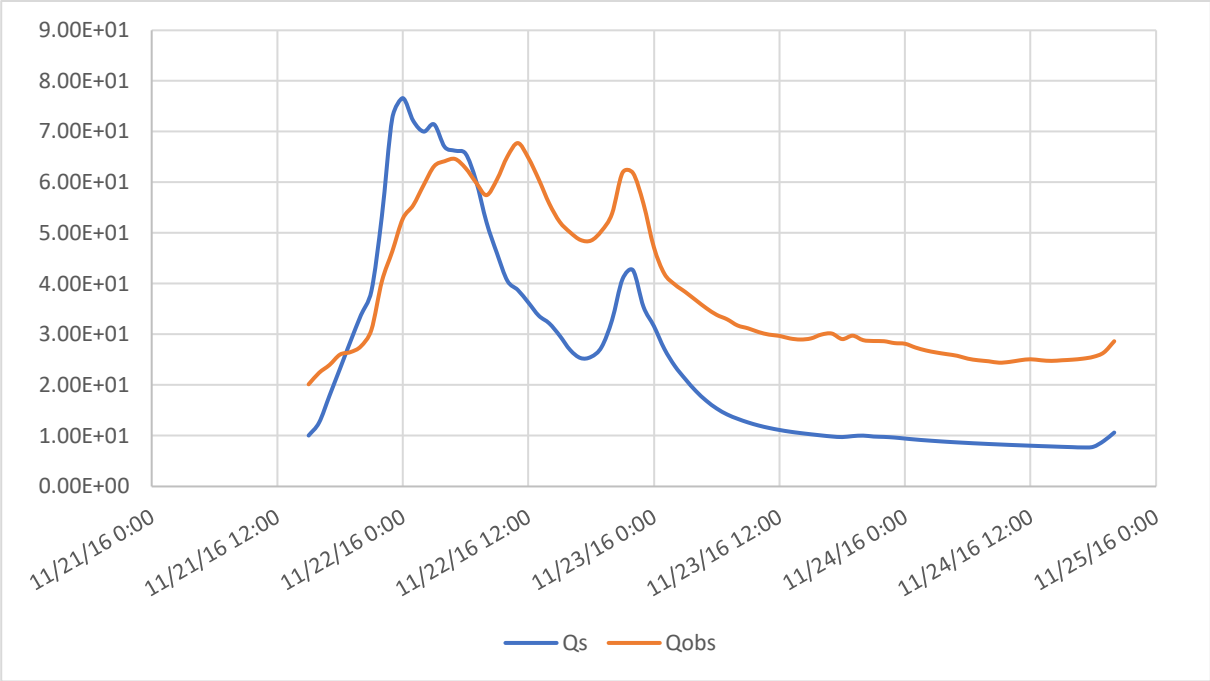


Figura 3-79 Milano - via Feltre: evento 2

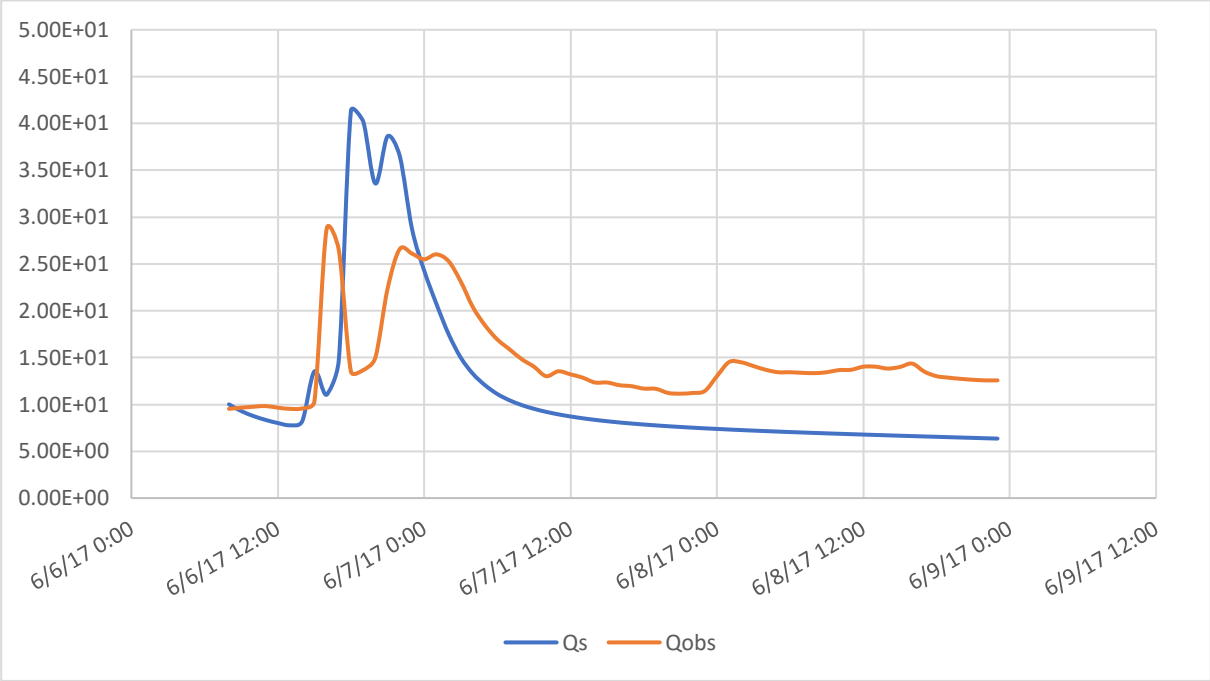


Figura 3-80 Milano - via Feltre: evento 3

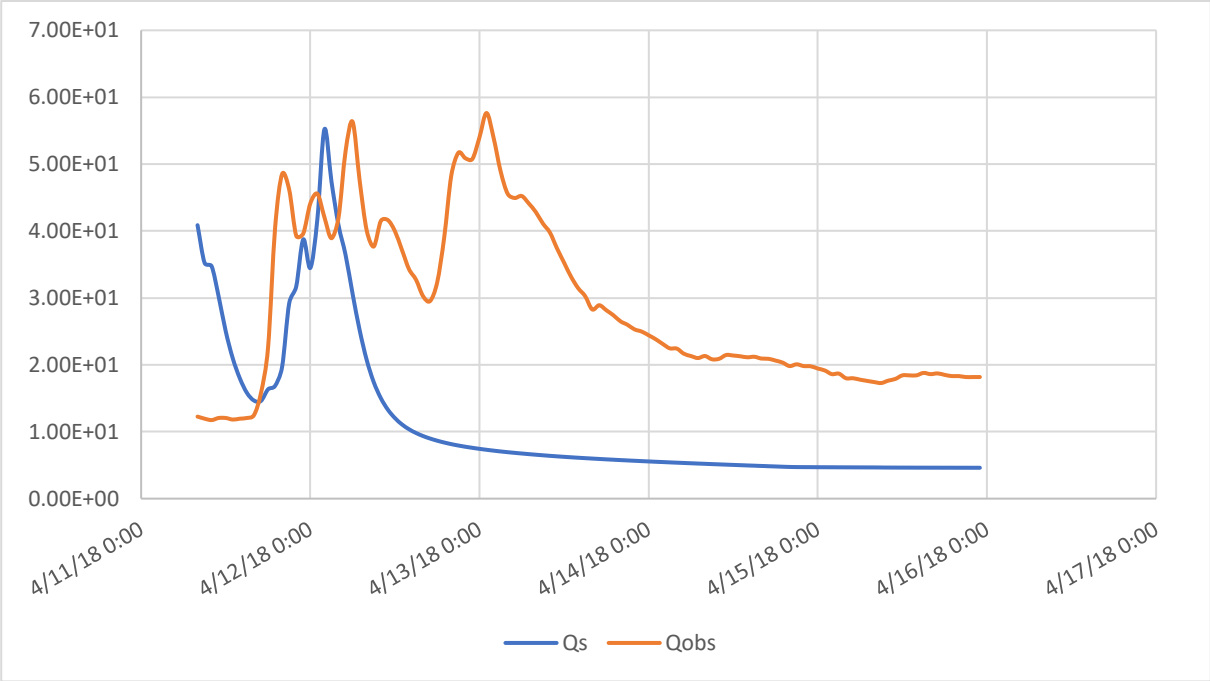


Figura 3-81 Milano - via Feltre: evento 5

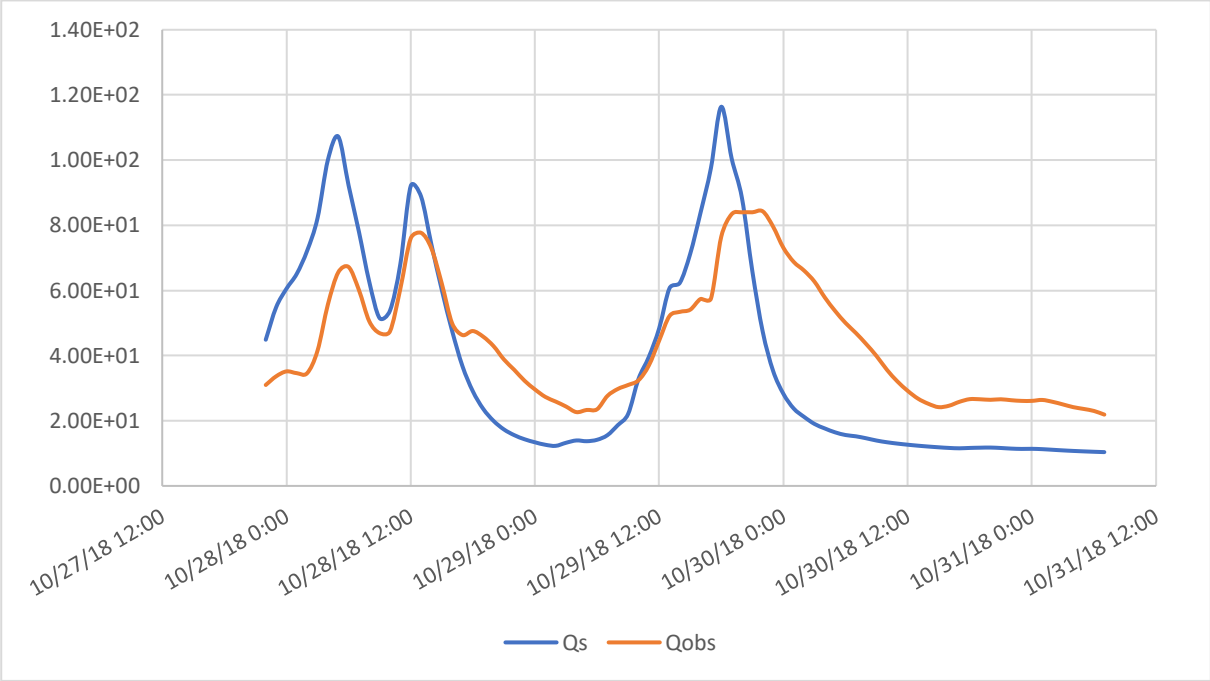


Figura 3-82 Milano - via Feltre: evento 6

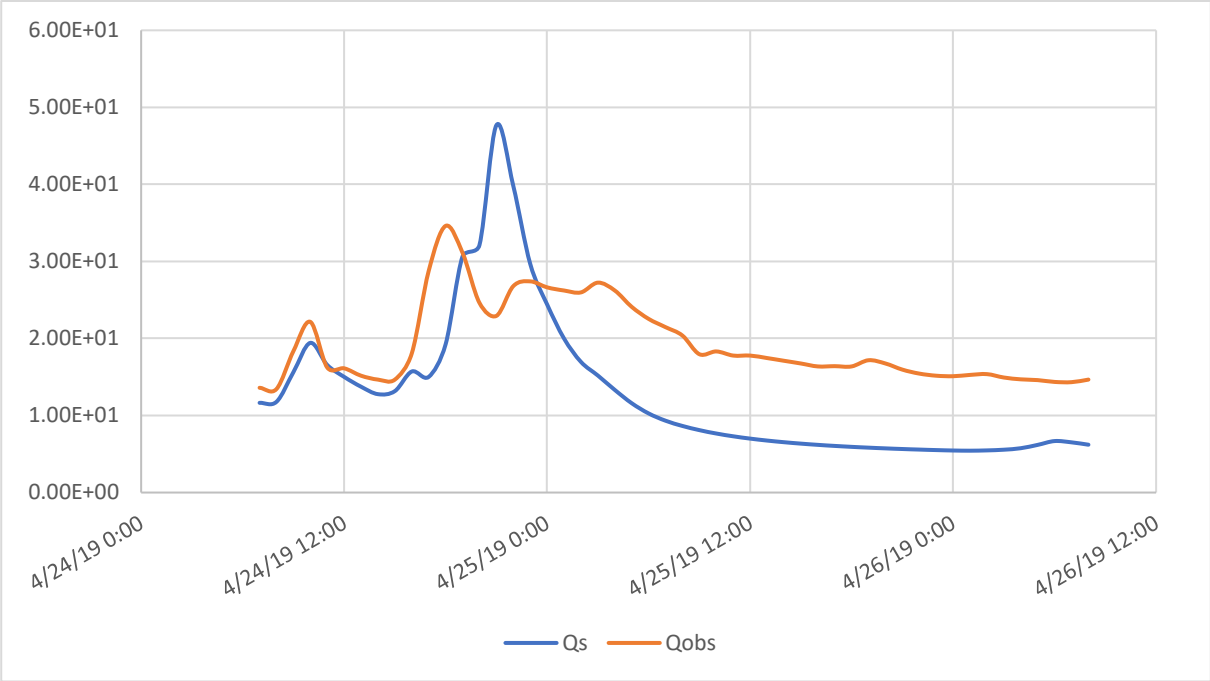


Figura 3-83 Milano - via Feltre: evento 7

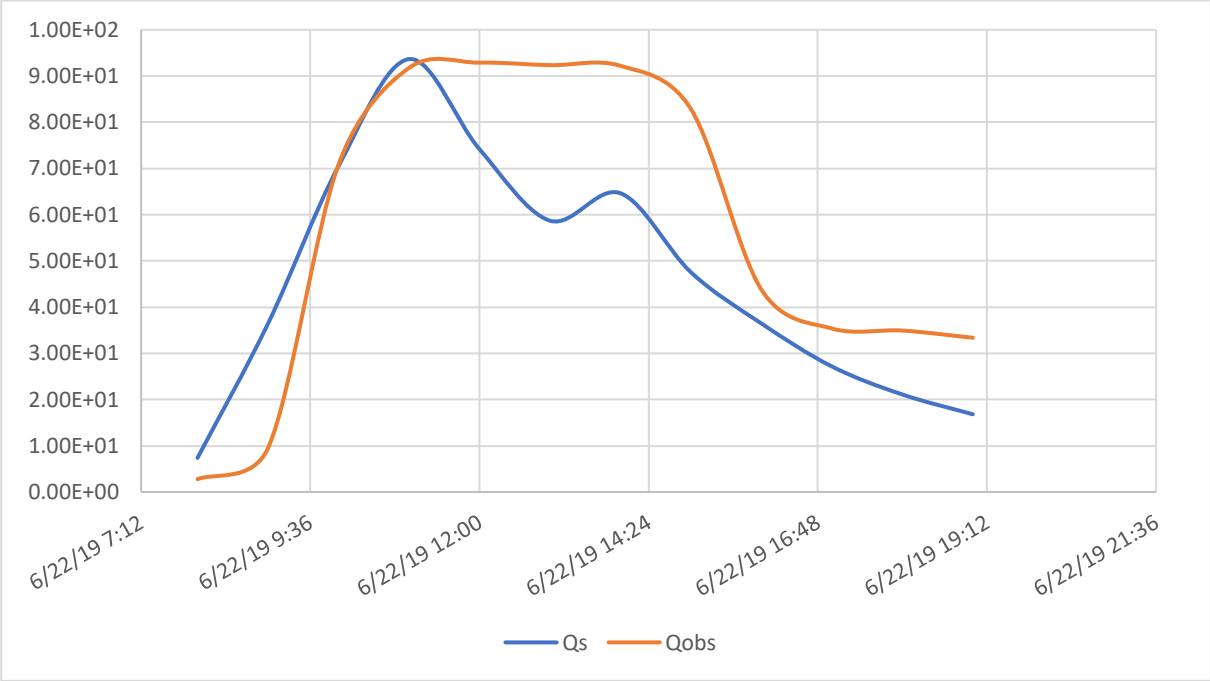


Figura 3-84 Milano - via Feltre: evento 8

In questa sezione, gli idrogrammi di portata sembrano approssimare in modo accurato l'istante in cui si verifica il picco di piena e, fatta eccezione per l'evento 5, sembra riprodurre la forma dell'idrogramma osservato.

Si riporta la tabella con gli indici per la valutazione

| evento | RMSE | NASH | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14.2390741 | 0.62270572 | -0.0438493 | -0.3320217 |
| 2 | 17.7716917 | 0.19659807 | 0.13092644 | -0.3541869 |
| 3 | 8.22494308 | -1.0201825 | 0.44086313 | -0.2163455 |
| 4 | - | - | - | - |
| 5 | 22.5188789 | -0.1121925 | -0.0422534 | -0.6031545 |
| 6 | 22.7557666 | -0.3433895 | 0.38068572 | -0.1467109 |
| 7 | 9.68465999 | -0.3390662 | 0.37736891 | -0.3384641 |
| 8 | 20.0567985 | 0.65752601 | 0.00829613 | -0.1875738 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| MEDIA | 16.4645447 | -0.0482858 | 0.17886253 | -0.3112082 |

Tabella 3-33 Errori stimati sezione Costa Masnaga – Lambrugo

Dall'analisi degli indici, si nota che RMSE è alto rispetto agli altri casi, l'indice di Nash è negativo; l'errore sul picco invece è contenuto, sovrastimato del 17.9%, mentre i volumi cumulati sono sottostimati del 31.1%.

Viene di seguito presentata una tabella riassuntiva dei valori medi degli indici di valutazione per il metodo Green - Ampt

| | RMSE | Nash | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| Bacino S-O-L | 10.5281921 | -0.8932803 | 0.3279437 | -0.3998523 |

Tabella 3-34 Media degli indici di valutazione del metodo GA per il bacino di Seveso - Olona – Lambro

L'indice di Nash per il metodo è negativo, mentre l'errore sul picco si attesta al 32.7%; l'errore sui volumi cumulati è del 40% circa, mentre rimane pressoché contenuto il valore di RMSE.

## 3.3 Confronto tra metodi

In questo paragrafo si presentano i risultati numerici ottenuti dalle varie analisi sulle simulazioni effettuate con il modello FEST-WB; in particolare, si valuta la qualità di ognuno dei metodi di infiltrazione presi in considerazione per poter stabilire quale, tra questi, interpola meglio i risultati osservati.

Per poter valutare i metodi, si confrontano gli indici medi stimati per le sezioni considerate, di seguito riportati

| | RMSE | Nash | Err[Qmax] | Err[V] |
|---|---|---|---|---|
| Metodo Curve Number | 9.22536247 | -0.2958511 | 0.1919409 | -0.4603219 |
| Metodo Green - Ampt | 10.5281921 | -0.8932803 | 0.3279437 | -0.3998523 |

Tabella 3-35 Confronto indici medi per la valutazione dei metodi utilizzati

Come promemoria, si ricorda il significato dei singoli indici.

RMSE, ovvero la radice dello scarto quadratico medio, rappresenta la bontà dell'interpolazione della forma dell'idrogramma; tanto più ridotto è il suo valore, quanto meglio è approssimata la forma dell'idrogramma.

L'indice di Nash, un altro stimatore della qualità di approssimazione della forma dell'idrogramma, afferma la bontà della stima, nel rispetto degli ordini di grandezza dell'evento, se compreso nel range $0 < Nash < 1$.

L'errore sul picco indica la qualità di approssimazione del valore massimo raggiunto dalla portata durante l'evento meteorologico; una buona stima del picco è caratterizzata da un errore tendente a zero.

L'errore sui volumi cumulati, per ultimo, è un indice medio sull'entità dei volumi interessati dall'evento.

Dai dati riportati nella tabella 3-35, si può osservare come il metodo SCS-CN sia il metodo che in modo migliore simula gli eventi verificatisi, avendo tutti gli indici più prossimi all'ottimo rispetto agli altri metodi.

Vengono ora riportate le tabelle di confronto per quanto riguarda l'istante in cui si verifica il picco di portata

| CN | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ritardo | -1.2 | -3.42857 | 0 | - | -11 | -1.85714 | -0.66667 | -1.2 |

Tabella 3-36 Media CN delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento

| GA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ritardo | -1 | -2.5 | -1 | - | -7.6 | -2.14285 | -2.2 | -1.66667 |

Tabella 3-37 Media GA delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento

Per quanto riguarda l'istante in cui si verifica il massimo della portata, si nota attraverso la media dei ritardi delle sezioni, che l'evento 3 e l'evento 7 sono i meglio approssimati dal metodo CN, mentre per il GA sono l'evento 1 e l'evento 3.

| CN | Lozza | Castellanza | Cantù | Caslino | Lambrugo | Lesmo | Milano |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ritardo | 0.16666667 | 1.8 | -1.6 | -2.6 | -5 | -6.8571429 | -2 |

Tabella 3-38 Media CN delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento

| GA | Lozza | Castellanza | Cantù | Caslino | Lambrugo | Lesmo | Milano |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ritardo | -0.5 | -2.6666667 | -1.3333333 | -2.2 | -2.4285714 | -6.1428571 | -1.5714286 |

Tabella 3-39 Media GA delle sezioni del ritardo dell'istante in cui si verifica il picco per ogni evento

Sempre parlando di tempo del picco, si nota dalle precedenti tabelle che la sezione più accurata per quanto riguarda il CN è Castiglione – Lozza, così come anche per il GA.

In media, valutando i metodi, si nota un anticipo nella previsione del picco della portata sia nel CN ($\Delta t$ = -2.76 [h]), sia nel GA ($\Delta t$ = -2.59 [h]).
I metodi si mostrano equivalenti, con un anticipo medio sulla previsione del verificarsi della portata di picco di 2 ore.

# 4 CONCLUSIONI

Il confronto tra i differenti modelli di infiltrazione presi in considerazione per l'analisi del bacino di Seveso - Olona – Lambro nell'ambito delle simulazioni con il modello idrologico distribuito FEST-WB conclude questo elaborato di tesi.
Si sono analizzati diversi indici che certificano la qualità delle varie simulazioni effettuate con ciascun metodo.
In media, si può osservare che tutti i metodi utilizzati ben approssimano gli eventi di piena che si verificano, con errori assoluti sul picco di portata che vanno dal 19% del Curve Number al 33% del Green – Ampt mentre, per quanto riguarda i tempi, tutti i metodi anticipano il picco di portata di poco più che due ore (mediamente).

Rispetto allo studio condotto da Sonvico nel 2016, si può notare come la tendenza all'anticipare il picco di portata sia mantenuta, con un aumento di un'ora dell'errore sul tempo di propagazione.
L'errore sul picco assoluto della portata invece si è ridotto dal 26% (CN) e dal 38% (GA) stimati da Sonvico nel 2016.

Si può quindi stabilire che, parlando in termini medi, il modello FEST-WB approssima in modo soddisfacente gli eventi di piena che si verificano nel bacino di Seveso – Olona – Lambro.

# BIBLIOGRAFIA


1. Ali S., Islam A., Mishra P., Sikka A., 2016. Green-Ampt approximations: A comprehensive analysis. Journal of Hydrology.
2. Autorità di Bacino del fiume Po. Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino del Lambro. Relazione tecnica.
3. Autorità di Bacino del fiume Po. Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi, Bacino dell'Olona. Relazione tecnica.
4. 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.
5. Chahinian N., Moussa R., Andrieux P., Voltz M., 2004. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. Journal of Hydrology.
6. Daeryong P., Momcilio M., 2014. Analysis of a changing hydrologic flood regime using the Variable Infiltration Capacity model. Journal of Hydrology.
7. Feki M, 2013-2016. Uncertainty reduction of soil moisture simulations based on combined improvement approach of model structure and parametrization.
8. Furnari S. Modello idrogeologico di un'area campione del territorio italiano in relazione ai dati raccolti con la L. 464/84.
9. 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.
10. Jamali B., Lowe R., Bach P. M., Ulrich C., Arnbjerg-Nielsem K., Deletic A., 2018. A rapid urban flood inundation and damage assessment model.
11. Jeon J., Park C., Engel B., 2014. Comparison of Performance between Genetic Algorithm and SCE-UA for calibration of SCS-CN Surface Runoff Simulation.
12. Jumadar A., Pathirana A., Gersonius B., Zevenbergen C., 2008. Incorpoating infiltration modelling in urban flood management. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
13. LegaAmbiente. L'Italia delle alluvioni. Gli impatti degli eventi estremi di pioggia nelle città italiane.
14. Lombardi G., 2016. La potenzialità di previsioni probabilistiche idro-meteorologiche sull'area urbana di Milano.
15. Kundu S., Khare D., Mondal A., 2017. Past, present and future land use changes and their impact on water balance.
16. 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.
17. Provincia di Milano. Sperimentazione di modelli progettuali-tipo per la riqualificazione fluviale: il caso del F. Olona a Nerviano. Dicembre 2008.
18. 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.

19. 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.
20. Ravazzani G., Gianoli P., Meucci S., Mancini M., 2014. Assessing downstream impacts of detention basins in urbanized river basins using a distribuited hydrological model.
21. Ravazzani G., Gianoli P., Meucci S., Mancini M., 2012. Indirect Estimation of Design Flood in Urbanized River Basins Using a Distribuited Hydrological Model.
22. Reggiani P., Todini E., Meibner D., 2016. On mass and momentum conservation in the variable- parameter Muskingum method. Journal of Hydrology.
23. Rojas R., Zambrano M., 2012. Tutorial for interfacing hydroPSO with SWAT-2005 and MODFLOW-2005.
24. 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.
25. Sonvico D., 2016. Verifica di diversi modelli di infiltrazione nella modellistica idrologica a scala di bacino in bacini prealpini e semiaridi
26. Wright O. M., Istanbulluoglu E., Horner R. R., De Gasperi C. L., Simmonds J., 2018. Evaluation of stormwater bioretention treatment using a lumped urban ecohydrologic model and ecologically based design criteria