

Sommario

INTRODUZIONE	3
1 I MODELLI DI PREVISIONE DELLE PIENE DEL CENTRO FUNZIONALE DELLA REGIONE UMBRIA ..5	
1.1 Il Centro Funzionale della Regione Umbria	5
1.2 Descrizione dei modelli utilizzati	13
1.2.1 Il modello STAFOM-RCM.....	15
1.2.1.1 STAFOM	16
1.2.1.2 Il modello RCM (RATING CURVE MODEL).....	18
1.2.1.3 Il modello STAFOM-RCM	21
1.2.1.4 Il codice di calcolo di STAFOM-RCM	23
1.2.1.5 Applicazione del modello STAFOM-RCM presso il CFD.....	25
1.2.1.6 Calibrazione e validazione del modello STAFOM-RCM	26
1.2.2 Il sistema modellistico MISDc	30
1.2.2.1 MModello di Bilancio Idrologico del Suolo (MOBIS)	31
1.2.2.1.1 Il codice di calcolo di MOBIS	32
1.2.2.2 Modello Idrologico Semi-Distribuito (MISD)	35
1.2.2.2.1 Il codice di calcolo di MISD.....	38
1.2.2.3 Applicazione del modello MISDc presso il CFD	41
1.2.2.4 Calibrazione e validazione del modello MISDc.....	41
1.2.3 Modelli HEC-HMS ed HEC-RAS.....	46
1.2.3.1 Il modello HEC-HMS.....	46
1.2.3.1.1 Applicazione del modello HEC-HMS presso il CFD.....	49
1.2.3.1.2 Calibrazione del modello HEC-HMS	51
1.2.3.2 Il modello HEC-RAS	56
1.2.3.2.1 Applicazione del modello HEC-RAS presso il CFD	60
1.2.3.2.2 Calibrazione del modello HEC-RAS.....	60
1.3 Considerazioni finali.....	62
2 PICCO IDROMETRICO – PREVISIONI DEI MODELLI E VALUTAZIONE DELLE LORO PERFORMANCE	63
2.1 L’analisi di accuratezza.....	64
2.2 L’analisi degli eventi passati.....	69
2.3 La valutazione dell’accuratezza	72
2.3.1 Picchi di livello idrometrico osservati e previsti dai modelli	74
2.3.2 Previsioni dei modelli all’istante di raggiungimento del picco osservato	80
2.3.3 La verifica del tempo di previsione	86
2.3.4 Conclusioni emerse dall’analisi di accuratezza delle previsioni	90

2.4	La valutazione del valore	91
2.4.1	Picchi di livello idrometrico osservati e previsti dai modelli	92
2.4.2	Previsioni dei modelli all'istante di raggiungimento del picco osservato	98
2.5	Conclusioni emerse dalle analisi	98
3	RAGGIUNGIMENTO DELLA SOGLIA IDROMETRICA DI PRE-ALLARME – PREVISIONI DEI MODELLI E VALUTAZIONE DELLE LORO PERFORMANCE.....	100
3.1	L'analisi di accuratezza e il valore delle previsioni	100
3.2	La valutazione dell'accuratezza	102
3.3	La verifica del tempo di previsione	106
3.4	La valutazione del valore	110
3.5	Conclusioni emerse dalle analisi	114
	CONCLUSIONI.....	115
	Appendice A – Codice di calcolo di STAFOM-RCM	121
	Appendice B – Codice di calcolo di MOBIS	123
	Appendice C – Codice di calcolo di MISD.....	125
	Appendice D – Grafici livello idrometrico osservato e previsto	128
	Appendice E – Grafici degli errori di previsione dei modelli all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato	136
	BIBLIOGRAFIA.....	138

INTRODUZIONE

Nel presente lavoro di tesi vengono valutate le performance di alcuni dei modelli idrologici/idraulici in uso presso il Centro Funzionale Decentrato (CFD) della Regione Umbria per la previsione delle piene in tempo reale e per la conseguente messa in atto delle misure necessarie alla mitigazione delle conseguenze in caso di evento alluvionale. La valutazione delle performance permette di fornire delle direttive per un futuro miglioramento dei modelli e per l'ottimizzazione del loro uso nella forma attuale. Un miglioramento dei modelli può condurre a delle previsioni più accurate mentre, un'ottimizzazione del loro uso, può permettere di distinguere i risultati affidabili da quelli che non lo sono.

I modelli considerati nel presente studio sono:

- ❖ il modello idrologico di trasferimento dell'onda di piena STAFOM-RCM;
- ❖ il modello idrologico afflussi-deflussi in continuo MISDc;
- ❖ il modello idrologico HEC-HMS accoppiato al modello idraulico HEC-RAS.

I risultati dei modelli alla sezione idrometrica di interesse derivano da un loro utilizzo in tempo differito, che permette di riprodurre gli idrogrammi di eventi di piena occorsi in passato di cui si conosce l'idrogramma reale. Tramite un confronto tra i risultati dei modelli e quanto realmente avvenuto si possono quindi valutare le performance degli stessi.

Si ritiene particolarmente interessante analizzare le previsioni dei modelli relativamente al picco idrometrico, da cui si deducono i danni massimi che l'evento di piena potrebbe provocare, ed in merito al raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme. Infatti, quest'ultimo coincide con l'avvio della fase operativa nella gestione delle emergenze derivanti dall'innalzamento del livello idrico e quindi, una buona previsione del tempo in cui si verificherà, dà la possibilità di pianificare con un certo anticipo le operazioni da svolgere. Per ora il CFD umbro gestisce le emergenze basandosi principalmente sull'osservato ma, la disponibilità di una modellistica di previsione affidabile, potrebbe anticipare la gestione dell'emergenza e quindi aumentarne l'efficacia.

Nel dettaglio, per ogni evento di piena riprodotto, vengono analizzati:

- ❖ l'intero idrogramma simulato (v. capitolo 2);
- ❖ i picchi idrometrici previsti dai modelli (v. capitolo 2);
- ❖ i livelli idrometrici forniti dai modelli all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato (v. capitolo 2);
- ❖ i tempi di previsione dei picchi idrometrici (v. capitolo 2);

- ❖ i livelli idrometrici previsti all'istante di raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme (v. capitolo 3);
- ❖ i tempi di previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme (v. capitolo 3).

In breve il presente studio ha dimostrato che per fare in modo che il CFD umbro disponga di modelli di previsione delle piene attendibili, che rappresentino quindi uno strumento efficace per la gestione del rischio idraulico, è necessario provvedere ad una ricalibrazione dei modelli oggetto dello studio. Per quanto riguarda invece l'uso degli stessi nella forma attuale, verranno fornite delle direttive che possono permettere di quantificare l'incertezza legata ai risultati dei modelli.

1 I MODELLI DI PREVISIONE DELLE PIENE DEL CENTRO FUNZIONALE DELLA REGIONE UMBRIA

Durante il lavoro di tesi, si è provveduto alla valutazione delle performance di alcuni dei modelli idrologici/idraulici di previsione degli eventi alluvionali in uso presso il Centro Funzionale Decentrato della Regione Umbria (CFD), ai fini di prevedere, in tempo reale, l'evoluzione degli eventi di piena che interessano la regione. Essi sono:

- ❖ il modello idrologico di trasferimento dell'onda di piena STAFOM-RCM;
- ❖ il modello idrologico afflussi-deflussi in continuo MISDc;
- ❖ il modello idrologico HEC-HMS accoppiato al modello idraulico HEC-RAS.

L'obiettivo del primo capitolo del presente lavoro è quello di:

- ❖ presentare le attività svolte dal CFD (paragrafo 1.1);
- ❖ illustrare le caratteristiche della sezione idrometrica di interesse (paragrafo 1.2);
- ❖ descrivere le basi matematiche ed il codice di calcolo dei modelli idrologici/idraulici utilizzati nello studio (paragrafi 1.2.1-1.2.1.4 per STAFOM, paragrafi 1.2.2-1.2.2.2.1 per MISDc, paragrafo 1.2.3.1 per HEC-HMS, paragrafo 1.2.3.2 per HEC-RAS);
- ❖ spiegare brevemente come vengono utilizzati attualmente tali modelli presso il CFD (paragrafo 1.2.1.5 per STAFOM, paragrafo 1.2.2.3 per MISDc, paragrafo 1.2.3.1.1 per HEC-HMS, paragrafo 1.2.3.2.1 per HEC-RAS);
- ❖ esporre le calibrazioni e le eventuali validazioni che sono state effettuate sui modelli utilizzati, al fine di pervenire alla versione degli stessi adoperata nel presente studio (paragrafo 1.2.1.6 per STAFOM, paragrafo 1.2.2.4 per MISDc, paragrafo 1.2.3.1.2 per HEC-HMS, , paragrafo 1.2.3.2.2 per HEC-RAS);
- ❖ accennare all'analisi svolta sui risultati forniti dai modelli, che verrà presentata nei capitoli successivi (paragrafo 1.3).

1.1 Il Centro Funzionale della Regione Umbria

In Italia, la gestione del sistema di allerta nazionale per il rischio idrogeologico ed idraulico è assicurata dal Dipartimento della Protezione Civile e dalle Regioni attraverso la rete dei Centri Funzionali, nonché dalle strutture regionali e dai Centri di Competenza chiamati a concorrere funzionalmente ed operativamente a tale rete (Direttiva P.C.M. 27 febbraio 2004). Il Centro Funzionale Decentrato (CFD) della Regione Umbria, costituito nel 2006 e formalmente attivo dal

12 febbraio 2010, attraverso le attività di monitoraggio e previsione degli eventi meteorologici critici e dei conseguenti effetti sul territorio, fornisce un supporto continuo (24 ore su 24/7 giorni su 7) alle decisioni delle autorità competenti per le allerte e per la gestione dell'emergenza, nonché a tutti i soggetti coinvolti.

In particolare, i compiti istituzionali del CFD possono essere così sintetizzati:

- ❖ Acquisizione dei dati meteo-idropluviometrici e successiva elaborazione modellistica;
- ❖ Gestione della rete radar regionale;
- ❖ Trasmissione dei dati ai Centri Funzionali Decentrati presso le Regioni e al Centro Funzionale Centrale presso il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, mediante apposito Sistema di Scambio Informativo predisposto per il funzionamento dei sistemi di comunicazione e per la cura dell'interscambio dei dati;
- ❖ Attività a supporto della Protezione Civile;
- ❖ Concentrazione ed integrazione dei:
 - ❖ dati qualitativi e quantitativi rilevati dalle reti meteo-idropluviometriche, dalla rete radarmeteorologica nazionale e regionale, dalle diverse piattaforme satellitari disponibili per l'osservazione della terra;
 - ❖ dati territoriali idrologici, geologici, geomorfologici e quelli derivanti dai sistemi di monitoraggio delle frane;
- ❖ Modellazioni meteorologiche, idrologiche, idrogeologiche ed idrauliche finalizzate all'elaborazione di scenari di rischio;
- ❖ Elaborazione di bollettini meteorologici finalizzati all'elaborazione di scenari di rischio;
- ❖ Attività di previsione, di valutazione, di monitoraggio e sorveglianza in ordine agli scenari di rischio probabili e ai livelli di criticità raggiungibili, in relazione alle diverse tipologie di rischio;
- ❖ Attività connesse alla definizione e all'aggiornamento delle zone di allertamento del territorio regionale e del relativo sistema di soglie di allarme pluviometrico e idrometrico;
- ❖ Svolgimento delle seguenti ulteriori attività:
 - ❖ Elaborazione ed emissione dell' "Avviso di criticità";
 - ❖ Espletamento delle attività connesse alle fasi dell'emergenza, inerenti la raccolta dati di tipo idrometeorologico e previsione meteorologica, finalizzata alla gestione della fase stessa, garantendo per il periodo di allertamento, e qualora necessario, un'attività H24;

- ❖ Espletamento delle necessarie attività di interlocuzione operativa con il Centro Funzionale Centrale presso il Dipartimento di Protezione Civile e con il Servizio regionale di Protezione Civile.

Nel complesso, l'attività del CFD rappresenta un collegamento tra le attività relative al "tempo reale" tipiche della Protezione Civile e quelle del "tempo differito" di pianificazione e gestione del territorio. A tale scopo, compito di un CFD è quello di far confluire, concentrare ed integrare tra loro sia i dati tempo-varianti (dati provenienti dalla rete di monitoraggio operante in tempo reale, previsioni meteorologiche qualitative e quantitative, previsioni dei modelli idrologici-idraulici, ...) che quelli quasi-statici (dati cartografici, modellazioni meteorologiche, idrologiche, idrogeologiche ed idrauliche, piani di assetto idrogeologico-idraulico, ...).

Per adempiere i suoi compiti il CFD si è dotato, secondo la normativa vigente, di un sistema di allerta basato su soglie idrometriche e pluviometriche e su procedure dettagliate per la gestione degli eventi critici, che ben definiscono i ruoli dei soggetti e delle autorità coinvolte (D.G.R. 2312/2007).

Tipicamente, i sistemi di previsione e gestione delle piene fluviali in tempo reale constano di alcune componenti fondamentali:

1. una rete di monitoraggio idrometeorologico funzionante in telemisura per l'acquisizione dei dati in tempo reale;
2. una modellistica di previsione che impiega come dati di ingresso le misure fornite dalla rete di monitoraggio;
3. un sistema di identificazione dei differenti livelli di pericolo (soglie di allerta) e di disseminazione delle informazioni alle autorità preposte e competenti per la messa in essere delle attività e delle operazioni di protezione civile previste nel Piano di Emergenza.

Per quanto riguarda il primo punto, nell'Alta-Media Valle del F. Tevere è operante da oltre venti anni una rete di monitoraggio idrometeorologico in tempo reale (v. figura 1.1) costituita da oltre 120 stazioni (1 stazione ogni 65 Km²): 72 idrometri, 88 pluviometri, 76 stazioni meteorologiche, 12 ripetitori radio e 1 radar meteorologico (rete radar nazionale del Dipartimento di Protezione Civile).

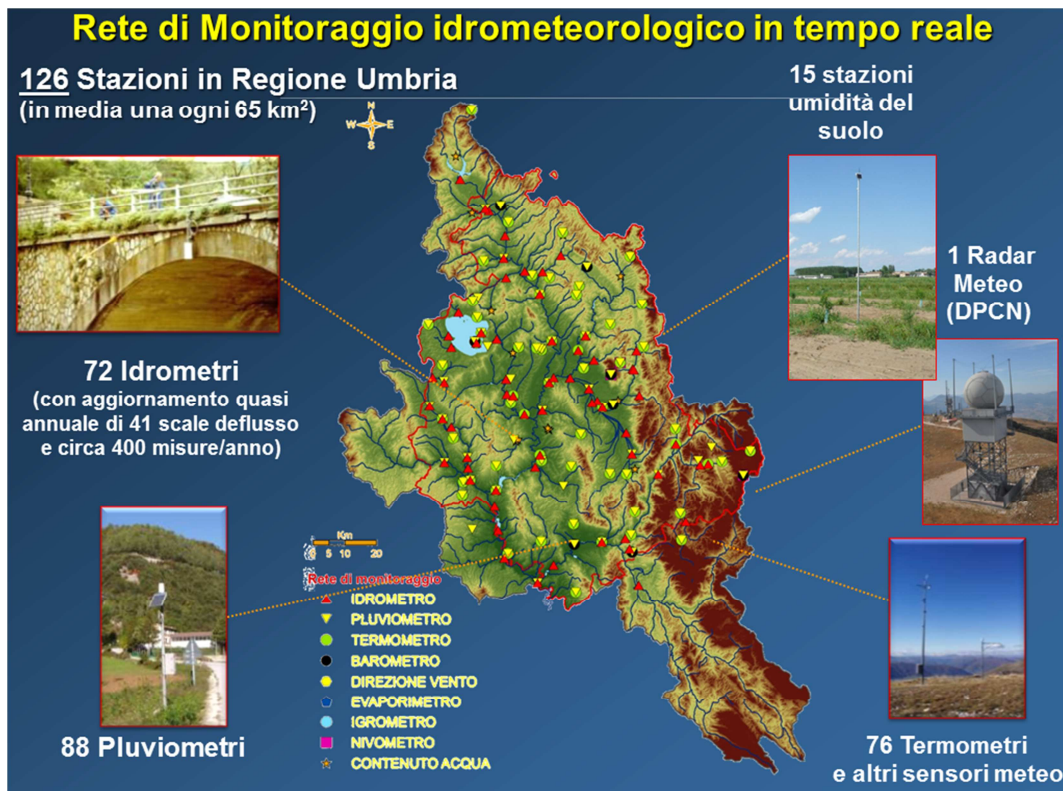


Figura 1.1 Rete di monitoraggio idrometeorologico in tempo reale. La Regione Umbria è evidenziata con un contorno rosso.

Per quanto concerne la componente di modellazione, possono essere impiegati approcci più o meno complessi che, pertanto, risultano caratterizzati da un diverso grado di parametrizzazione e da una diversa mole di dati necessari per la simulazione della risposta futura del bacino e/o del corso d'acqua. In particolare, l'applicazione di modelli afflussi-deflussi fisicamente basati e distribuiti è caratterizzata da problematiche legate all'elevato numero di parametri, che inevitabilmente comporta un elevato grado di incertezza, e alla descrizione della risoluzione spaziale dei principali processi fisici rappresentati. Pertanto, le modellistiche tipicamente impiegate sono di tipo concettuale e semi-distribuito. Presso il CFD della Regione Umbria sono operativi diversi modelli idrologici, sia a scala d'evento che in continuo, ed idraulici, per la previsione delle piene. Alcuni di essi sono di tipo commerciale ed altri sono stati sviluppati in collaborazione con Università e Centri di Ricerca. Tali modelli di simulazione incorporano parametri e variabili di stato, sulla base dei dati in ingresso (ad esempio piogge e temperature o livelli idrometrici), misurati o previsti, e delle condizioni iniziali (ad esempio il contenuto d'acqua). Essi forniscono quindi, al tempo corrente, una stima di prima approssimazione delle variabili di uscita previste (ad esempio portate o livelli) per successivi istanti temporali fino a un tempo in avanti L , denominato intervallo di preannuncio ("Lead Time"). È importante sottolineare che, per adempiere gli scopi del CFD, i modelli utilizzati sono stati calibrati per prevedere in modo accurato

il picco di portata. Essi vengono utilizzati per elaborare previsioni in tempo reale, cioè nel corso dell'evento di piena, utilizzando come input gli ultimi dati provenienti dalla rete di monitoraggio, oppure in tempo differito, cioè quando l'evento di piena è terminato, usando come dati di input quelli registrati dalla rete di monitoraggio durante l'evento di piena stesso. La previsione in tempo reale ha lo scopo, come già detto, di fornire un supporto continuo alle autorità competenti per la gestione delle emergenze. L'utilizzo in tempo differito ha invece l'obiettivo di valutare le performance dei modelli, considerando la differenza tra la previsione del modello e l'osservato, e quindi di pervenire ad una loro eventuale ricalibrazione. Anticipiamo che, l'attività svolta nel presente lavoro di tesi, è basata sull'utilizzo dei modelli idrologici/idraulici ex-post, cioè utilizzando i dati di input di eventi di piena avvenuti in passato, per ottimizzare l'uso degli stessi in tempo reale.

Infine, per quanto riguarda il terzo punto, il sistema di allerta del CFD della Regione Umbria, ai fini della previsione delle piene e delle frane, ha individuato:

- ❖ Zone di Allerta;
- ❖ Soglie Idrometriche per il rischio idraulico, che assumono valori diversi nelle varie sezioni idrometriche strumentate dei corsi d'acqua principali e secondari della Regione;
- ❖ Soglie Pluviometriche per il rischio idraulico (pluviometriche areali), i cui valori sono definiti per ogni Zona d'Allerta
- ❖ Soglie Pluviometriche per il rischio idrogeologico (pluviometriche puntuali), definite per tutti i pluviometri che si trovano nella Regione.

Per quanto riguarda le Zone di Allerta, il territorio umbro è stato suddiviso in 6 zone, definite considerando la morfologia dei bacini ed in base a criteri di omogeneità pluviometrica, di seguito elencate:

- ❖ Zona di Allerta "Umbr-A": Alto Tevere;
- ❖ Zona di Allerta "Umbr-B": Medio Tevere;
- ❖ Zona di Allerta "Umbr-C": Chiascio – Topino;
- ❖ Zona di Allerta "Umbr-D": Nera – Corno;
- ❖ Zona di Allerta "Umbr-E": Trasimeno – Nestore;
- ❖ Zona di Allerta "Umbr-F": Chiani – Paqlia.

La figura 1.2 mostra le suddette Zone:



Figura 1.2 Zone di Allerta della Regione Umbria

Quanto alle soglie Idrometriche, è stata sviluppata una procedura semplificata per l'individuazione di quattro differenti livelli di soglia (inizialmente per bacini di estensione superiore ai 400 km²), che variano da una sezione idrometrica all'altra:

- *Soglia d'Attenzione*: valore associabile ad una situazione di criticità ordinaria utile per la fase iniziale di attivazione delle procedure di emergenza ed assunto pari al valore corrispondente a un tempo di ritorno pari a 1 anno;
- *Soglia di Pre-Allarme*: valore che corrisponde ad una situazione di criticità moderata e consente di avere a disposizione almeno 1 ora di anticipo prima del raggiungimento del successivo livello di pericolosità. Sottolineiamo che, già in situazione di pre-allarme, se necessario, si costituiscono le strutture di comando e controllo a vari livelli, nelle quali si riuniscono i responsabili delle funzioni di supporto necessarie a gestire l'emergenza e i rappresentanti degli enti e delle strutture operative interessate dall'evento.
- *Soglia d'Allarme*: valore che corrisponde ad una situazione di elevata criticità (effettivo pericolo) che richiede di intraprendere azioni di Protezione Civile, ovviamente qualora le precipitazioni continuino incessanti all'interno del medesimo bacino idrografico in cui si trova il sensore in allarme, cioè qualora si osservi che le piogge causano l'ulteriore innalzamento del livello

idrometrico. Tale livello consente di avere a disposizione circa 3 ore di anticipo prima dell'esondazione vera e propria;

- *Soglia di Esondazione*: valore che corrisponde ad una fuoriuscita di portata liquida a monte o a valle del sensore.

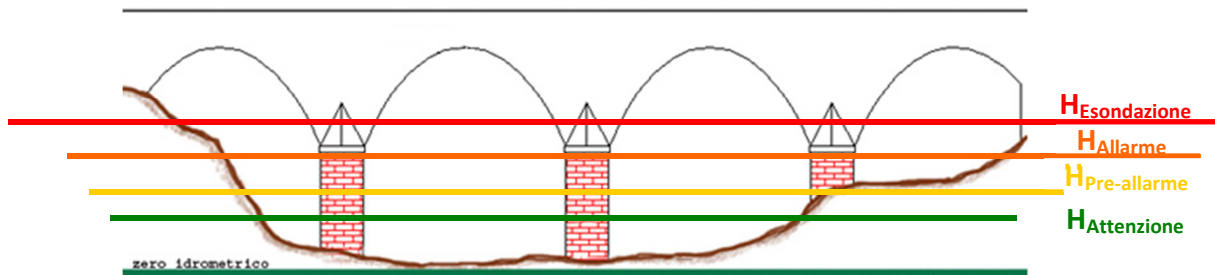


Figura 1.3 Visualizzazione schematica delle Soglie Idrometriche.

La soglia di esondazione viene determinata in funzione del livello idrometrico che rappresenta la situazione in cui il tratto fluviale, a monte o a valle del sensore, inizia a non essere più in grado di convogliare la portata liquida. Le altre soglie sopra nominate vengono stabilite, a partire dal valore di quest'ultima, conoscendo la massima velocità di crescita caratteristica dell'onda di piena (incremento in termini di tirante Δh in un prefissato intervallo di tempo Δt). In particolare tale velocità è stata calcolata, per ogni sezione idrometrica di interesse, valutando, per le principali piene storiche occorse, il massimo incremento di tirante Δh osservato in corrispondenza di un generico intervallo temporale Δt , sfruttando i dati idrometrici semiorari a disposizione.

Infine, i valori delle Soglie Pluviometriche puntuali ed areali, sono stati determinati associando a tre livelli di criticità (ordinaria, moderata ed elevata) tre differenti valori del tempo di ritorno (2, 5 e 10 anni) e stimati mediante le procedure di regionalizzazione delle piogge definite nell'ambito del progetto VAPI sulla Valutazione delle Piene in Italia sviluppato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) per il Compartimento Bologna-Pisa-Roma (CNR-GNDCI, 2000).

Le soglie così individuate, sia idrauliche che pluviometriche, necessitano di una verifica e di un aggiornamento continuo, in funzione di nuovi dati acquisiti e del progredire delle conoscenze tecniche. Tale attività, come già detto, è compito primario del CFD.

Le attività del CFD di previsione e monitoraggio di un evento estremo, basate sulle soglie sopra descritte, sono organizzate in tre fasi:

1. Previsione dell'evento;
2. Evento;

3. Post Evento.

In Figura 1.4 si mostra il grafico delle procedure adottate per le fasi di Previsione (Pre-Evento) e Evento.

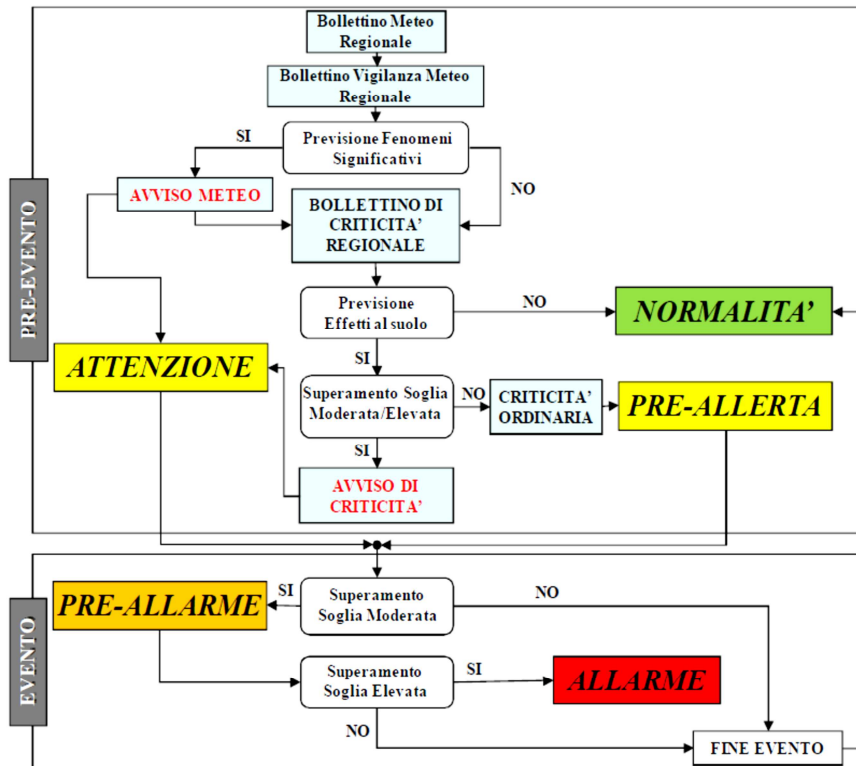


Figura 1.4 Procedure adottate dal CFD nelle fasi di Previsione dell'Evento (Pre-Evento) ed Evento.

Il periodo di Previsione dell'evento è suddiviso in 3 stati d'allerta in funzione della previsione quantitativa delle precipitazioni e dei relativi effetti al suolo: Normalità (se non sono previsti effetti al suolo), Pre-Allerta (se sono previsti effetti al suolo di ordinaria entità), Attenzione (se sono previsti effetti al suolo di moderata o elevata entità). Durante queste fasi è garantito un servizio di controllo e monitoraggio 9 ore al giorno durante l'orario d'ufficio e 24 ore su 24 tramite controlli da remoto mediante un reperibile.

Durante l'Evento se vengono superate le soglie di moderata o elevata criticità si attiva, rispettivamente, lo stato di Pre-Allarme e Allarme in cui il CFD si attiva H24. Infine, durante la fase Post Evento il CFD garantisce supporto fino alla fine delle condizioni critiche.

A ogni fase corrisponde l'emanazione e l'eventuale adozione di bollettini e avvisi, nonché una precisa suddivisione dei compiti di ciascun soggetto e autorità coinvolti.

Il CFD della Regione Umbria, in collaborazione con il CFD della Regione Toscana, ha implementato una piattaforma web completamente "open source", www.cfumbria.it, per lo scambio dei dati e delle informazioni in tempo reale con tutte le amministrazioni e i soggetti coinvolti (con differenti

livelli d'accesso) e per la pubblicazione di previsioni metereologiche qualitative e quantitative, di Bollettini/Avvisi Meteo e di Criticità, di immagini Meteosat di seconda generazione, di mappe delle fulminazioni, di mappe meteo-radar, di dati provenienti dalla rete di monitoraggio idro-meteorologico operante in tempo reale, di previsioni dei modelli idrologici ed idraulici, di report d'evento, ecc...

1.2 Descrizione dei modelli utilizzati

Nel presente studio sono stati considerati tre differenti modelli idrologici/idraulici tra quelli in uso presso il CFD della Regione Umbria:

- ❖ il modello idrologico di trasferimento dell'onda di piena STAFOM-RCM;
- ❖ il modello idrologico afflussi-deflussi in continuo MISDc;
- ❖ il modello idrologico HEC-HMS accoppiato con il modello idraulico HEC-RAS.

Essi sono stati usati ex-post, come precedentemente specificato, e sono stati considerati i risultati, in termini di livello idrometrico previsto, alla sezione di Ponte Felcino del Fiume Tevere.

Tale sezione è stata scelta perché la zona di P. Felcino, sin dal passato, è stata frequentemente soggetta ad allagamenti. La portata di esondazione a P. Felcino risulta pari a circa 650 m³/s ed è caratterizzata da un tempo di ritorno compreso tra 5 e 10 anni. Presentiamo di seguito alcune caratteristiche del bacino idrografico sotteso dalla sezione di interesse.

La sezione idrometrica di Ponte Felcino sottende un bacino idrografico di estensione pari a circa 1800 km² (v. figura 1.4), quota media pari a 521 m s.l.m. e un dislivello di 1225 m rispetto alla sezione di chiusura. Il bacino selezionato è caratterizzato da una topografia complessa che può influenzare in modo significativo la formazione di sistemi frontali che possono causare fenomeni di piena consistenti. Il bacino di interesse è caratterizzato da facies terrigene e depositi flyschoidi che consistono essenzialmente di argilloscisti e sedimenti marnoso-argillosi; la maggior parte della superficie del bacino è costituita da aree boschive (57%), la restante parte da aree ad uso agricolo (37%) e da pascolo (6%). La zona presenta un clima mediterraneo con una precipitazione media annua di circa 900 mm e una temperatura media annua di 11 °C.



Figura 1.5 Area di studio: caratteristiche geomorfologiche e rete di monitoraggio idrometeorologico.

Di seguito si riporta un'immagine del F. Tevere in piena a P. Felcino (figura 1.6) e una che mostra l'idrometro ad ultrasuoni presente nella sezione (figura 1.7):



Figura 1.6 Evento di piena del gennaio 2010 alla sezione di P. Felcino del F. Tevere



Figura 1.7 Sezione idrometrica di P. Felcino del F. Tevere

È necessario specificare che, nel funzionamento in tempo reale, i tempi di previsione a Ponte Felcino sono di:

- ❖ 4 ore per il modello STAFOM,
- ❖ circa 8 ore per il modello MISDc,
- ❖ circa 8 ore per i modelli HEC-HMS ed HEC-RAS accoppiati.

Si specifica che, tali tempi di previsione, corrispondono al tempo medio di trasferimento dell'onda di piena tra S. Lucia e P. Felcino per STAFOM, come verrà spiegato in seguito, ed al tempo di corrivazione a P. Felcino per MISDc e per i modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS.

Di seguito vengono presentati i tre modelli idrologici/idraulici oggetto del presente studio, viene sinteticamente descritta l'applicazione attuale dei modelli presso il CFD ed infine viene esposta la calibrazione effettuata sugli stessi al fine di pervenire alla scelta dei parametri in ingresso.

1.2.1 Il modello STAFOM-RCM

Il modello di previsione STAFOM-RCM è il risultato dell'accoppiamento del modello STAFOM con una procedura di correzione basata sul modello RCM (Rating Curve Model).

1.2.1.1 STAFOM

STAFOM (STAge FOrecasting Model) è un modello idrologico di trasferimento dell'onda di piena lungo l'asta fluviale sviluppato dal CNR-IRPI (Consiglio Nazionale della Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica) di Perugia e utilizzato come strumento operativo nell'ambito del sistema di monitoraggio, previsione e allertamento in tempo reale degli eventi di piena del CFD umbro.

La formulazione di STAFOM si ottiene dal modello Muskingum scritto per un tratto fluviale delimitato da due stazioni idrometriche con significativi afflussi laterali (Barbetta et al., 2008a; 2008b). Specificatamente, il livello previsto nella sezione di valle al tempo t_f e per un orizzonte temporale Δt^* , $h_d(t_f + \Delta t^*)$, è dato da:

$$h_d(t_f + \Delta t^*) = \left\{ (1/\lambda) \left[C_1^* (Q_u(t_f) + q(t_f)L + \varepsilon L) + C_2^* \lambda h_d^\delta(t_f) \right] \right\}^{1/\delta} \quad (1.1)$$

dove L è la lunghezza del tratto, C_1^* e $C_2^* = 1 - C_1^*$ sono i parametri di Muskingum relativi all'intervallo di previsione Δt^* ; Q_u è la portata nella sezione di monte ricavata conoscendo la relazione livello-portata per la sezione di monte, λ e δ sono i parametri della scala di deflusso di tipo cinematico per la sezione di valle, $q(t_f)$ è l'afflusso laterale per unità di lunghezza del canale, dipendente dall'area bagnata nota nelle due sezioni che delimitano il tratto, calcolato con la seguente relazione:

$$Q_l(t_f) = q(t_f)L = \frac{A_d(t_f) - A_u(t_f - \Delta t^*)}{\Delta t^*} L \quad (1.2)$$

dove A_d e A_u sono rispettivamente le aree bagnate a valle e a monte del tratto considerato.

La conoscenza accurata della geometria delle sezioni e delle singolarità eventualmente presenti consente di calcolare per ciascun valore del livello idrometrico l'area bagnata effettiva da utilizzare nell'equazione (1.2). L'afflusso laterale è supposto essere affetto da un errore di tipo additivo, ε .

L'equazione (1.1) si ottiene, dopo aver esplicitato h_d , considerando una relazione cinematica del tipo $Q = \lambda h^\delta$, dalla formula:

$$Q_d(t_f + \Delta t^*) = C_1^* Q_u(t_f) + C_1^* [q(t_f) + \varepsilon] L + C_2^* Q_d(t_f) \quad (1.3)$$

dove Q_d è ovviamente la portata nella sezione di valle.

L'applicazione del modello necessita della stima dei parametri λ , δ , C_1^* ed ε . Assumendo che la scala di deflusso nella sezione di monte sia sufficientemente accurata, la maggiore incertezza nella previsione dei livelli è dovuta alla stima del termine legato agli afflussi laterale. L'errore, rappresentato dal parametro ε , viene stimato in tempo reale mediante una procedura di

aggiornamento che fa uso delle informazioni derivanti dagli ultimi dati acquisiti dalla rete di monitoraggio idrometrico funzionante on-line. In particolare, ad ogni istante di previsione, t_f , ε è stimato imponendo che l'afflusso laterale, $Q_l(t_f)$, sia dato dalla differenza tra il valore di portata osservato nella sezione di valle, $Q_{d_oss}(t_f)$, e quello previsto dal modello all'istante $(t_f - \Delta t^*)$, sempre noti conoscendo la relazione livello-portata per la sezione di valle e quindi λ e δ . Pertanto, dalla (1.3) si ottiene:

$$\varepsilon(t_f) = \frac{(Q_{d_oss}(t_f) - C_1^* Q_u(t_f - \Delta t^*) - C_2^* Q_d(t_f - \Delta t^*))}{(C_1^* L)} - q \quad (1.4)$$

dove q si riferisce a $q(t_f)$ o $q(t_f - \Delta t^*)$ a seconda che per l'evento di piena sia predominante, rispettivamente, il contributo di monte o quello laterale. La necessità di diversificare l'approccio per la stima di q in funzione delle caratteristiche dell'evento è dovuta all'esigenza di non sottostimare significativamente il contributo laterale durante la fase di risalita dell'idrogramma quando Q_l risulta predominante rispetto al contributo di monte. La selezione della formulazione del modello, denominata formulazione 1 o 2 quando viene utilizzato rispettivamente $q(t_f)$ o $q(t_f - \Delta t^*)$, si basa sulle misure di livello acquisite in tempo reale che consentono di valutare il peso del contributo dell'interbacino.

Gli altri parametri da definire sono λ , δ e C_1^* . I parametri della scala di deflusso, λ e δ , sono facilmente determinabili quando è nota la relazione funzionale livello-portata per la sezione di valle, cosa che tipicamente avviene per sezioni storiche o di particolare rilevanza per finalità di monitoraggio e gestione del rischio idraulico. La disponibilità sia di numerose ed accurate misure di portata che di rilievi topografici di dettaglio delle sezioni eseguiti nel corso degli anni di attività delle stazioni di misura consente infatti di disporre di affidabili espressioni delle relazioni funzionali livello-portata. λ e δ vengono calcolati trovando la curva $Q = \lambda h^\delta$ che meglio interpola la scala di deflusso.

Nel caso in cui non si disponga dell'espressione della scala di deflusso, la relazione livello-portata viene stimata attraverso il modello Rating Curve Model (RCM) proposto da Moramarco et al. (2005) che tiene anche conto del contributo degli afflussi laterali. In particolare, tale approccio consente di stimare la portata defluente in una sezione fluviale sede di registrazioni di livello a partire dalla conoscenza delle portate transitanti in un altro sito idrometrico situato anche a considerevoli distanze lungo l'asta fluviale. L'applicazione del metodo RCM consente quindi di stimare una relazione funzionale livello-portata in una sezione di interesse dove, ad esempio, non è possibile eseguire misure correntometriche a partire dalle sole registrazioni di livello e dai dati di

portata relativi ad una sezione remota. Tale procedura permette, quindi, in caso di necessità di stimare a priori il valore dei parametri λ e δ per una sezione di interesse in modo da impiegarli per la previsione dei livelli nella sezione stessa.

Il valore di C_1^* dipende esclusivamente da quello dei coefficienti di Muskingum K ed x . Considerando che K rappresenta nella classica formulazione di Muskingum il tempo medio di propagazione dell'onda lungo il tratto fluviale, T_L , esso può essere stimato attraverso eventi di piena osservati. Per ogni evento si stima T_L come lo sfasamento necessario per sovrapporre il ramo di risalita e la regione di colmo dei due idrogrammi di livello (quello a monte e quello a valle del tratto) resi adimensionali e si assume K pari alla media dei valori di T_L così calcolati individuando una caratteristica media del tratto in esame e, quindi, l'ampiezza dell'intervallo di previsione, Δt^* . L'assunzione $\Delta t^* = K$ determina un valore di $x=0.5$, che rientra nel tipico intervallo di valori di tale parametro (Chow et al., 1988). Conseguentemente, C_1^* e C_2^* risultano pari rispettivamente a 1 e 0.

Dopo aver descritto il modello STAFOM viene di seguito spiegato il metodo di correzione introdotto.

1.2.1.2 Il modello RCM (RATING CURVE MODEL)

Il metodo RCM (Rating Curve Model), è stato sviluppato da Moramarco e Singh (2001). Esso si basa sull'ipotesi che per qualsivoglia condizione di flusso esiste una relazione di proporzionalità diretta tra la velocità media stimata nelle due sezioni fluviali che delimitano a monte e a valle il tratto investigato. Tale ipotesi ha consentito di sviluppare la semplice equazione alla base del modello RCM che permette di relazionare livelli locali e portate remote lungo un tratto di canale senza la necessità di ricorrere a una procedura di trasferimento dell'onda di piena. Si consideri un tratto fluviale di lunghezza L delimitato da due sezioni dove sono monitorati i livelli, mentre le portate sono note solo nella sezione di monte (v. figura 1.8). La portata nella sezione di valle può essere espressa come (Moramarco & Singh, 2001):

$$Q_D(t) = \alpha \frac{A_D(t)}{A_U(t-T_L)} Q_U(t - T_L) + \beta \quad (1.5)$$

dove i pedici D e U sono riferiti alle sezioni di valle e di monte, rispettivamente. Q è la portata; A rappresenta l'area di flusso; t è il tempo; T_L è il tempo di trasferimento dell'onda di piena; α e β sono i parametri del modello.

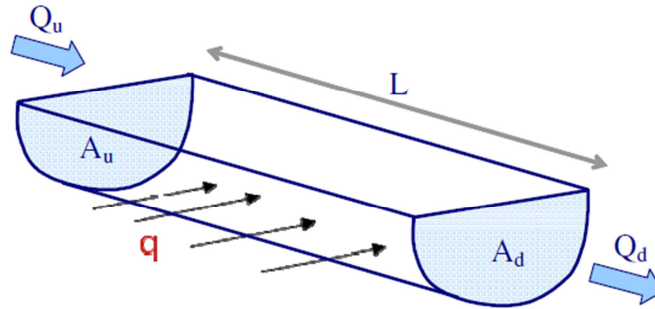


Figura 1.8 Schematizzazione di un tratto fluviale delimitato da due sezioni fluviali strumentate (L = lunghezza del tratto; Q_u e Q_d = portata defluente nella sezione di monte e di valle; A_u e A_d = area bagnata nella sezione di monte e di valle; q = afflusso laterale per unità di lunghezza del canale)

Per un dato livello idrometrico, l'area di flusso viene determinata mediante il rilievo topografico della sezione e tenendo conto della presenza di eventuali singolarità. Infatti, queste ultime possono determinare la formazione di zone di accumulo e ristagno dell'acqua con conseguente riduzione della porzione di sezione trasversale che contribuisce attivamente al deflusso della corrente (USACE, 1995, 2001). La stima di T_L si basa sull'analisi dello sfasamento tra il ramo di risalita e la regione di picco dei due idrogrammi di livello resi adimensionali.

Per quanto concerne la stima dei parametri del modello, α e β , vengono considerate le condizioni di deflusso di base e portata al colmo per le quali la (1.5) diventa (Moramarco et al., 2005):

$$Q_D(t_b) = \alpha \frac{A_D(t_b)}{A_U(t_b - T_L)} Q_U(t_b - T_L) + \beta \quad (1.6)$$

$$Q_D(t_p) = \alpha \frac{A_D(t_p)}{A_U(t_p - T_L)} Q_U(t_p - T_L) + \beta$$

dove t_p e t_b rappresentano l'istante in cui la portata di picco, $Q_D(t_p)$, e il deflusso di base, $Q_D(t_b)$, transitano nella sezione di valle. In particolare t_b è l'istante immediatamente precedente il ramo di risalita. I parametri α e β vengono stimati dalle equazioni (1.6) noti i valori delle portate $Q_D(t_b)$ e $Q_D(t_p)$.

Il deflusso di base, $Q_D(t_b)$, può essere facilmente calcolato nella sezione di valle quando questa è sede di misure correntometriche eseguite solo per bassi livelli idrometrici. Nel caso di assenza totale di osservazioni strumentali della velocità e nell'ipotesi di afflussi laterali trascurabili, il valore della portata di base può essere assunto ragionevolmente pari a quello osservato nella sezione di monte (Moramarco & Singh, 2001). Nel caso di afflussi laterali consistenti, la velocità media osservata nella sezione di monte all'istante $t_b - T_L$ viene assunta costante per l'intero tratto. Questa ipotesi può generare errori non trascurabili nella stima del deflusso di base che, tuttavia, è stato

dimostrato non influenzano in maniera significativa la simulazione dell'idrogramma delle portate di valle per le elevate altezze idrometriche (Moramarco et al., 2005).

La portata di picco nella sezione di valle viene calcolata come somma del contributo degli afflussi laterali, $q_p L$, nell'intervallo $(t_p - T_L, t_p)$ e quello della portata di monte $Q_U(t_p - T_L)$ attenuata per il processo di trasferimento lungo il tratto di interesse. Pertanto, per $Q_D(t_p)$ si ha:

$$Q_D(t_p) = (Q_U(t_p - T_L) - Q^*) + q_p L \quad (1.7)$$

La stima dell'attenuazione della portata di monte, Q^* , è data dalla formula di Prince (1973):

$$Q^* = \frac{K}{(L/T_L)^3} Q_U(t'_p) \left| \frac{Q_1 + Q_{-1} - 2Q_U(t'_p)}{\Delta t^2} \right| \quad (1.8)$$

dove $K = L/2BS_0$ è il parametro di attenuazione del picco, S_0 è la pendenza media del fondo alveo e B è la larghezza media del canale. $Q_U(t'_p)$ rappresenta la portata al colmo nella sezione di monte.

Q_1 e Q_{-1} sono rispettivamente le portate di monte all'istante $(t'_p - \Delta t)$ e $(t'_p + \Delta t)$; Δt è pari alla quinta parte del tempo al picco dell'idrogramma in ingresso (Raudkivi, 1979).

Per stimare l'entità degli afflussi laterali viene utilizzata la relazione (1.2). Sottolineiamo che essa è ottenuta mediante l'equazione di continuità espressa nella forma caratteristica (Moramarco et al., 2005):

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = q \\ \frac{dx}{dt} = \frac{L}{T_L} \end{cases} \quad (1.9)$$

Pertanto, la stima del contributo laterale per unità di lunghezza del canale per l'applicazione del modello RCM è condotta con la medesima procedura considerata nella formulazione del modello di previsione dei livelli STAFOM (Barbetta et al., 2008).

Uno degli aspetti più importanti da sottolineare consiste nel fatto che l'equazione (1.5) identifica una relazione di tipo lineare tra la portata defluente nella sezione di valle, Q_D , e una quantità, indicata con X , che dipende solamente dalle aree bagnate nelle due sezioni, dalla portata che defluisce nella sezione di monte e dal tempo di trasferimento dell'onda di piena:

$$Q_D(t) = \alpha \frac{A_D(t)}{A_U(t - T_L)} Q_U(t - T_L) + \beta = \alpha X + \beta \quad (1.10)$$

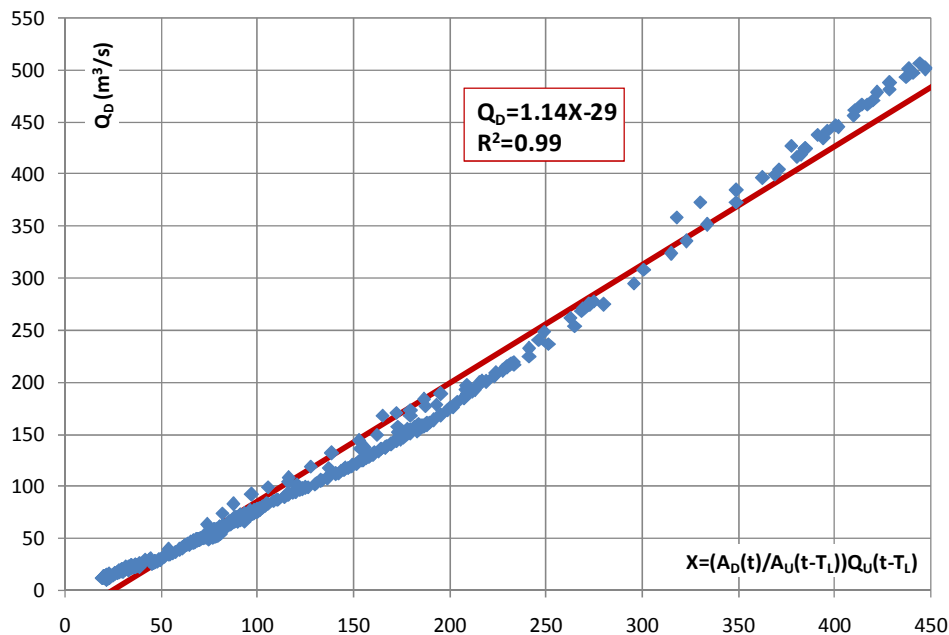


Figura 1.9 Relazione lineare tra la portata nella sezione di valle, Q_{Dv} , e la quantità X calcolata per il tratto fluviale Santa Lucia – Ponte Felcino per il periodo di sperimentazione oggetto di analisi.

Pertanto, i parametri del modello RCM (α , β) individuano nel piano (X, Q_D) la relazione lineare caratteristica del tratto e del periodo considerato; in particolare, α rappresenta la pendenza della retta, mentre β ne identifica l'intercetta (v. figura 1.9). L'aspetto più significativo consiste nel fatto che per ciascun evento di piena associato all'effettivo valore del tempo di trasferimento, T_L , è possibile considerare il valore dei parametri così individuato a patto che per il periodo in esame si possono assumere condizioni geometrico-idrauliche sostanzialmente costanti. La conoscenza della relazione lineare caratteristica è estremamente significativa e fornisce un'informazione robusta; infatti, a parità di condizioni idrauliche e di caratteristiche geometriche-morfologiche del tratto, tutti gli eventi di piena che hanno luogo lungo il canale devono necessariamente muoversi nel piano (X, Q_D) lungo la retta caratteristica (Tayfur et al. 2009). Tale vincolo costituisce un'indicazione estremamente preziosa che può essere convenientemente utilizzata per correggere in corso d'evento e ad ogni istante di previsione il livello fornito dall'applicazione del modello STAFOM secondo la procedura descritta di seguito.

1.2.1.3 Il modello STAFOM-RCM

Come già detto, STAFOM è stato accoppiato con una procedura di correzione che si basa sulla relazione alla base del modello RCM e sulla conoscenza del valore caratteristico dei parametri α e β , stimato durante una fase di analisi preliminare che considera tutti gli eventi osservati nel tratto e nel periodo di interesse.

In particolare, l'accoppiamento dei due modelli descritti ha consentito di correggere ad ogni passo temporale di previsione, cioè ogni 30 minuti, il livello previsto da STAFOM mediante l'informazione derivata dall'applicazione dell'approccio semplificato RCM. Nel dettaglio, la procedura consiste nei seguenti passi fondamentali, sinteticamente mostrati nello schema di figura 1.10:

1. ad ogni istante di previsione, t_f , l'applicazione di STAFOM consente di stimare il valore futuro di livello nella sezione di valle, $h_D(t_f + \Delta t^*)$, mediante l'equazione (1.1);
2. noto il livello previsto nella sezione di valle all'istante $(t_f + \Delta t^*)$, è possibile calcolare il corrispondente valore di area bagnata, $A_D(t_f + \Delta t^*)$, dalla relazione funzionale livello-area di flusso dedotta a partire dalla conoscenza della geometria della sezione;
3. la quantità X può essere agevolmente calcolata dipendendo da grandezze osservate nella sezione di monte ($A_U(t_f)$, $Q_U(t_f)$) e dalla quantità determinata al passo 2, $A_D(t_f + \Delta t^*)$, oltre che dal tempo di trasferimento che per le elaborazioni in tempo reale è assunto pari all'orizzonte di previsione, Δt^* :

$$X = \frac{A_D(t_f + \Delta t^*)}{A_U(t_f)} Q_U(t_f) \quad (1.11)$$

4. nota la relazione lineare per il tratto nel piano (X, Q_D) , ossia i valori dei parametri α e β , si verifica la posizione del punto identificato dalla previsione fornita da STAFOM rispetto alla retta caratteristica. In particolare, l'ascissa del punto è il valore di X calcolato al passo 3, mentre il valore della portata prevista a valle è derivata dal livello fornito dal modello STAFOM, $h_D(t_f + \Delta t^*)$, applicando semplicemente la scala di deflusso nota per la sezione in valle;
5. se il punto identificato al passo 4 non si trova sulla retta caratteristica (v. figura 1.11) si corregge il valore di Q_D in modo da sovrapporlo alla relazione lineare. A questo punto, il nuovo livello previsto, $\hat{h}_D(t_f + \Delta t^*)$, può essere stimato a partire dalla conoscenza della scala di deflusso.

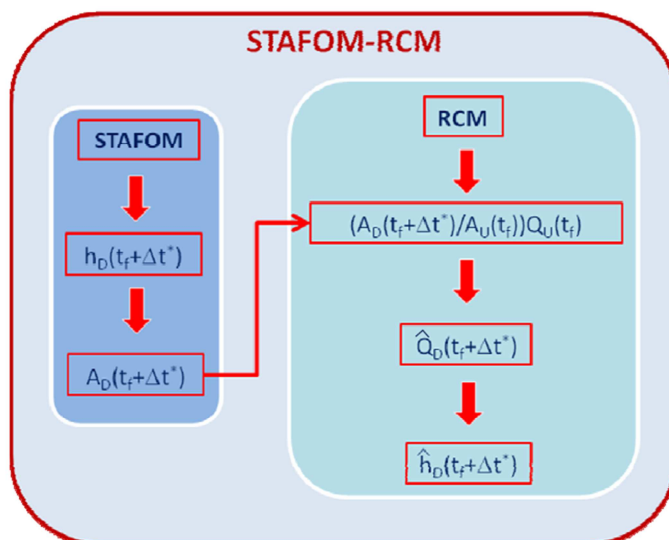


Figura 1.10 Procedura di correzione del livello previsto da STAFOM basata sul modello RCM.

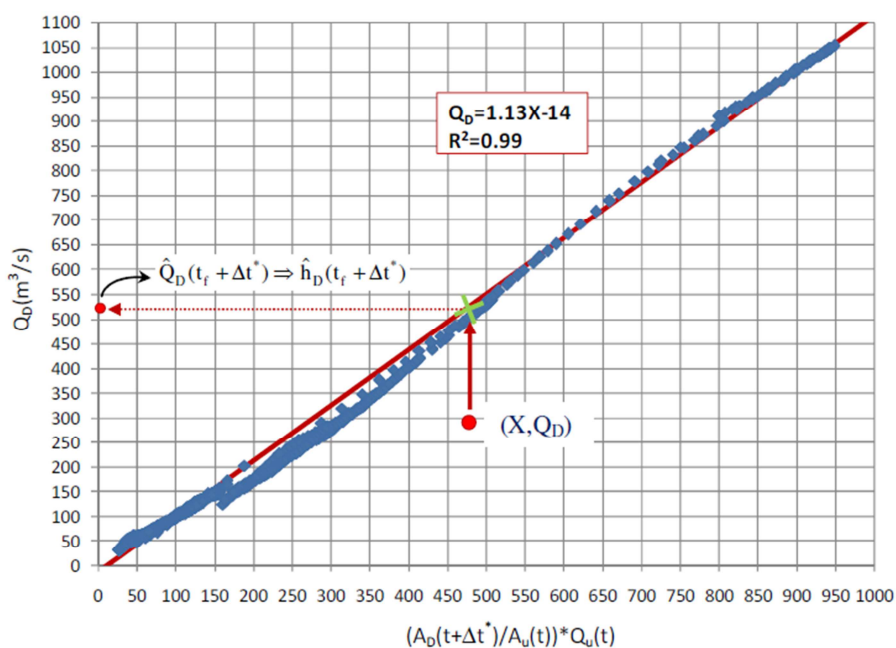


Figura 1.11 Correzione della portata prevista a valle, e quindi del livello idrometrico, sulla base della relazione lineare caratteristica del tratto fluviale identificata mediante l'approccio RCM.

1.2.1.4 Il codice di calcolo di STAFOM-RCM

Per la descrizione dettagliata del codice di calcolo del programma si veda l'Appendice A; di seguito si riporta uno schema a blocchi che descrive i dati in ingresso ed in uscita dal modello:

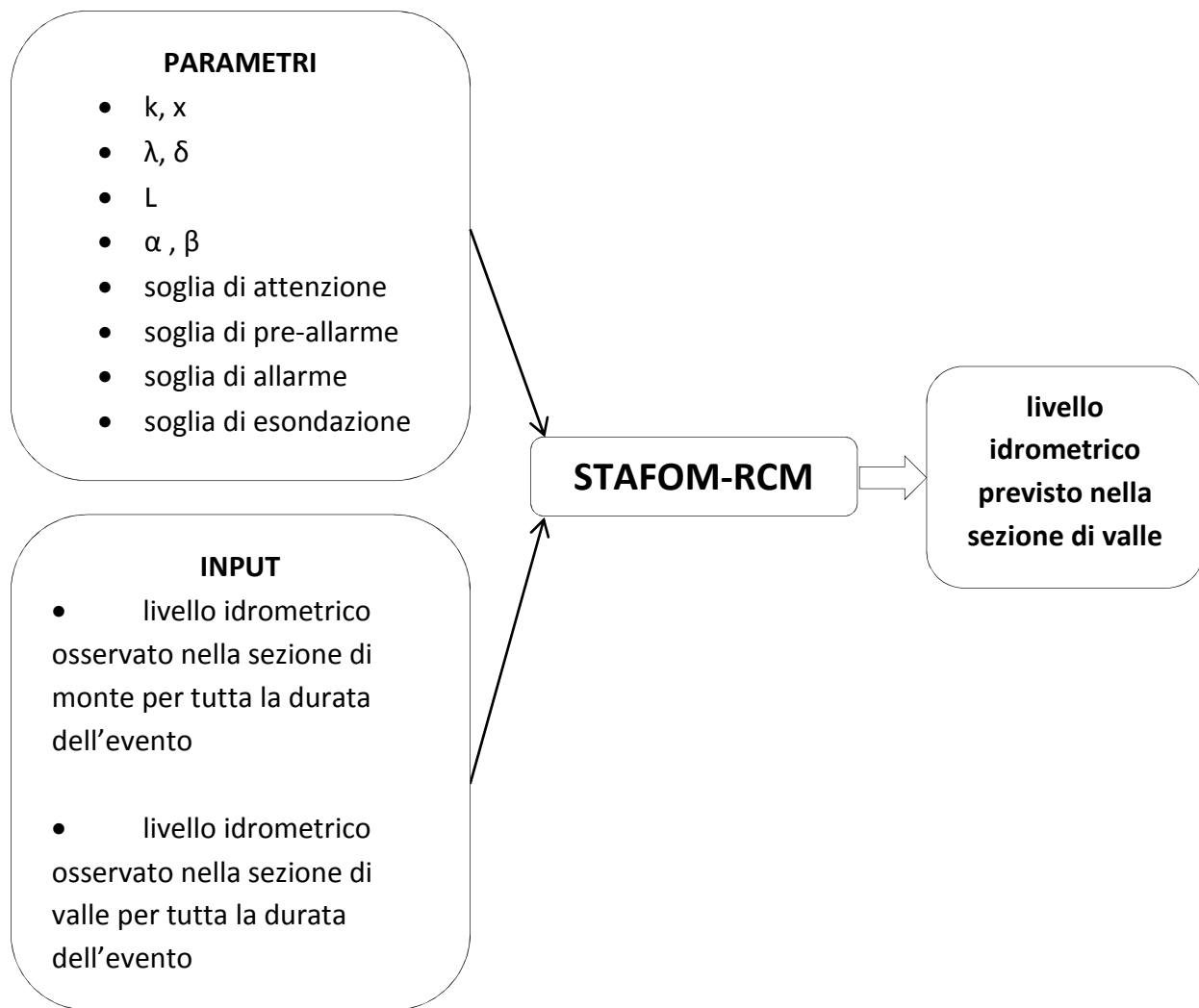


Figura 1.12 Dati in ingresso ed in uscita - STAFOM-RCM

In figura 1.13 di mostra un esempio dell'immagine fornita dal modello STAFOM-RCM.

L'immagine si riferisce al tratto del F. Tevere compreso tra le sezioni di Santa Lucia e Ponte Felcino.

In nero è indicato il livello idrometrico osservato a monte (S. Lucia) mentre in verde quello osservato a valle (P. Felcino), la linea blu indica infine il livello previsto a valle, cioè a P. Felcino.

Le soglie idrometriche sono quelle descritte in precedenza:

- soglia di attenzione: in verde;
- soglia di pre-allarme: in giallo;
- soglia di allarme: in arancione;
- soglia di esondazione: in rosso.

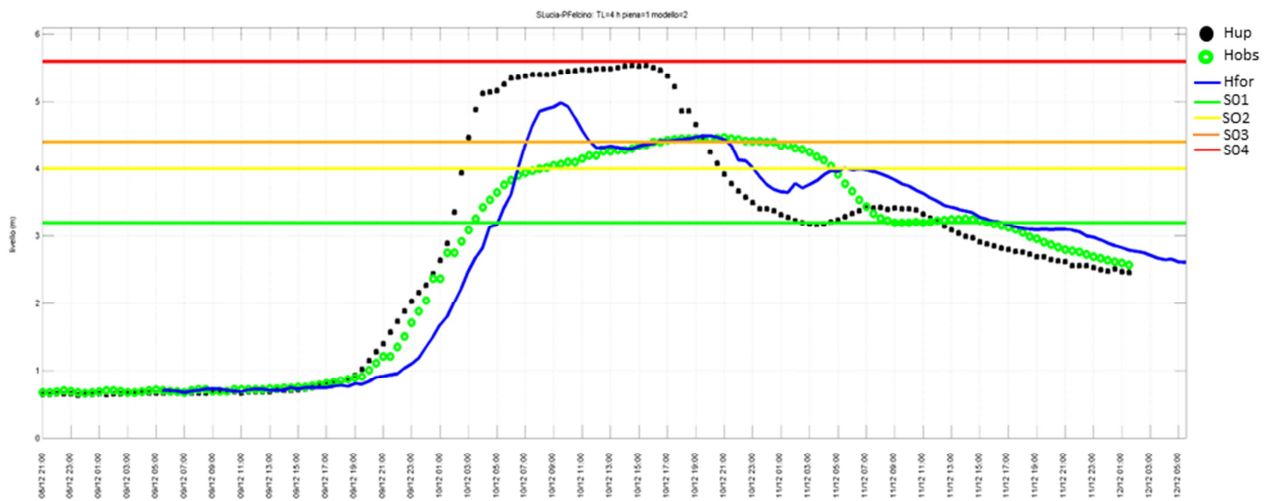


Figura 1.13 Grafico fornito dal modello STAFOM-RCM

1.2.1.5 Applicazione del modello STAFOM-RCM presso il CFD

Il modello STAFOM-RCM è stato implementato presso il CFD per scopi di allertamento per diversi tratti significativi del reticolo idrografico principale umbro. In particolare, il modello è ad oggi operante per il F. Tevere, per i F. Chiascio-Topino e per i F. Chiani-Paglia (v. figura 1.14) ; in tabella 1.1 sono sintetizzati per ciascun corso d'acqua i tratti fluviali in cui è implementato il modello, la lunghezza del tratto e l'intervallo di previsione.



Figura 1.14 Bacino del F. Tevere, bacino del F. Chiascio-Topino, bacino dei F. Chiani-Paglia

	Tratto	L (m)	T_L (ore)
TEVERE	S Lucia - P. Felcino	44610	4
	Pierantonio - P. Nuovo	40230	5
	P. FELCINO - P. NUOVO	25390	4
	P. Nuovo - M. Molino	30830	4
	Pierantonio - M. Molino	71000	9
	P. Felcino - M. Molino	56220	7
	CHIASCIO-TOPINO	Pianello-Petrignano	8600
Valtopina-Bevagna		19900	3
Azzano-Cantalupo		23900	3, 4
Valtopina-Bettona		34800	4
Azzano-Bettona		36000	3, 4
PAGLIA-CHIANI	Ponticelli-Ponte S.Maria	6200	2
	Ponticelli-Ponte Osteria	11000	2
	Ponticelli-Morrano	31000	4
	Ponte S.Maria-Morrano	24800	3
	Ponte Osteria-Morrano	20000	3

Tabella 1.1 Lunghezza di alcuni tratti fluviali del F. Tevere, dei F. Chiascio-Topino e dei F. Chiani-Paglia e intervallo di previsione fornito dal modello STAFOM

1.2.1.6 Calibrazione e validazione del modello STAFOM-RCM

La calibrazione dei parametri presenti nel modello è stata effettuata dal CNR-IRPI considerando una serie di eventi di piena registrati dalla rete di monitoraggio idrometeorologico. In particolare, per la calibrazione dei parametri del modello STAFOM sono stati considerati circa 20 eventi di piena tra quelli più significativi occorsi tra il 1996 e il 2006. In tabella 1.2 sono elencate le caratteristiche principali dei suddetti eventi per il tratto fluviale Santa Lucia-Ponte Felcino, oggetto del presente studio. La sezione di interesse è infatti, come precedentemente esposto, quella di P. Felcino, che costituisce la sezione di valle del tratto S. Lucia-P. Felcino del Fiume Tevere.

Evento	Santa Lucia		Ponte Felcino	
	h_p	Q_p	h_p	Q_p
Dicembre 96	4.39	268	4.22	382
Aprile 97	5.11	345	4.57	449
Novembre 97	2.52	112	3.81	311
Dicembre 97	1.66	59	2.44	126
Gennaio 98	2.29	98	3.23	222
Febbraio 98	1.13	27	2.02	86
Aprile 98	2.26	96	3.30	232
Ottobre 98	1.35	40	-	-
Febbraio 99	3.89	219	4.52	440
Dicembre 99	-	-	2.79	165
Dicembre 00	4.98	331	5.25	596
Marzo 01	2.01	81	2.97	187
Aprile 01	3.01	143	3.23	222
Novembre 05	5.61	403	6.92	1044
2 Dicembre 05	3.87	217	4.42	420
5 Dicembre 05	4.12	241	4.76	488
30 Dicembre 05	4.59	289	4.34	405
Febbraio 06	1.25	34	2.64	147

Tabella 1.2 Principali caratteristiche degli eventi di piena selezionati per i tratti fluviali Santa Lucia-Ponte Felcino: livello di picco, h_p , portata di picco, Q_p .

Per la stima dei due parametri α e β del modulo RCM sono stati invece considerati anche gli eventi di piena successivi, compresi tra il 2006 e il 2008 (si veda la figura riportata di seguito, in cui i quadratini azzurri corrispondono a tutti gli eventi considerati per la stima di α e β):

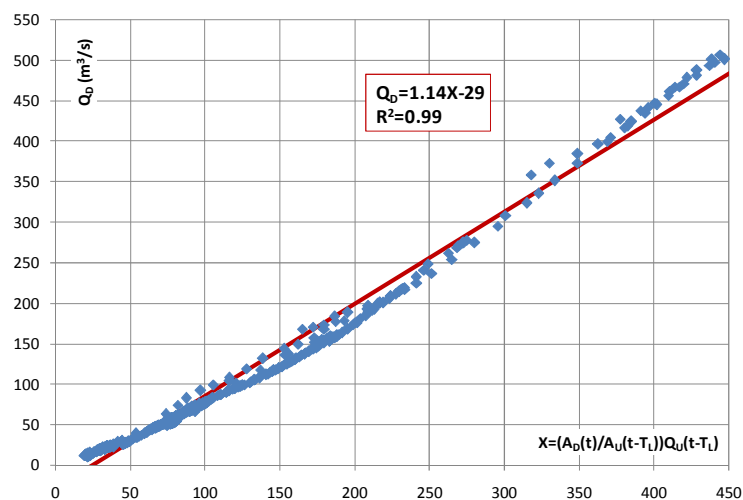


Figura 1.15 Relazione lineare tra la portata nella sezione di valle, Q_D , e la quantità X calcolata per il tratto fluviale S. Lucia-P. Felcino per il periodo di sperimentazione oggetto di analisi

In definitiva nella tabella seguente si sintetizzano i risultati per il tratto di interesse, cioè i parametri considerati nell'applicazione di STAFOM-RCM oggetto del presente studio:

• Tempo di previsione caratteristico: 4 ore	
• Lunghezza tratto: 44.61 km	
• PARAMETRI MODELLO STAFOM-RCM	
* $K = 4$	parametri modello Muskingum
* $x = 0.5$	
* $\lambda = 24.6$	parametri scala deflusso valle
* $\delta = 1.90$	
* $\alpha = 1.14$	parametri modello RCM
* $\beta = -29$	

Tabella 1.3 Parametri del modello STAFOM-RCM per il tratto S. Lucia-P. Felcino

Di seguito viene descritta la validazione svolta dal CNR-IRPI sul modello STAFOM-RCM.

Nel periodo successivo al 2008 si sono verificati alcuni eventi di piena che hanno interessato l'asta principale del Fiume Tevere. Tra questi, i due eventi occorsi nel mese di Dicembre 2008, particolarmente significativi, hanno permesso di testare l'accuratezza di STAFOM-RCM in corso d'evento, costituendo un ottimo strumento di verifica dell'affidabilità della previsione. In particolare durante l'evento di piena verificatosi nei giorni 10-11 Dicembre 2008 sono stati raggiunti livelli elevati in tutte le sezioni idrometriche di monitoraggio dell'asta del Fiume Tevere (Santa Lucia=4.96 m; Pierantonio=6.51 m; Ponte Felcino=4.98 m; Ponte Nuovo=7.29 m; Monte Molino=8.20 m), inserite nell'ambito della rete di monitoraggio operante on-line della Regione Umbria, con superamento sia delle soglie idrometriche di criticità che della soglia di inizio "esondazione".

Durante l'evento in esame, importanti afflussi laterali hanno influenzato in modo significativo l'evoluzione dell'onda di piena lungo l'intero tratto di asta fluviale, particolarmente per quanto concerne la prima fase di risalita degli idrogrammi. In effetti, per molti dei tratti fluviali considerati per l'implementazione del modello STAFOM, gli idrogrammi di livello registrati presso le stazioni di monte e di valle sono caratterizzati da forme diverse, con contributi laterali importanti responsabili di rami di risalita a valle che precedono quelli osservati nelle sezioni di monte, spesso con pendenze dissimili. L'evento in questione ha quindi costituito un eccellente caso di studio per

la verifica dell'affidabilità del modello e della sua capacità di fornire informazioni utili per indirizzare l'attività decisionale delle autorità preposte in corso d'evento.

Di seguito vengono mostrate le caratteristiche degli eventi di piena occorsi in tale periodo.

Sezione idrometrica	5 Dicembre 2008		11 Dicembre 2008		Gennaio 2009		Febbraio 2009	
	H _{max} (m)	Q _{max} (m ³ /s)	H _{max} (m)	Q _{max} (m ³ /s)	H _{max} (m)	Q _{max} (m ³ /s)	H _{max} (m)	Q _{max} (m ³ /s)
Santa Lucia (S _{trac} = 4.90 m)	3.36	172	4.96	328	1.39	42	2.24	95
Pierantonio (S _{trac} =5.60 m)	5.13	350	6.51	564	2.59	75	4.26	237
Ponte Felcino (S _{trac} = 5.60 m)	3.60	281	4.98	522	1.93	77	3.19	220
Ponte Nuovo (S _{trac} = 6.60m)	5.28	522	7.29	905	2.78	160	3.91	319
Monte Molino (S _{trac} = 6.90 m)	5.28	573	8.20	1088	2.35	173	4.00	376

S_{trac}: soglia di inizio tracimazione tratto

Tabella 1.4 Caratteristiche degli eventi di piena occorsi lungo l'asta principale del Fiume Tevere nel periodo Aprile 2008-Aprile 2009 (Hmax=livello di picco; Qmax=portata al colmo)

La modellistica di previsione è risultata affidabile e ha fornito risultati confrontabili con quelli ottenuti dall'applicazione del modello STAFOM senza correzione RCM (S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco, 2009). I risultati ottenuti nei due casi per $\Delta t^* = 4$ ore, che corrisponde al tempo di trasferimento dell'onda di piena medio caratteristico del tratto, sono mostrati in figura 1.16 in termini di errore sul valore del picco di livello, er_Hp, in metri, errore sul tempo al picco, er_Tp, in ore, e coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe, NS¹. Il confronto tra i valori degli errori sul picco di livello e sul tempo al picco e del coefficiente NS ottenuti con il modello STAFOM-RCM non ha evidenziato significative modifiche rispetto ai risultati ottenuti con il modello STAFOM senza correzione RCM.

Complessivamente, per il caso di studio e per il periodo di sperimentazione considerati, l'applicazione della procedura di correzione, basata sul metodo RCM, ha introdotto un lieve incremento dell'accuratezza non comportando significative variazioni della previsione fornita.

¹ È definito come $NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$, dove Q_0^t è la portata osservata al tempo t, Q_m^t è la portata fornita dal modello al tempo t e \bar{Q}_0 è la portata media osservata nell'intervallo temporale di previsione. NS può andare da $-\infty$ a 1. La previsione del modello è tanto più accurata tanto più NS si avvicina a 1. Esso può essere anche espresso in percentuale. NS indica quanto l'idrogramma di piena viene simulato correttamente.

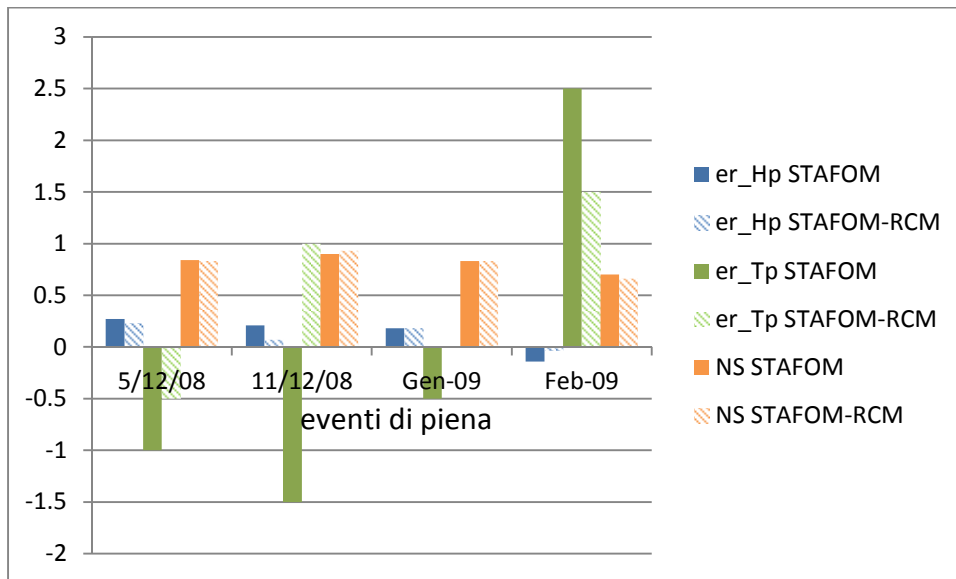


Figura 1.16 Tratto Santa Lucia-Ponte Felcino: prestazioni dei modelli di previsione STAFOM e STAFOM-RCM nel periodo Aprile 2008-Aprile 2009 per $\Delta t^*=4$ ore (er_Hp =errore sul picco di livello; er_Tp =errore sul tempo al picco; NS =coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe)

A conclusione della suddetta validazione si è ritenuto opportuno implementare in tempo reale il modello di previsione STAFOM-RCM considerando l'applicazione ai seguenti tratti singoli del F. Tevere:

Bacino del Fiume Tevere – asta principale

1. tratto Santa Lucia-Ponte Felcino: intervallo di previsione 3/4/5 ore;
2. tratto Pierantonio-Ponte Nuovo: intervallo di previsione 4/5/6 ore;
3. tratto Ponte Felcino-Ponte Nuovo: intervallo di previsione 3/4/5 ore;
4. tratto Ponte Nuovo-Monte Molino: intervallo di previsione 3/4/5 ore;
5. tratto Pierantonio-Monte Molino: intervallo di previsione 8/9/10 ore;
6. tratto Ponte Felcino-Monte Molino: intervallo di previsione 6/7/8 ore;

La versione del modello STAFOM utilizzata nel presente lavoro è quindi quella che prevede la correzione RCM e, come già detto, si riferisce al tratto singolo Santa Lucia-Ponte Felcino.

1.2.2 Il sistema modellistico MISDc

MISDc è un sistema modellistico, sviluppato dal CNR-IRPI di Perugia, costituito da un modello di bilancio idrologico del suolo per la simulazione in continuo dell'evoluzione temporale del contenuto d'acqua (MOBIS) accoppiato con un modello idrologico semi-distribuito (MISD) per la simulazione afflussi-deflussi a scala di evento. Il modulo MOBIS funziona in continuo e il modulo MISD inizia la simulazione quando viene rilevato un evento di piena. L'integrazione di MOBIS e

MISD rende la modellistica di tipo “continuo” e permette di simulare in tempo reale gli eventi di piena più significativi pur mantenendo una parametrizzazione assai limitata. Questo aspetto riveste una notevole importanza perché permette di considerare l’effettiva variabilità spazio-temporale del contenuto d’acqua dei suoli e, quindi, di stimare con sufficiente grado di accuratezza le condizioni antecedenti di umidità del suolo (AMC, Antecedent Moisture Conditions) prima di un evento di piena (parametro questo fondamentale per una corretta valutazione del deflusso superficiale) pur mantenendo un limitato numero di parametri.

Si riporta di seguito un diagramma schematico del MISDc:

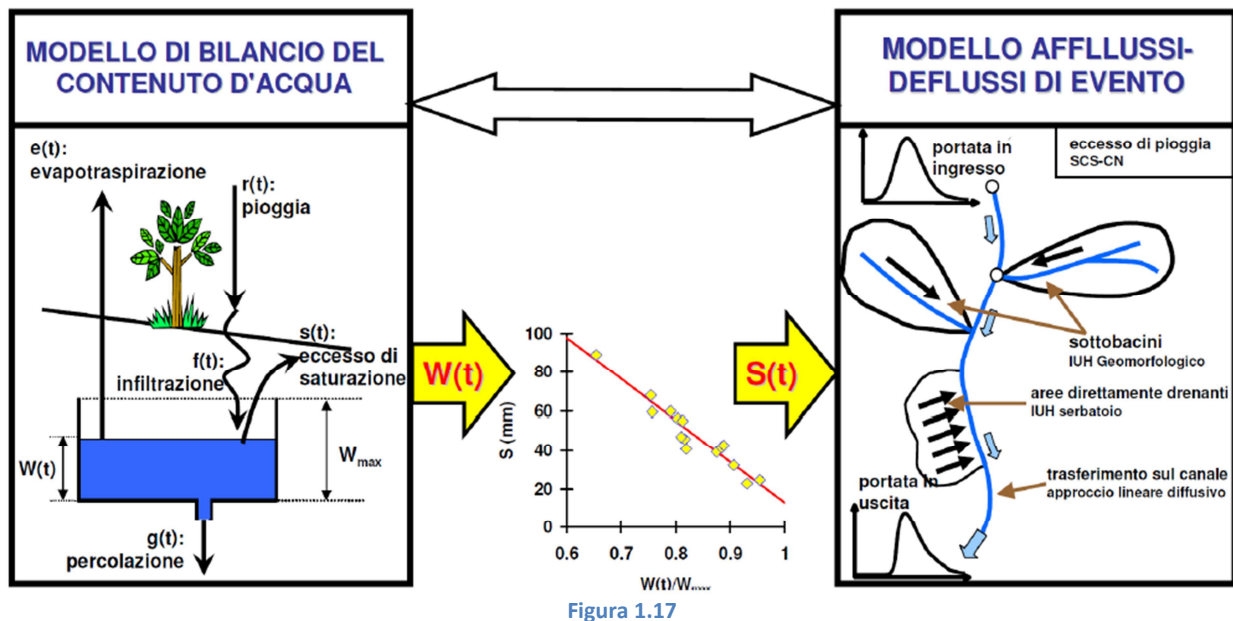


Figura 1.18 Diagramma schematico del modello MISDc

1.2.2.1 Modello di Bilancio Idrologico del Suolo (MOBIS)

Si illustrano di seguito gli elementi principali del Modello di Bilancio Idrologico del Suolo (MOBIS). Si assuma che lo strato superficiale di terreno sia un sistema omogeneo per cui valga la seguente equazione di bilancio:

$$\frac{dW(t)}{dt} = f(t) - e(t) - g(t) \quad W(t) \leq W_{\max} \quad (1.12)$$

$$W(t) = W_{\max} \quad W(t) > W_{\max} \quad (1.13)$$

dove $W(t)$ rappresenta il volume di acqua immagazzinato nel suolo, $f(t)$ è la frazione di pioggia che si infiltra nel terreno, $e(t)$ è il tasso di evapotraspirazione, $g(t)$ è il tasso di percolazione e W_{\max} rappresenta la quantità massima di acqua che può essere immagazzinata nello strato.

L'infiltrazione, $f(t)$, è stimata utilizzando la formula di Green-Ampt scritta in termini di volume di acqua W :

$$f(t) = K_s \left[1 - \frac{\psi (W_{\max} - W_i)}{L F(t)} \right] \quad f(t) \leq p(t) \quad (1.14)$$

$$f(t) = p(t) \quad f(t) > p(t) \quad (1.15)$$

dove K_s è la conducibilità idraulica a saturazione, ψ/L è il rapporto tra il potenziale capillare medio del fronte bagnato che avanza, ψ , e lo spessore di suolo, L , W_i è il volume d'acqua all'inizio dell'evento di pioggia. $F(t)$ è l'infiltrazione cumulata dall'inizio dell'evento di pioggia e $p(t)$ è l'intensità di pioggia. Si sottolinea che il valore di W_i deve essere aggiornato per ogni evento di pioggia.

Per la percolazione si assume una relazione non lineare con il grado di saturazione del suolo, $W(t)/W_{\max}$:

$$g(t) = K_s \left(\frac{W(t)}{W_{\max}} \right)^{3+(2/\lambda)} \quad (1.16)$$

dove λ è l'indice di distribuzione dei pori, che è legato alla struttura geometrica del suolo. In questo caso si assume che il flusso avvenga solo per gravità, trascurando l'effetto legato alle forze capillari.

L'evapotraspirazione, il principale processo che controlla l'evoluzione temporale del contenuto d'acqua nei periodi di non pioggia, è rappresentata attraverso una relazione lineare che dipende dall'evapotraspirazione potenziale, $ET_p(t)$, e dal grado di saturazione del suolo:

$$e(t) = ET_p(t) \cdot \frac{W(t)}{W_{\max}} \quad (1.17)$$

Questa relazione implicitamente ipotizza che il valore del contenuto d'acqua a saturazione e residuo coincidano, rispettivamente, con la capacità di campo e con il punto di appassimento.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale è stata adottata l'equazione di Blaney and Criddle (1950) nella versione modificata da Doorenbos and Pruitt (1977):

$$ET_p(t) = -2 + b[\xi(0.46T_a(t) + 8.13)] \quad (1.18)$$

Dove $T_a(t)$ è la temperatura dell'aria in °C, ξ è la percentuale di ore di luce nel periodo considerato (giornaliero o mensile) e b è un parametro stimato tramite calibrazione.

1.2.2.1.1 Il codice di calcolo di MOBIS

Per la descrizione dettagliata del codice di calcolo del programma si rimanda all'Appendice B.

In figura 1.19 si illustra, tramite uno schema a blocchi, i dati in ingresso ed in uscita dal modello.

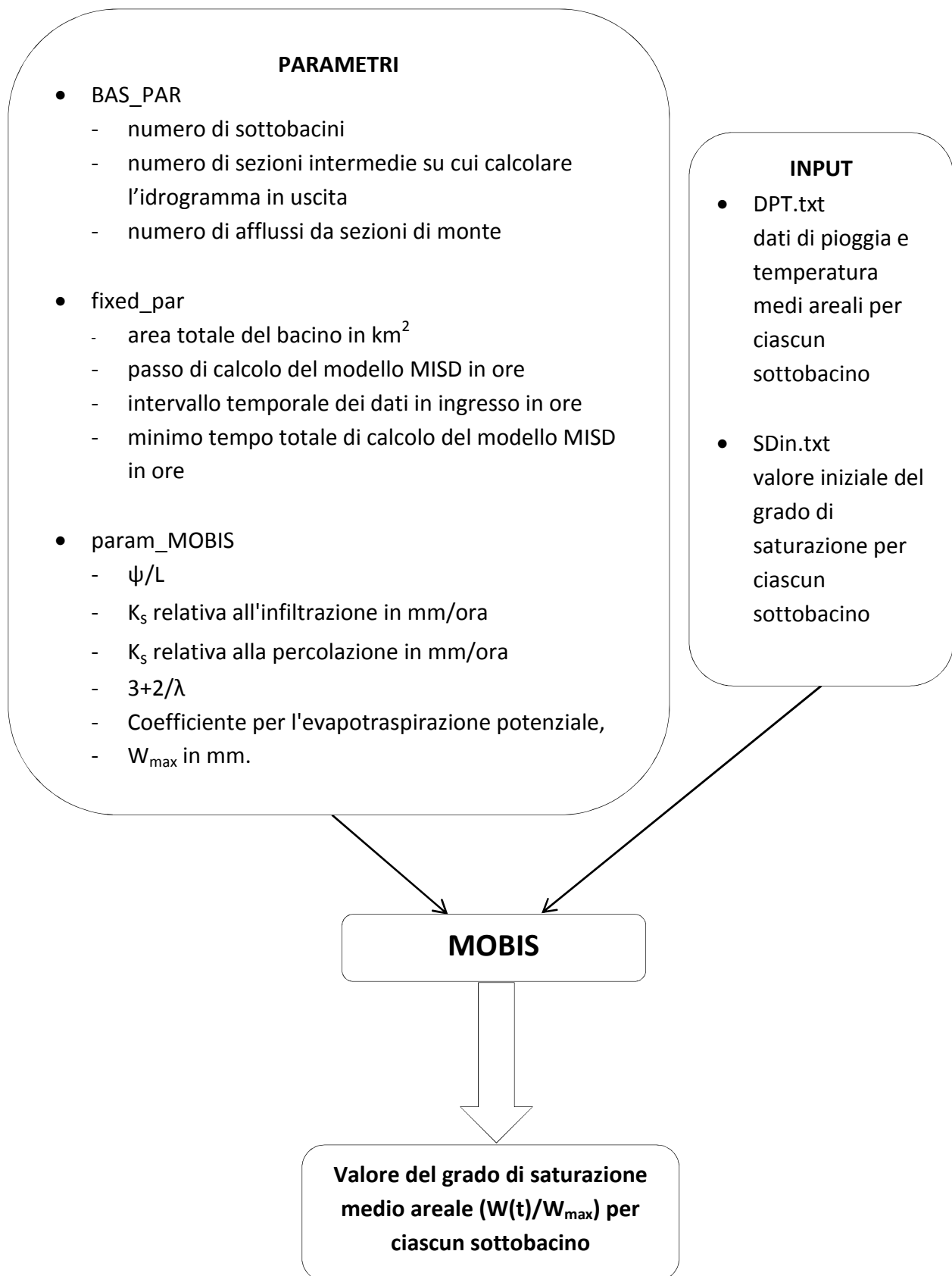


Figura 1.19 Dati in ingresso ed in uscita – MOBIS

Specifichiamo che nel programma MOBIS viene utilizzata solo l'informazione relativa al numero di sottobacini del file BAS_PAR e solo le informazioni relative all'intervallo temporale dei dati in ingresso ed all'area totale del bacino del file fixed_par. Gli altri parametri presenti all'interno dei due suddetti file vengono utilizzati da MISD.

Le due immagini successive (figure 1.20-1.21) costituiscono invece due esempi delle figure fornite dal programma. La prima contiene in alto l'andamento temporale della pioggia e in basso l'andamento del grado di saturazione per ogni sottobacino. La linea blu identifica l'andamento medio del grado di saturazione del bacino in esame. La seconda figura è invece un esempio di mappa del grado di saturazione del bacino del F. Tevere.

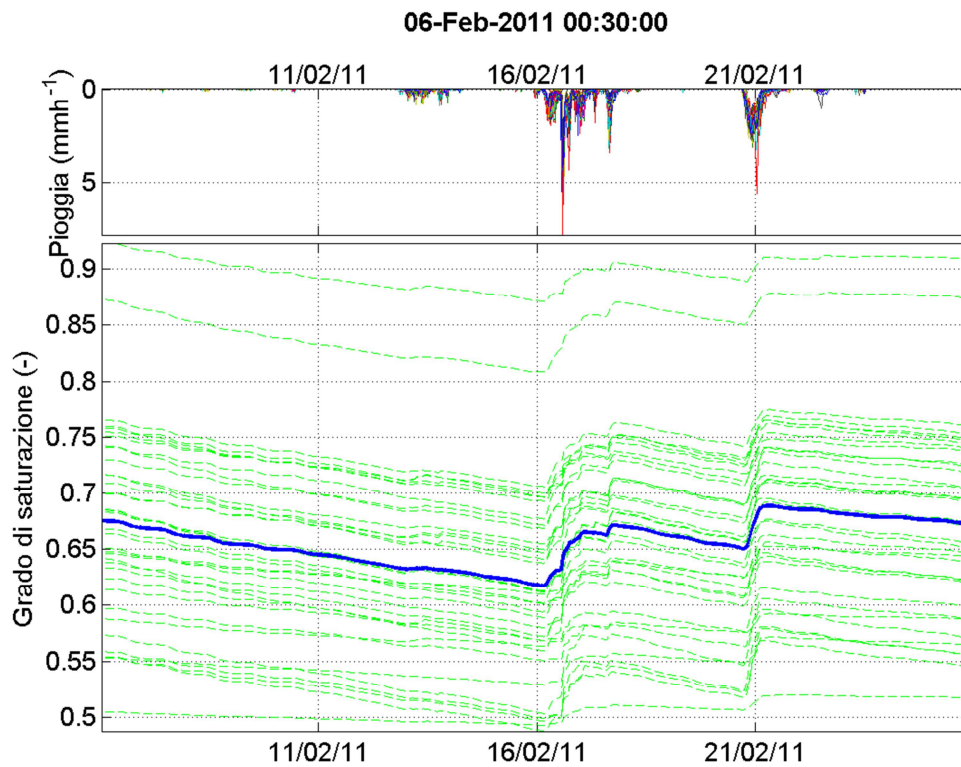


Figura 1.20 Esempio dell'andamento temporale della pioggia e del grado di saturazione per ogni sottobacino raggruppate in un'unica figura. La simulazione è iniziata il 6 febbraio 2011 alle 00:30.

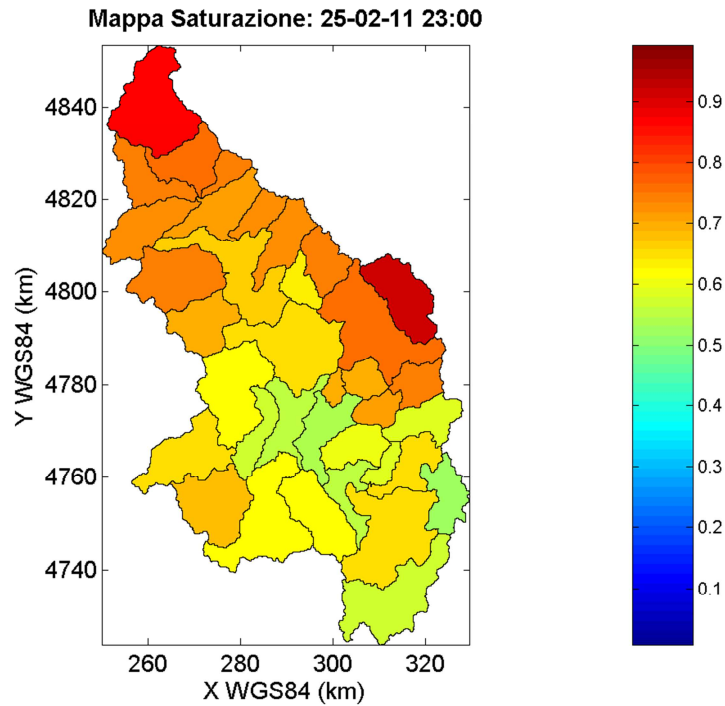


Figura 1.21 Esempio della mappa di saturazione del bacino del F. Tevere in data 25 febbraio 2011 alle ore 23:00

1.2.2.2 Modello Idrologico Semi-Distribuito (MISD)

Il Modello Idrologico Semi-Distribuito (MISD) è un modello afflussi-deflussi a scala di evento.

Il bacino idrografico viene schematizzato come un insieme di N_b elementi assunti omogenei per caratteristiche morfologiche e di uso/tipo di suolo. Tali elementi rappresentano sottobacini o aree che drenano nel corso d'acqua principale che a sua volta può essere suddiviso in N_r segmenti omogenei in base alle caratteristiche idrauliche. Di seguito vengono descritte le equazioni matematiche alla base del modello.

Per quanto riguarda il trasferimento dell'onda di piena, l'idrogramma di portata diretta, $Q_j(t)$, alla sezione di valle del j -esimo segmento fluviale, avente lunghezza L_j , è stimato attraverso l'approccio diffusivo lineare come:

$$Q_j(t) = \sum_i Q_{ij}(t) = \sum_i \int_0^t Y_{ij}(\tau) r(t - \tau; c_j, D_j, X_{ij}) d\tau \quad (1.19)$$

dove Y_{ij} è il deflusso diretto del i -esimo elemento che drena nel segmento ad una distanza X_{ij} dalla sezione di valle; per $X_{ij}=L$ esso rappresenta l'idrogramma d'ingresso alla sezione di monte del segmento stesso. Per il trasferimento dell'onda di piena è stata utilizzata la funzione di trasferimento diffusiva, r , data da (Troutman and Karlinger, 1985):

$$r(t; c_j, D_j, X_{ij}) = \frac{X_{ij}}{2(\pi D_j t^3)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(c_j t - X_{ij})^2}{4D_j t}\right) \quad (1.20)$$

dove c_j è la celerità e D_j il coefficiente di diffusione.

La risposta idrologica di ogni elemento omogeneo (sottobacino o area direttamente drenante) è espressa attraverso l'integrale di convoluzione della pioggia effettiva e dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH). Per una generica pioggia effettiva media areale di intensità ε , l'idrogramma di portata diretta è data da:

$$Y(t) = A \int_0^t \varepsilon(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1.21)$$

dove A è l'area dell'elemento, $\varepsilon(t)$ è riferita all'intervallo temporale $d\tau$ ed è espressa come spessore per unità di tempo, mentre $h(t-\tau)$ è l'IUH le cui dimensioni fisiche sono $[T]^{-1}$. Per i sottobacini è stato utilizzato l'approccio geomorfologico (GIUH). Esso permette di determinare la funzione $h(t)$ di un dato bacino senza avere bisogno di dettagliate informazioni sulle caratteristiche morfologiche dello stesso. Infatti, noto il GIUH adimensionale (v. figura 1.22), $h^*(t^*)$, ed il tempo di ritardo (lag) del bacino in esame, L_B , l'idrogramma unitario istantaneo si ottiene dalla:

$$h(t) = h_p h^*(t^*) \quad (1.22)$$

dove $t^* = t/L_B$ ed h_p è esprimibile attraverso l'equazione:

$$h_p = \frac{1}{L_B \int_0^\infty h^*(t^*) dt^*} \cong \frac{0.8}{L_B} \quad (1.23)$$

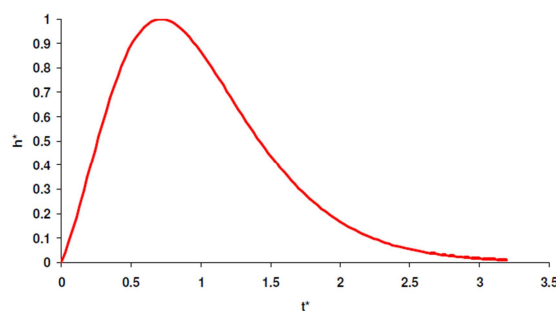


Figura 1.22 *Idrogramma unitario istantaneo geomorfologico adimensionale.*

Per le aree direttamente drenanti, invece, viene utilizzato il modello dell'invaso per il quale si ha:

$$h(t) = \frac{1}{K_R} e^{-\frac{t}{K_R}} \quad (1.24)$$

dove il parametro dinamico K_R è supposto assumere un valore doppio rispetto ad un elemento sottobacino di pari area, quindi pari al doppio di L_B , per tener conto che in questo caso l'acqua

scorre prevalentemente sulla superficie del terreno con una velocità inferiore a quella che si ha nella rete drenante.

In particolare, il lag di ciascun sottobacino, L_B , è ricavato dalla formula empirica proposta da Melone et al. (2002):

$$L_B = \eta 1.19 A_B^{0.33} \quad (1.25)$$

Dove A_B è l'area del sottobacino in km^2 , mentre η è un parametro da calibrare.

La pioggia effettiva viene determinata considerando il metodo del Soil Conservation Service - Curve Number (SCS-CN) per la stima delle perdite:

$$\varepsilon(t) = \frac{[p(t)(P(t) - \lambda_1 S)(P(t) + (2 - \lambda_1)S)]}{(P(t) + (1 - \lambda_1)S)^2} \quad P(t) \geq 0.2S$$

(1.26)

$$\varepsilon(t) = 0 \quad \text{altrimenti}$$

dove $p(t)$ è l'intensità di pioggia, $P(t)$ rappresenta la pioggia cumulata dall'inizio dell'evento di pioggia, λ_1 è il coefficiente legato alle perdite iniziali e S è la massima ritenzione potenziale del suolo all'inizio dell'evento.

Il valore di S viene determinato sulla base delle caratteristiche di uso e tipo di suolo e delle condizioni di contenuto d'acqua antecedente l'evento meteorico. Le caratteristiche di uso e tipo di suolo vengono inglobate in un parametro adimensionale, detto Curve Number, CN, legato ad S dalla:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

(1.27)

con S espresso in mm.

I valori del parametro CN corrispondenti ad una condizione media di contenuto d'acqua del terreno, CN(II), sono forniti in forma tabellare, mentre per condizioni umide, CN(III), e secche, CN(I), si utilizzano le seguenti relazioni:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (1.28)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (1.29)$$

Su tale base nella modellistica adottata le condizioni antecedenti sono stimate attraverso il valore del volume di contenuto d'acqua $W(t)/W_{\max}$ fornito dal modello MOBIS:

$$S = (\alpha S_{CN(III)} - \beta S_{CN(I)}) \frac{W(t)}{W_{\max}} + \beta S_{CN(I)} \quad (1.30)$$

dove $S_{CN(III)}$ e $S_{CN(I)}$ sono i valori di S corrispondenti a condizioni del terreno umide e secche ed α e β sono, in generale, due parametri da calibrare. L'affidabilità di tale relazione è stata dimostrata considerando il confronto tra osservazioni dirette di contenuto d'acqua su una parcella sperimentale e i valori di S che permettono di riprodurre il volume di deflusso diretto.

1.2.2.2.1 Il codice di calcolo di MISD

Per la descrizione dettagliata del codice di calcolo del programma si veda l'Appendice C.

In figura 1.23 illustriamo, tramite uno schema a blocchi, i dati in ingresso ed in uscita dal modello. Inoltre in figura 1.24 si osserva un esempio di una delle immagini fornite dal programma: in alto è mostrato l'andamento temporale della pioggia e della pioggia effettiva ed in basso l'andamento della portata simulata ed osservata. In figura 1.25 è invece mostrata una figura unica contenente il confronto tra le portate simulate e osservate per ogni sottobacino, fornita come output dal modello.

Si specifica che, nelle figure 1.23 e 1.25, NS è il coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe illustrato nel paragrafo 1.2.1.6, EQ_p è il rapporto tra la differenza tra il picco di portata previsto e osservato ed il picco di portata osservato ed EV è il rapporto tra la differenza in volume tra l'onda di piena prevista ed osservata e il volume dell'onda di piena osservata.

Si sottolinea che il MISD permette di simulare l'andamento del solo deflusso diretto, e non del deflusso totale. Per il calcolo del deflusso totale è necessario aggiungere al deflusso diretto un deflusso di base che può essere costante per tutto l'evento e pari al valore osservato prima dell'inizio della pioggia. Tale valore è infatti supposto noto nell'ottica dell'applicazione di tale modello per la previsione delle piene in tempo reale. Si sottolinea che il sistema modellistico MISDc utilizza dati di input con passo temporale semiorario (provenienti dalla rete di monitoraggio idrometeorologico operante in tempo reale e i cui dati convergono anche al CFD) e richiede un limitato numero di parametri da calibrare (pari a 11).

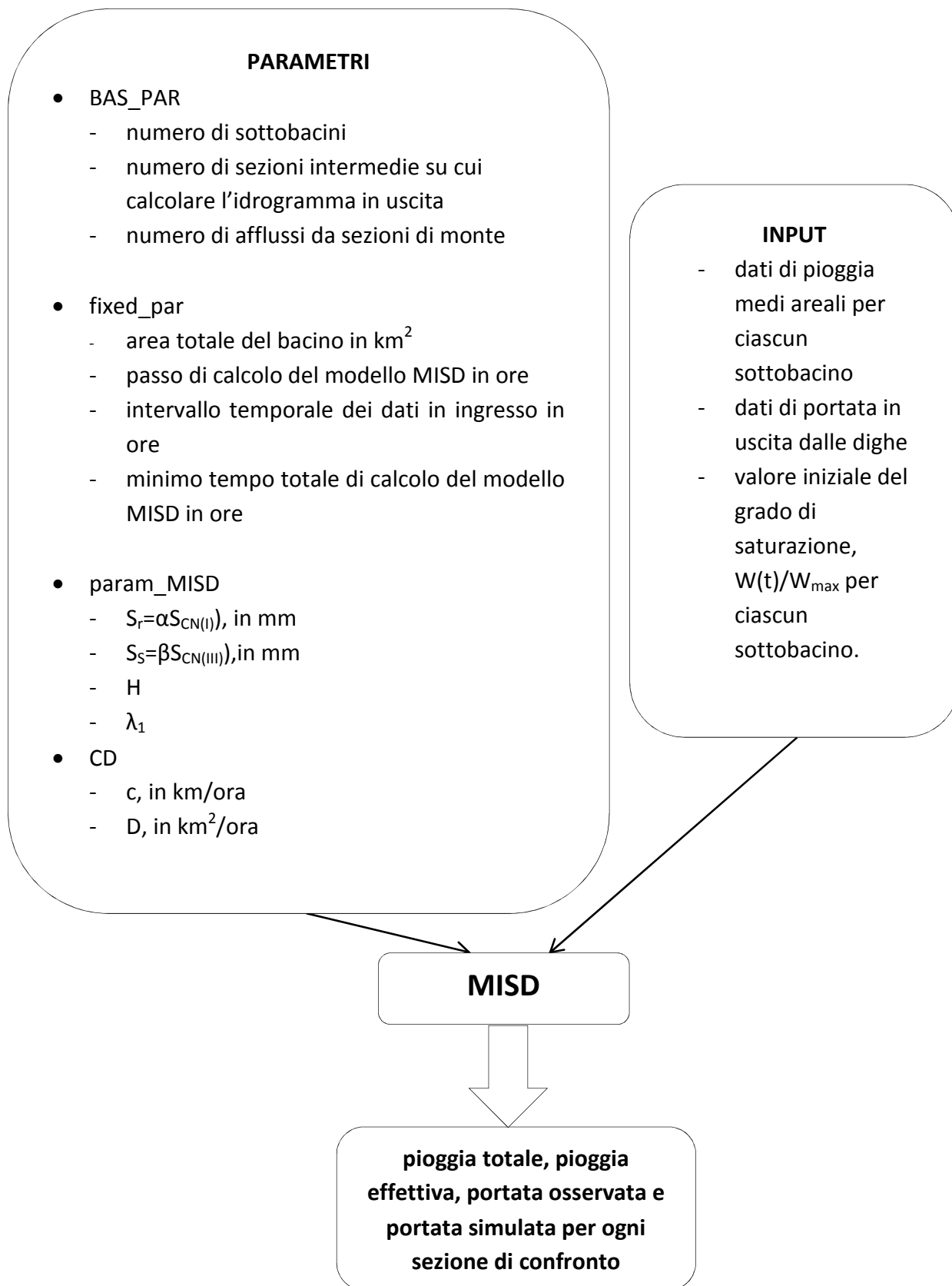


Figura 1.23 Dati in ingresso ed in uscita - MISD

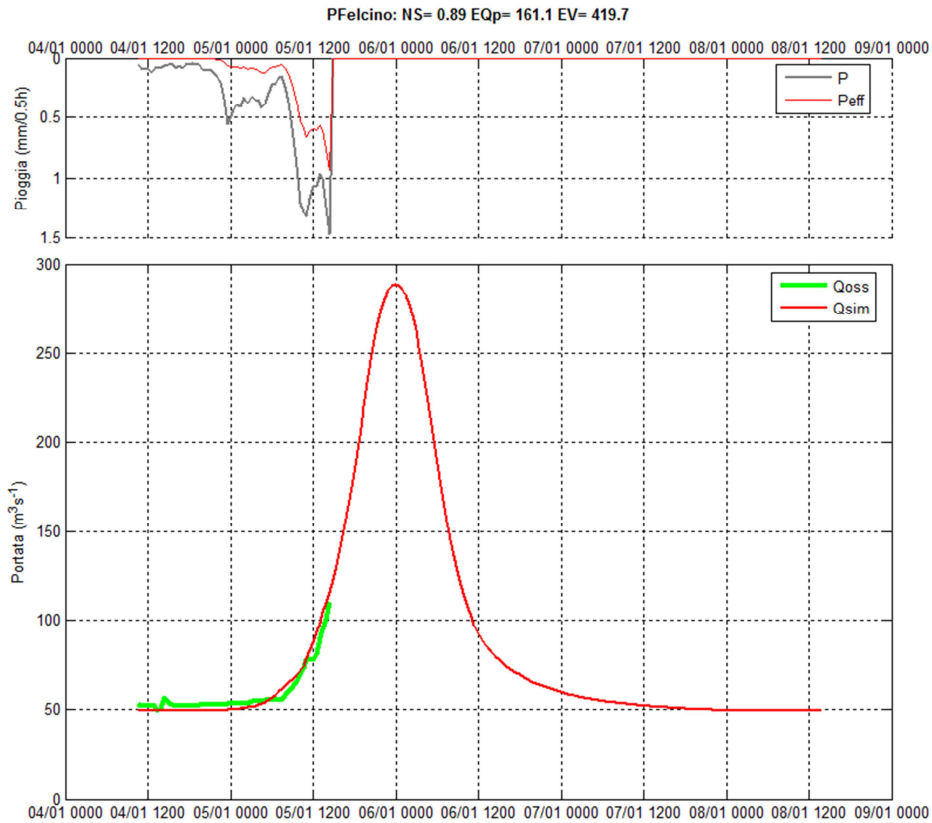


Figura 1.24 Esempio del confronto tra le portate simulate e osservate per la sezione di Ponte Felcino del fiume Tevere. I risultati sono relativi alla simulazione in tempo reale dell'evento di piena del gennaio 2010.

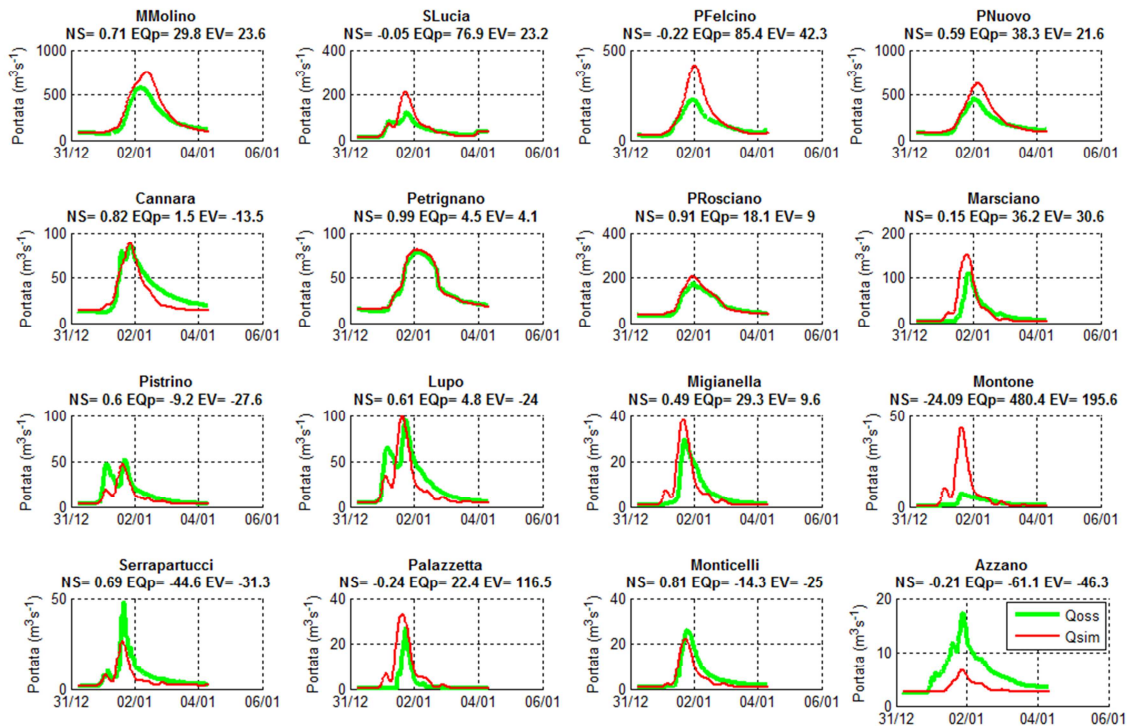


Figura 1.25 Esempio del confronto tra le portate simulate e osservate per tutte le sezioni di confronto. I risultati sono relativi alla simulazione in tempo differito dell'evento di piena del gennaio 2010. I tempi di previsione degli idrogrammi nelle varie sezioni sono diversi perché dipendono dal tempo di corrivazione.

1.2.2.3 Applicazione del modello MISDc presso il CFD

Il modello MISDc è stato implementato presso il CFD per scopi di allertamento nel bacino del F. Tevere con sezione di chiusura a Monte Molino ($A_b \approx 4466 \text{ km}^2$). In particolare, sono stati individuati 32 sottobacini di area non superiore ai 400 km^2 , come da Direttiva P.C.M. 27 febbraio 2004, ma non inferiore ai 300 km^2 a meno di presenza di sezioni strumentate. Questo perché è stato constatato che l'accuratezza del modello non migliora considerando sottobacini di dimensione inferiore. La schematizzazione del bacino del F. Tevere con le principali sezione idrometriche è la seguente:

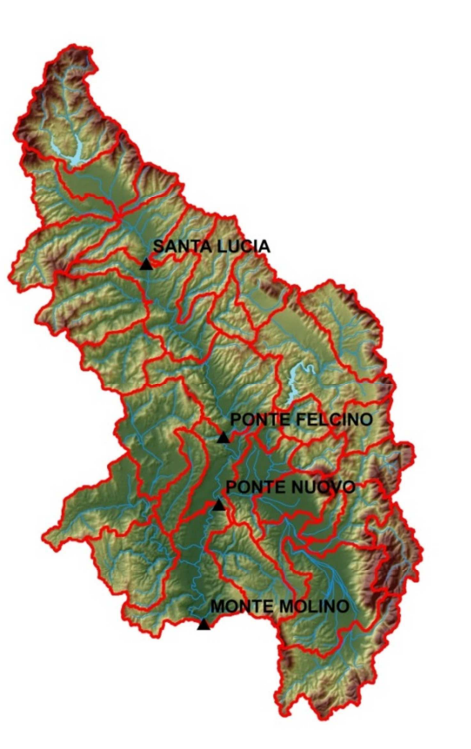


Figura 1.26 Schematizzazione del bacino del F. Tevere nel MISDc

1.2.2.4 Calibrazione e validazione del modello MISDc

La calibrazione del MISDc, per il bacino del F. Tevere con sezione di chiusura a Monte Molino, è stata fatta dal CNR-IRPI in base ad eventi di piena osservati in un periodo di 18 mesi (settembre 1996-febbraio 1998), durante il quale sono stati osservati 6 eventi di piena significativi alla sezione di M.Molino.

Sono stati stimati 11 parametri e cioè: la quantità massima d'acqua che può essere immagazzinata nello strato di terreno W_{max} , la conducibilità idraulica a saturazione K_s , il rapporto tra il potenziale capillare medio e lo spessore del suolo ψ/L , l'indice di distribuzione dei pori λ , il coefficiente per l'evapotraspirazione potenziale b , il parametro η che determina la risposta di ogni singolo

sottobacino attraverso la sua area drenante, la celerità c , la diffusione D , il parametro λ_1 del metodo SCS-CN e i parametri α e β della relazione tra il contenuto d'acqua e la massima ritenzione potenziale del suolo all'inizio dell'evento (v. equazione (1.30)). I primi 5 parametri nominati sono quelli di MOBIS mentre gli ultimi 6 sono i parametri del MISD. Per la calibrazione dei parametri sono state considerate, come da letteratura, le seguenti tabelle, che mostrano l'intervallo di valori che possono assumere i parametri, insieme all'unità di misura e alla definizione:

Parametro	Descrizione	Unità di misura	Intervallo di variabilità
W_{max}	quantità massima di acqua che può essere immagazzinata nello strato di terreno	mm	50 ÷ 700
K_s	conducibilità idraulica a saturazione	mm/h	0.3 ÷ 20.0
$\frac{\psi}{L}$	rapporto tra il potenziale capillare medio e lo spessore di suolo	/	-2.0 ÷ -0.05
λ	indice di distribuzione dei pori	/	0.05 ÷ 0.5
b	coefficiente per l'evapotraspirazione potenziale	/	0.3 ÷ 2.5

Tabella 1.5 Parametri di calibrazione di MOBIS

Parametro	Descrizione	Unità di misura	Intervallo di variabilità
c	celerità	km/h	2 ÷ 6
D	diffusione	km ² /h	1.0 ÷ 10.0
η	parametro legato al tempo di risposta dei bacini della relazione lag-area	/	0.5 ÷ 2.0
λ_1	parametro legato alle perdite iniziali del metodo SCS-CN	/	0.04 ÷ 0.4
α	coefficiente della relazione tra contenuto d'acqua e massima ritenzione potenziale	/	0.0 ÷ 0.4
β	coefficiente della relazione tra contenuto d'acqua e massima ritenzione potenziale	/	0.9 ÷ 1.5

Tabella 1.6 Parametri di calibrazione del MISD

Avendo a disposizione alcuni idrogrammi osservati, il coefficiente di diffusione, D , può essere espresso come:

$$D = \frac{1}{2B} \frac{\bar{Q}_p}{S_0}$$

(1.31)

dove \bar{Q}_p è il valore medio delle portate di picco degli eventi, B è la larghezza del canale nella sezione di riferimento ed S_0 è la pendenza media del canale.

Il valore della celerità può essere dedotto attraverso le caratteristiche geometriche dell'alveo ed il coefficiente di scabrezza di Manning.

Il parametro η può essere calibrato in modo accurato analizzando i tempi di risposta dei diversi sottobacini strumentati in modo da ottenere una realistica distribuzione spaziale di tale parametro.

In generale la calibrazione è stata svolta con un metodo automatico di ottimizzazione ('fmincon' function in MATLAB®). Come funzioni obiettivo sono state usate la massimizzazione del coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe NS, la minimizzazione del valore assoluto dell'errore percentuale sul picco idrometrico e del valore assoluto dell'errore percentuale sul volume dell'onda di piena. La figura 1.27 mostra i risultati ottenuti durante il periodo di calibrazione, in particolare la prima immagine mostra la pioggia osservata e il contenuto d'acqua del terreno simulato da MOBIS per i vari sottobacini, mentre la seconda mostra la portata osservata e simulata per gli eventi di piena considerati. I punti gialli identificano l'inizio degli eventi di piena. Gli indici delle performance del modello evidenziano l'accuratezza di MISDc; infatti NS è uguale all'88% e il valore assoluto dell'errore sulla portata al picco è inferiore all'8%, invece l'errore più alto sul volume dell'onda di piena, pari in valore assoluto, al 14.8%, è probabilmente legato alla rappresentazione semplificata della portata di base nel modello (L. Brocca et al., 2011).

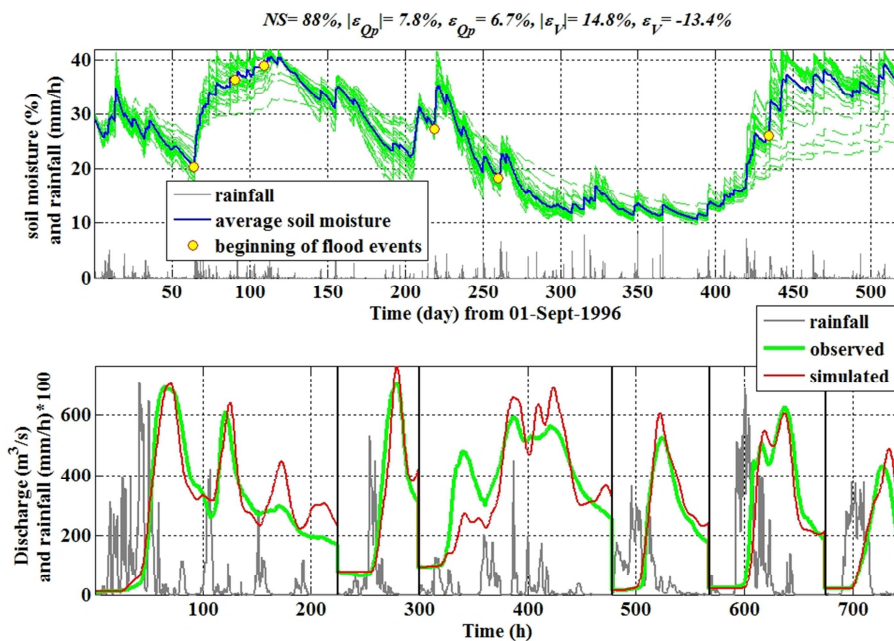


Figura 1.27 Risultati della calibrazione del modello MISDc alla sezione di Monte Molino nel periodo settembre 1996-febbraio 1998.

Il valore assunto dagli 11 parametri del MISDc è riportato nelle tabelle 1.7-1.13. I parametri α e β vengono considerati costanti e pari rispettivamente a 0.2 e 1.2. Si ricorda che i valori contenuti in param_MOBIS e param_MISD sono medi areali per ogni sottobacino e che i valori contenuti nel file CD sono relativi a ciascuna sezione dove si vuole conoscere la risposta del modello. Il bacino

del Fiume Tevere con sezione di chiusura a M. Molino, come già detto, è suddiviso in 32 sottobacini:

	numero sottobacino											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ψ/L	-0.15639	-0.16729	-0.19049	-0.19214	-0.18672	-0.23846	-0.20552	-0.17549	-0.1806	-0.17858	-0.17795	-0.17417
Ks infiltrazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
Ks percolazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
$3+2/\lambda$	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617
b	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Wmax	327.0747	305.7483	268.518	266.2171	273.9443	214.4979	248.8761	291.4762	283.2253	286.4334	287.4408	293.6734

Tabella 1.7 param_MOBIS

	numero sottobacino											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ψ/L	-0.2067	-0.23303	-0.19126	-0.15956	-0.18918	-0.18396	-0.18262	-0.19004	-0.12694	-0.19302	-0.22616	-0.22738
Ks infiltrazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
Ks percolazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
$3+2/\lambda$	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617
b	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Wmax	247.4636	219.4999	267.4357	320.5682	270.3745	278.0426	280.0832	269.1485	402.9571	264.9991	226.1681	224.9575

Tabella 1.8 param_MOBIS

	25	26	27	28	29	30	31	32
Ψ/L	-0.15578	-0.15284	-0.0849	-0.05132	-0.10849	-0.15599	-0.07338	-0.13897
Ks infiltrazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
Ks percolazione	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617	4.968617
$3+2/\lambda$	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617	76.65617
b	3	3	3	3	3	3	3	3
Wmax	328.3421	334.6663	602.4476	996.6341	471.4653	327.9003	697.0622	368.0689

Tabella 1.9 param_MOBIS

	numero sottobacino											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sr	433.8785	405.5881	356.2006	353.1483	363.3988	284.5405	330.1448	386.6555	375.7104	379.966	381.3024	389.5702
Ss	33.91074	31.69963	27.83964	27.60109	28.40223	22.23889	25.8032	30.21992	29.36447	29.69709	29.80153	30.44772
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
λ_1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 1.10 param_MISD

	numero sottobacino											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Sr	328.271	291.1759	354.7648	425.2474	358.6633	368.8353	371.5422	357.0369	534.5397	351.5325	300.0215	298.4156
Ss	25.65675	22.7575	27.72742	33.23615	28.03212	28.82714	29.0387	27.90501	41.77813	27.4748	23.44885	23.32333
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
λ_1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 1.11 param_MISD

	25	26	27	28	29	30	31	32
Sr	435.5598	443.9491	799.1723	1322.077	625.4188	434.9737	924.6827	488.259
Ss	34.04214	34.69782	62.46108	103.3299	48.88099	33.99633	72.27062	38.16096
η	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
λ_1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 1.12 param_MISD

	numero sezioni							
c	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
D	8	8	8	8	8	8	8	8

Tabella 1.13 CD

Per completezza si riportano anche il contenuto dei file BAS_par² e fixed_par³ relativi al bacino del F.Tevere con sezione di chiusura a M.Molino:

numero sottobacini	32
numero di sezioni intermedie su cui calcolare l'idrogramma in uscita	8
numero di afflussi da sezioni di monte	2

Tabella 1.14 BAS_par

area totale del bacino (km ²)	4465.69
passo calcolo MISD (ore)	0.2
intervallo temporale dati in ingresso	0.5
minimo tempo totale di calcolo MISD (ore)	100

Tabella 1.15 fixed_par

Il modello MISDc è stato validato considerando i due eventi di piena occorsi nel 2005 e nel 2008.

² contiene alcune caratteristiche principali relative alla struttura morfologica del modello semi-distribuito:

- numero di sottobacini
- numero di sezioni intermedie su cui calcolare l'idrogramma in uscita
- numero di afflussi da sezioni di monte

³ contiene alcuni parametri fissi relativi all'esecuzione del programma:

- riga 1: Area totale del bacino in km²
- riga 2: passo di calcolo del modello MISD in ore
- riga 3: intervallo temporale dei dati in ingresso in ore
- riga 4: minimo tempo totale di calcolo del modello MISD in ore

In figura 1.28 sono mostrate le portate osservate e simulate per la sezione di M.Molino e per quelle di S. Lucia, P. Felcino e P. Nuovo.

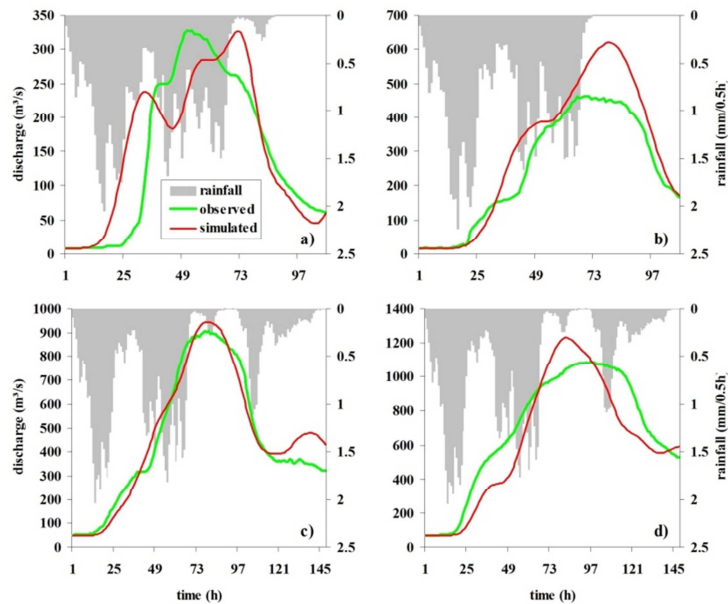


Figura 1.28 Portata osservata e simulata per l'evento di piena del dicembre 2008: (a) S. Lucia, (b) P. Felcino, (c) P. Nuovo, (d) M. Molino

Come si può vedere nella figura sopra riportata il modello è capace di riprodurre gli idrogrammi di portata degli eventi di piena considerati, i cui dati non sono stati usati nella calibrazione. Nello specifico il coefficiente NS è maggiore del 70% per tutte le sezioni.

In complesso quindi il modello MISDc si è dimostrato accurato nella simulazione di eventi di piena significativi. Nel presente studio è utilizzato il modello con i principali parametri di input precedentemente elencati e i suoi risultati sono valutati alla sezione di interesse, cioè a P. Felcino. La suddetta sottende 14 sottobacini.

1.2.3 Modelli HEC-HMS ed HEC-RAS

1.2.3.1 Il modello HEC-HMS

Il software libero HEC-HMS, Hydrologic Modeling System, è un modello idrologico messo a punto dall'Hydrologic Engineering Center dell' USACE (US Army Corps of Engineers) per l'esecuzione di modellazioni idrologiche sia di bacini idrografici che in ambito urbano. Al suo interno sono implementate le principali formulazioni utilizzate nella pratica idrologica per il calcolo delle perdite per infiltrazione e, quindi, del volume di run-off, per la trasformazione afflussi-deflussi con

possibilità di considerare anche il contributo del deflusso di base, per la propagazione dell'onda di piena nei canali, per la descrizione di invasi naturali o artificiali,... (USACE, 2000).

Tale software permette, quindi, di descrivere quantitativamente la trasformazione delle piogge in deflussi superficiali sulla superficie di un bacino imbrifero e in correnti idriche che confluiscono e si propagano lungo i suoi collettori drenanti.

Vengono di seguito presentate le diverse fasi di implementazione del software attraverso i seguenti passaggi procedurali:

- ❖ Definizione dei componenti del sistema idrografico
- ❖ Individuazione della metodologia di stima delle perdite di bacino
- ❖ Impostazione della trasformazione afflussi-deflussi
- ❖ Definizione dei parametri di propagazione dei deflussi
- ❖ Analisi meteorologica
- ❖ Trasformazione afflussi-deflussi
- ❖ Taratura dei parametri idrologici

Attraverso il modulo BASIN MODEL viene definita la caratterizzazione fisica del bacino idrografico. Ciascuno degli elementi idrologici che compongono il sistema in esame può essere definito compiutamente dal punto di vista fisico-morfologico e idrologico mediante uno specifico editor. Gli elementi idrologici simulabili sono: SUBBASIN (sottobacino), JUNCTION (confluenza), REACH (tratto di corso d'acqua), RESERVOIR (bacino di invaso o serbatoio), DIVERSION (scolmatore o diversivo), SOURCE (sorgente) e SINK (pozzo). Ciascun elemento viene connesso in una rete ad albero.

In ogni sottobacino i processi idrologici vengono modellati distinguendo tre fasi: le perdite iniziali, la trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi superficiali e il processo del deflusso sub-superficiale, o deflussi di base. Devono essere specificati i metodi di calcolo per ciascuna delle tre fasi sopra indicate (LOSS METHOD, TRANSFORM METHOD e BASEFLOW METHOD). Per quanto riguarda il calcolo delle perdite di bacino, il programma mette a disposizione 10 metodi, tra cui il metodo SCS-CN (v. pagine 37), utilizzato nel presente lavoro di tesi.

In base al metodo scelto è necessario specificare i parametri idrologici. Per il metodo SCS-CN è necessario specificare il coefficiente CN, le perdite iniziali (I_a) e la percentuale di impermeabilità.

Relativamente ai metodi di calcolo della trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi superficiali (che a partire dalla quota parte di precipitazione che effettivamente contribuisce alla formazione del deflusso superficiale, determinano il conseguente idrogramma), il codice di calcolo

consente di applicare sette diversi metodi. Quello utilizzato nel presente studio è il metodo del Soil Conservation Service-Unit Hydrograph (SCS-UH) che ha il pregio di essere di applicazione generale e di richiedere 1 solo parametro per la sua definizione: il tempo di ritardo (Lag). Esso rappresenta il tempo di risposta medio del bacino definito come lo sfasamento tra il centroide dello ietogramma di pioggia effettiva e quello dell'idrogramma di deflusso diretto (Singh, 1975; 1988). Inoltre possono essere computati i deflussi sub superficiali che contribuiscono alla formazione dei deflussi superficiali con 5 diversi metodi.

Quanto agli elementi di tipo REACH, essi simulano tratti di corsi d'acqua naturali o artificiali, i quali normalmente presentano uno o più idrogrammi in ingresso ed un idrogramma in uscita risultante dal processo di trasferimento a pelo libero ed eventuale laminazione all'interno dello stesso elemento. Per simulare la propagazione dei deflussi in tali elementi è possibile utilizzare sei diversi metodi. Nel presente lavoro il processo di routing lungo i canali è stato rappresentato attraverso il metodo Muskingum-Cunge. Esso richiede la geometria dei canali e i valori dei coefficienti di scabrezza.

Dopo aver inserito la geometria del bacino ed aver specificato i parametri per la modellazione dei processi idrologici, devono essere inseriti i dati di pioggia registrati dalle varie stazioni pluviometriche nel periodo in esame. Vengono assegnati opportuni coefficienti di peso al fine di interpolare spazialmente i dati di pioggia e determinare la pioggia nel centroide di ogni sottobacino. A tal fine il programma mette a disposizione vari metodi. Nel presente studio si è utilizzato il metodo Inverse Distance Weighting (IDW). Secondo tale metodo l'altezza di pioggia nel centroide di ogni sottobacino si calcola come una media pesata delle altezze di pioggia misurate nelle stazioni pluviometriche più vicine, adottando come peso per ciascuna delle altezze misurate l'inverso di una certa potenza (comunemente il quadrato) della distanza che intercorre tra il punto considerato e la stazione a cui si riferisce la misura. Chiaramente la scelta dei pesi si basa sull'assunzione che il legame tra le altezze di pioggia in due punti diversi sia tanto più forte quanto minore è la distanza tra loro. L'analisi meteorologica permette anche di stimare gli eventuali processi di evapotraspirazione e scioglimento del manto nevoso. Nel modello possono anche essere inseriti dati di portata o livelli noti, serie di temperature, velocità del vento, ecc.

La simulazione idrologica vera e propria viene quindi effettuata combinando il modello morfologico del bacino definito nel componente BASIN MODEL con i dati pluviometrici introdotti nel METEOROLOGICAL MODEL e con un'ulteriore variabile, che consiste nella definizione, tramite

il componente CONTROL SPECIFICATION, dell'intervallo di tempo per il quale effettuare la simulazione, nonché della discretizzazione temporale di calcolo.

I risultati delle simulazioni effettuate possono essere visualizzati sia tramite tabelle riassuntive che tramite grafici e serie numeriche complete dell'intero processo di formazione e trasferimento dei deflussi superficiali. In Figura 1.29 si possono vedere in forma grafica i risultati della simulazione:

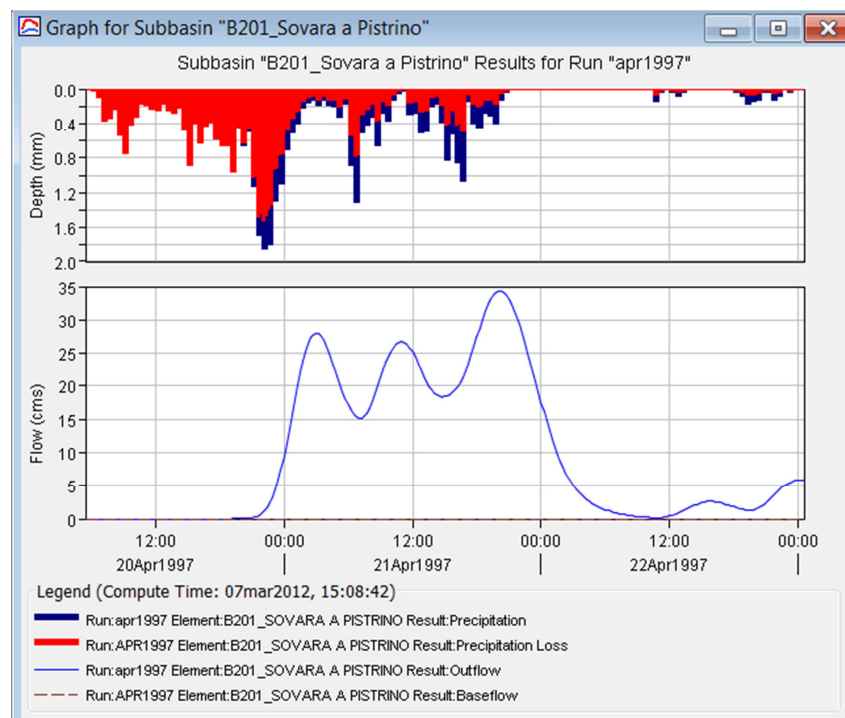


Figura 1.29 Risultati della simulazione di HEC-HMS. In alto sono presenti la pioggia totale in blu e quella effettiva considerata in rosso. In basso si vede l'idrogramma di portata restituito dal modello.

Una volta esaminati i risultati ottenuti dalla simulazione idrologica, è possibile procedere alla loro taratura. Tale processo può essere effettuato sia manualmente, andando ad agire sui singoli parametri caratteristici del reticolo idrografico in esame, sia applicando una procedura di ottimizzazione presente all'interno del codice di calcolo e accessibile tramite la funzione OPTIMIZATION MANAGER, basata sui valori di portata riferiti ad almeno un evento di riferimento rispetto al quale effettuare la taratura.

1.2.3.1.1 Applicazione del modello HEC-HMS presso il CFD

Il modello HEC-HMS è stato implementato presso il CFD per scopi di allertamento nei bacini del F. Tevere con sezione di chiusura a M. Molino ($A_b \approx 4466 \text{ km}^2$), nel bacino dei F. Chiani-Paglia alla sezione di chiusura di Orvieto Scalo sul F. Paglia ($A_b \approx 1275 \text{ km}^2$) e nel bacino del F. Nera alla sezione di chiusura di Torre Orsina ($A_b \approx 1360 \text{ km}^2$) (v. figure 1.30-1.32).

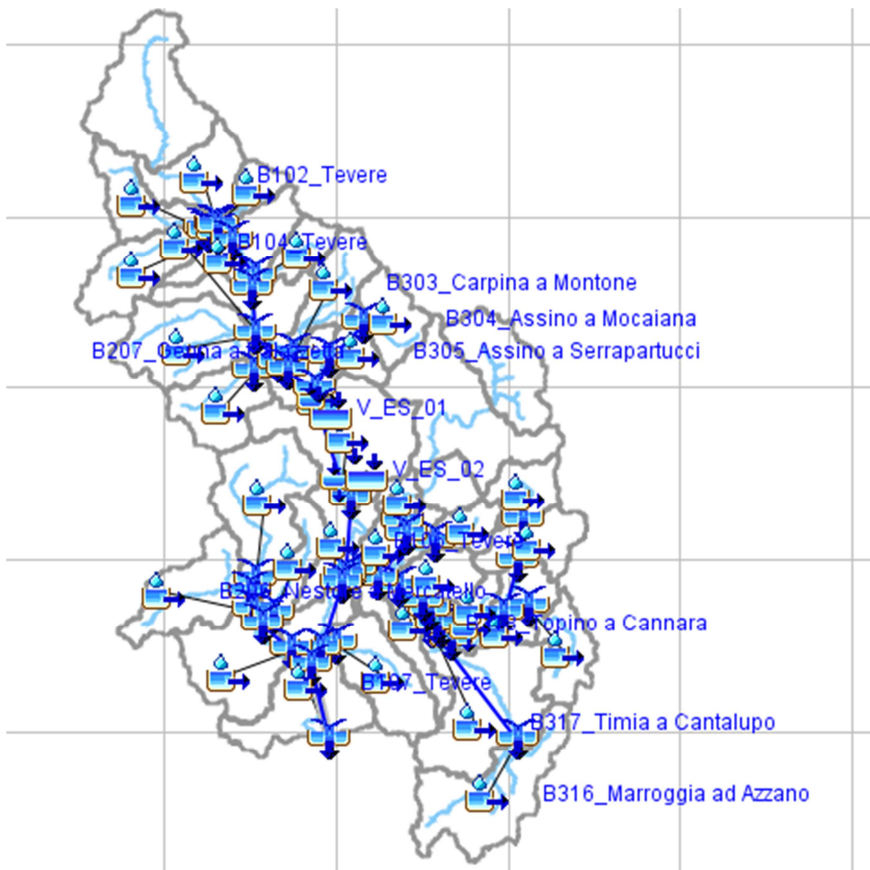


Figura 1.30 Schematizzazione del bacino del F. Tevere nel modello HEC-HMS

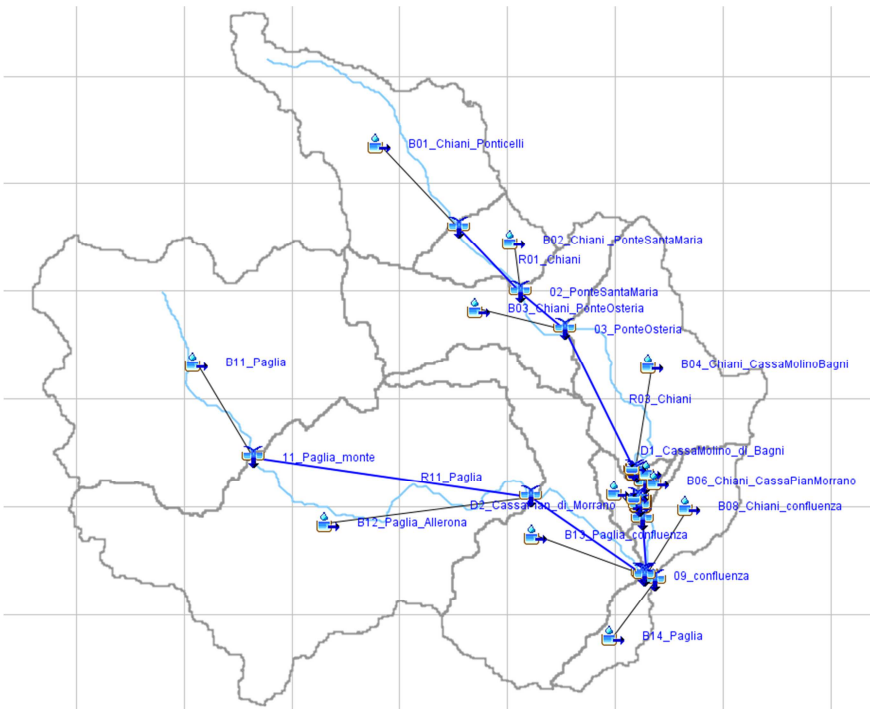


Figura 1.31 Schematizzazione del bacino dei F. Chiani-Paglia nel modello HEC-HMS

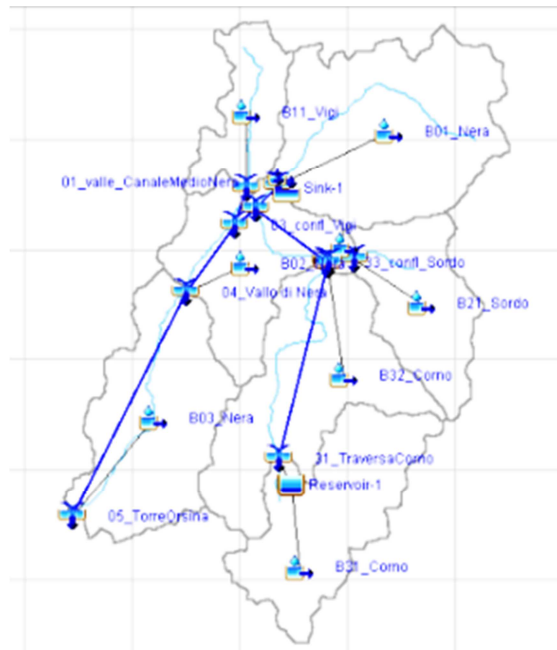


Figura 1.32 Schematizzazione del bacino del F. Nera nel modello HEC-HMS

1.2.3.1.2 Calibrazione del modello HEC-HMS

Ai fini del presente lavoro di tesi è stato considerato il modello idrologico del F. Tevere, ed in particolare i risultati del modello alla sezione idrometrica di Ponte Felcino. Di seguito viene descritta l'impostazione del modello utilizzato relativamente alla versione e la calibrazione dello stesso effettuata dal CFD.

Inizialmente è stata definita la geometria del bacino del F. Tevere, da inserire nel modulo BASIN MODEL. Per quanto riguarda l'individuazione dei sottobacini, sono stati utilizzati gli stessi criteri già precedentemente descritti per il modello MISDc; quindi, anche in questo caso, sono stati definiti 32 sottobacini di area non superiore ai 400 km², come da Direttiva P.C.M. 27 febbraio 2004, ma neanche inferiore ai 300 km², a meno di presenza sezioni idrometriche strumentate. Inoltre nel modello sono presenti 48 rami, 47 confluenze e 2 dighe. La rappresentazione del BASIN MODEL considerato è visibile in figura 1.30.

Una volta definita la geometria da utilizzare all'interno del modello sono stati calcolati tutti i parametri necessari, descritti al paragrafo 1.2.3.1:

- sottobacini
 - calcolo delle perdite con il metodo SCS-CN: per la definizione del Curve Number sono state utilizzate una carta geolitologica (scala 1:100.000) e la carta di uso del suolo sviluppata nell'ambito del progetto europeo CORINE – LAND COVER (scala 1:100.000). Per quanto riguarda l'influenza dello stato di umidità del suolo all'inizio dell'evento meteorico, il CFD

considerata sia AMC II che AMC III, quindi sia CN(II) che CN(III) (suolo caratterizzato da condizioni di umidità intermedie e suolo saturo) per ogni sottobacino. Inoltre viene utilizzato il valore di CN calcolato dal MOBIS. Nel presente studio è stata considerata una condizione media di umidità del suolo di ogni sottobacino all'inizio dell'evento meteorico (CN(II)).

Il valore di I_a è stato invece calcolato, come suggerito dall'SCS, come $I_a=0.2 S$.

La percentuale di impermeabilità del suolo è stata assunta uguale allo 0% per tutti i sottobacini.

I valori assunti dai parametri del metodo SCS-CN, nel presente lavoro di tesi, sono riportati nella seguente tabella:

Sottobacino	I_a (mm)	Curve Number	Impermeabilità(%)
B201_Sovara a Pistrino	20,7	71	0,0
B202_Cerfone a Lupo	21,8	70	0,0
B301_Selci	20,7	71	0,0
B102_Tevere	19,8	72	0,0
B302_Soara	18,8	73	0,0
B103_Tevere	19,8	72	0,0
B203_Neestore	21,8	70	0,0
B204_Niccione a Miglianella	19,8	72	0,0
B303_Carpina a Montone	18,8	73	0,0
B304_Assino a Mocaiana	16,9	75	0,0
B305_Assino a Serrapartucci	17,8	74	0,0
B104_Tevere	20,7	71	0,0
B105_Tevere	19,8	72	0,0
B316_Marroggia ad Azzano	21,8	70	0,0
B317_Timia a Cantalupo	19,8	72	0,0
B311_Caldognola a NoceraSc	16,9	75	0,0
B312_Topino a Valtopina	16,9	75	0,0
B313_Menotre a Pale	21,8	70	0,0
B314_Topino a Bevagna	17,8	74	0,0
B315_Budino	17,8	74	0,0
B318_Topino a Cannara	17,8	74	0,0
B319_Topino a Bettona	18,8	73	0,0
B310_Tescio a PonteSanVett	16,9	75	0,0
B309_Chiascio a Petrignano	16,0	76	0,0
B320_Chiascio a PteRosciano	17,8	74	0,0
B106_Tevere	16,9	75	0,0
B321_Puglia	16,9	75	0,0
B205_Caina a Monticelli	16,9	75	0,0
B206_Nestore a Mercatello	21,8	70	0,0
B207_Genna a Palazzetta	14,3	78	0,0

B208_Nestore a Marsciano	17,8	74	0,0
B107_Tevere	17,8	74	0,0

Tabella 1.16 Parametri del metodo SCS-CN

- calcolo della trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi superficiali fatto in riferimento all'idrogramma del Soil Conservation Service per tutti i sottobacini in esame (SCS-UH).

I valori del tempo di ritardo (Lag), immessi nel modello oggetto del presente studio, sono stati ricavati tramite un processo di taratura del modello, effettuato considerando più eventi di piena. Da questo si è deciso di considerare il tempo di ritardo medio tra quelli ricavati per i singoli eventi. Nella tabella 1.17 vengono mostrati i valori del lag ricavati per i singoli eventi ed il valor medio considerato.

Come tutti gli idrogrammi in cui la risposta idrologica è determinata da 1 solo parametro si possono avere degli effetti forma per cui l'idrogramma SCS non riesce a riprodurre adeguatamente la forma dell'idrogramma registrato. Per i bacini in esame in particolare si è sempre registrata una buona capacità di riprodurre il tratto sommitale di picco dell'idrogramma dei deflussi, ma in alcuni casi i rami ascendente (più raramente) e discendente (più frequentemente) presentano una ripidità tendenzialmente diversa rispetto agli idrogrammi registrati, dando luogo ad idrogrammi calcolati più "stretti" rispetto agli idrogrammi misurati. È importante sottolineare che, al fine di prevedere correttamente le varie fasi di allerta (attenzione, pre-allarme, allarme), che iniziano quando viene raggiunta la corrispondente soglia idrometrica, è utile avere un idrogramma previsto che riproduca in modo affidabile il ramo di risalita dell'idrogramma osservato.

Sottobacino	Evento 4-12-1998	Evento 15-12-1999	Evento 27-12-2000	Evento 14-12-1996	Evento 01-06-1997	Valori medi
	Lag (min)	Lag (min)	Lag (min)	Lag (min)	Lag (min)	Lag (min)
B102_Tevere	182	250	182	300	300	244
B103_Tevere	188	257	188	253	250	232
B104_Tevere	200	305	200	570	325	317
B105_Tevere	257	400	257	255	368	310
B106_Tevere	246	280	246	235	280	256
B107_Tevere	400	400	400	545	427	414
B201_Sovara a Pistrino	206	120	120	295	313	216
B202_Cerfone a Lupo	221	200	200	335	390	268
B203_Nèstore	190	190	190	205	285	225
B204_Niccone a Miglianella	281	308	308	312	245	284
B205_Caina a Monticelli	466.4	430	430	434	410	412

B206_Nestore a Mercatello	224.4	224.4	224.4	296	248	250
B207_Genna a Palazzetta	261.8	263	290	263	205	250
B208_Nestore a Marsciano	228.8	228.8	228.8	382	240	266
B301_Selci	152	152	152	152	152	157
B302_Soara	168	168	168	105	105	152
B303_Carpina a Montone	242	360	360	352	400	326
B304_Assino a Mocaiana	199	242	242	190	160	210
B305_Assino a Serrapartucci	119	154	154	108	108	139
B309_Chaiscio a Petignano	148	148	148	148	148	148
B310_Tescio a PonteSanVett	192	192	192	192	192	192
B311_Caldognola a NoceraSc	158	158	158	160	100	158
B312_Topino a Valtopina	171	160	171	440	170	225
B313_Menotre a Pale	234	190	234	234	172	216
B314_Topino a Bevagna	170	170	170	320	135	200
B315_Budino	123	123	123	123	123	131
B316_Marroggia ad Azzano	250	230	230	230	267	253
B317_Timia a Cantalupo	440	440	440	167	425	373
B318_Topino a Cannara	215	215	215	180	195	206
B319_Topino a Bettona	231	231	231	265	130	220
B320_Chiascio a PteRosciano	247	247	247	252	191	239
B321_Puglia	301	301	301	385	385	324

Tabella 1.17 Parametri del metodo SCS-UH

- calcolo dei deflussi sub superficiali : nel presente lavoro la portata di base è stata considerata nulla per ogni sottobacino poiché essa viene sommata nel modello HEC-RAS (vedi dopo).
- tratti di corsi d'acqua:
 - secondo il CFD umbro la modellazione della propagazione nei rami fluviali ha un'importanza inferiore sui risultati della modellazione rispetto alla corretta definizione degli afflussi od alla corretta scelta dei parametri di valutazione delle perdite e di trasformazione piogge nette - deflussi. Nel presente studio, come prima specificato, è stato considerato il metodo Muskingum-Cunge che richiede la geometria dei canali e i valori dei coefficienti di scabrezza. I valori dei coefficienti di Manning sono stati ricavati da una taratura del modello considerando un certo numero di eventi di piena. Tale processo di taratura è stato effettuato a partire da valori di letteratura in base alle caratteristiche dei tratti fluviali. In tabella 1.18 sono riportati, per ogni ramo fluviale, i valori dei coefficienti in funzione dell'evento considerato ed il valore medio degli stessi. Nelle simulazioni sono stati considerati i coefficienti di Manning medi.

Le analisi di sensitività effettuate hanno mostrato come la scelta dei parametri del metodo di Muskingum Cunge per rami fluviali di lunghezza maggiore (indicativamente superiore a 10 Km, con una attenzione maggiore per i tratti del Tevere di lunghezza superiore ai 20 Km) possa avere una certa influenza sia sui tempi di propagazione dei colmi di piena che sulla laminazione dell'idrogramma. E' soltanto su questi ultimi casi che si potrà concentrare la maggiore attenzione nella taratura in tempo reale del modello, infatti, i valori medi del coefficiente di scabrezza di Manning, riportati nella tabella seguente, per i tratti di lunghezza minore difficilmente avranno bisogno di essere variati nelle applicazioni future.

Reach	Length (m)	Evento 4-12-1998	Evento 15-12-1999	Evento 27-12-2000	Evento 14-12-1996	Evento 01-06-1997	Valori medi
		n Manning (s/m ^{1/3})	n Manning (s/m ^{1/3})	n Manning (s/m ^{1/3})	n Manning (s/m ^{1/3})	n Manning (s/m ^{1/3})	n Manning (s/m ^{1/3})
R100_Tevere	15361	0.035	0.035	0.035	0.050	0.050	0.041
R101_Tevere	100	0.035	0.035	0.035	0.050	0.050	0.041
R102_Tevere	3462.7	0.035	0.035	0.035	0.050	0.050	0.041
R103_Tevere	8149.7	0.035	0.035	0.035	0.075	0.050	0.046
R104_Tevere	2514.2	0.035	0.035	0.035	0.070	0.070	0.049
R105_Tevere	7904.2	0.025	0.025	0.025	0.080	0.080	0.047
R106_Tevere	9156.9	0.025	0.025	0.025	0.080	0.080	0.047
R107_Tevere	565.7	0.025	0.025	0.025	0.080	0.080	0.047
R108_Tevere	6566.9	0.025	0.025	0.025	0.080	0.060	0.043
R109_Tevere	3279.9	0.025	0.035	0.035	0.080	0.060	0.047
R110_Tevere	18955.1	0.025	0.030	0.035	0.085	0.100	0.055
R111_Tevere	19720.8	0.040	0.040	0.040	0.085	0.085	0.058
R112_Tevere	282.8	0.080	0.080	0.080	0.080	0.090	0.082
R113_Tevere	11439.7	0.080	0.080	0.080	0.085	0.097	0.084
R114_Tevere	3038.5	0.080	0.080	0.080	0.085	0.097	0.084
R115_Tevere	17056.6	0.090	0.090	0.090	0.085	0.120	0.095
R201_Sovara	524.3	0.035	0.035	0.035	0.035	0.060	0.040
R202_Cerfone	982.8	0.035	0.035	0.035	0.035	0.060	0.040
R203_Cerfone	3438.5	0.035	0.035	0.035	0.060	0.045	0.042
R204_Niccone	5152.7	0.035	0.035	0.035	0.030	0.030	0.033
R205_Caina	2107.1	0.035	0.035	0.035	0.065	0.045	0.043
R206_Genna	1631.4	0.035	0.035	0.035	0.065	0.065	0.047
R207_Nestore	3521.3	0.035	0.035	0.035	0.067	0.045	0.043
R208_Nestore	2972.8	0.035	0.035	0.035	0.075	0.040	0.044
R209_Nestore	9484.1	0.035	0.030	0.035	0.080	0.040	0.044
R210_Nestore	4104.2	0.035	0.035	0.035	0.085	0.085	0.055
R301_Carpina	1697.1	0.035	0.035	0.035	0.030	0.085	0.044
R302_Assino	8932.6	0.033	0.033	0.033	0.040	0.050	0.038
R303_Assino	6428.4	0.033	0.033	0.033	0.065	0.065	0.046
R306_Chiascio	8718.4	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
R307_Chiascio	4704.2	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035

R308_Tescio	4921.3	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
R309_Chiascio	8908.3	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
R310_Topino	6821.3	0.035	0.023	0.035	0.035	0.032	0.032
R311_Topino	9325.5	0.035	0.035	0.035	0.070	0.060	0.047
R312_Menotre	3989.9	0.035	0.035	0.035	0.070	0.070	0.049
R313_Topino	11195.3	0.035	0.035	0.035	0.070	0.065	0.048
R314_Topino	3228.4	0.035	0.035	0.035	0.075	0.030	0.042
R315_Budino	865.7	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
R316_Topino	2755.6	0.035	0.035	0.035	0.075	0.045	0.045
R317_Timia	25042.1	0.045	0.045	0.030	0.045	0.055	0.044
R318_Timia	3207.1	0.035	0.035	0.035	0.075	0.075	0.051
R319_Topino	1672.8	0.035	0.035	0.035	0.075	0.050	0.046
R320_Topino	7349.7	0.035	0.035	0.035	0.075	0.045	0.045
R321_Topino	1165.7	0.035	0.035	0.035	0.075	0.050	0.046
R322_Chiascio	4855.6	0.035	0.035	0.035	0.080	0.065	0.050
R323_Chiascio	1931.4	0.035	0.035	0.035	0.080	0.050	0.047
R324_Puglia	1207.1	0.035	0.035	0.035	0.075	0.075	0.051

Tabella 1.18 Valori del coefficiente di Manning per i singoli eventi di taratura e valori medi.

Per quanto riguarda il modulo METEOROLOGIC MODEL, nel presente studio, come già detto, è stato utilizzato il metodo IDW ed è stato specificato un raggio di ricerca dei pluviometri di 200 km. Sono state inserite le coordinate e il peso di tutti i centroidi dei sottobacini, in cui si è voluto calcolare la pioggia oltre alle coordinate ed ai dati di pioggia delle stazioni pluviometriche.

Nel modello utilizzato nel presente studio sono stati inseriti anche dati di portata noti in determinate sezioni.

Dopo aver descritto la calibrazione di HEC-HMS specifichiamo che il CFD al momento non ha effettuato nessuna validazione sui risultati forniti dal modello, che permetta di valutare l'affidabilità generale dello stesso.

1.2.3.2 Il modello HEC-RAS

HEC-RAS è un software sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineer (USACE) per l'analisi di reti di canali naturali ed artificiali attraverso il calcolo dei profili del pelo libero in condizioni di moto permanente e/o motovario monodimensionale. Il programma è in grado di effettuare l'analisi di più profili contemporaneamente, prevedendo la possibilità di inserire punti singolari (ponti, sottopassi, ecc.) e portate con vari tempi di ritorno, è possibile, inoltre, un loro confronto per sovrapposizione (es. stato attuale e modificato).

Il programma è attualmente il codice di simulazione monodimensionale più diffuso ed utilizzato per la risoluzione di una svariata serie di problemi e situazioni idrauliche.

Vengono di seguito descritte le principali parti del programma, con particolare attenzione a come creare i file di ingresso e dei parametri e come interpretare i risultati del modello stesso.

Innanzitutto deve essere introdotto lo schema della rete idrica da simulare. Questo, in prima approssimazione, avviene disegnando manualmente gli assi dei singoli rami. Inoltre, nonostante non sia necessario per lo svolgimento delle simulazioni idrauliche, è consigliabile inserire le coordinate effettive dell'asse dei vari rami. In seguito è necessario definire la localizzazione e le caratteristiche fisiche e geometriche delle singole sezioni trasversali. È possibile georeferenziare ciascuna sezione trasversale. Inoltre vengono inseriti, per ciascuna sezione, i coefficienti di scabrezza (coefficienti di Manning) e quelli di contrazione ed espansione. Il valore di scabrezza rappresenta una delle variabili da cui maggiormente dipende la risposta idraulica del corso d'acqua, e proprio per questo è estremamente importante per la buona riuscita della simulazione numerica. Per una prima stima del valore complessivo del coefficiente di scabrezza di Manning ci si può riferire a valori che tengano conto del ricoprimento vegetale e dell'uso del suolo, oltre che della conformazione generale della sezione trasversale. I coefficienti di contrazione ed espansione della sezione di deflusso caratterizzano il flusso tra due sezioni trasversali successive. Tali perdite di carico sono generalmente molto inferiori rispetto a quelle per attrito, governate dal coefficiente di scabrezza. Acquistano però maggiore importanza in caso di marcate variazioni della sezione di deflusso in tratti brevi, come avviene in corrispondenza di ponti o tombini.

Tramite il software è inoltre possibile procedere all'inserimento di ponti, tombini, strutture trasversali, strutture laterali, aree di laminazione ed impianti di sollevamento.

Per poter eseguire una simulazione in moto vario (caso considerato nel presente studio), oltre alla definizione delle caratteristiche fisiche del reticolo idrico e delle eventuali strutture presenti, è necessario specificare le condizioni al contorno di monte e/o di valle in funzione del tempo, definibili ad esempio come idrogrammi di portata o di livelli, come scale di deflusso o corrispondenti all'altezza di moto uniforme per ciascun valore di portata transitante ai diversi istanti temporali simulati. Inoltre devono essere definite le condizioni iniziali, come le portate iniziali per ciascun tratto e le eventuali quote di invaso iniziali per le aree di laminazione.

Una volta definite la geometria del corso d'acqua e le condizioni idrologiche di riferimento, è possibile effettuare la simulazione idrologica. HEC-RAS è capace di modellare condizioni di corrente lenta, veloce o mista, oltre a considerare, come già sottolineato, l'effetto di ponti, dighe, strutture. I principali parametri che influenzano la stabilità della simulazione sono la distanza tra le

sezioni trasversali, l'intervallo temporale di calcolo e una serie di parametri relativi alla modalità computazionale.

I risultati possono essere visualizzati graficamente per quanto riguarda il profilo longitudinale, le sezioni trasversali, le scale di deflusso, gli idrogrammi di portata e i livelli.

Gli idrogrammi di riferimento di cui ha bisogno HEC-RAS possono derivare da una procedura di calcolo di tipo afflussi-deflussi, e quindi possono venir forniti dal software HEC-HMS.

Di seguito viene brevemente descritta la teoria matematica alla base delle operazioni eseguite da HEC-RAS. Nel caso di moto vario monodimensionale, che è quello considerato nell'utilizzo di HEC-RAS® oggetto del presente studio, le portate e i livelli variano nello spazio e nel tempo e le variazioni di velocità in senso trasversale al canale e sulla verticale possono essere trascurate. Le equazioni che governano questo comportamento sono quelle di De Saint Venant. Le ipotesi alla base sono le seguenti:

- ❖ il flusso è mono-dimensionale, le grandezze che definiscono la corrente idrica sono funzioni continue del tempo t e della coordinata s , misurata lungo la linea di massima pendenza dell'alveo. Questo implica che su ogni sezione trasversale normale alla direzione della corrente la velocità è costante e la superficie libera è rappresentabile come un segmento orizzontale.
- ❖ Ci sono variazioni graduali di sezione e velocità nello spazio e nel tempo; pertanto le curvature delle linee di corrente risultano piccole e la corrente sostanzialmente cilindrica. Quindi la distribuzione delle pressioni p è di tipo idrostatico sulle singole sezioni trasversali.
- ❖ L'asse longitudinale del canale è approssimato da una retta.
- ❖ La pendenza del canale è piccola, quindi il coseno dell'angolo formato con l'orizzontale può essere assunto pari a 1 ed il tirante idrico verticale e la geometria del letto è fissata.
- ❖ Le leggi di resistenza del moto stazionario puramente turbolento sono applicabili nella descrizione degli effetti delle resistenze
- ❖ Il fluido è incomprimibile e a densità costante attraverso tutta la corrente

L'equazione di continuità per un tronco di corrente di lunghezza ds , nell'intervallo di tempo dt , ove scorre una portata Q , può essere scritta come segue:

$$\frac{\partial Q(s,t)}{\partial s} + \frac{\partial A(s,t)}{\partial t} = q(s,t) \quad (1.32)$$

in cui $Q=UA$ è la portata che transita attraverso la sezione trasversale di area A (U è la velocità media della corrente sulla sezione) e q rappresenta la somma degli afflussi/deflussi che entrano/escono nel/dal tronco di corrente considerato, in termini di portata per unità di lunghezza del canale. Questa equazione è valida per alvei non necessariamente prismatici.

L'equazione di una corrente lineare in moto vario viene ricavata scrivendo l'equazione di bilancio delle forze agenti sul volume di controllo e proiettandola poi lungo la direzione del canale. Dall'equazione globale dell'equilibrio dinamico si ottiene:

$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho v dW - \int v \rho (v \cdot n) d\Omega \quad (1.33)$$

in cui W rappresenta il volume di controllo di superficie laterale Ω , con versore normale entrante n , ρ è la densità del fluido, v è il vettore delle velocità locali della corrente, $\sum F$ è la risultante delle forze di massa e di superficie che agiscono sul fluido contenuto nel volume W . La (1.33) indica che la somma delle forze applicate alla massa racchiusa nel volume W è uguale al tasso di variazione nel tempo della quantità di moto immagazzinata in W più il flusso netto di quantità di moto attraverso la superficie laterale di controllo Ω . Ci sono in genere 5 forze agenti sul volume di controllo nella direzione del moto: la forza dovuta al peso dell'acqua contenuta nel volume di controllo (F_g), la forza resistente per attriti che si sviluppa lungo i contorni solidi del volume (F_f), la forza che si produce a seguito di improvvise variazioni di sezione (allargamenti e/o restringimenti) nel volume di controllo (F_e), le forze di superficie trasmesse attraverso la superficie libera (ad esempio l'azione del vento) (F_w), la forza di pressione (F_p). Considerando solo le forze F_g , F_f e F_p , con alcune semplificazioni, si ottiene:

$$\sum F = \rho g A \left(i - j - \frac{\partial h}{\partial s} \right) ds \quad (1.34)$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, i è la pendenza del fondo, j è la cadente piezometrica, h è l'altezza piezometrica.

Considerando opportune espressioni per i due termini di quantità di moto che compaiono al membro di destra nella (1.34) si ottiene l'equazione seguente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) - \beta v_s q + g A \left(\frac{\partial h}{\partial s} - i + j \right) = 0 \quad (1.35)$$

in cui β è il coefficiente correttivo dei flussi di quantità di moto e tiene conto della non uniforme distribuzione delle velocità su di una sezione trasversale del canale. In molte applicazioni si considera $\beta \sim 1$ (velocità locali quasi uniformemente distribuite sulla sezione trasversale A). v_s è la velocità media degli afflussi laterali q nella direzione ds .

Le equazioni (1.32) e (1.35) sono dunque le equazioni di De Saint Venant. Esso costituiscono un sistema alle derivate parziali che non possiede soluzioni analitiche e necessita quindi di metodi di integrazione numerica.

Il codice di calcolo HEC-RAS, durante le simulazioni in moto vario, integra il sistema completo delle equazioni di De Saint Venant con relative condizioni iniziali ed al contorno, usando un metodo alle differenze finite implicito. Esso fornisce quindi i profili di pelo libero della corrente.

Un esempio dell'output del programma è fornito nell'immagine seguente:

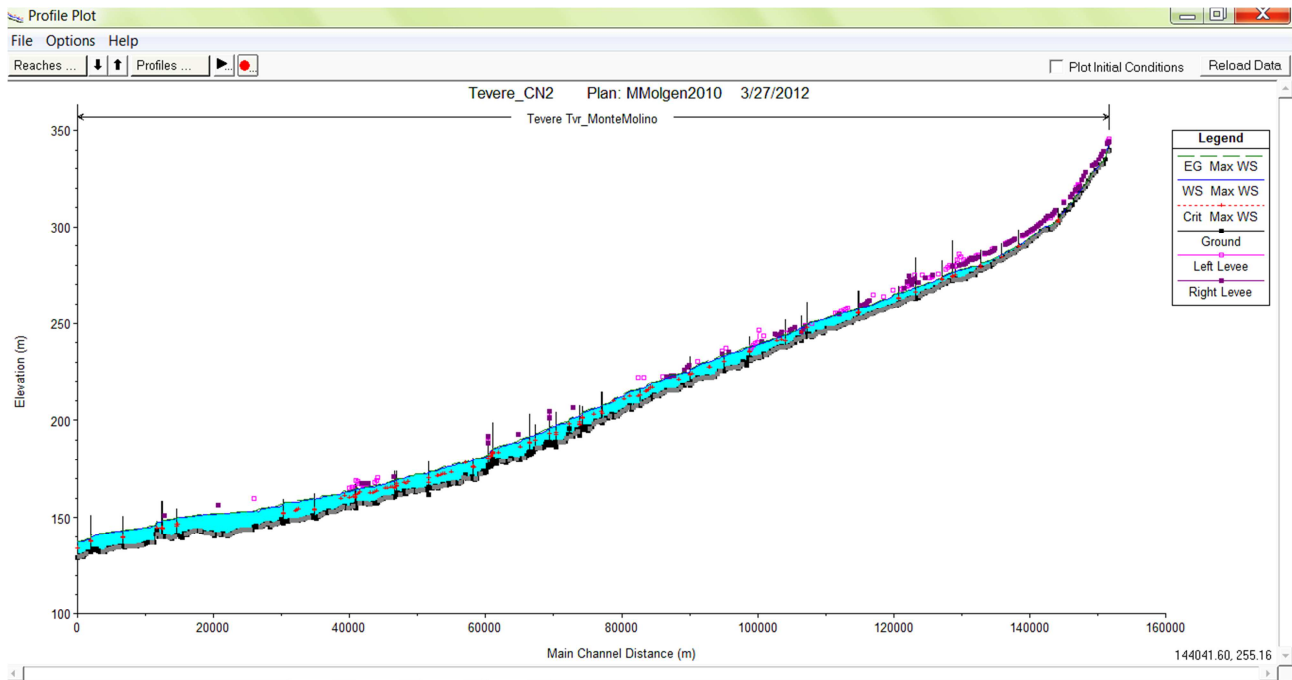


Figura 1.33 Profilo di corrente fornito da HEC-RAS®

1.2.3.2.1 Applicazione del modello HEC-RAS presso il CFD

Il modello HEC-RAS è stato implementato, accoppiato con il relativo modello idrologico, per il solo F. Tevere per il tratto compreso tra le sezioni idrometriche di Gorgabuia e di M. Molino per una lunghezza complessiva del tratto pari a 160 Km, circa 430 sezioni idrometriche a una distanza media di 300 m circa, oltre 40 strutture idrauliche (ponti, traverse, ...).

1.2.3.2.2 Calibrazione del modello HEC-RAS

Di seguito viene descritta l'impostazione del modello del F. Tevere utilizzato nel presente studio e la calibrazione dello stesso.

Premettiamo che nella realizzazione del modello si è ricercato un compromesso tra le tre primarie esigenze di accuratezza, stabilità e tempi di calcolo.

La geometria del modello è stata sviluppata a partire dalle sezioni trasversali utilizzate per gli studi realizzati per il PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) del F. Tevere, effettuati in condizioni di moto

permanente, di cui sono stati anche acquisiti i dati relativi alle resistenze al moto (coefficienti di scabrezza di Manning), che erano stati calibrati sulla base di eventi storici. La media dei coefficienti di Manning per il canale principale è circa $0.038 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ mentre la media dello stesso considerando entrambe le golene è circa $0.066 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$.

In generale per la calibrazione del modello si è provveduto a:

- analizzare il comportamento idraulico delle strutture in moto vario (ponti e strutture trasversali),
- effettuare operazioni di interpolazione delle sezioni per rendere il modello numericamente stabile in condizioni di moto vario per differenti scenari di portate,
- definire i parametri di calcolo numerico in modo tale da garantire flessibilità del modello per diversi scenari (sia basse che alte portate) ma anche tempi di calcolo compatibili con un'applicazione del modello stesso per l'allertamento in tempo reale.

La spaziatura delle sezioni e la definizione di sezioni interpolate a partire dalle sezioni base si è dimostrata un parametro importante principalmente per la stabilità di calcolo e solo secondariamente per i tempi di calcolo. Il modello geometrico finale adottato prevede una distanza massima tra le sezioni (interpolate od originali) pari a 350 m.

Nelle varie configurazioni testate, l'intervallo temporale di calcolo (computation interval) ottimale per un adeguato compromesso tra tempi di calcolo e stabilità del modello è risultato variabile tra 20 secondi e 3 minuti, per cui si è scelto un valore pari a un passo temporale di calcolo di 1 minuto.

Il numero massimo di iterazioni possibili nel calcolo è stato mantenuto pari al valore di default di HEC-RAS (20). Questo perché generalmente il modello ha presentato buona velocità di convergenza (in genere nei vari casi testati si ha convergenza del calcolo entro le prime 5 iterazioni). Nel caso in cui il modello raggiunga il numero massimo di 20 iterazioni l'incremento del maximum number of iterations non ha generalmente portato significativi benefici, ma soltanto incrementato i tempi di calcolo.

Mentre la definizione nelle condizioni al contorno spaziali (Boundary Conditions) degli afflussi laterali di tipo concentrato o distribuito non è fonte di particolari problemi per la stabilità del modello, la definizione delle condizioni iniziali (Initial Conditions) può essere invece causa di problemi di stabilità numerica se si inizia la simulazione con portate molto basse.

Il modello finale adottato presenta una buona stabilità anche per portate inferiori a $10 \text{ mc}/\text{sec}$. Naturalmente, visti gli scopi del modello, si è cercato comunque di ottenere una maggior stabilità del calcolo soprattutto per portate rilevanti, rappresentative di eventi estremi.

Dopo aver descritto la calibrazione del modello, è importante specificare che anche i risultati forniti da HEC-RAS non sono stati ancora sottoposti a validazioni che permettano di valutare l'affidabilità generale del modello.

1.3 Considerazioni finali

Dagli studi effettuati fino ad ora sui modelli è emerso che:

- ❖ Il modello STAFOM si è dimostrato abbastanza accurato nella previsione degli eventi di piena del periodo 2008-2009 (v. paragrafo 1.2.1.6);
- ❖ Il sistema modellistico MISDc è risultato abbastanza accurato nella previsione degli eventi di piena occorsi nel 2005 e nel 2008 (v. paragrafo 1.2.2.4).
- ❖ I modelli HEC-HMS ed HEC-RAS accoppiati non sono ancora stati sottoposti ad una verifica delle loro performance.

Nel presente studio (v. capitoli 2 e 3) si è quindi provveduto a:

- ❖ verificare le performance di STAFOM e MISDc su un periodo temporale più lungo rispetto a quello finora considerato. Ricordiamo infatti che, le validazioni svolte fino ad ora, si sono basate sui risultati forniti da STAFOM nel corso di 2 anni, in cui sono occorsi 4 eventi di piena e sulle previsioni di MISDc nel corso di 2 anni, in cui sono occorsi due eventi di piena.
- ❖ Analizzare l'attendibilità dei risultati forniti dall'uso accoppiato dei modelli HEC-HMS ed HEC-RAS.

Sono quindi stati considerati 20 anni, durante i quali sono occorsi 23 eventi di piena significativi nel territorio umbro, la cui simulazione tramite i modelli, ha permesso di valutarne l'accuratezza e di capire quindi quanto i modelli costituiscano degli strumenti di previsione utili.

Inoltre, sappiamo che i modelli, per i sopra descritti scopi di allertamento, sono stati calibrati per stimare correttamente il picco idrometrico. Nel presente lavoro, oltre ad un'ulteriore analisi delle performance degli stessi in relazione alla previsione del picco idrometrico ed alla riproduzione dell'idrogramma di piena, si analizzeranno le loro previsioni in relazione al raggiungimento della soglia di pre-allarme. Tale raggiungimento è molto importante poiché segna l'inizio della fase operativa nella gestione delle emergenze, come verrà spiegato nel terzo capitolo. Il fatto di avere delle previsioni verosimili in corrispondenza di questa soglia rappresenta quindi uno strumento efficace ai fini della messa in atto delle operazioni da svolgersi.

2 PICCO IDROMETRICO – PREVISIONI DEI MODELLI E VALUTAZIONE DELLE LORO PERFORMANCE

Al termine del capitolo precedente si è accennato alle analisi svolte al fine di provvedere ad un'ulteriore valutazione delle performance di STAFOM e MISDc ed ad una prima valutazione dei risultati forniti dai modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS in merito all'intero idrogramma previsto ed al picco idrometrico fornito. Inoltre è stata sottolineata l'importanza di una valutazione delle performance dei modelli anche in relazione alla previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme.

Nel presente capitolo viene descritta la valutazione delle performance effettuata sui modelli, con particolare riferimento alla capacità dei modelli di riprodurre l'intero idrogramma di piena e di prevedere correttamente i picchi idrometrici. La valutazione delle performance viene fatta tramite un'analisi di accuratezza ed un'analisi del valore delle previsioni.

Nel dettaglio, il capitolo è strutturato come segue:

- ❖ vengono ripresi i motivi che spingono ad effettuare una verifica delle performance dei modelli di previsione delle piene, vengono descritti gli indicatori abitualmente utilizzati nelle analisi di accuratezza e vengono specificati gli indicatori utilizzati nell'analisi di accuratezza svolta (paragrafo 2.1);
- ❖ vengono spiegati i criteri considerati per la scelta degli eventi di piena da simulare e vengono elencati tali eventi (paragrafo 2.2);
- ❖ vengono presentate le analisi di accuratezza effettuate:
 - ❖ sull'intero idrogramma simulato (paragrafo 2.3);
 - ❖ sulla previsione del picco idrometrico, tali analisi comprendono:
 - ❖ analisi dei picchi idrometrici previsti dai modelli (paragrafo 2.3.1);
 - ❖ analisi dei livelli idrometrici forniti dai modelli all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato (paragrafo 2.3.2);
 - ❖ analisi dei tempi di previsione dei picchi idrometrici (paragrafo 2.3.3);
 - ❖ conclusioni cui si è pervenuti al termine dell'analisi di accuratezza (paragrafo 2.3.4);
- ❖ viene spiegata la modalità di valutazione del valore delle previsioni (paragrafo 2.4), che viene calcolato per:
 - ❖ i picchi idrometrici previsti dai modelli (paragrafo 2.4.1);

- ❖ i livelli idrometrici forniti dai modelli all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato (paragrafo 2.4.2);
- ❖ vengono espone le conclusioni cui si è pervenuti al termine di tutte le analisi svolte (paragrafo 2.5).

2.1 L'analisi di accuratezza

I modelli idrologici/idraulici per la previsione delle piene, come quelli descritti al capitolo precedente, dovrebbero fornire un tempo sufficiente alla messa in opera di appropriate misure preventive ed eventuali azioni di evacuazione, al fine di limitare i possibili danni derivanti da eventi alluvionali. Come spiegato nel paragrafo 1.1 del capitolo precedente, i modelli in questione sono di tipo concettuale e semi-distribuito, quindi utilizzano delle relazioni semplificate per la descrizione dei processi fisici e sono basati su un livello intermedio di discretizzazione delle informazioni spaziali. Essi costituiscono quindi la semplificazione di un sistema complesso ed i risultati forniti dagli stessi sono incerti. L'affidabilità della portata/livello idrometrico stimato dai modelli è affetta da tre principali fonti di incertezza (Bates and Townley, 1988): l'incertezza connessa ai dati, che è molto difficile stabilire perché la grandezza degli errori di quest'ultimi è spesso sconosciuta, l'incertezza della struttura del modello (abilità del modello di descrivere la risposta del bacino) e l'incertezza dei parametri (valore adeguato dei parametri del modello). Le suddette incertezze portano ad avere previsioni che si discostano dalla realtà ed è molto importante valutare l'entità di tale discostamento. Per farlo viene svolta un'analisi delle performance dei modelli. Tradizionalmente la performance di un modello viene studiata tramite un'analisi di accuratezza, che permette di confrontare le variabili simulate ed osservate alla sezione di interesse. Per accuratezza di una previsione si intende infatti la corrispondenza tra previsioni ed osservazioni, la differenza tra il previsto e l'osservato è l'errore: l'accuratezza è tanto maggiore quanto minori sono gli errori (Murphy, 1993).

Vediamo come viene usualmente effettuata tali analisi. Di seguito viene fornita una tabella contenente gli indicatori di accuratezza più utilizzati (v. F.T. Andrews et al., 2011; Kolbjørn Engeland et al., 2010; Mukesh Kumar Tiwari et al., 2010; Murphy, 1993; X. Sun et al., 2000; Yves Tramblay et al., 2010). Si tenga presente che:

- ❖ O_i è l'i-esima grandezza osservata;
- ❖ P_i è l'i-esima grandezza prevista;

- ❖ n è la numerosità del campione che può essere identificata come il numero di istanti temporali di discretizzazione di un evento o come il numero di eventi di piena simulati;
- ❖ \bar{O} è la media delle osservazioni;
- ❖ \bar{P} è la media delle previsioni;
- ❖ x_i è il dato osservato o previsto e μ è la media dei dati osservati o previsti;
- ❖ T_p è l'istante temporale in cui viene prevista la grandezza;
- ❖ T_o è l'istante temporale in cui viene osservata la grandezza;

indicatore	nome	significato	possibili variazioni
$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Media dei dati	Fornisce il valore medio dei dati osservati o previsti considerando il numero totale degli eventi simulati	
$e_i = P_i - O_i$	Errore tra valori previsti e valori osservati	Permette di valutare quanto le previsioni si discostano dalle osservazioni considerando: <ul style="list-style-type: none"> tutti gli istanti temporali di un evento di piena più eventi di piena ed un determinato istante temporale (come il tempo di picco) per ogni evento 	<ul style="list-style-type: none"> espresso in valore assoluto espresso come errore relativo dividendo per O_i
$\Sigma = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)$	Somma degli errori	Permette di valutare l'errore totale tra previsioni ed osservazioni considerando: <ul style="list-style-type: none"> un singolo evento di piena più eventi di piena ed un determinato istante temporale (come il tempo di picco) per ogni evento 	espresso come somma degli errori relativi dividendo per $\sum_{i=1}^n O_i$
$\mu_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i$	Media degli errori	Permette di valutare l'errore medio tra osservazioni e previsioni considerando: <ul style="list-style-type: none"> un singolo evento di piena più eventi di piena ed un determinato istante temporale (come il tempo di picco) per ogni evento 	<ul style="list-style-type: none"> valore assoluto tra osservazioni e previsioni espresso come media relativa dividendo per $\sum_{i=1}^n O_i$
$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5}$	Radice dell'errore quadratico medio	Misura la grandezza media dell'errore tra osservazione e previsione, dando un peso maggiore agli errori più elevati. Può essere valutato considerando: <ul style="list-style-type: none"> un singolo evento di piena più eventi di piena ed un determinato istante temporale (come il tempo di picco) per ogni evento 	<ul style="list-style-type: none"> Può essere espresso in termini relativi come $\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2 \right]^{0.5}$
$\sigma = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \right]^{0.5}$	Deviazione standard	Indica la dispersione dei dati attorno al valore medio, x_i è il dato (valore osservato/previsto) e μ è la media dei dati	

$s = \frac{\bar{O}}{\bar{P}}$	Scostamento (Bias)	È il rapporto tra il valore medio previsto ed il valore medio osservato considerando: <ul style="list-style-type: none"> • un singolo evento di piena • più eventi di piena ed un determinato istante temporale (come il tempo di picco) per ogni evento 	
$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)^{0.5}}$	Coefficiente di correlazione	Assume valori compresi tra -1 ed 1: <p>$\rho > 0$: le due variabili si dicono correlate positivamente; $\rho = 0$: le due variabili si dicono incorrelate; $\rho < 0$: le due variabili si dicono correlate negativamente. In particolare: $0 < \rho < 0.3$ indica una correlazione debole; $0.3 < \rho < 0.7$ indica una correlazione moderata; $\rho > 0.7$ indica una correlazione forte.</p>	
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe	Assume valori tra $-\infty$ ed 1, l'idrogramma di piena viene riprodotto tanto più correttamente quanto più NS si avvicina ad 1.	Può essere calcolato il valor medio di NS sul numero totale di eventi di piena. Se compreso tra 0 ed 1 può essere espresso in termini percentuali.
$PTE = T_p - T_o$	Errore temporale (Peak Timing Error)	Indica quanto il massimo della grandezza prevista è stato anticipato o posticipato rispetto all'osservato	Espresso considerando l'errore assoluto tra i tempi
$\mu_{PTE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{P_i} - T_{O_i}$	Errore temporale medio	Indica l'errore medio, considerando il totale degli eventi di piena simulati, tra i tempi di previsione ed osservazione del picco della grandezza	Espresso considerando l'errore assoluto tra i tempi
$\sigma_{PTE} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (PTE_i - \mu_{PTE})^2 \right)^{0.5}$	Deviazione standard degli errori temporali	Indica la dispersione degli errori temporali intorno all'errore temporale medio	

Tabella 2.1 Indicatori di accuratezza

Nel presente lavoro di tesi è stata svolta un'analisi di accuratezza dei risultati dei modelli presentati al capitolo 1. Ricordiamo che sono stati analizzate le previsioni alla sezione idrometrica di P. Felcino del F. Tevere (v. capitolo 1). Si è scelto di considerare il livello idrometrico come grandezza di riferimento e di analizzare le previsioni dei modelli relativamente al picco idrometrico:

1. sono stati presi in considerazione i livelli idrometrici massimi previsti dai modelli ed osservati, per ciascun evento;
2. è stata analizzata la previsione fornita dai modelli all'istante temporale in cui è stato osservato il massimo livello idrometrico, per ogni evento;

per tutti gli eventi di piena simulati dai modelli sono stati dunque considerati i risultati nei suddetti punti e sono stati calcolati alcuni degli indicatori di accuratezza illustrati in tabella 2.1, mediando sul numero totale di eventi di piena. Tali indicatori sono:

- ❖ il coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe NS, per ogni evento simulato, e la media dello stesso sul numero totale di eventi simulati.
- ❖ l'errore tra valori previsti e valori osservati, e_i , per ogni evento;
- ❖ l'errore assoluto tra valori previsti e valori osservati, $|e_i|$, per ogni evento;
- ❖ la media μ_o dei valori osservati e la media μ_p dei valori previsti dai modelli considerando tutti gli eventi simulati;
- ❖ la deviazione standard σ_o dei valori osservati e dei valori previsti (σ_p) considerando tutti gli eventi simulati;
- ❖ la media degli errori tra previsioni ed osservazioni, μ_E , considerando il numero totale degli eventi;
- ❖ la media degli errori assoluti tra previsioni ed osservazioni, $|\mu_E|$, considerando il numero totale degli eventi;
- ❖ per ogni evento di piena è stato calcolato il rapporto tra l'errore assoluto tra il dato previsto ed il dato osservato, e_i , ed il dato osservato, quindi è stata fatta la media di questo rapporto considerando il totale degli eventi;
- ❖ per ogni evento di piena è stato calcolato il rapporto tra l'errore assoluto tra il dato previsto ed il dato osservato, e_i , ed il dato previsto, quindi è stata fatta la media di questo rapporto considerando il totale degli eventi;
- ❖ lo scostamento considerando il totale degli eventi;
- ❖ il coefficiente di correlazione;

- ❖ PTE per ogni evento;
- ❖ μ_{PTE} considerando tutti gli eventi di piena simulati;
- ❖ $|\mu_{PTE}|$ in valore assoluto considerando tutti gli eventi di piena simulati;
- ❖ La deviazione standard degli errori temporali, σ_{PTE} considerando tutti gli eventi di piena simulati.

2.2 L'analisi degli eventi passati

Per verificare le previsioni dei modelli di interesse è stata effettuata una back analysis identificando eventi di piena passati, che hanno prodotto o meno esondazione nel territorio umbro. I valori previsti derivano quindi da un utilizzo dei modelli in tempo differito.

La sezione idrometrica di interesse, cioè quella in cui sono stati rilevati i risultati forniti dai modelli, è, come già spiegato, quella di P. Felcino del F. Tevere (v. capitolo 1).

Le soglie di allerta, descritte al capitolo 1, assumono i seguenti valori in corrispondenza della sezione di Ponte Felcino:

- *soglia d'Attenzione*: 3.20 m;
- *soglia di Pre-Allarme*: 4.00 m;
- *soglia d'Allarme*: 4.40 m;

inoltre la soglia di esondazione è fissata a 5.60 m.

Gli eventi considerati sono stati scelti con i seguenti criteri:

- ❖ raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme (pari a 4 m);
- ❖ disponibilità di dati di pioggia e portata osservati.

Sono quindi stati rilevati 23 eventi, relativi al periodo 1990-2010, che identificano un intervallo temporale in cui è stato raggiunto un picco di livello idrometrico. Si è voluto scegliere solo gli eventi durante i quali è stata effettivamente raggiunta la soglia di pre-allarme per fare un'analisi anche in riferimento a tale soglia, come verrà descritto nel dettaglio nel terzo capitolo. Si sottolinea che, per i modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS, non sono stati considerati i risultati relativi al ventunesimo evento a causa della mancanza dei dati di input dell'evento.

Nella tabella seguente viene mostrato il set di eventi scelto:

numero evento	INIZIO EVENTO				FINE EVENTO			
	giorno	mese	anno	ora	giorno	mese	anno	ora
1	8	dicembre	1990	21:00	12	dicembre	1990	1:30
2	10	febbraio	1991	4:00	12	febbraio	1991	2:00
3	6	maggio	1991	4:00	8	maggio	1991	14:00
4	15	novembre	1991	7:30	17	novembre	1991	18:30
5	19	novembre	1991	4:30	23	novembre	1991	0:30
6	23	novembre	1991	22:30	25	novembre	1991	12:00
7	19	ottobre	1992	14:00	22	ottobre	1992	17:30
8	4	dicembre	1992	18:30	7	dicembre	1992	9:30
9	7	dicembre	1992	10:00	9	dicembre	1992	16:00
10	30	dicembre	1995	3:30	2	gennaio	1996	3:00
11	16	novembre	1996	11:30	20	novembre	1996	5:30
12	13	dicembre	1996	9:30	15	dicembre	1996	15:30
13	2	gennaio	1997	14:00	5	gennaio	1997	20:30
14	20	aprile	1997	5:30	23	aprile	1997	0:30
15	1	giugno	1997	2:30	4	giugno	1997	2:00
16	9	febbraio	1999	7:30	11	febbraio	1999	13:30
17	24	dicembre	2000	17:30	30	dicembre	2000	18:00
18	25	novembre	2005	9:30	28	novembre	2005	0:00
19	2	dicembre	2005	12:00	4	dicembre	2005	8:30
20	4	dicembre	2005	15:30	7	dicembre	2005	0:00
21	31	dicembre	2005	6:00	4	gennaio	2006	13:00
22	9	dicembre	2008	11:30	13	dicembre	2008	1:00
23	4	gennaio	2010	14:00	7	gennaio	2010	1:00

Tabella 2.2 *Eventi di piena*

Per l'intervallo temporale di ogni evento sono disponibili 4 dati:

- ❖ il livello idrometrico osservato;
- ❖ il livello idrometrico previsto da STAFOM;
- ❖ il livello idrometrico previsto dal MISDc;
- ❖ il livello idrometrico previsto dai modelli HEC-HMS ed HEC-RAS accoppiati.

Da una prima osservazione grafica dei risultati dei modelli (v. Appendice D) si è constatato che:

- ❖ i livelli idrometrici vengono generalmente sottostimati da tutti i modelli;
- ❖ generalmente STAFOM fornisce l'idrogramma che si avvicina maggiormente a quello osservato, mentre l'uso accoppiato dei modelli HEC-HMS ed HEC-RAS restituisce l'idrogramma che si discosta maggiormente dalla realtà;
- ❖ in molti casi gli idrogrammi forniti dai tre modelli presentano un andamento simile tra loro, seppure i livelli idrometrici restituiti siano diversi.

A titolo esemplificativo si mostrano di seguito alcuni grafici dei livelli idrometrici osservati e previsti dai tre modelli. Essi si riferiscono agli eventi di piena in cui è stata raggiunta la soglia idrometrica di esondazione. Si tenga presente che i modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS vengono indicati specificando solo il nome del modello idraulico.

Evento 2:

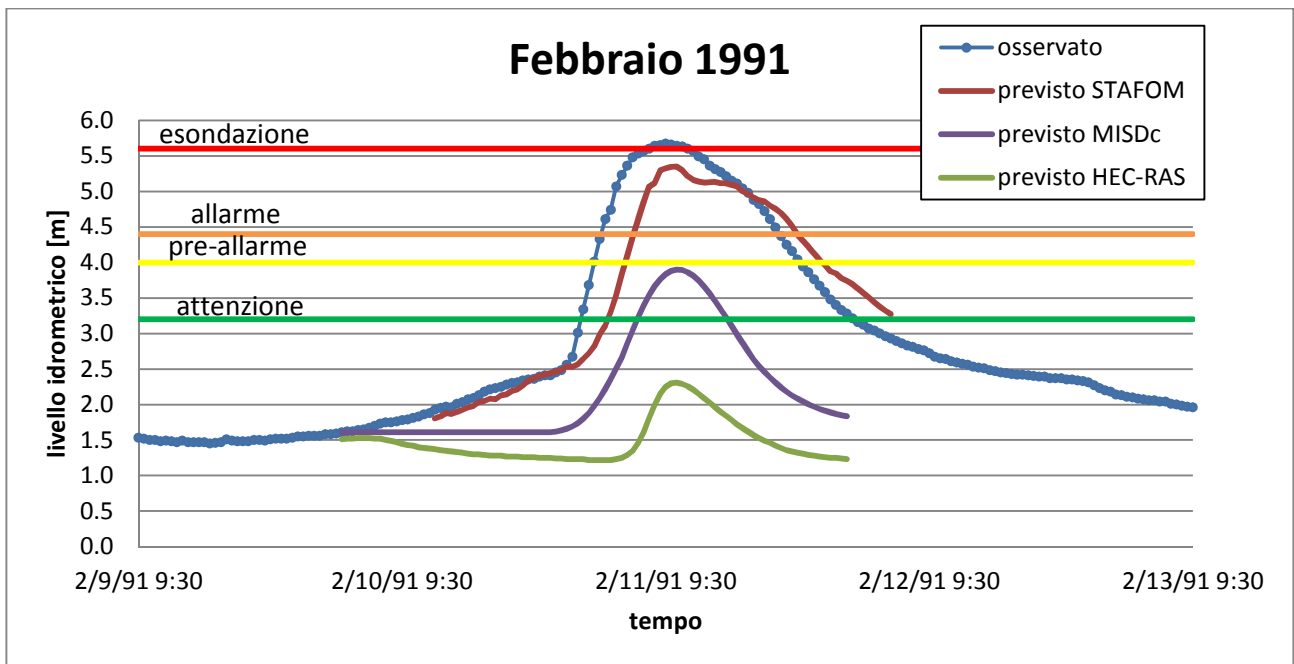


Figura 2.1 Livelli idrometrici osservati e previsti dai modelli - Febbraio 1991

Evento 18:

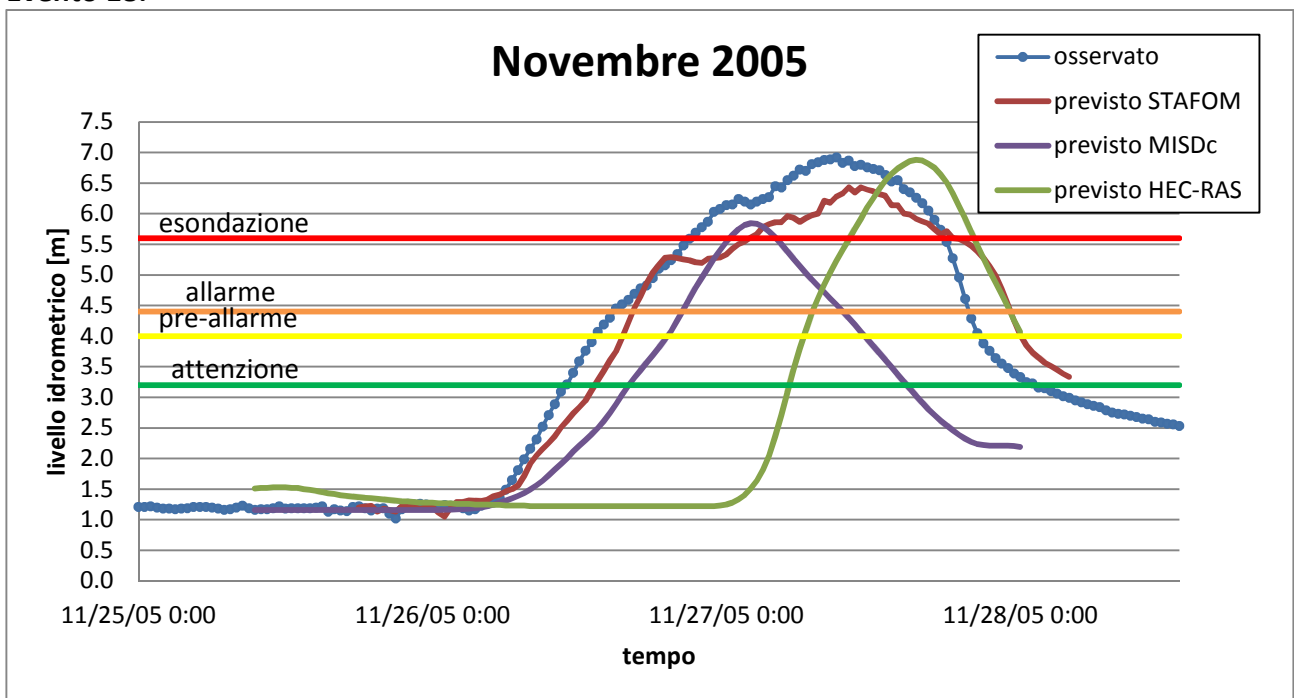


Figura 2.2 Livelli idrometrici osservati e previsti dai modelli - Novembre 2005

Evento 23:

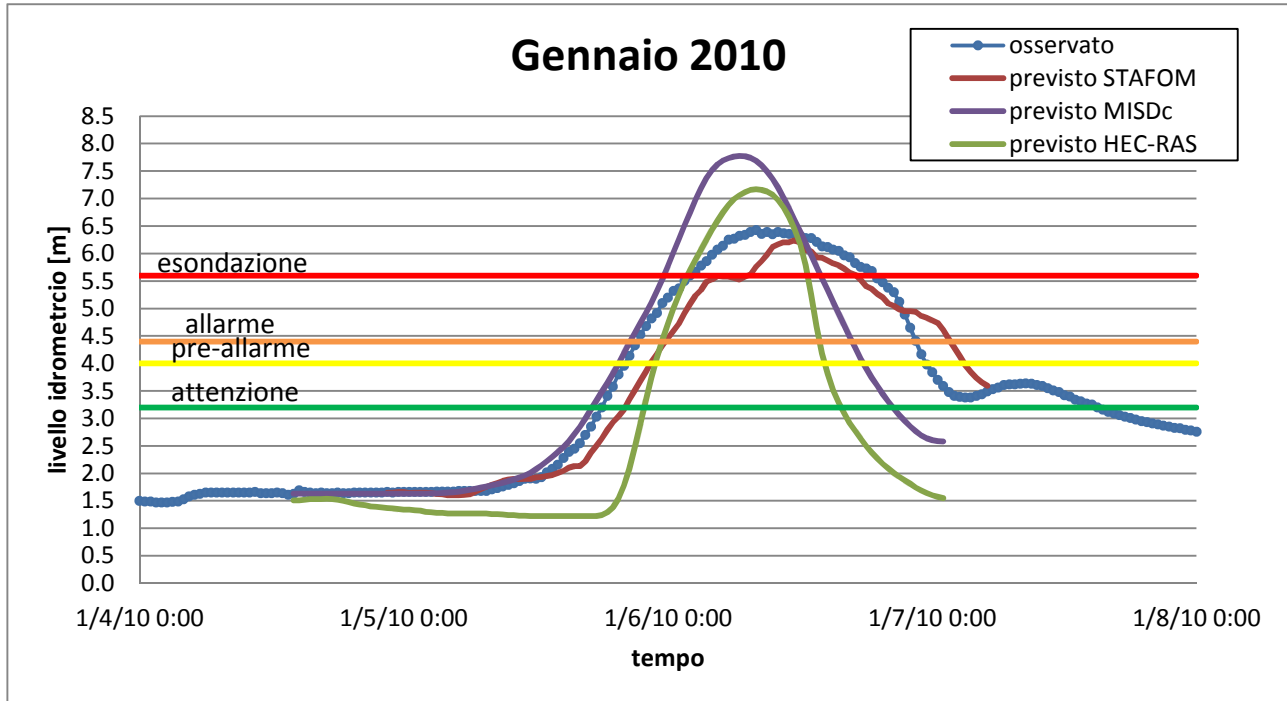


Figura 2.3 Livelli idrometrici osservati e previsti dai modelli - Gennaio 2010

Mentre durante gli eventi di piena del Novembre 2005 e Gennaio 2010 i tre modelli prevedono il superamento della soglia di esondazione, coerentemente a quanto realmente avvenuto, durante l'evento del Febbraio 1991 le tre previsioni non indicano lo stesso livello di allerta, infatti:

- ❖ HEC-RAS non prevede situazioni di allerta;
- ❖ MISDc prevede il superamento della soglia di attenzione;
- ❖ STAFOM prevede il superamento della soglia di allarme;

nella realtà è stata invece superata la soglia di esondazione. È quindi importante svolgere un'analisi di accuratezza per valutare le performance dei modelli, che, in casi come quello appena descritto, possono fornire risultati discordanti, al fine di supportare le decisioni prese da coloro che utilizzano le previsioni dei modelli al fine di gestire le situazioni di rischio idraulico.

2.3 La valutazione dell'accuratezza

Di seguito viene illustrata l'analisi di accuratezza svolta sui risultati forniti dai modelli in relazione al picco idrometrico.

Innanzitutto sono stati calcolati i coefficienti di efficienza di Nash-Sutcliffe delle previsioni di STAFOM, MISDc, HEC-HMS ed HEC-RAS per ogni evento. Essi sono riportati in tabella 2.3 e nel grafico 2.4 (fino ad un valore minimo pari a -1 per rendere comprensibile il grafico) in funzione del numero dell'evento.

numero evento	coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe		
	STAFOM	MISDc	HEC-RAS
1	0.92	0.43	0.57
2	0.84	-0.05	-1.64
3	0.87	-0.02	-7.54
4	0.91	0.85	0.71
5	0.93	0.53	-0.21
6	0.86	0.33	-2.13
7	0.74	0.74	-0.50
8	0.95	0.50	-0.27
9	0.85	0.38	-6.88
10	0.96	0.75	0.33
11	0.91	0.94	0.23
12	0.89	0.44	-0.46
13	0.79	0.73	-32.81
14	0.93	0.84	0.75
15	0.87	0.81	0.19
16	0.94	0.62	0.39
17	0.89	0.74	0.49
18	0.93	0.54	-0.06
19	0.76	0.89	-4.96
20	0.92	0.96	-5.47
21	0.97	0.70	no dati
22	0.91	0.89	0.73
23	0.93	0.79	0.42

Tabella 2.3 NS per ogni evento e modello considerato

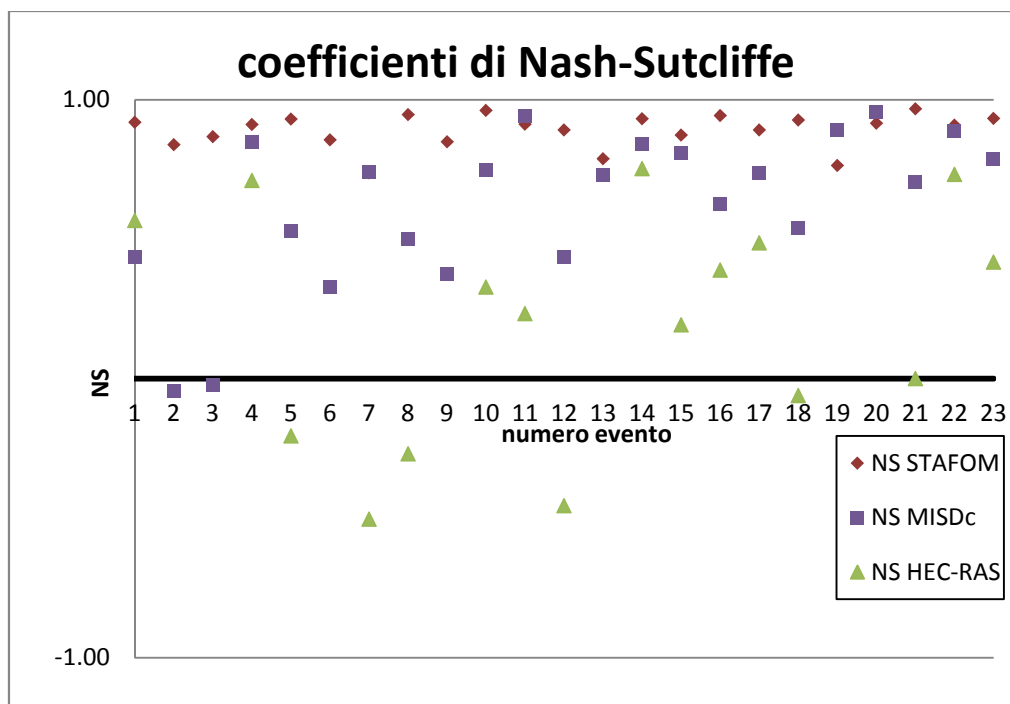


Figura 2.4 NS (da un minimo di -1) per ogni evento e modello considerato. Non vengono riportati i valori dei coefficienti NS delle simulazioni di HEC-RAS degli eventi 2, 3, 6, 9, 13, 19, 20 che assumono valori inferiori a -1 e pari rispettivamente a -1.64, -7.54, -2.13, -6.88, -32.81, -4.96, -5.47.

Si osserva che:

- ❖ STAFOM fornisce sempre dei valori positivi del coefficiente, il cui valor medio, considerando il numero totale degli eventi di piena, è superiore al 70%, ed è pari a 0.89. Questo, secondo il CFD, indica una buona corrispondenza tra l'idrogramma previsto e quello osservato.
- ❖ MISDc fornisce dei valori positivi per 21 casi su 23 ed il valore di NS nei casi in cui è negativo è molto piccolo. In questo caso NS medio è pari a 0.62, il che, secondo il CFD, indica una riproduzione abbastanza buona dell'idrogramma.
- ❖ Dalle previsioni fornite da HEC-RAS, invece, si rilevano NS negativi per 12 casi su 22 e, per il tredicesimo evento, tale coefficiente assume il valore di -32.81, il che indica che il modello non ha fornito un buon idrogramma. Il valore medio di NS è pari a -2.64 ed indica quindi che gli idrogrammi non vengono riprodotti in modo accurato dal modello. Il raggiungimento delle varie soglie di allerta ed in particolare di quella di pre-allarme, a cui, come anticipato nelle conclusioni del primo capitolo, siamo interessati, non viene dunque previsto correttamente da HEC-RAS. Questo causa dei problemi nella pianificazione degli interventi necessari a limitare gli eventuali danni prodotti dall'innalzamento del livello d'acqua, come si vedrà più nel dettaglio nel terzo capitolo.

2.3.1 Picchi di livello idrometrico osservati e previsti dai modelli

In seguito, come specificato al paragrafo 2.1, è stato considerato il picco idrometrico osservato e quello previsto dai modelli. I risultati sono riportati nella tabella seguente:

numero evento	anno	PICCO OSSERVATO [m]	ESONDAZIONE	PICCO PREVISTO STAFOM [m]	h PREVISTO MISDc [m]	h PREVISTO HEC-RAS [m]
1	1990	4.47	no	4.98	3.30	3.87
2	1991	5.67	si	5.35	3.90	2.31
3	1991	4.10	no	3.97	3.14	1.93
4	1991	4.56	no	5.15	3.89	4.27
5	1991	4.74	no	4.65	4.12	4.46
6	1991	4.62	no	4.88	4.09	1.72
7	1992	4.11	no	4.17	3.89	3.01
8	1992	5.01	no	4.96	4.03	4.40
9	1992	5.12	no	5.43	4.22	2.44
10	1995	4.77	no	5.17	3.78	4.56
11	1996	4.49	no	5.10	4.71	6.93

12	1996	4.22	no	4.12	3.31	2.60
13	1997	4.11	no	3.95	3.80	2.09
14	1997	4.57	no	5.00	3.94	4.52
15	1997	4.64	no	5.25	4.92	6.66
16	1999	4.52	no	4.85	3.44	3.00
17	2000	5.25	no	5.49	5.90	6.76
18	2005	6.92	si	6.43	5.85	6.88
19	2005	4.42	no	4.34	4.05	1.63
20	2005	4.76	no	4.51	5.15	1.96
21	2006	4.34	no	4.33	3.86	no dati
22	2008	4.98	no	5.08	4.75	4.84
23	2010	6.43	si	6.24	7.77	7.17

Tabella 2.4 *Analisi sugli eventi passati: picchi di livello idrometrico osservati e previsti. In verde sono evidenziati i picchi idrometrici previsti che si discostano da quelli osservati di un valore massimo in termini assoluti pari al 10% del livello idrico osservato.*

Osservando le previsioni riportate si nota che la maggior parte dei picchi di livello idrometrico vengono sottostimati.

Tale tendenza è confermata anche dal confronto grafico tra i livelli idrometrici previsti ed osservati, riportati nelle figure 2.5-2.7, nonché dalle figure 2.8-2.10, che mostrano l'errore di previsione sulle ordinate e il livello previsto sulle ascisse e dalle figure 2.11-2.13 che mostrano l'errore di previsione sulle ordinate e il livello osservato sulle ascisse. Infine la tabella 2.5 riporta i valori delle misure di accuratezza effettuate, illustrate al paragrafo 2.1.

Dalle figure 2.5-2.7 emerge una forte correlazione tra le osservazioni e le previsioni fornite da STAFOM e MISDc ed una correlazione moderata tra le osservazioni e le previsioni di HEC-RAS (v. tabella 2.1).

Guardando i grafici si nota che STAFOM tende a sovrastimare ed a sottostimare il picco per circa lo stesso numero di eventi. Con esattezza, infatti, il modello sottostima in 11 casi su 23 e sovrastima in 12 casi su 23. MISDc ed HEC-RAS tendono invece a sottostimare il picco idrometrico per la maggior parte degli eventi.

Più nel dettaglio, STAFOM ha commesso un errore assoluto inferiore al 10% del picco osservato per 19 eventi su 23, il cui picco previsto è evidenziato in verde in tabella 2.4. MISDc presenta degli errori assoluti tra picco idrometrico previsto e picco idrometrico osservato, inferiori al 10% del picco osservato, in 7 casi su 23, i cui picchi idrometrici previsti sono evidenziati in verde in tabella 2.4, ed infine HEC-RAS ha fornito solo 6 simulazioni su 22 con errore assoluto al picco inferiore al 10% del picco idrometrico osservato (i picchi previsti sono evidenziati in verde in tabella 2.4).

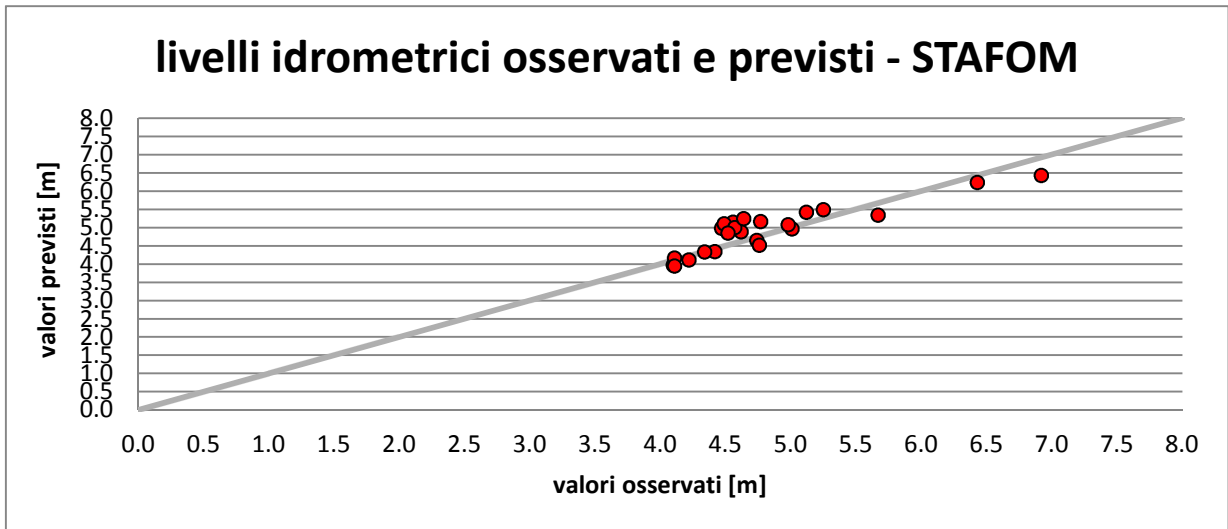


Figura 2.5 Picchi idrometrici previsti da STAFOM rispetto ai picchi idrometrici osservati

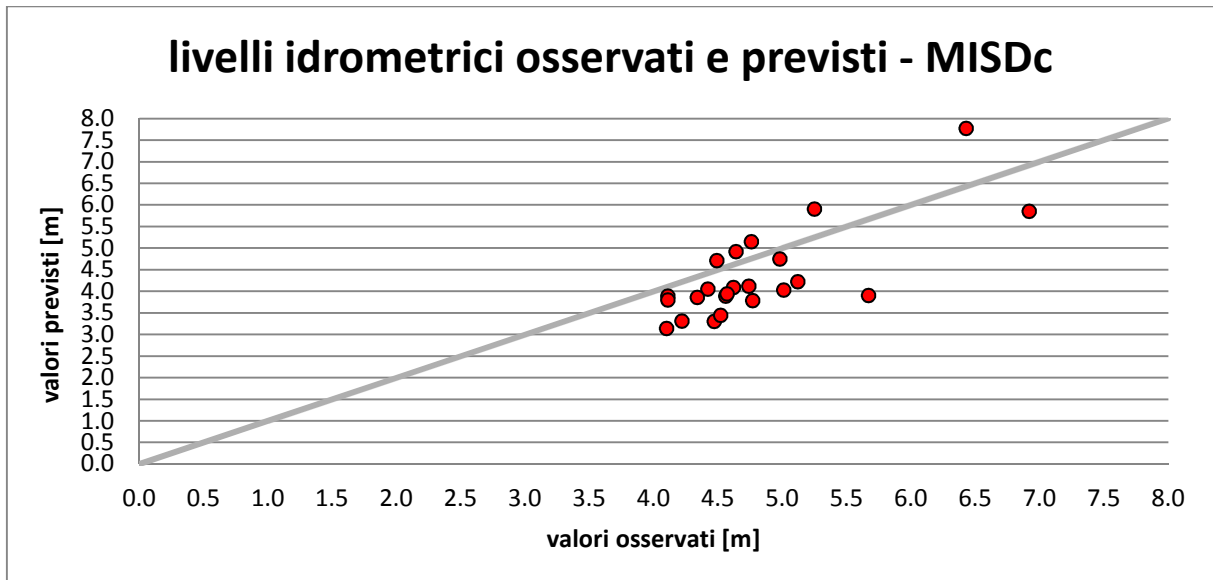


Figura 2.6 Picchi idrometrici previsti dal MISDc rispetto ai picchi idrometrici osservati

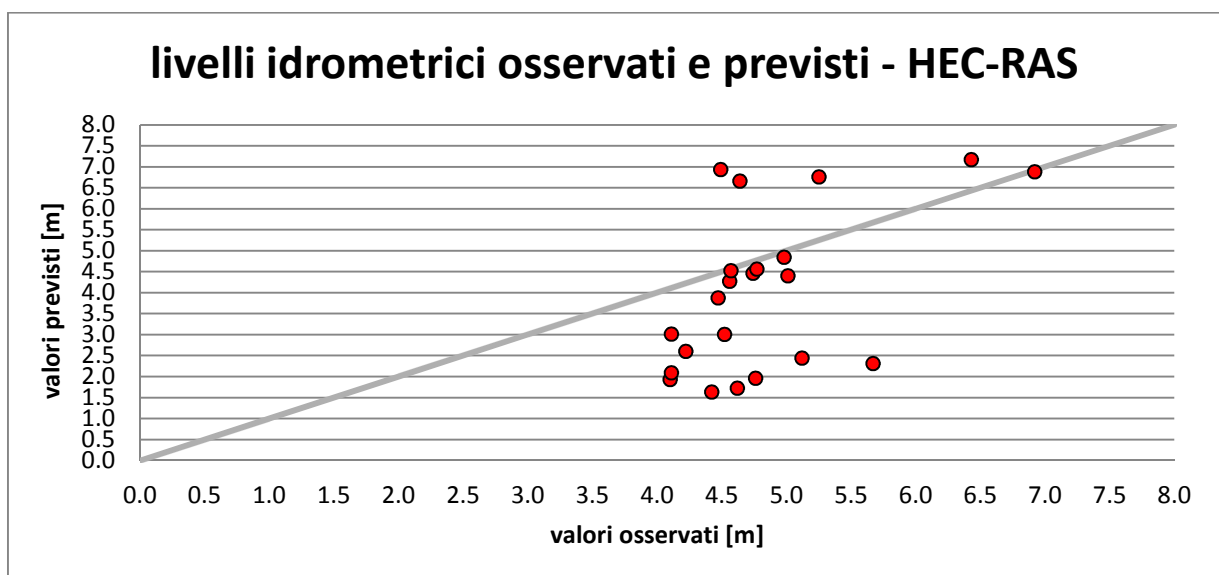


Figura 2.7 Picchi idrometrici previsti da HEC-RAS rispetto ai picchi idrometrici osservati

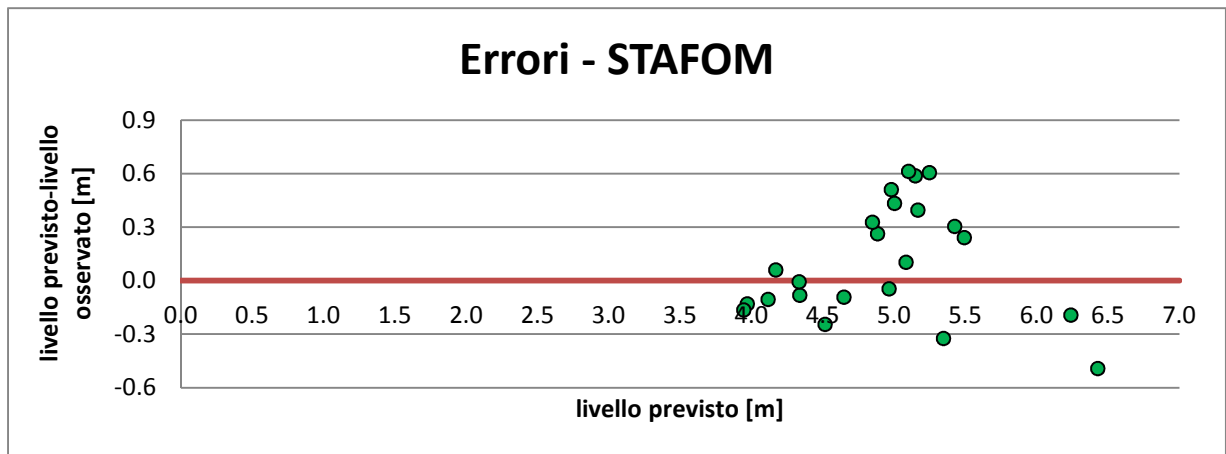


Figura 2.8 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: STAFOM

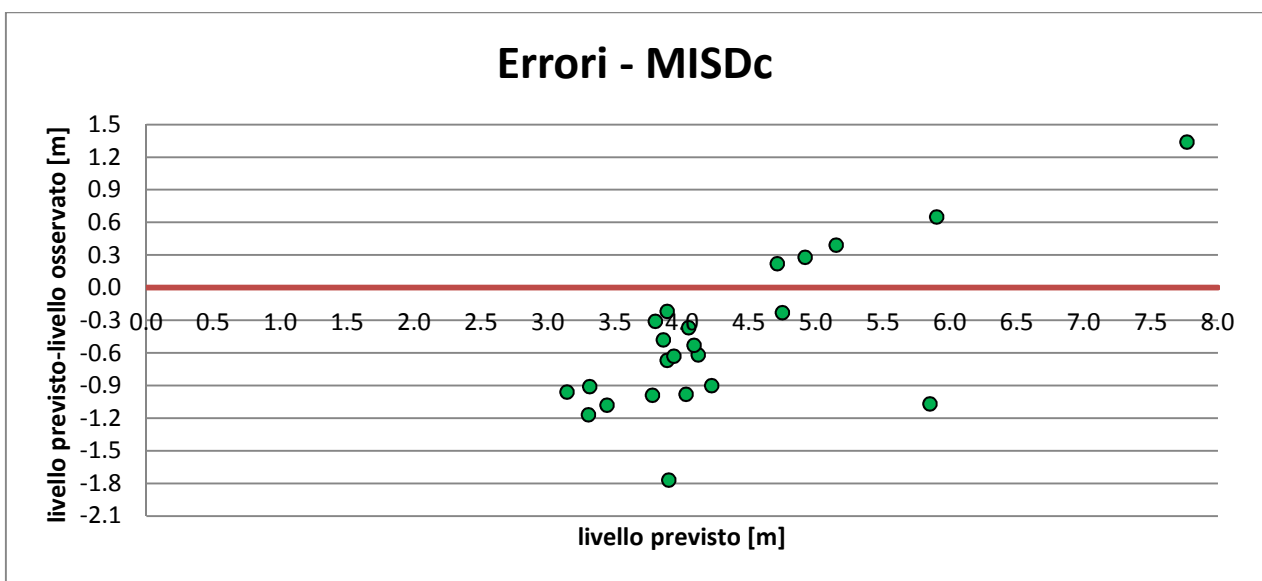


Figura 2.9 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: MISDc

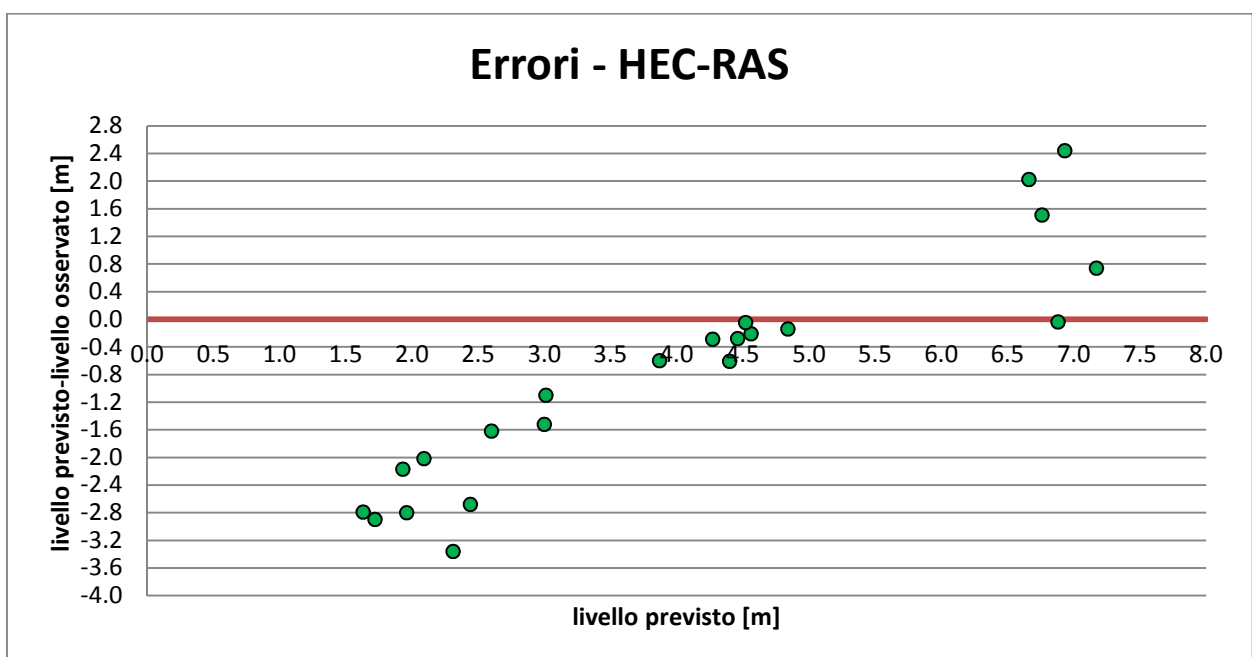


Figura 2.10 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: HEC-RAS

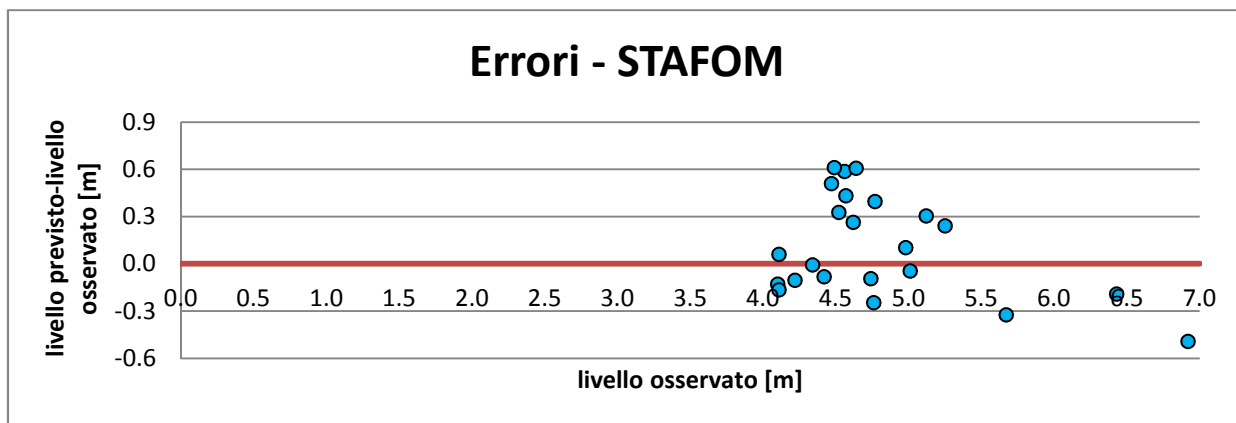


Figura 2.11 Errori rispetto al livello idrometrico osservato: STAFOM

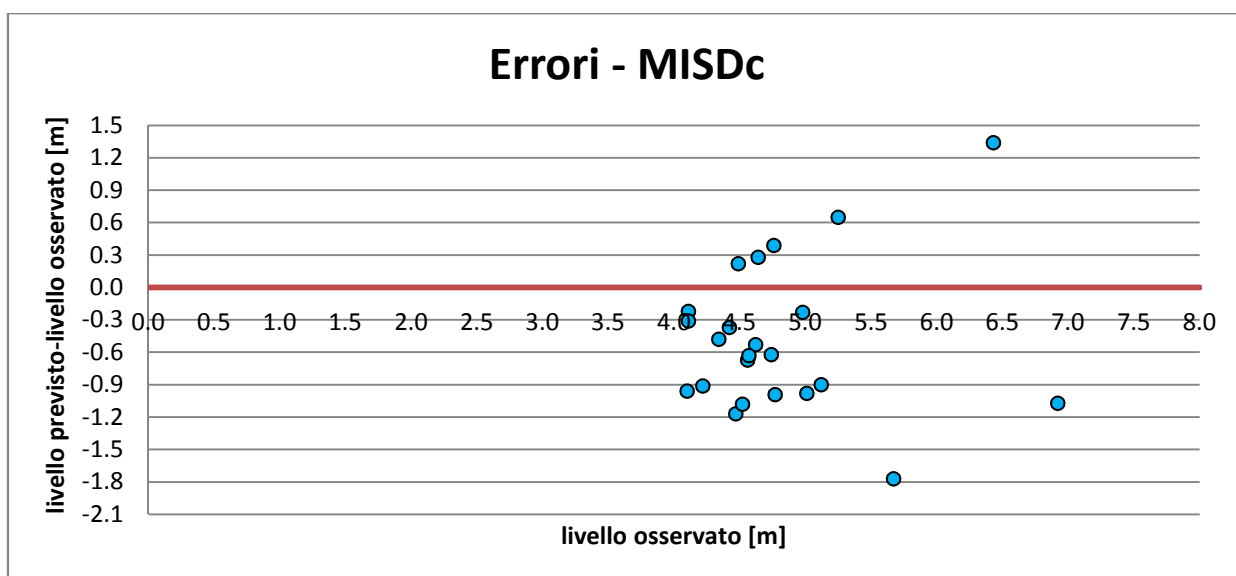


Figura 2.12 Errori rispetto al livello idrometrico osservato: MISD

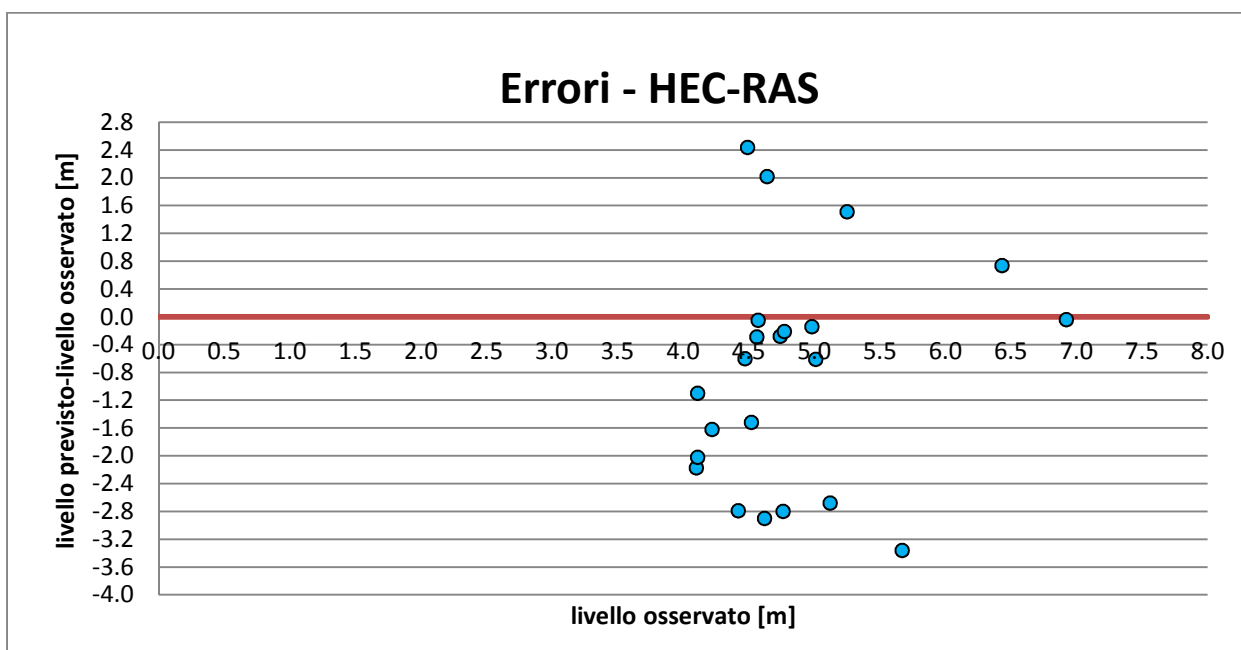


Figura 2.13 Errori rispetto al livello idrometrico osservato: HEC-RAS

Misura	simbolo	osservato (di STAFOM e MISDc)	osservato (di HEC-RAS)	STAFOM	MISDc	HEC-RAS
media	μ	4.82	4.84	4.93	4.34	4.00
deviazione standard	σ	0.70	0.71	0.64	1.05	1.90
media errori	μ_E			0.11	-0.48	-0.84
media errore assoluto	$ \mu_E $			0.27	0.73	1.45
media di (errore assoluto/dati osservati)	$\mu(e^* /O_i)$			0.06	0.15	0.31
media di (errore assoluto/dati previsti)	$\mu(e^* /P_i)$			0.05	0.18	0.57
scostamento	s			1.02	0.90	0.83
coefficiente di correlazione	ρ			0.89	0.75	0.54

Tabella 2.5 Misure di accuratezza

Il range di errori di STAFOM va da un minimo di circa -0.50 metri ad un massimo di circa +0.60 metri rispetto al picco osservato, con un errore assoluto medio di 0.27 metri. Per MISDc gli errori vanno all'incirca da -1.80 metri a +1.40 metri rispetto al picco osservato e si ha un errore assoluto medio di 0.73 metri. Infine per HEC-RAS tale intervallo è più ampio e va approssimativamente da -3.50 metri a +2.50 metri rispetto al picco reale, con un valore assoluto medio di 1.45 metri.

Si ricorda che, a P. Felcino, tra la soglia di attenzione e quella di pre-allarme intercorrono 80 centimetri, mentre tra quest'ultima e quella di allarme c'è una distanza di 40 centimetri. È dunque plausibile che, a causa degli errori sopra riportati, i modelli MISDc ed HEC-RAS non siano in grado di collocare i livelli idrometrici previsti all'interno della corretta fascia di allerta. Più avanti verrà approfondita l'analisi delle capacità dei modelli di prevedere la giusta "classe di allerta" (v. paragrafo 2.4.1)

Le misure di accuratezze riportate in tabella 2.5 (ricordiamo che i risultati di HEC-RAS riguardano solo 22 eventi) confermano le evidenze grafiche. In particolare:

- ❖ Il coefficiente di correlazione è positivo e sopra lo 0.5 per tutti i modelli, in particolare il coefficiente di correlazione di STAFOM è circa 0.9, il che indica una forte correlazione tra osservazioni e previsioni. Anche i risultati di MISDc mostrano una forte correlazione tra previsioni ed osservazioni. Quelli di HEC-RAS identificano infine una correlazione moderata.
- ❖ la media, la media degli errori e lo scostamento suggeriscono che STAFOM presenta una leggera tendenza a sovrastimare, invece MISDc ed HEC-RAS tendono a sottostimare il picco idrometrico;

- ❖ la media degli errori, la media degli errori assoluti e la deviazione standard mostrano che STAFOM è il modello che fornisce la previsione più accurata, seguito dal MISDc. La media degli errori assoluti di HEC-RAS è circa il 30% della media delle osservazioni.

2.3.2 Previsioni dei modelli all'istante di raggiungimento del picco osservato

Per ogni evento è stato considerato l'istante temporale in cui il picco idrometrico è stato raggiunto e quanto previsto dai modelli nello stesso istante. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

numero evento	DATA				h OSSERVATO [m]	ESONDAZIONE	h PREVISTO STAFOM [m]	h PREVISTO MISDc [m]	h PREVISTO HEC-RAS [m]
	giorno	mese	anno	ora					
1	10	12	1990	21:00	4.47	no	4.44	2.63	3.51
2	11	2	1991	9:30	5.67	si	5.32	3.84	2.25
3	7	5	1991	19:00	4.10	no	3.87	3.13	1.69
4	16	11	1991	16:30	4.56	no	4.69	3.42	3.64
5	20	11	1991	18:00	4.74	no	4.49	4.08	3.82
6	25	11	1991	4:00	4.62	no	4.48	2.97	1.38
7	21	10	1992	0:30	4.11	no	3.98	3.59	2.26
8	6	12	1992	3:30	5.01	no	4.95	3.92	4.40
9	8	12	1992	14:30	5.12	no	4.67	4.13	1.78
10	31	12	1995	21:30	4.77	no	5.15	3.76	4.51
11	18	11	1996	9:30	4.49	no	4.99	4.68	6.91
12	14	12	1996	22:00	4.22	no	3.81	3.07	2.32
13	3	1	1997	17:30	4.11	no	3.85	3.79	1.22
14	21	4	1997	16:30	4.57	no	4.16	3.81	3.97
15	3	6	1997	1:00	4.64	no	4.02	4.92	6.65
16	10	2	1999	15:30	4.52	no	3.96	3.44	2.97
17	28	12	2000	7:30	5.25	no	4.51	4.95	6.01
18	27	11	2005	9:00	6.92	si	6.28	4.51	5.23
19	3	12	2005	22:30	4.42	no	3.96	4.05	1.44
20	6	12	2005	9:00	4.76	no	4.36	4.99	1.59
21	2	1	2006	1:30	4.34	no	4.23	3.85	no dati
22	11	12	2008	11:30	4.98	no	4.54	4.59	4.56
23	6	1	2010	8:00	6.43	si	5.76	7.69	7.17

Tabella 2.6 Osservazioni e previsioni all'istante di raggiungimento del picco idrometrico. In verde sono evidenziati i picchi idrometrici previsti che si discostano da quelli osservati di un valore massimo in termini assoluti pari al 10% del livello idrico osservato.

Osservando la tabella sopra riportata si nota che la tendenza generale è quella di sottostimare il picco idrometrico.

Tale tendenza è confermata anche dal confronto tra i livelli idrometrici previsti ed osservati mostrato nelle figure 2.14-2.16, nonché dalle figure 2.17-2.19, che mostrano l'errore di previsione sulle ordinate e il livello idrometrico previsto sulle ascisse e dalle figure 2.20-2.22, che mostrano l'errore di previsione sulle ordinate e il livello di picco osservato sulle ascisse. Infine la tabella 2.8 riporta i valori delle misure di accuratezza effettuate.

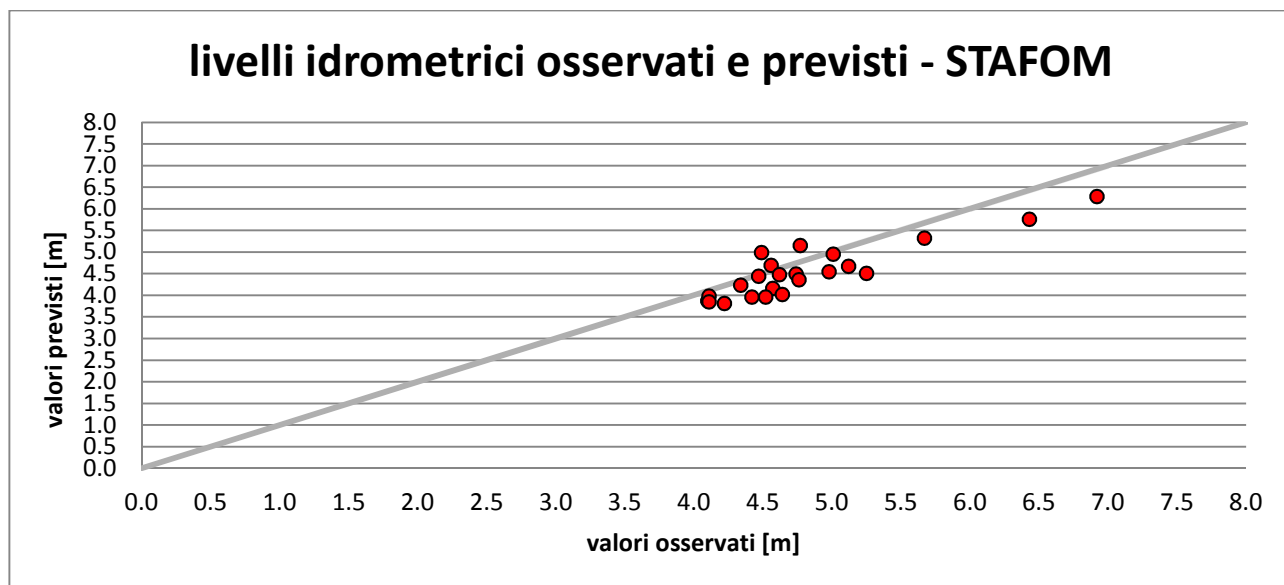


Figura 2.14 Livelli idrometrici previsti da STAFOM rispetto ai picchi idrometrici osservati

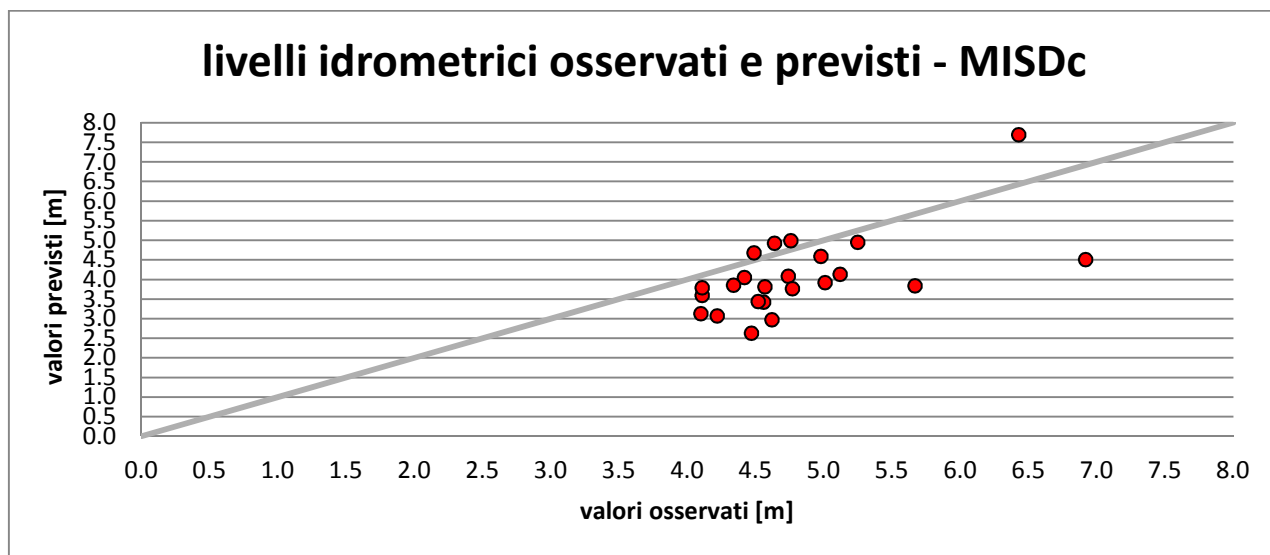


Figura 2.15 Livelli idrometrici previsti da MISDc rispetto ai picchi idrometrici osservati

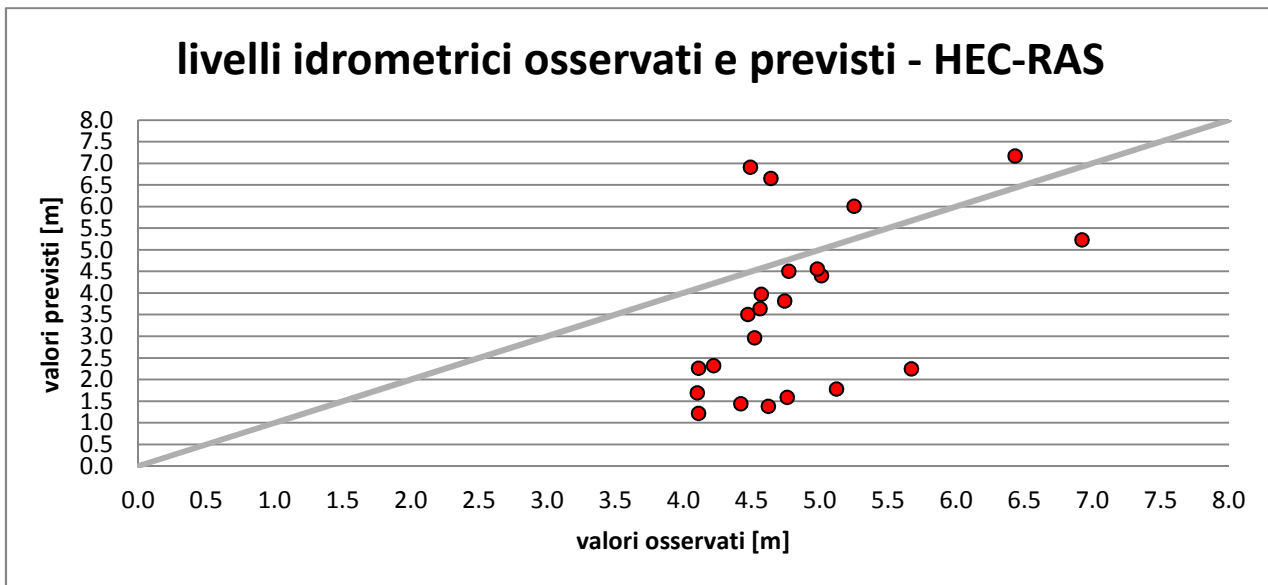


Figura 2.16 Livelli idrometrici previsti da MISDc rispetto ai picchi idrometrici osservati

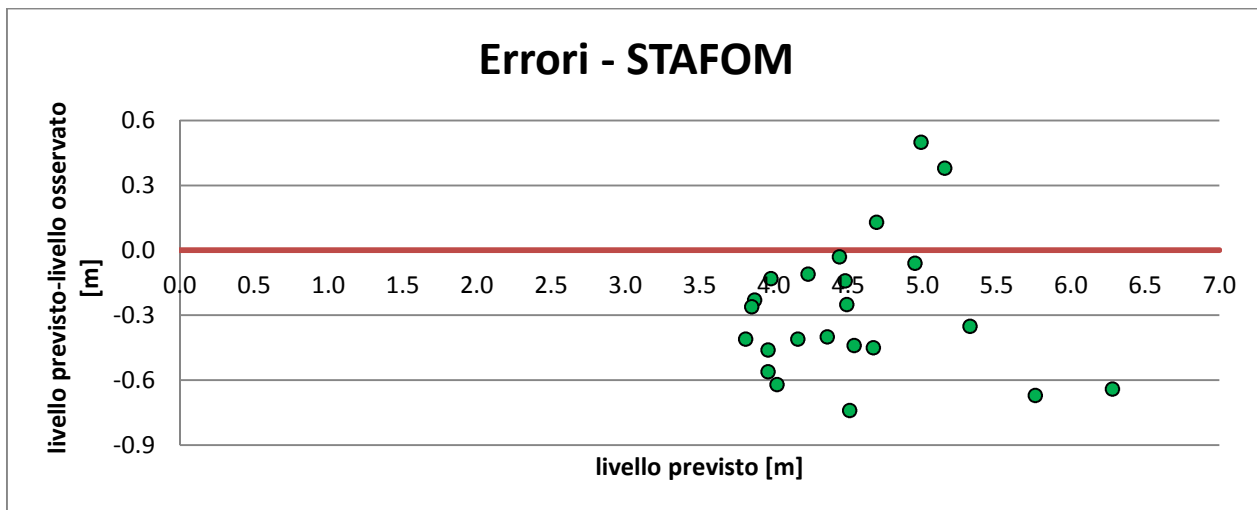


Figura 2.17 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: STAFOM

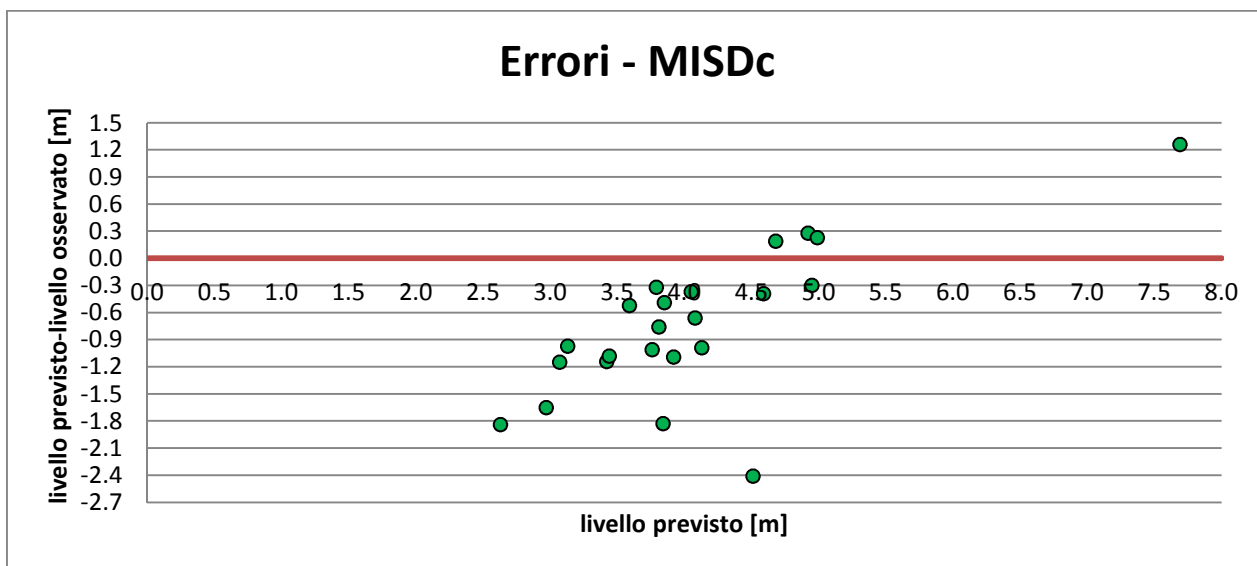


Figura 2.18 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: MISDc

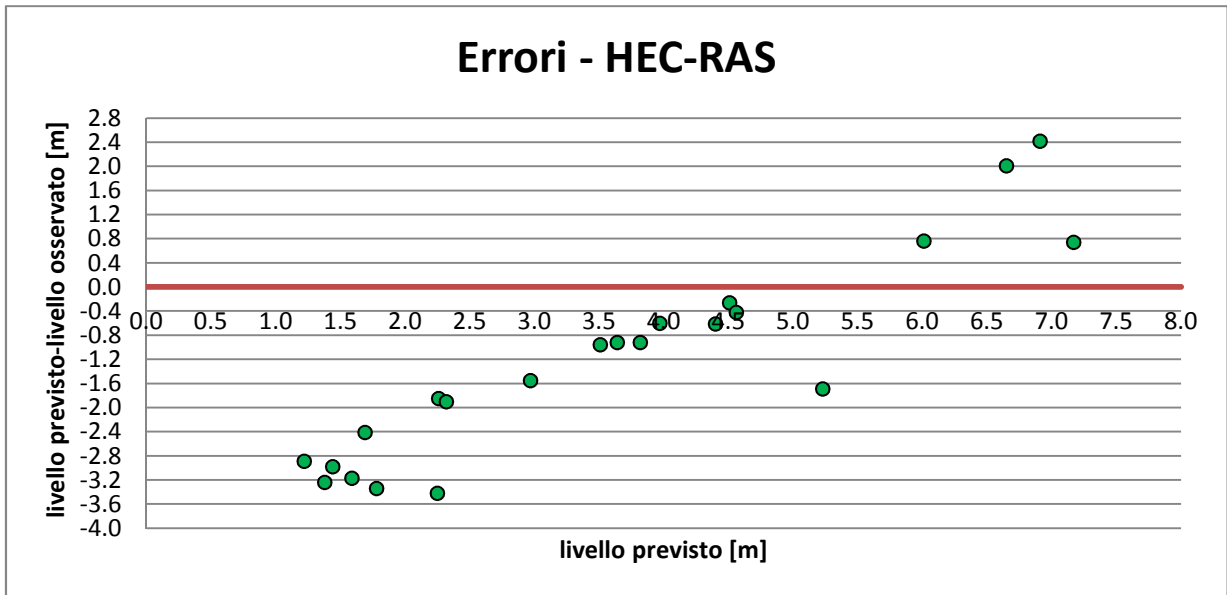


Figura 2.19 Errori rispetto al livello idrometrico previsto: HEC-RAS

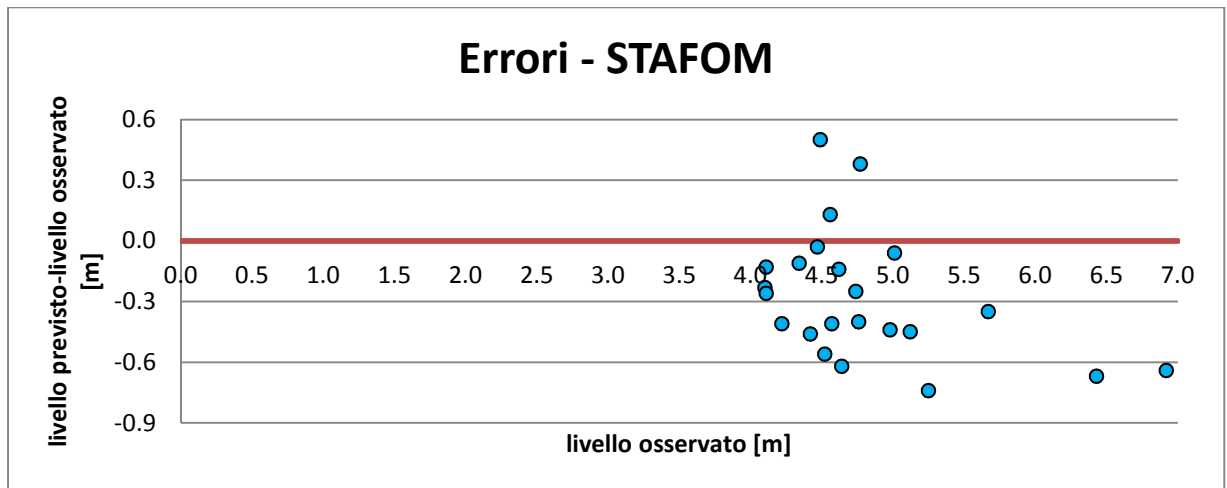


Figura 2.20 Errori rispetto al picco idrometrico osservato: STAFOM

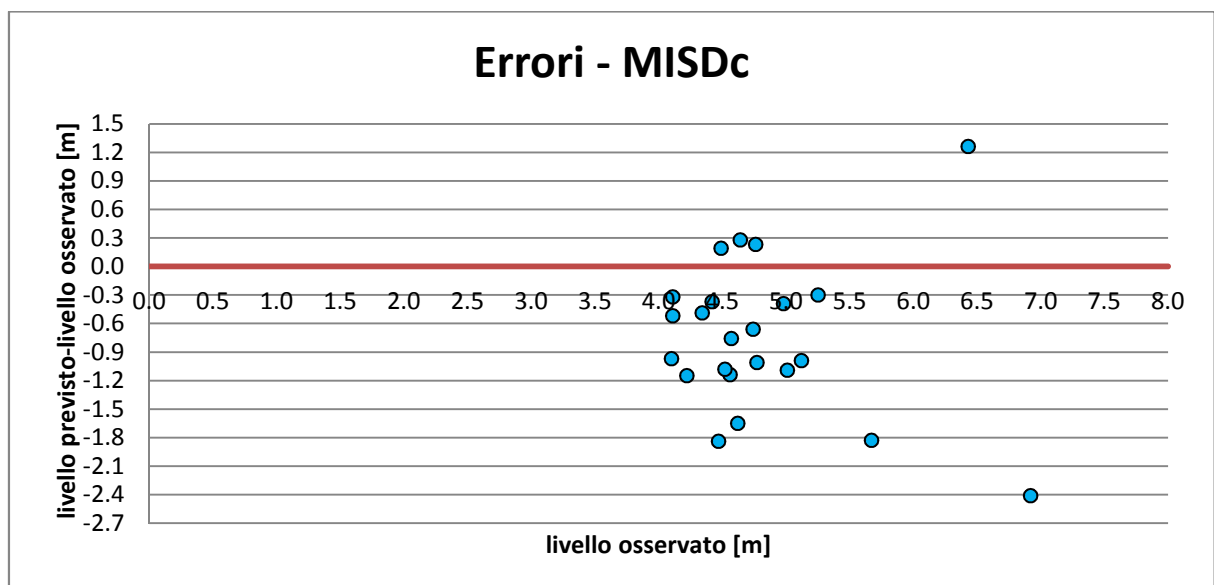


Figura 2.21 Errori rispetto al picco idrometrico osservato: MISDc

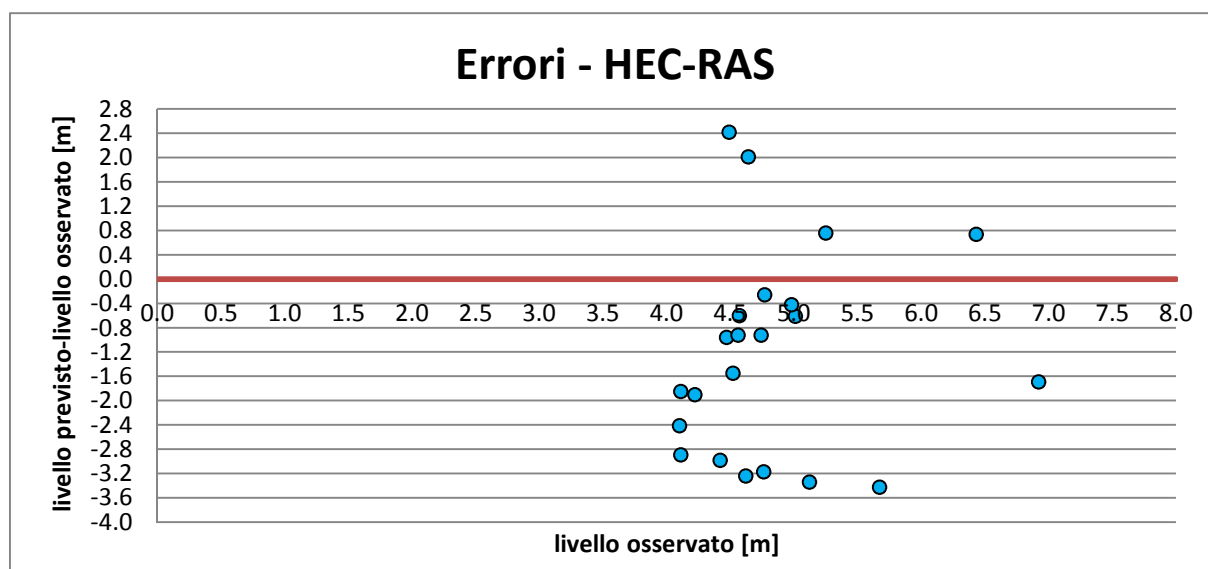


Figura 2.22 Errori rispetto al picco idrometrico osservato: HEC-RAS

Misura	simbolo	osservato (di STAFOM e MISDc)	osservato (di HEC-RAS)	STAFOM	MISDc	HEC-RAS
media	μ	4.82	4.84	4.54	4.08	3.60
deviazione standard	σ	0.70	0.71	0.64	1.02	1.90
media errori	μ_E			-0.28	-0.74	-1.24
media errore assoluto	$ \mu_E $			0.36	0.91	1.78
media di (errore assoluto/dati osservati)	$\mu(e^* /O_i)$			0.07	0.18	0.38
media di (errore assoluto/dati previsti)	$\mu(e^* /P_i)$			0.08	0.25	0.83
scostamento	s			0.94	0.85	0.74
coefficiente di correlazione	ρ			0.89	0.61	0.47

Tabella 2.7 Misure di accuratezza

Dalle figure 2.14-2.16 emerge che le osservazioni e le previsioni di MISDc ed HEC-RAS sono moderatamente correlate, mentre le previsioni di STAFOM e le osservazioni presentano una forte correlazione (v. tabella 2.1).

Inoltre, in generale, tutti i modelli tendono a sottostimare, infatti, STAFOM sovrastima il picco idrometrico per soli 3 eventi su 23, mentre HEC-RAS e MISDc lo sovrastimano per soli 4 eventi.

Più nel dettaglio, STAFOM ha commesso un errore assoluto inferiore al 10% del picco osservato per 17 eventi su 23 (i cui picchi idrici previsti sono evidenziati in verde in tabella 2.6). MISDc presenta degli errori assoluti tra picco idrometrico previsto e picco idrometrico osservato, inferiori al 10 % del picco osservato, in 7 casi su 23 (i cui picchi idrici previsti sono evidenziati in verde in tabella 2.6) ed infine HEC-RAS ha fornito solo 2 simulazioni su 22 con errore assoluto al picco

inferiore al 10% del picco idrometrico osservato (i cui picchi idrici previsti sono evidenziati in verde in tabella 2.6).

STAFOM, coerentemente a quanto già osservato nell'analisi precedente, presenta quindi il range di errori più contenuto, che va da un minimo di -0.80 metri circa ad un massimo di +0.50 metri circa rispetto al picco osservato, con un valore medio, in termini assoluti, pari a 0.36 metri. Le previsioni di MISDc invece forniscono un range di errori che va all'incirca da -2.50 metri a +1.25 metri rispetto al picco osservato, con un errore assoluto medio di 0.91 metri. HEC-RAS è invece il modello che fornisce la stima più incerta e il range di errori va, approssimativamente, da -3.5 metri a +2.5 metri rispetto al picco osservato, con un valore medio, in termini assoluti, di 1.78 metri. Anche in questo caso valgono le considerazioni sul superamento delle soglie di allerta fatte al paragrafo precedente, notiamo però che, il range di errori di STAFOM, è maggiore di quello precedentemente rilevato, quindi anch'esso potrebbe non essere in grado di identificare la corretta fascia d'allerta. Più avanti verrà approfondita l'analisi delle capacità dei modelli di prevedere la giusta "classe di allerta" (v. paragrafo 2.4.2).

La tabella 2.8, contenente le misure di accuratezza, conferma le evidenze grafiche:

- ❖ Il coefficiente di correlazione è circa uguale allo 0.9 per STAFOM, come nell'analisi precedente, il che indica una forte correlazione tra osservazioni e previsioni. Esso è invece minore di quello ottenuto dall'analisi precedente per gli altri due modelli, che presentano comunque una moderata correlazione, ed in particolare è inferiore allo 0.5 per HEC-RAS.
- ❖ la media, la media degli errori e lo scostamento suggeriscono che tutti i modelli tendono a sottostimare il picco idrometrico;
- ❖ la media degli errori, la media degli errori assoluti e la deviazione standard mostrano che STAFOM è il modello che fornisce la previsione più accurata, seguito dal MISDc. La media degli errori assoluti di HEC-RAS è poco inferiore al 40% della media delle osservazioni.

Al termine di questa seconda analisi si può osservare che i risultati della stessa sono coerenti con quelli della prima analisi, descritta al paragrafo 2.3.1. Infatti STAFOM si conferma il modello che fornisce la previsione più accurata, seguito dal MISDc. Si nota però che gli errori tra picchi idrometrici previsti ed osservati sono inferiori agli errori fra picchi idrometrici osservati ed altezze d'acqua previste all'istante di osservazione del picco idrometrico reale.

2.3.3 La verifica del tempo di previsione

Terminiamo l'analisi di accuratezza considerando i tempi di previsione dei picchi idrometrici forniti dai modelli. Tale analisi è stata condotta calcolando gli indicatori temporali presentati al paragrafo 2.1.

La corretta previsione del tempo in cui si verifica, durante un evento di piena, il livello idrometrico massimo in una determinata sezione di un fiume (che potrebbe dar luogo ad esondazione od al superamento di soglie di allerta che attivano le procedure di emergenza) è altrettanto importante della valutazione dell'intensità del picco previsto. Se viene previsto che una piena si verifichi più tardi di quanto realmente avviene, tale ritardo nell'avvisare i soggetti predisposti alla gestione dell'emergenza può comportare una riduzione dell'efficacia delle misure preventive adottate. È quindi necessaria anche una stima dell'incertezza relativa al tempo di previsione.

Di seguito viene descritta l'analisi di accuratezza svolta.

Le tabelle 2.8-2.10 mostrano, per ogni evento, quando sono stati osservati e previsti dai tre modelli i picchi idrometrici e qual'è l'anticipo o il posticipo della previsione rispetto all'osservazione (PTE):

numero evento	DATA E ORA PICCO OSSERVATO	DATA E ORA PICCO PREVISTO - STAFOM	PTE - STAFOM		
			anticipo/posticipo	ore	minuti
1	12/10/90 21:00	12/10/90 9:30	anticipo	11	30
2	2/11/91 9:30	2/11/91 10:00	posticipo	0	30
3	5/7/91 19:00	5/7/91 22:30	posticipo	3	30
4	11/16/91 16:30	11/16/91 18:30	posticipo	2	0
5	11/20/91 18:00	11/20/91 20:30	posticipo	2	30
6	11/25/91 4:00	11/24/91 21:00	anticipo	7	0
7	10/21/92 0:30	10/21/92 6:00	posticipo	5	30
8	12/6/92 3:30	12/6/92 4:00	posticipo	0	30
9	12/8/92 14:30	12/8/92 18:30	posticipo	4	0
10	12/31/95 21:30	12/31/95 22:00	posticipo	0	30
11	11/18/96 9:30	11/18/96 10:30	posticipo	1	0
12	12/14/96 22:00	12/14/96 19:00	anticipo	3	0
13	1/3/97 17:30	1/3/97 21:30	posticipo	4	0
14	4/21/97 16:30	4/21/97 19:00	posticipo	2	30
15	6/3/97 1:00	6/2/97 21:30	anticipo	3	30
16	2/10/99 15:30	2/10/99 19:30	posticipo	4	0
17	12/28/00 7:30	12/28/00 1:00	anticipo	6	30
18	11/27/05 9:00	11/27/05 10:00	posticipo	1	0
19	12/3/05 22:30	12/3/05 20:00	anticipo	2	30
20	12/6/05 9:00	12/6/05 12:30	posticipo	3	30

21	1/2/06 1:30	1/1/06 23:30	anticipo	2	0
22	12/11/08 11:30	12/11/08 7:00	anticipo	4	30
23	1/6/10 8:00	1/6/10 11:30	posticipo	3	30

Tabella 2.8 Errori temporali nella previsione dei picchi idrometrici - STAFOM

numero evento	DATA E ORA PICCO OSSERVATO	DATA E ORA PICCO PREVISTO - MISDc	PTE - MISDc		
			anticipo/posticipo	ore	minuti
1	12/10/90 21:00	12/10/90 10:30	anticipo	10	30
2	2/11/91 9:30	2/11/91 10:30	posticipo	1	0
3	5/7/91 19:00	5/7/91 20:30	posticipo	1	30
4	11/16/91 16:30	11/16/91 21:00	posticipo	4	30
5	11/20/91 18:00	11/20/91 19:00	posticipo	1	0
6	11/25/91 4:00	11/24/91 20:00	anticipo	8	0
7	10/21/92 0:30	10/20/92 21:00	anticipo	3	30
8	12/6/92 3:30	12/6/92 5:30	posticipo	2	0
9	12/8/92 14:30	12/8/92 19:00	posticipo	4	30
10	12/31/95 21:30	1/1/96 0:00	posticipo	2	30
11	11/18/96 9:30	11/18/96 11:00	posticipo	1	30
12	12/14/96 22:00	12/14/96 19:00	anticipo	3	0
13	1/3/97 17:30	1/3/97 19:00	posticipo	1	30
14	4/21/97 16:30	4/21/97 13:30	anticipo	3	0
15	6/3/97 1:00	6/3/97 1:00	nessun errore temporale		
16	2/10/99 15:30	2/10/99 15:30	nessun errore temporale		
17	12/28/00 7:30	12/28/00 3:00	anticipo	4	30
18	11/27/05 9:00	11/27/05 2:00	anticipo	7	0
19	12/3/05 22:30	12/3/05 22:00	anticipo	0	30
20	12/6/05 9:00	12/6/05 7:00	anticipo	2	0
21	1/2/06 1:30	1/2/06 1:00	anticipo	0	30
22	12/11/08 11:30	12/11/08 8:30	anticipo	3	0
23	1/6/10 8:00	1/6/10 6:30	anticipo	1	30

Tabella 2.9 Errori temporali nella previsione dei picchi idrometrici - MISDc

numero evento	DATA E ORA PICCO OSSERVATO	DATA E ORA PICCO PREVISTO - HEC-RAS	PTE - HEC-RAS		
			anticipo/posticipo rispetto all'osservato	ore	minuti
1	12/10/90 21:00	12/10/90 9:00	anticipo	12	0
2	2/11/91 9:30	2/11/91 10:30	posticipo	1	0
3	5/7/91 19:00	5/7/91 22:30	posticipo	3	30
4	11/16/91 16:30	11/16/91 19:00	posticipo	2	30
5	11/20/91 18:00	11/21/91 19:30	posticipo	25	30
6	11/25/91 4:00	11/24/91 21:30	anticipo	6	30
7	10/21/92 0:30	10/22/92 0:00	posticipo	23	30
8	12/6/92 3:30	12/6/92 3:30	nessun errore temporale		

9	12/8/92 14:30	12/8/92 19:30	posticipo	5	0
10	12/31/95 21:30	12/31/95 20:30	anticipo	1	0
11	11/18/96 9:30	11/18/96 10:30	posticipo	1	0
12	12/14/96 22:00	12/14/96 19:00	anticipo	3	0
13	1/3/97 17:30	1/5/97 12:30	posticipo	43	0
14	4/21/97 16:30	4/21/97 9:00	anticipo	7	30
15	6/3/97 1:00	6/3/97 1:30	posticipo	0	30
16	2/10/99 15:30	2/10/99 17:00	posticipo	1	30
17	12/28/00 7:30	12/28/00 3:30	anticipo	4	0
18	11/27/05 9:00	11/27/05 15:30	posticipo	6	30
19	12/3/05 22:30	12/4/05 3:00	posticipo	4	30
20	12/6/05 9:00	12/6/05 15:00	posticipo	6	0
22	12/11/08 11:30	12/11/08 8:00	anticipo	3	30
23	1/6/10 8:00	1/6/10 8:00	nessun errore temporale		

Tabella 2.10 Errori temporali nella previsione dei picchi idrometrici - HEC-RAS®

Le figure dalla 2.23 alla 2.25 mostrano, per ciascun evento di piena considerato, PTE rispetto al valore del picco idrometrico previsto.

STAFOM posticipa il picco di livello per 15 eventi su 23. HEC-RAS posticipa il picco idrometrico per 13 eventi su 22 e non commette nessun errore temporale nella previsione dello stesso per 2 eventi su 22. MISDc è l'unico modello che presenta maggiori anticipi che posticipi nella previsione del picco. Esso infatti anticipa per 12 eventi su 23 e non commette errori temporali per 2 eventi su 23. È interessante fare qualche considerazione anche sui rami di risalita degli idrogrammi forniti dai modelli: generalizzando si può affermare che l'inizio del ramo di risalita degli idrogrammi previsti da STAFOM e MISDc è all'incirca coincidente con l'inizio dei rami di risalita degli idrogrammi osservati, tranne pochi casi in cui l'inizio del ramo è posticipato da STAFOM. Invece, le previsioni di HEC-RAS posticipano in tutti i casi, tranne per l'evento del Novembre 1996 (evento 11), l'inizio del ramo di risalita dell'idrogramma.

Per quanto riguarda il range di errori temporali osserviamo che:

- ❖ STAFOM: l'intervallo di errori va da -11.5 ore a +5.5 ore rispetto all'ora del picco osservato.
- ❖ MISDc: il range di errori va da +4.5 ore a -10.5 ore rispetto all'ora del picco osservato.
- ❖ HEC-RAS: il range di errori va da +43 ore circa a -12 ore circa rispetto all'ora del picco osservato.

Di seguito vengono mostrati la media dell'errore temporale, la media dell'errore assoluto temporale e la deviazione standard degli errori temporali della previsione del picco idrometrico (calcolati come descritto al paragrafo 2.1):

	simbolo	STAFOM	MISDc	HEC-RAS
media errore temporale [ore]	μ_{PTE}	-0.09	-1.17	3.93
media errore temporale assoluto [ore]	$ \mu_{PTE} $	3.43	2.91	7.34
deviazione standard errori temporali [ore]	σ_{PTE}	4.31	3.80	12.23

Tabella 2.11 Misure di accuratezza sugli errori temporali

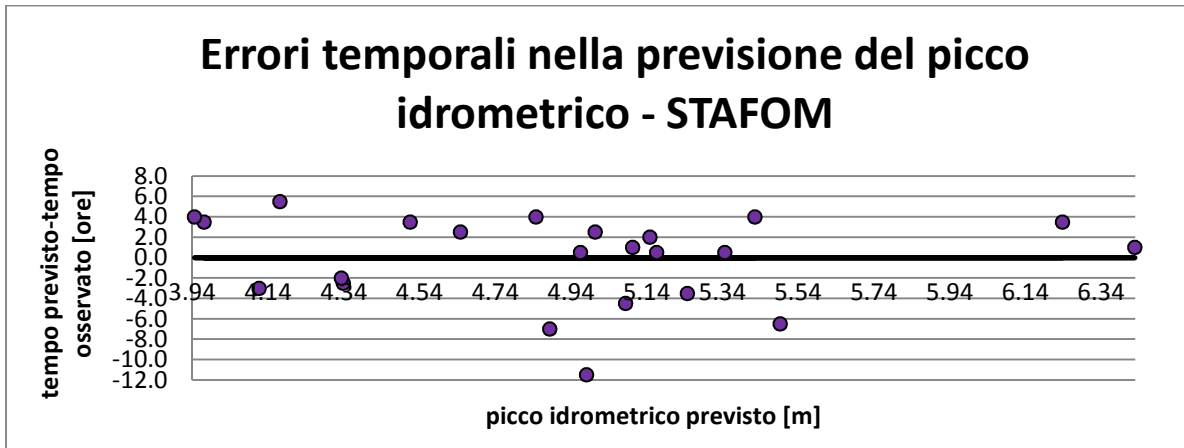


Figura 2.23 Errore temporale sul picco rispetto al picco idrometrico previsto: STAFOM

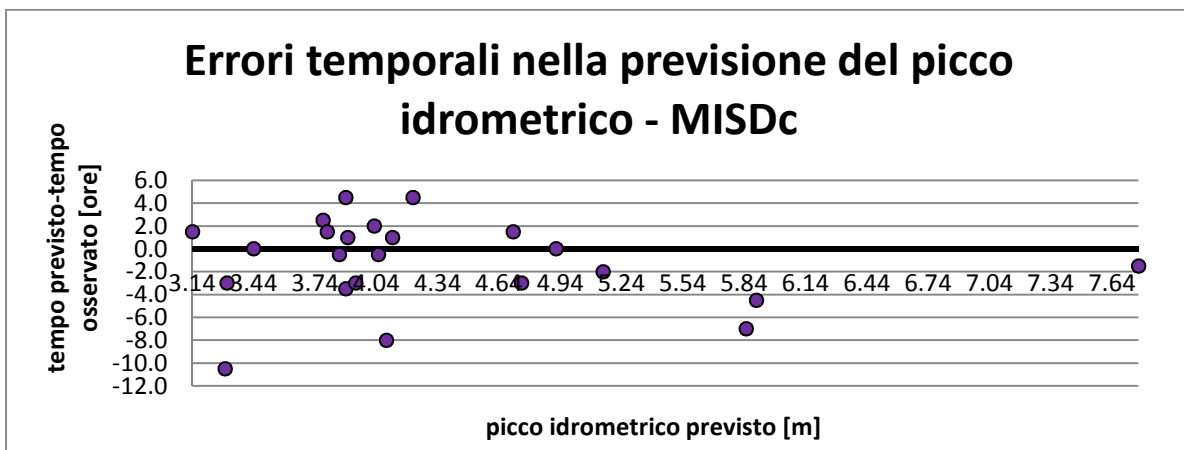


Figura 2.24 Errore temporale sul picco rispetto al picco idrometrico previsto: MISDc

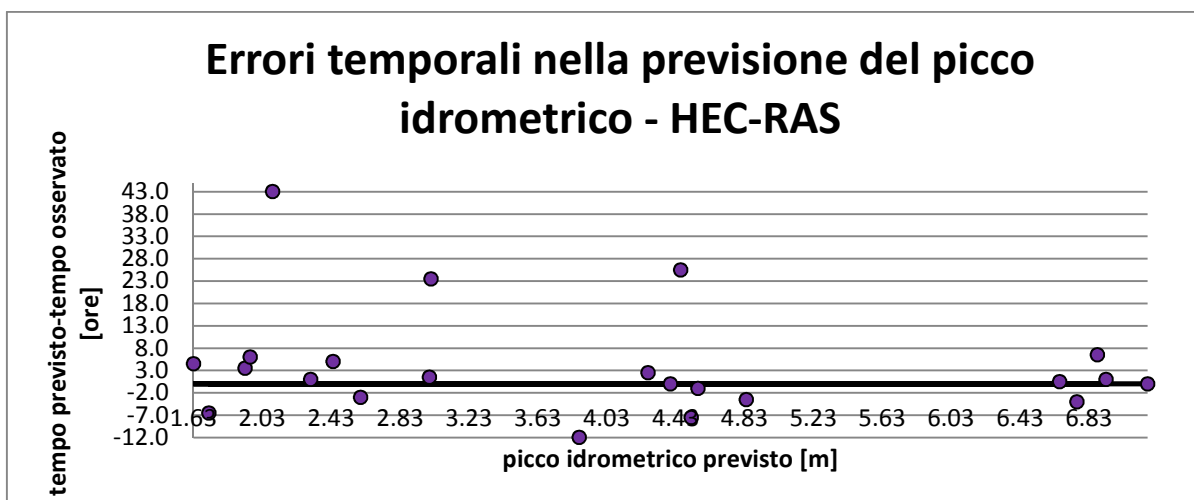


Figura 2.25 Errore temporale sul picco rispetto al picco idrometrico previsto: HEC-RAS

Dalla tabella 2.11 emerge che MISDc presenta la media dell'errore temporale assoluto e la deviazione standard più piccoli ed è quindi il modello più preciso nella previsione temporale sul picco idrometrico, seguito da STAFOM.

Le informazioni derivate dall'analisi sui tempi di previsione del picco idrometrico sono molto importanti per la gestione delle emergenze. STAFOM elabora la previsione con un anticipo di 4 ore mentre MISDc e HEC-RAS prevedono con circa 8 ore di anticipo (v. capitolo 1) ma, nel caso in cui la previsione posticipi il picco idrometrico, l'anticipo temporale che può permettere di limitare i danni derivanti da una piena si accorcia. Questo può aumentare i danni causati da un'esondazione perché le misure preventive saranno meno efficaci se il tempo di preparazione delle stesse è inferiore a quanto si attendeva. Serve infatti del tempo per avvisare tutti gli enti coinvolti nella gestione delle emergenze e realizzare le azioni preventive che, nel caso in cui il livello idrometrico previsto raggiunga la soglia di esondazione, implicheranno anche l'evacuazione della popolazione della zona.

2.3.4 Conclusioni emerse dall'analisi di accuratezza delle previsioni

Al termine dell'analisi di accuratezza illustrata nei paragrafi 2.3.1-2.3.3, in cui sono stati presi in considerazione, da più punti di vista, i risultati dei modelli relativamente alla previsione del picco idrometrico, abbiamo dedotto che:

- ❖ per quanto riguarda la previsione dell'intensità del picco idrometrico STAFOM si è dimostrato il modello più accurato, seguito da MISDc. Inoltre, in generale, tutti i modelli considerati tendono a sottostimare i livelli idrometrici. L'unica eccezione è rappresentata dai risultati di STAFOM della prima analisi (v. paragrafo 2.3.1), secondo i quali il modello mostra una tendenza alla sottostima in poco meno del 50% dei casi;
- ❖ quanto ai tempi di previsione del picco idrometrico MISDc si è rivelato il modello più accurato, seguito da STAFOM.

Si suggerisce quindi di procedere ad una ricalibrazione dei modelli al fine di eliminare l'errore sistematico di sottostima.

Nel frattempo, risulta indispensabile fornire delle direttive volte ad ottimizzare l'impiego in tempo reale dei modelli idrologici/idraulici in questione, al fine di gestire in modo migliore la previsione degli eventi alluvionali. Questo è appunto lo scopo del presente lavoro di tesi, nonché l'obiettivo richiesto dal CFD. A tal fine risulta di particolare interesse l'analisi del valore delle previsioni, illustrata nel paragrafo seguente.

2.4 La valutazione del valore

Il valore di una previsione è il beneficio incrementale che essa fornisce a coloro che la utilizzano per indirizzare le loro scelte tra diverse possibili alternative (Murphy, 1993). Le previsioni non possiedono un valore intrinseco ma lo acquisiscono con la loro abilità di dirigere le decisioni prese da coloro che ne fanno uso. Il valore di una previsione può essere espresso in diversi modi: in termini di benefici economici o spese oppure in termini di guadagni o perdite non monetarie (ad esempio considerando il numero di persone salvate o perse). Potrebbe inoltre essere identificato con la capacità, di un determinato sistema, di prevedere il superamento di una soglia idrometrica e quindi permettere di adottare adeguate misure di mitigazione. Questo è proprio quello che si ritiene interessante valutare nel presente studio.

Il valore delle previsioni varia quindi da problema a problema ed in base a colui che lo considera relativamente ad uno specifico caso, invece l'accuratezza delle stesse è indipendente dal contesto operativo.

Dalla prospettiva di coloro che gestiscono le emergenze e che coinvolgono i diversi soggetti interessati, in base al superamento atteso delle soglie di allerta, è molto importante capire in quale "classe di allerta"⁴ si collocano i livelli idrometrici previsti. Più che capire se le previsioni sono accurate o meno, è quindi importante determinare se le stesse permettono di identificare in modo corretto i vari livelli di allerta e quindi se permettono di predisporre le necessarie misure di sicurezza. Una volta stabilito che una determinata soglia di allerta verrà raggiunta, è poi importante conoscere il livello idrometrico atteso, in modo da pianificare con esattezza le operazioni da svolgere (v. analisi di accuratezza).

Per analizzare il valore nei termini sopra esposti, ovvero la capacità di distinguere tra diverse fasi di allerta, si può ricorrere all'analisi dalle tabelle di contingenza. Esse mostrano le distribuzioni di probabilità congiunte e condizionate delle previsioni e delle osservazioni come sorgente di tutte le informazioni rilevanti ai fini dell'analisi (Murphy, 1993). Nel dettaglio sono state valutate:

- ❖ distribuzioni congiunte di osservazioni e previsioni
- ❖ distribuzioni condizionate delle osservazioni date le previsioni, $p(o|p)$,
- ❖ distribuzioni condizionate delle previsioni date le osservazioni, $p(p|o)$,
- ❖ distribuzione marginale delle previsioni, $p(p)$,

⁴ nel presente studio, coerentemente a quanto esposto nel paragrafo 2.2, $h=3.20-4$ m corrisponde ad una situazione di attenzione, $h=4-4.40$ indica una situazione di pre-allarme, $h=4.40-5.60$ identifica una fase di allarme ed $h>5.60$ m corrisponde ad un'esondazione.

- ❖ distribuzione marginale delle osservazioni, $p(o)$.

Nello studio sono state identificate le seguenti classi, coincidenti con le classi di allerta, in cui “p” indica la previsione:

- ❖ $p < 3.20$ metri;
- ❖ $p = 3.20-4$ metri;
- ❖ $p = 4-4.40$ metri;
- ❖ $p = 4.40-5.60$ metri;
- ❖ $p > 5.60$ metri.

Le osservazioni possono invece collocarsi all’interno delle seguenti classi, in cui “o” indica l’osservazione:

- ❖ $o = 4-4.40$ metri;
- ❖ $o = 4.40-5.60$ metri;
- ❖ $o > 5.60$ metri.

Si ricorda infatti che sono stati scelti gli eventi di piena in cui si è verificato il raggiungimento della soglia di pre-allarme (4 metri a P. Felcino), quindi, il picco osservato è almeno pari a 4 metri.

2.4.1 Picchi di livello idrometrico osservati e previsti dai modelli

Innanzitutto riferiamoci al picco idrometrico previsto dai modelli, come fatto nell’analisi di accuratezza precedentemente illustrata. Le tabelle di contingenza dalla 2.12 alla 2.14 mostrano le frequenze di occorrenza relative delle diverse combinazioni di previsioni ed osservazioni rispetto alle “classi di allerta”.

Ognuna delle tabelle contiene:

- ❖ la tabella di contingenza in termini di frequenze relative; si assume che siano uguali alle probabilità congiunte $p(p,o)$;
- ❖ le distribuzioni marginali delle previsioni $p(p)$ e delle osservazioni $p(o)$;
- ❖ le distribuzioni condizionate delle osservazioni date le previsioni $p(o|p)$ e la loro moda⁵;
- ❖ le distribuzioni condizionate delle previsioni date le osservazioni $p(p|o)$ e la loro moda.

Le celle sono evidenziate in grigio quando una frequenza uguale ad 1 dovrebbe essere presente nel caso ideale di perfetta previsione (senza errori).

⁵ l’intervallo di allerta più frequente

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)							
PREVISIONE STAFOM		osservato			marginale		
		4-4.40	4.40-5.60	>5.60	p(p)		
previsto	<3.20	0.00	0.00	0.00	0.00		
	3.20-4	0.09	0.00	0.00	0.09		
	4-4.40	0.13	0.04	0.00	0.17		
	4.40-5.60	0.00	0.61	0.04	0.65		
	>5.60	0.00	0.00	0.09	0.09		
marginale	p(o)	0.22	0.65	0.13			
distribuzioni condizionate delle osservazioni date le previsioni					moda		
p(o p<3.20)		0.00	0.00	0.00			
p(o p=3.20-4)		1.00	0.00	0.00	4-4.40		
p(o p=4-4.40)		0.75	0.25	0.00	4-4.40		
p(o p=4.40-5.60)		0.00	0.93	0.07	4.40-5.60		
p(o p>5.60)		0.00	0.00	1.00	>5.60		
distribuzioni condizionate delle previsioni date le osservazioni						moda	
p(p o=4-4.40)		0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	4-4.40
p(p o=4.40-5.60)		0.00	0.00	0.07	0.93	0.00	4.40-5.60
p(p o>5.60)		0.00	0.00	0.00	0.33	0.67	>5.60

Tabella 2.12 Risultati dell'analisi delle distribuzioni probabilistiche delle previsioni di STAFOM. In grigio sono evidenziate le celle in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione. Le previsioni vengono collocate all'interno di cinque fasce d'allerta, mentre le osservazioni all'interno di tre fasce d'allerta.

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)							
PREVISIONE MISDc		osservato			marginale		
		4-4.40	4.40-5.60	>5.60	p(p)		
previsto	<3.20	0.04	0.00	0.00	0.04		
	3.20-4	0.17	0.22	0.04	0.43		
	4-4.40	0.00	0.22	0.00	0.22		
	4.40-5.60	0.00	0.17	0.00	0.17		
	>5.60	0.00	0.04	0.09	0.13		
marginale	p(o)	0.22	0.65	0.13			
distribuzioni condizionate delle osservazioni date le previsioni					moda		
p(o p<3.20)		1.00	0.00	0.00	4-4.40		
p(o p=3.20-4)		0.40	0.50	0.10	4.40-5.60		
p(o p=4-4.40)		0.00	1.00	0.00	4.40-5.60		
p(o p=4.40-5.60)		0.00	1.00	0.00	4.40-5.60		
p(o p>5.60)		0.00	0.33	0.67	>5.60		
distribuzioni condizionate delle previsioni date le osservazioni						moda	
p(p o=4-4.40)		0.20	0.80	0.00	0.00	0.00	3.20-4
p(p o=4.40-5.60)		0.00	0.33	0.33	0.27	0.07	3.20-4.40
p(p o>5.60)		0.00	0.33	0.00	0.00	0.67	>5.60

Tabella 2.13 Risultati dell'analisi delle distribuzioni probabilistiche delle previsioni di MISDc. In grigio sono evidenziate le celle in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione. Le previsioni vengono collocate all'interno di cinque fasce d'allerta, mentre le osservazioni all'interno di tre fasce d'allerta.

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)						
PREVISIONE HEC-RAS		osservato			marginale	
		4-4.40	4.40-5.60	>5.60	p(p)	
previsto	<3.20	0.18	0.23	0.05	0.45	
	3.20-4	0.00	0.05	0.00	0.05	
	4-4.40	0.00	0.05	0.00	0.05	
	4.40-5.60	0.00	0.23	0.00	0.23	
	>5.60	0.00	0.14	0.09	0.23	
marginale	p(o)	0.18	0.68	0.14		
distribuzioni condizionate delle osservazioni date le previsioni					moda	
p(o p<3.20)		0.40	0.50	0.10	4.40-5.60	
p(o p=3.20-4)		0.00	1.00	0.00	4.40-5.60	
p(o p=4-4.40)		0.00	1.00	0.00	4.40-5.60	
p(o p=4.40-5.60)		0.00	1.00	0.00	4.40-5.60	
p(o p>5.60)		0.00	0.60	0.40	4.40-5.60	
distribuzioni condizionate delle previsioni date le osservazioni						moda
p(p o=4-4.40)		1.00	0.00	0.00	0.00	<3.20
p(p o=4.40-5.60)		0.33	0.07	0.07	0.33	<3.20/4.40-5.60
p(p o>5.60)		0.33	0.00	0.00	0.67	>5.60

Tabella 2.14 Risultati dell'analisi delle distribuzioni probabilistiche delle previsioni di HEC-RAS. In grigio sono evidenziate le celle in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione. Le previsioni vengono collocate all'interno di cinque fasce d'allerta, mentre le osservazioni all'interno di tre fasce d'allerta.

Il confronto tra il caso ideale e le caselle evidenziate in grigio evidenzia che STAFOM (v. tabella 2.12) fornisce delle buone previsioni, infatti, in un caso su sei è presente un numero intorno ad 1 all'interno della cella evidenziata, mentre nei restanti 5 casi la cella grigia corrisponde all'intervallo più frequente, cioè alla moda. Inoltre sembra che le performance del modello migliorino per livelli idrometrici più alti.

Anche guardando le tabelle di contingenza dei risultati di MISDc (v. tabella 2.13) ed HEC-RAS (v. tabella 2.14) si nota che in un caso su sei è presente un numero intorno ad 1 nella cella evidenziata, ma negli altri casi non sempre la cella grigia corrisponde alla frequenza maggiore, cioè alla moda. Anche in queste tabelle sembra che le performance dei modelli migliorino con l'aumento dei livelli idrometrici.

Per meglio analizzare queste prime osservazioni parliamo di attendibilità, risoluzione e discriminazione:

- ❖ **attendibilità:** la corrispondenza media tra i valori previsti e quelli osservati. Se tutte le previsioni vengono considerate assieme l'attendibilità totale è la media. Se le previsioni sono divise in gruppi diversi (ad esempio classi di allerta), la loro attendibilità è uguale alla media condizionata, cioè ha un valore diverso per ogni categoria.

- ❖ **Risoluzione:** l'abilità della previsione di dividere il gruppo di previsioni in sottogruppi con diverse distribuzioni di frequenza; questo significa che la distribuzione dei risultati quando la previsione identifica una determinata classe di allerta, è diversa dalla distribuzione dei risultati quando la previsione si colloca all'interno di un'altra classe di allerta. Anche se le previsioni sono sbagliate, il sistema di previsione ha risoluzione se può separare con successo un tipo di risultato da un altro;
- ❖ **Discriminazione:** l'abilità della previsione di discriminare tra le osservazioni, cioè, di avere un'alta frequenza di previsione di un determinato valore, indipendentemente dal fatto che tale valore si verifichi;

L'attendibilità e la risoluzione possono essere valutate esaminando le distribuzioni $p(o|p)$ e $p(p)$. L'attendibilità si riferisce alla corrispondenza tra la media delle osservazioni associate ad una specifica previsione (\bar{o}_p) e questa previsione (p), quindi, la valutazione dell'attendibilità può dare risposte a domande come: il livello medio osservato nelle situazioni in cui il livello previsto è di 4 metri corrisponde a questa previsione? Ovviamente è preferibile avere piccole differenze tra \bar{o}_p e p . La risoluzione invece riguarda la differenza tra le osservazioni medie condizionate (\bar{o}_p) e l'osservazione media totale incondizionata (\bar{o}). Una questione importante a cui la risoluzione può rispondere può essere: in che misura le medie delle osservazioni condizionate a previsioni di 4 e 5 m differiscono tra loro e dalla media totale delle osservazioni? Grandi differenze indicano che, in media, diverse previsioni sono seguite da diverse osservazioni.

Le distribuzioni $p(p|o)$ forniscono informazioni sulla discriminazione, che si riferisce all'abilità della previsione di discriminare tra le osservazioni. Per una previsione p , se $p(p|o)$ è molto simile per diverse osservazioni o , la previsione non è molto discriminatoria. All'estremo, quando $p(p|o)$ è la stessa per tutte le osservazioni, la previsione non è per nulla discriminatoria e non fornisce informazioni significative sulle osservazioni. Quando invece le probabilità sono molto diverse per diverse osservazioni, la previsione è molto discriminatoria e fornisce utili informazioni sulla previsione. La previsione p è perfettamente discriminatoria se $p(p|o)$ è uguale a zero per tutti i valori di osservazione tranne che per uno.

Parlando di attendibilità si osserva che la moda⁶ delle distribuzioni condizionate $p(o|p)$ è uguale alla corrispondente classe di previsione in tutti i casi per STAFOM, tranne ovviamente quando $p=3.20-4$, poiché il picco osservato parte dai 4 metri, il che è indice di buona attendibilità.

Secondo i risultati di MISDc ed HEC-RAS la moda di $p(o|p)$ è uguale o vicina alla corrispondente classe di previsione solo quando $p>4.40$, cioè i livelli idrometrici previsti ed osservati corrispondono solo quando le altezze d'acqua previste sono alte.

La risoluzione di STAFOM è abbastanza alta perché la moda delle distribuzioni condizionate $p(o|p)$ è uguale al valore della previsione (tranne nel caso in cui la previsione è minore di 4 metri). Per quanto riguarda i risultati di HEC-RAS la risoluzione è bassa in quanto la moda delle distribuzioni condizionate $p(o|p)$ è sempre la stessa, indipendentemente dal valore di p . Anche la risoluzione di MISDc è bassa perché la moda delle distribuzioni condizionate $p(o|p)$ assume lo stesso valore in tre casi in cui varia l'intervallo di previsione considerato.

In generale l'abilità delle previsioni di MISDc ed HEC-RAS di dividere il set di eventi in sottogruppi con diverse distribuzioni di frequenza è bassa quindi non ci si aspetta che valori previsti diversi fra loro corrispondano a valori osservati diversi tra loro.

Infine per quanto riguarda la discriminazione, STAFOM discrimina bene in quanto le probabilità condizionate $p(p|o=4-4.40)$, $p(p|o=4.40-5.60)$, $p(p|o>5.60)$ sono molto diverse per diverse osservazioni, quindi esse identificano la più probabile previsione. MISDc è discriminatorio per $o=4-4.40$ ed $o>5.60$ ma presenta una discriminazione più bassa per $o=4.40-5.60$. Infine HEC-RAS discrimina perfettamente per $o=4-4.40$ e presenta una buona discriminazione anche per $o>5.60$.

È emerso quindi che STAFOM è il modello le cui previsioni hanno più valore delle altre quanto agli aspetti sopra indagati e che quindi esso è il modello che fornisce le previsioni più utili ai fini dell'identificazione delle "classi di allerta". HEC-RAS è invece il modello che fornisce le previsioni con valore più basso.

Generalizzando l'analisi del valore descritta, è possibile identificare il valore delle previsioni nell'abilità del sistema di distinguere gli eventi che provocano esondazione da quelli che non la causano. Questa capacità dei modelli, come quella di prevedere la giusta "classe di allerta", sembra più importante che prevedere esattamente il valore del picco idrometrico, almeno considerando il punto di vista dell'efficacia dell'allertamento.

⁶ nell'analisi la moda è stata usata (al posto del valore medio) per valutare l'attendibilità e la risoluzione. Questo perché, per il problema investigato (cioè la capacità di distinzione tra varie classi) la conoscenza della classe più frequente è più importante del valore medio delle previsioni

Per capire che valore forniscono le previsioni dei modelli anche in questi termini analizziamo le tabelle di contingenza riportate di seguito. Esse mostrano, per ogni intervallo di previsione, la frequenza di occorrenza di tutti i possibili risultati della previsione, definiti in tabella 2.15.

Sul totale degli eventi considerati, cioè 23 per STAFOM e MISDc e 22 per i modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS osserviamo che:

- ❖ STAFOM non ha previsto un'alluvione in un solo caso e non ha dato falsi allarmi.
- ❖ MISDc non ha previsto un'alluvione in un solo caso e ha fornito un solo falso allarme.
- ❖ HEC-RAS non ha previsto un'alluvione in un caso e ha dato 3 falsi allarmi.

Anche dall'analisi di queste ulteriori tabelle STAFOM si conferma il modello che fornisce la previsione con valore più elevato, mentre HEC-RAS quello che fornisce le previsioni con valore più scarso.

risultato	definizione			osservato	
falso allarme FA	è stato dato l'allarme ma non si è verificata l'alluvione				
mancato evento ME	è avvenuta un'alluvione non prevista			>5.60	<5.60
evento previsto H	l'alluvione prevista si è verificata	previsto	>5.60	H	FA
calma N	non sono state previste né sono avvenute alluvioni		<5.60	ME	N

Tabella 2.15 Definizione dei risultati della previsione

STAFOM		osservato	
		>5.60	<5.60
previsto	>5.60	2	0
	<5.60	1	20

STAFOM		osservato	
		>5.60	<5.60
previsto	>5.60	0.09	0.00
	<5.60	0.04	0.87

MISDc		osservato	
		>5.60	<5.60
previsto	>5.60	2	1
	<5.60	1	19

MISDc		osservato	
		>5.60	<5.60
previsto	>5.60	0.09	0.04
	<5.60	0.04	0.83

HEC-RAS		osservato	
		>5.60	<5.60

HEC-RAS		osservato	
		>5.60	<5.60

previsto	>5.60	2	3
	<5.60	1	16

previsto	>5.60	0.09	0.14
	<5.60	0.05	0.73

Tabella 2.16 *Tabelle di contingenza relative alle alluvioni: le frequenze assolute sono riportate a sinistra mentre le frequenze relative a destra*

2.4.2 Previsioni dei modelli all'istante di raggiungimento del picco osservato

La valutazione del valore delle previsioni fornite dai modelli, all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato, è stata svolta sempre analizzando le distribuzioni congiunte e condizionate delle osservazioni e delle previsioni. Sono state costruite le tabelle di contingenza, come quelle riportate nel paragrafo precedente. Non vengono riportati i calcoli ed i relativi commenti poiché le analisi hanno fornito risultati che non si discostano molto da quelli emersi dall'analisi del valore illustrata nel paragrafo precedente. L'unica differenza è il fatto che, le previsioni fornite all'istante di raggiungimento del picco idrometrico reale, possiedono un valore leggermente inferiore rispetto a quello delle previsioni analizzate al paragrafo 2.4.1. Infatti, nel primo caso, STAFOM è l'unico modello utile ai fini dell'identificazione della corretta classe di allerta solo quando i livelli idrometrici sono almeno pari a 4.40 metri, mentre, dalle analisi illustrate al paragrafo 2.4.1, è emerso che STAFOM riesce ad identificare la corretta fascia di allerta quando il livello idrometrico previsto è superiore ai 4 metri. Ricordiamo che, anche dalle analisi di accuratezza, era emerso il fatto che l'accuratezza delle previsioni all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato fosse leggermente inferiore a quella dei picchi idrometrici previsti.

2.5 Conclusioni emerse dalle analisi

Dalle analisi effettuate sul valore delle previsioni è emerso quindi che STAFOM è, tra i tre, il modello che fornisce le previsioni che meglio identificano le "classi di allerta" e meglio distinguono gli eventi che provocano esondazione da quelli che non la causano. Esso è quindi lo strumento che meglio può indirizzare le attività dei soggetti coinvolti nella gestione delle emergenze. Inoltre HEC-RAS costituisce il modello che offre le previsioni con valore più scarso.

Quanto concluso è coerente con le osservazioni desunte dall'analisi di accuratezza, infatti, anche da quest'ultima, era emerso che STAFOM fosse il modello più accurato, seguito da MISDc, per quanto riguarda l'intensità dei livelli idrometrici previsti. È però importante ricordare che STAFOM fornisce la previsione con un anticipo massimo pari a quattro ore, mentre MISDc ed HEC-RAS permettono di avere fino ad 8 ore di anticipo sull'osservato. Quindi MISDc, che è risultato essere un modello più accurato di HEC-RAS, potrebbe essere considerato, in alcuni casi, uno strumento

più utile di STAFOM ai fini della gestione delle emergenze, in quanto fornisce più tempo per la messa in atto delle operazioni necessarie.

Inoltre, ricordiamo che l'analisi di accuratezza ha messo in luce i seguenti aspetti:

- ❖ I modelli HEC-HMS ed HEC-RAS accoppiati non forniscono dei buoni idrogrammi (v. coefficiente NS medio al paragrafo 2.3);
- ❖ la tendenza generale di tutti i modelli è quella di sottostimare il livello idrometrico;
- ❖ Per quanto riguarda i tempi di previsione dei picchi idrometrici MISDc si è dimostrato il modello più accurato, seguito da STAFOM.

Dall'analisi di accuratezza è emersa quindi la necessità di una ricalibrazione dei modelli al fine di eliminare l'errore sistematico di sottostima. Dall'analisi del valore è invece emerso che MISDc ed HEC-RAS non sono in grado di identificare la classe di allerta all'interno della quale si colloca il picco idrometrico.

È interessante capire se questo comportamento dei modelli si manifesta anche nella previsione del ramo di risalita dell'idrogramma, cioè se il livello idrometrico previsto in fase di risalita dell'idrogramma si colloca all'interno della corretta fascia di allerta o meno. Ai fini dell'ottimizzazione dell'uso dei modelli in tempo reale, è importante quindi verificare se i modelli prevedono correttamente il raggiungimento delle varie soglie di allerta e se quindi costituiscono degli strumenti utili per l'esecuzione delle operazioni da svolgersi. In particolare, si ritiene utile analizzare i risultati relativamente al raggiungimento della soglia di pre-allarme, infatti essa rappresenta la soglia da cui, come vedremo nel capitolo successivo, comincia la fase operativa della gestione delle emergenze. È quindi fondamentale che, i modelli funzionanti in tempo reale, siano in grado di identificare il raggiungimento della soglia.

3 RAGGIUNGIMENTO DELLA SOGLIA IDROMETRICA DI PRE-ALLARME – PREVISIONI DEI MODELLI E VALUTAZIONE DELLE LORO PERFORMANCE

Al termine del capitolo precedente si è sottolineato che, ai fini dell'ottimizzazione dell'uso dei modelli in tempo reale, è importante capire se questi riescono a prevedere in modo accurato l'inizio della fase di pre-allarme, che segna l'avvio della fase operativa nella gestione delle emergenze. Nel presente capitolo vengono illustrate le analisi svolte in merito alla bontà dei modelli in corrispondenza del raggiungimento della soglia di pre-allarme. Il capitolo è organizzato come segue:

- ❖ vengono spiegati i motivi che spingono ad un'analisi delle performance dei modelli relativamente alla soglia di pre-allarme e viene spiegata la modalità di analisi (paragrafo 3.1);
- ❖ viene esposta la valutazione di accuratezza effettuata sulle previsioni dei modelli all'istante di raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme (paragrafo 3.2);
- ❖ viene analizzato il tempo di previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme (paragrafo 3.3);
- ❖ viene riportata l'analisi del valore delle previsioni all'istante di raggiungimento della soglia idrometrica in questione (paragrafo 3.4);
- ❖ vengono espone le conclusioni cui si è pervenuti (paragrafo 3.5).

3.1 L'analisi di accuratezza e il valore delle previsioni

Le previsioni fornite dai modelli idrologici/idraulici oggetto del presente studio, alla sezione idrometrica di P. Felcino, in seguito alla simulazione degli eventi di piena elencati nel secondo capitolo, sono stati analizzati anche relativamente alla soglia di pre-allarme (fissata a 4 metri a P Felcino).

Innanzitutto, è importante chiarire le motivazioni che hanno spinto alla scelta di questa soglia come elemento in relazione al quale valutare le performance dei modelli.

Quando l'altezza d'acqua, in una o più sezioni fluviali strumentate della Regione Umbria, raggiunge la suddetta soglia idrometrica, secondo il Piano Provinciale di Emergenza Protezione Civile della Regione Umbria (2006), devono essere realizzate le seguenti operazioni:

- ❖ Vigilanza, ricognizione e sopralluoghi da parte delle strutture locali (Regione, Provincia, Comuni.....);
- ❖ Aggiornamento continuo dello scenario (Responsabile della Funzione tecnico – scientifica e pianificazione);

- ❖ Se necessario, attivazione della Sala Operativa e/o delle strutture di comando e controllo a vari livelli;
- ❖ Allertamento delle funzioni di supporto interessate dall'evento che operano secondo l'ambito di competenza;
- ❖ Scambio continuo di informazioni tra la sala operativa e le varie strutture di comando e controllo, se attivate.

La fase di pre-allarme, determinata dal raggiungimento della relativa soglia idrometrica, rappresenta dunque, se necessario, l'inizio della fase operativa nella gestione del rischio idraulico. Infatti, durante lo stadio precedente, cioè in fase di attenzione, gli adempimenti dei responsabili delle funzioni di supporto possono riassumersi in azioni di monitoraggio, aggiornamento della situazione e scambio di informazioni. Ai fini della gestione delle emergenze, è dunque molto importante conoscere, con un certo anticipo, quando la soglia di pre-allarme verrà raggiunta, in modo da poter pianificare, con cura e tempo sufficiente, le operazioni elencate. E' quindi fondamentale capire se i modelli utilizzati prevedono in modo corretto il raggiungimento della soglia di pre-allarme, cioè se riescono a prevedere quando tale raggiungimento si verificherà.

Nel primo capitolo era stato specificato che, i modelli in uso presso il CFD, sono stati tarati per predire, la portata massima in una determinata sezione. Questo perché il picco di portata può dar luogo ad esondazione e quindi a danni rilevanti, che è importante poter prevenire. È interessante capire se, le performance dei modelli, relativamente alla previsione del picco idrometrico, corrispondono a quelle rilevate nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme. Ci stiamo quindi chiedendo come si comportano dei modelli idrologici/idraulici, tarati per raggiungere un certo obiettivo (previsione accurata del picco idrometrico), quando i loro risultati vengono valutati relativamente ad un altro aspetto (previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme). Ricordiamo che i modelli in questione sono stati utilizzati in tempo differito per ottimizzare l'uso degli stessi in real-time, scopo che necessita della conoscenza dei livelli idrometrici previsti in fase di risalita dell'idrogramma, ed in particolare delle previsioni inerenti il raggiungimento della soglia di pre-allarme.

Dopo aver chiarito i motivi alla base della scelta effettuata, spieghiamo come è stata condotta la valutazione delle performance dei modelli. Sono state studiate:

1. i livelli idrometrici forniti dai modelli all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato;
2. i tempi di raggiungimento della soglia di pre-allarme previsti ed osservati.

Il primo punto è stato inizialmente esaminato tramite un'analisi di accuratezza, svolta calcolando gli indici di performance considerati per il picco idrometrico (v. paragrafo 2.1) tranne il coefficiente di correlazione, al fine di valutare gli errori tra osservazioni e previsioni.

In seguito sono state fatte alcune considerazioni sugli aspetti messi in luce dall'analisi del secondo punto.

Infine è stata fatta una valutazione del valore delle previsioni all'istante di raggiungimento della soglia in questione. Il valore è stato considerato per constatare se, il beneficio incrementale che una giusta previsione del raggiungimento della soglia può offrire a coloro che gestiscono i rischi alluvionali, viene fornito dai modelli cui siamo interessati.

3.2 La valutazione dell'accuratezza

Di seguito viene illustrata l'analisi di accuratezza svolta sulle previsioni fornite dai modelli all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme. I risultati sono riportati in tabella 3.1:

numero evento	DATA				h OSSERVATO [m]	h PREVISTO STAFOM [m]	previsione superamento soglia STAFOM	h PREVISTO MISDc [m]	previsione superamento soglia MISDc	h PREVISTO HEC-RAS [m]	previsione superamento soglia HEC-RAS
	giorno	mese	anno	ora							
1	10	12	1990	8:00	4.00	4.86	si	3.20	no	3.76	no
2	11	2	1991	3:00	4.01	2.82	no	1.98	no	1.22	no
3	7	5	1991	16:00	4.01	3.81	no	3.11	no	1.46	no
4	16	11	1991	13:30	4.04	3.16	no	2.59	no	1.45	no
5	20	11	1991	11:30	4.04	3.19	no	2.79	no	1.31	no
6	24	11	1991	18:00	4.00	3.79	no	3.92	no	1.45	no
7	20	10	1992	20:30	4.00	3.93	no	3.88	no	2.83	no
8	5	12	1992	22:30	4.12	3.97	no	2.81	no	2.46	no
9	8	12	1992	5:30	4.04	3.23	no	3.23	no	1.24	no
10	31	12	1995	13:00	4.08	3.88	no	3.08	no	3.75	no
11	18	11	1996	4:00	4.03	4.29	si	4.26	si	6.29	si
12	14	12	1996	16:00	4.01	3.64	no	2.97	no	1.68	no
13	3	1	1997	14:00	4.01	3.73	no	3.67	no	1.22	no
14	21	4	1997	8:30	4.01	4.45	si	3.47	no	4.50	si
15	2	6	1997	16:30	4.10	3.45	no	4.01	si	5.17	si
16	10	2	1999	11:00	4.08	3.77	no	2.69	no	1.94	no
17	26	12	2000	9:30	4.04	4.25	si	3.66	no	4.08	si
18	26	11	2005	13:30	4.07	3.27	no	2.49	no	1.22	no
19	3	12	2005	14:30	4.03	3.22	no	3.39	no	1.22	no
20	6	12	2005	2:00	4.13	3.69	no	4.00	si	1.22	no
21	1	1	2006	19:30	4.05	3.89	no	3.73	no	no dati	
22	11	12	2008	0:30	4.06	4.09	si	3.63	no	2.62	no

23	5	1	2010	20:30	4.14	3.34	no	4.37	si	2.08	no
----	---	---	------	-------	------	------	----	------	----	------	----

Tabella 3.1 Osservazioni e previsioni all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme. In verde sono evidenziati i livelli idrometrici previsti che si discostano da quelli osservati di un valore massimo in termini assoluti pari al 10% del livello idrico osservato.

Osservando la tabella si nota che la tendenza generale è quella di sottostimare la soglia di pre-allarme.

Tale tendenza è confermata anche dal confronto grafico tra l'osservato all'istante di raggiungimento della soglia (ovviamente coincidente o molto prossimo a 4 metri) e il previsto (v. figure 3.1-3.3). Sono disponibili anche i grafici che mostrano l'errore di previsione sulle ordinate ed il livello idrometrico previsto/osservato sulle ascisse (v. Appendice D), essi non vengono riportati poiché forniscono informazioni desumibili anche dalle figure 3.1-3.3. Gli indici di accuratezza calcolati, illustrati nel paragrafo 2.1 del secondo capitolo, sono riportati in tabella 3.2.

Dai grafici si nota che STAFOM fornisce la previsione più accurata, seguito dal MISDc, coerentemente al comportamento riscontrato nelle analisi sul picco idrometrico.

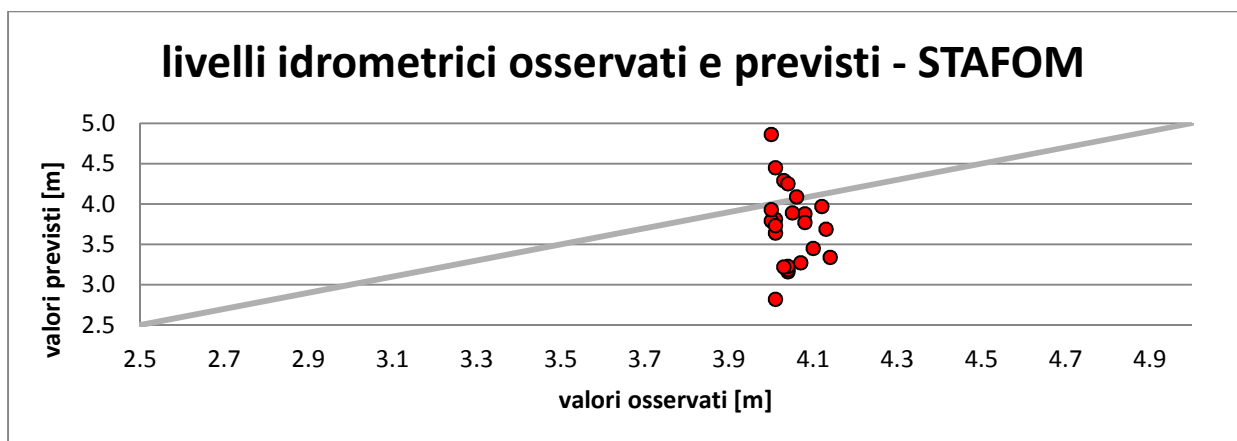


Figura 3.1 Livelli idrometrici previsti da STAFOM rispetto al raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato

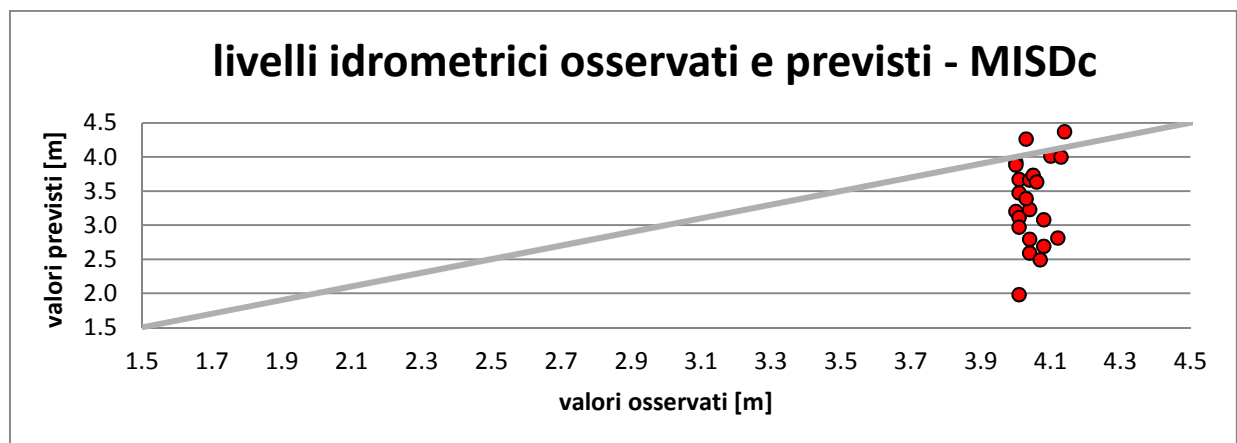


Figura 3.2 Livelli idrometrici previsti da MISDc rispetto al raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato

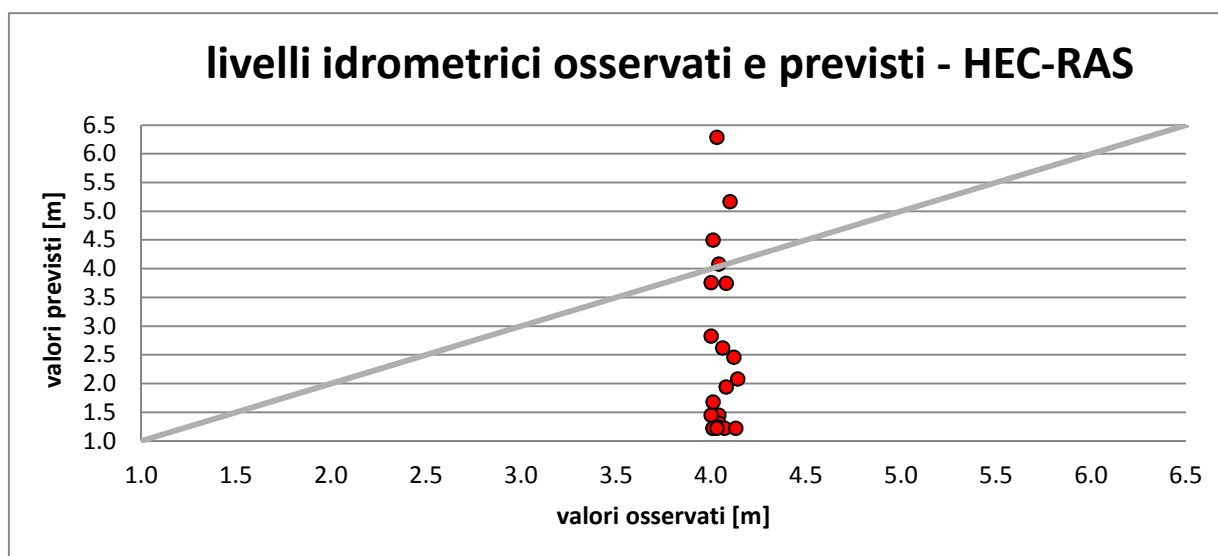


Figura 3.3 Livelli idrometrici previsti da HEC-RAS rispetto al raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato

Misura	simbolo	osservato	STAFOM	MISDc	HEC-RAS
media	μ	4.05	3.73	3.34	2.46
deviazione standard	σ	0.04	0.48	0.61	1.49
media errori	μ_E		-0.32	-0.70	-1.59
media errore assoluto	$ \mu_E $		0.48	0.74	1.94
media di (errore assoluto/dati osservati)	$\mu(e^* /O_i)$		0.12	0.18	0.48
media di (errore assoluto/dati previsti)	$\mu(e^* /P_i)$		0.14	0.26	1.24
scostamento	s		0.92	0.83	0.61

Tabella 3.2 Misure di accuratezza

Si osserva che STAFOM sottostima il livello idrometrico, e quindi non prevede il raggiungimento della soglia, per 19 casi su 23, MISDc sottostima il livello idrometrico per 21 casi su 23, tra cui, per due eventi, è previsto il raggiungimento della soglia ma il livello idrometrico è poco inferiore a quello realmente registrato. Infine HEC-RAS sottostima il livello idrometrico per 18 eventi su 22.

Più nel dettaglio, STAFOM ha commesso un errore assoluto inferiore al 10% del livello idrometrico osservato per 12 eventi su 23 (i cui livelli idrici previsti sono evidenziati in verde in tabella 3.1). MISDc presenta degli errori assoluti tra livello idrometrico previsto ed osservato, inferiori al 10 % dell'altezza d'acqua osservata, in 9 casi su 23 (i cui livelli idrometrici previsti evidenziati in verde in tabella 3.1) ed infine HEC-RAS ha fornito solo 3 simulazioni su 22 con errore assoluto tra previsto ed osservato inferiore al 10% del livello idrometrico osservato (i cui livelli idrici previsti evidenziati in verde in tabella 3.1).

Il range di errori di STAFOM va da un minimo di -1.2 metri circa ad un massimo di circa +0.9 metri rispetto al livello idrometrico osservato, con un errore medio in termini assoluti di 0.48 metri. Per MISDc tale intervallo va da -2 metri circa ad un massimo di +0.2 metri circa rispetto al livello

idrometrico osservato e l'errore medio assoluto è di 0.74 metri. Infine, per HEC-RAS, il range di errori va approssimativamente da un minimo di -3 metri ad un massimo di +2.3 metri, con un valore medio assoluto di 1.94 metri. Considerando ancora una volta l'altezza d'acqua che intercorre tra le varie soglie di allerta, cioè 80 centimetri tra quella di attenzione e quella di pre-allarme e 40 centimetri tra quest'ultima e quella di allarme, è possibile affermare che non può essere garantito il fatto che i modelli riescano ad identificare la corretta fascia di allerta, e cioè quella di pre-allarme. Si analizzerà più nel dettaglio tale capacità al paragrafo 3.4.

Le misure di accuratezza dei modelli (v. tabella 3.2) confermano le evidenze grafiche. In particolare:

- la media, la media degli errori e lo scostamento suggeriscono che le previsioni dei modelli tendono a sottostimare il livello idrometrico, in particolare HEC-RAS è il modello che sottostima maggiormente;
- la media degli errori, la media degli errori assoluti e la deviazione standard mostrano che STAFOM è il modello che fornisce la previsione più accurata, seguito da MISDc. La media degli errori assoluti di HEC-RAS è poco inferiore al 50% della media delle osservazioni.

Confrontando le tabelle 2.7 e 3.2 si nota che le misure di accuratezza di STAFOM ed HEC-RAS sono peggiori all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme, mentre quelle di MISDc sono migliori all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme. In complesso si può affermare che il raggiungimento della soglia di pre-allarme è previsto in modo meno accurato rispetto al raggiungimento del picco idrometrico, infatti l'errore di sottostima è più accentuato in corrispondenza della soglia.

È importante conoscere questi dati perché, se i modelli non fungono da strumenti utili in fase di allerta, non potrà essere garantita un'adeguata predisposizione delle misure atte a mitigare il rischio idraulico. Come conseguenza, i danni derivanti dall'innalzamento del livello idrico saranno maggiori.

Si conclude l'analisi evidenziando la necessità di procedere ad una ricalibrazione dei modelli, al fine di eliminare l'errore sistematico di sottostima, come già emerso delle analisi di accuratezza sul picco idrometrico (v. capitolo 2). La ricalibrazione deve essere però svolta con lo scopo di stimare in modo accurato tutto l'idrogramma di piena, non solamente il picco idrometrico.

3.3 La verifica del tempo di previsione

Terminiamo l'analisi di accuratezza considerando i tempi di previsione del raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme forniti dai modelli, così come fatto in riferimento alla previsione del picco idrometrico.

Al capitolo precedente è stata già sottolineata l'importanza delle tempistiche di previsione ai fini della gestione delle emergenze. L'anticipo temporale fornito dalla modellistica di previsione viene infatti ridotto se, il verificarsi di un determinato fatto, in questo caso il raggiungimento della soglia di pre-allarme, viene posticipato dai modelli.

Le tabelle 3.3-3.5 mostrano, per ogni evento, quando è stato osservato e previsto dai tre modelli il raggiungimento della soglia di pre-allarme e qual è l'errore temporale⁷ dei modelli, mentre le figure 3.4-3.6 mostrano, per ciascun evento di piena considerato, l'errore temporale tra il raggiungimento della soglia previsto e osservato rispetto al livello idrometrico previsto.

numero evento	DATA E ORA RAGGIUNGIMENTO SOGLIA OSSERVATO	DATA E ORA RAGGIUNGIMENTO SOGLIA PREVISTO - STAFOM	ERRORE TEMPORALE SOGLIA PRE-ALLARME - STAFOM		
			anticipo/posticipo	ore	minuti
1	12/10/90 8:00	12/10/90 6:30	anticipo	1	30
2	2/11/91 3:00	2/11/91 6:00	posticipo	3	0
3	5/7/91 16:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
4	11/16/91 13:30	11/16/91 15:30	posticipo	2	0
5	11/20/91 11:30	11/20/91 14:30	posticipo	3	0
6	11/24/91 18:00	11/24/91 18:30	posticipo	0	30
7	10/20/92 20:30	10/21/92 3:00	posticipo	6	30
8	12/5/92 22:30	12/5/92 23:00	posticipo	0	30
9	12/8/92 5:30	12/8/92 8:00	posticipo	2	30
10	12/31/95 13:00	12/31/95 13:30	posticipo	0	30
11	11/18/96 4:00	11/18/96 3:30	anticipo	0	30
12	12/14/96 16:00	12/14/96 18:30	posticipo	2	30
13	1/3/97 14:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
14	4/21/97 8:30	4/21/97 7:30	anticipo	1	0
15	6/2/97 16:30	6/2/97 18:30	posticipo	2	0
16	2/10/99 11:00	2/10/99 12:00	posticipo	1	0
17	12/26/00 9:30	12/26/00 7:00	anticipo	2	30
18	11/26/05 13:30	11/26/05 16:00	posticipo	2	30
19	12/3/05 14:30	12/3/05 17:00	posticipo	2	30
20	12/6/05 2:00	12/6/05 3:30	posticipo	1	30
21	1/1/06 19:30	1/1/06 13:30	anticipo	6	0

⁷ Indica quanto il raggiungimento della soglia di pre-allarme è stato anticipato o posticipato rispetto all'osservato. Ha lo stesso significato di PTE (v. tabella 2.1), ma è riferito al raggiungimento della soglia di pre-allarme.

22	12/11/08 0:30	12/10/08 22:30	anticipo	2	0
23	1/5/10 20:30	1/5/10 22:30	posticipo	2	0

Tabella 3.3 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme - STAFOM

numero evento	DATA E ORA PICCO OSSERVATO	DATA E ORA PICCO PREVISTO - MISDc	ERRORE TEMPORALE SOGLIA PRE-ALLARME - MISDc		
			anticipo/posticipo	ore	minuti
1	12/10/90 8:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
2	2/11/91 3:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
3	5/7/91 16:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
4	11/16/91 13:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
5	11/20/91 11:30	11/20/91 17:30	posticipo	6	0
6	11/24/91 18:00	11/24/91 19:00	posticipo	1	0
7	10/20/92 20:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
8	12/5/92 22:30	12/6/92 4:30	posticipo	6	0
9	12/8/92 5:30	12/8/92 12:00	posticipo	6	30
10	12/31/95 13:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
11	11/18/96 4:00	11/18/96 3:30	anticipo	0	30
12	12/14/96 16:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
13	1/3/97 14:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
14	4/21/97 8:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
15	6/2/97 16:30	6/2/97 16:30	nessun errore temporale		
16	2/10/99 11:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
17	12/26/00 9:30	12/27/00 20:30	posticipo	35	0
18	11/26/05 13:30	11/26/05 19:30	posticipo	6	0
19	12/3/05 14:30	12/3/05 19:00	posticipo	4	30
20	12/6/05 2:00	12/6/05 2:00	nessun errore temporale		
21	1/1/06 19:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
22	12/11/08 0:30	12/11/08 4:30	posticipo	4	0
23	1/5/10 20:30	1/5/10 20:00	anticipo	0	30

Tabella 3.4 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme - MISDc

numero evento	DATA E ORA RAGGIUNGIMENTO SOGLIA OSSERVATO	DATA E ORA RAGGIUNGIMENTO SOGLIA PREVISTO - HEC-RAS	ERRORE TEMPORALE SOGLIA PRE-ALLARME - HEC-RAS		
			anticipo/posticipo	ore	minuti
1	12/10/90 8:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
2	2/11/91 3:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
3	5/7/91 16:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
4	11/16/91 13:30	11/16/91 17:30	posticipo	4	0
5	11/20/91 11:30	11/21/91 16:00	posticipo	28	30
6	11/24/91 18:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
7	10/20/92 20:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
8	12/5/92 22:30	12/6/92 2:00	posticipo	3	30
9	12/8/92 5:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			

10	12/31/95 13:00	12/31/95 15:00	posticipo	2	0
11	11/18/96 4:00	11/17/96 23:30	anticipo	4	30
12	12/14/96 16:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
13	1/3/97 14:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
14	4/21/97 8:30	4/21/97 6:30	anticipo	2	0
15	6/2/97 16:30	6/2/97 4:30	anticipo	12	0
16	2/10/99 11:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
17	12/26/00 9:30	12/26/00 9:00	anticipo	0	30
18	11/26/05 13:30	11/27/05 6:30	posticipo	17	0
19	12/3/05 14:30	soglia di pre-allarme non raggiunta			
20	12/6/05 2:00	soglia di pre-allarme non raggiunta			
22	12/11/08 0:30	12/11/08 4:00	posticipo	3	30
23	1/5/10 20:30	1/5/10 23:00	posticipo	2	30

Tabella 3.5 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme - HEC-RAS

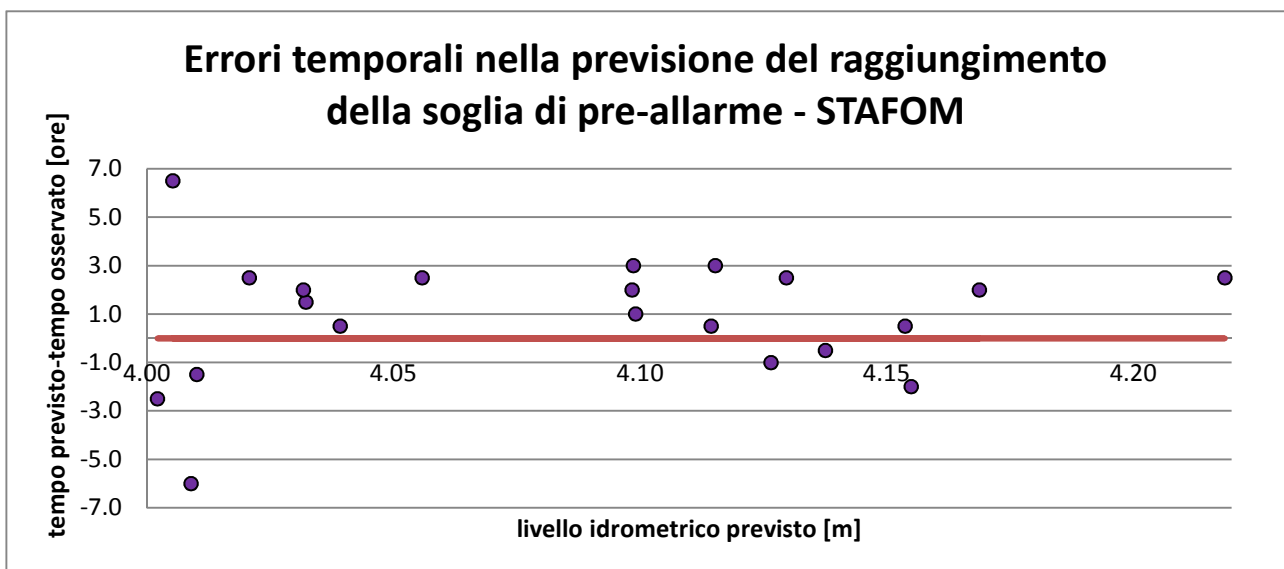


Figura 3.4 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme rispetto al livello idrometrico previsto: STAFOM

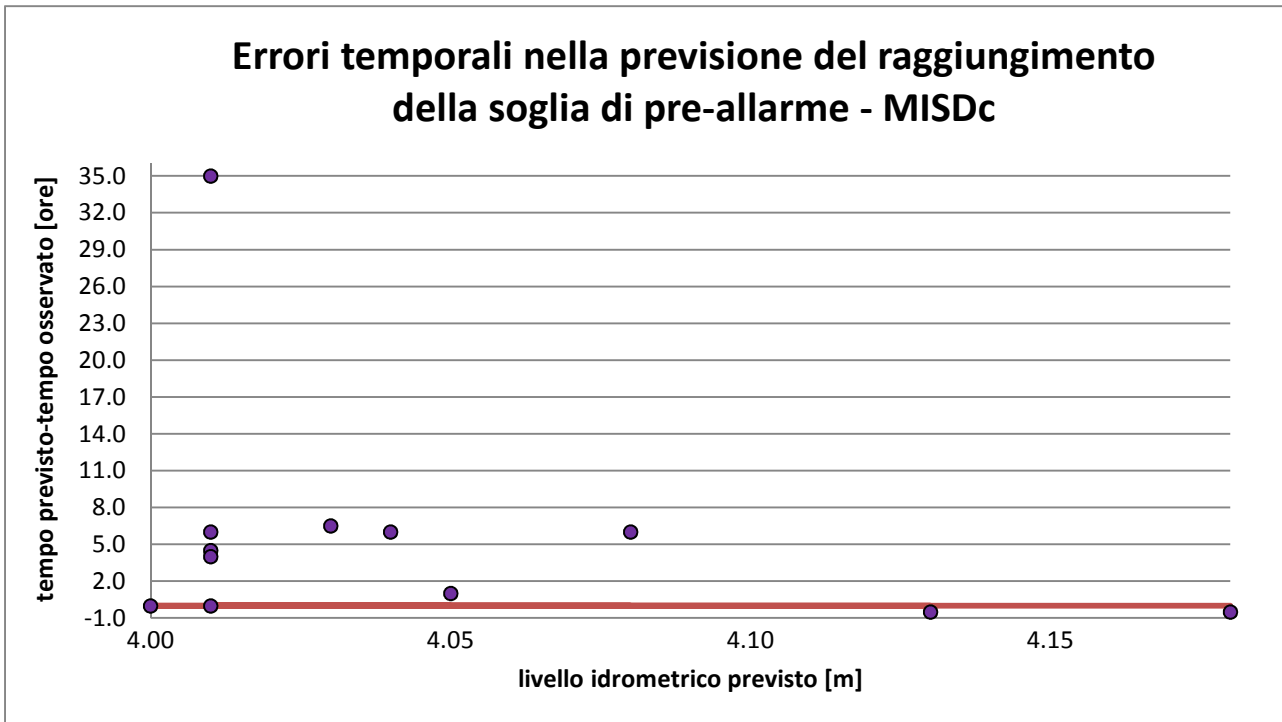


Figura 3.5 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme rispetto al livello idrometrico previsto: MISDc

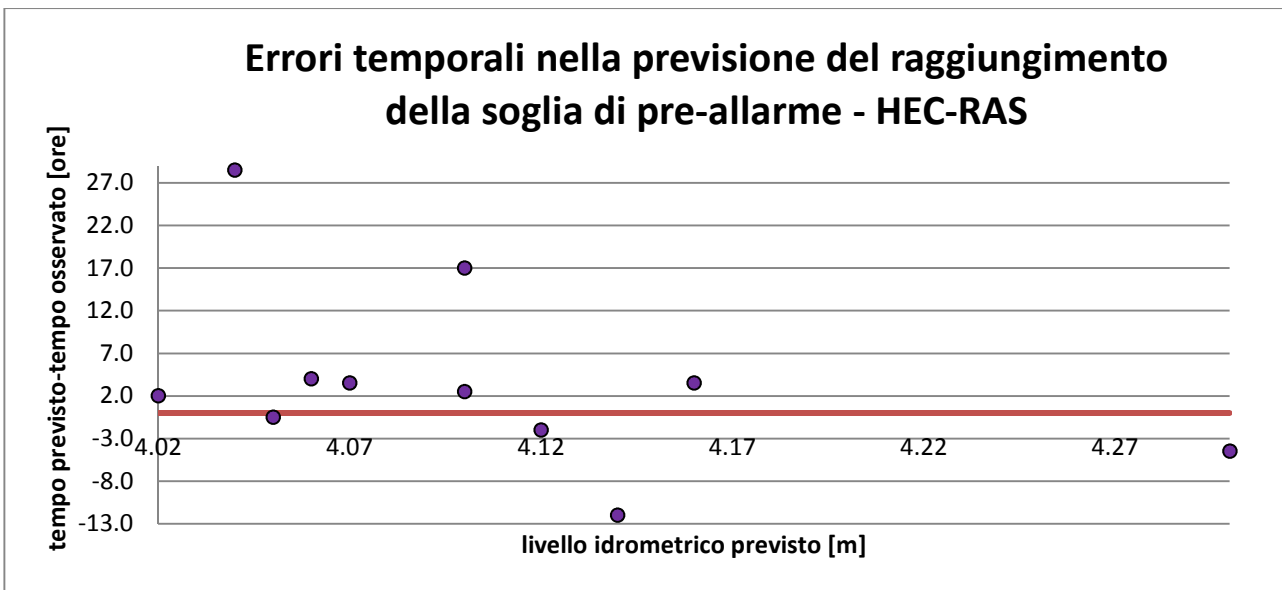


Figura 3.6 Errori temporali nella previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme rispetto al livello idrometrico previsto: HEC-RAS

Guardando le tabelle 3.3-3.5 e le figure 3.4-3.6, si nota che, in numerosi casi, a causa della sottostima dei livelli idrometrici, i modelli hanno fornito un'altezza d'acqua massima inferiore ai 4 metri e quindi non hanno previsto il raggiungimento della soglia di pre-allarme. Tale fatto si è verificato per molti eventi riprodotti da MISDc ed HEC-RAS e, siccome un'analisi di accuratezza sugli errori temporali verrebbe svolta considerando solo i casi in cui è stato previsto il raggiungimento della soglia, il campione degli eventi considerati sarebbe troppo ridotto (pari a 21

eventi per STAFOM, 12 eventi per MISDc, 11 eventi per HEC-RAS) e renderebbe l'analisi poco significativa ai fini di comprendere l'effettivo comportamento dei modelli.

Nonostante tale analisi non venga svolta è importante fare alcune considerazioni sul comportamento dei modelli:

- ❖ STAFOM ha previsto il raggiungimento della soglia per 21 eventi su 23 totali, tra questi, osservando le tabelle ed i grafici precedenti, si vede che tale raggiungimento viene posticipato in 15 casi ed anticipato in 6.
- ❖ MISDc ha previsto il raggiungimento della suddetta per 12 eventi su 23 totali, tra questi si vede che tale raggiungimento viene posticipato in 8 casi, anticipato in 2 ed il modello non commette nessun errore temporale nella simulazione di altri 2 eventi.
- ❖ L'uso accoppiato dei modelli HEC-HMS ed HEC-RAS ha portato alla previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme in 11 casi su 22, di cui per 7 eventi è stato previsto un posticipo rispetto all'osservato e per 4 un anticipo.

Sottolineiamo quindi che le previsioni fornite dai modelli tendono a posticipare o a non prevedere il raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme. Tale fatto è coerente con quanto rilevato al paragrafo 3.2, cioè che, all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme reale, mediamente i modelli tendono a sottostimare il livello idrometrico. Il fatto che i modelli tendano a posticipare o a non prevedere il raggiungimento della soglia è un punto critico per la gestione delle emergenze in tempo reale. Infatti ricordiamo che, in tempo reale, STAFOM prevede come si evolverà l'idrogramma di piena nelle 4 ore successive all'istante di avvio della simulazione, mentre MISDc ed HEC-RAS all'incirca nelle 8 ore successive all'istante di avvio della simulazione, alla sezione idrometrica di P. Felcino. Nell'ipotesi che MISDc o HEC-RAS prevedano il raggiungimento della soglia di pre-allarme dopo circa 8 ore dall'avvio della simulazione, se tale raggiungimento viene posticipato, non si hanno a disposizione 8 ore per mettere in atto le operazioni necessarie alla mitigazione dei danni, ma di meno. Lo stesso discorso vale per le previsioni fornite da STAFOM. La situazione è ancora più grave se ci si basa sui risultati dei modelli ed il raggiungimento della soglia di pre-allarme non viene previsto.

3.4 La valutazione del valore

In linea a quanto esposto nel paragrafo 2.4 del secondo capitolo, la valutazione del valore delle previsioni fornite dai modelli viene condotta analizzando le tabelle di contingenza. Esse sono più

semplificate rispetto a quelle ricavate nel capitolo precedente a causa delle diverse condizioni di analisi e mostrano solamente le distribuzioni di probabilità congiunta. Tali tabelle presentano infatti il livello idrometrico osservato sempre all'interno della fascia di pre-allarme (4-4.40 metri), conseguentemente le distribuzioni di probabilità congiunta di osservazioni e previsioni coincidono con le distribuzioni di probabilità condizionate delle previsioni date le osservazioni ($p(p|o)$) e con le distribuzioni marginali delle previsioni ($p(p)$). Inoltre le distribuzioni di probabilità condizionate delle osservazioni date le previsioni, $p(o|p)$, sono sempre uguali ad 1 per qualsiasi intervallo di previsione ed anche la distribuzione marginale dell'osservato è uguale ad 1. Dunque sono state calcolate solo le distribuzioni di probabilità congiunta di osservazioni e previsioni. Non sono stati presi in considerazione l'attendibilità⁸ e la risoluzione⁹ ma è stata considerata solo la discriminazione¹⁰. Si rimanda al capitolo precedente per la teoria riguardante il valore delle previsioni.

Il valore delle previsioni viene identificato, nella presente analisi, nella capacità dei modelli di individuare correttamente la fase di pre-allarme. Questo può infatti fornire un beneficio a coloro che gestiscono le emergenze.

Nelle tabelle 3.6-3.8 si mostrano le distribuzioni di probabilità congiunta di osservazioni e previsioni, che identificano la probabilità che la previsione si trovi in un determinato intervallo quando l'osservato si trova nell'intervallo 4-4.40 metri.

Si osserva che, nelle celle grigie evidenziate nelle tabelle, non è mai presente un numero intorno all'1, che identificherebbe una previsione ideale. Inoltre, il valore all'interno delle suddette, non corrisponde neppure alla frequenza più elevata.

Questo significa che, nella maggior parte dei casi, i modelli non sono in grado di identificare la fase di pre-allarme. Infatti, la simulazione di molti eventi tramite i modelli ha messo in luce una sottostima dei livelli idrometrici: la maggior parte delle volte il livello idrometrico, all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato, viene collocato nella fascia di attenzione (3.20-4 metri) da parte di STAFOM e MISDc, mentre HEC-RAS ha addirittura previsto, in circa il 73% dei casi, che il livello idrometrico si trovasse al di sotto della soglia di attenzione (3.20 metri) ed ha

⁸ la corrispondenza media tra i valori previsti e i valori osservati, è relativa al livello di accordo tra la media delle osservazioni associate ad una particolare previsione e questa previsione.

⁹ l'abilità della previsione di dividere il set di eventi in sottoinsiemi con diverse distribuzioni di frequenza, è relativa alla differenza tra la media delle osservazioni associate ad una particolare previsione e l'osservazione media totale incondizionata.

¹⁰ L'abilità della previsione di discriminare tra le osservazioni, cioè, di avere un'alta frequenza di previsione di un valore quando questo valore si verifica.

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)		
PREVISIONE STAFOM		osservato
		4-4.40
previsto	<3.20	0.13
	3.20-4	0.65
	4-4.40	0.13
	4.40-5.60	0.09
	>5.60	0.00

Tabella 3.6 Distribuzioni di probabilità congiunte delle previsioni di STAFOM. In grigio è evidenziata la cella in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)		
PREVISIONE MISDc		osservato
		4-4.40
previsto	<3.20	0.39
	3.20-4	0.43
	4-4.40	0.17
	4.40-5.60	0.00
	>5.60	0.00

Tabella 3.7 Distribuzioni di probabilità congiunte delle previsioni di MISDc. In grigio è evidenziata la cella in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione

tabella di contingenza (distribuzione congiunta)		
PREVISIONE HEC-RAS		osservato
		4-4.40
previsto	<3.20	0.73
	3.20-4	0.09
	4-4.40	0.05
	4.40-5.60	0.09
	>5.60	0.05

Tabella 3.8 Distribuzioni di probabilità congiunte delle previsioni di HEC-RAS. In grigio è evidenziata la cella in cui una frequenza pari ad 1 dovrebbe essere presente in caso di perfetta previsione

dunque fornito la previsione meno accurata. Inoltre, si nota che nessuno dei modelli presenta una buona discriminazione tra le previsioni, poiché le distribuzioni di probabilità congiunta riportate nelle soprastanti tabelle, che si ricorda coincidere con le distribuzioni di probabilità condizionata $p(p|o=4-4.40)$, non sono molto diverse per diverse previsioni.

Al termine di questa analisi sembra quindi che i modelli non costituiscano uno strumento affidabile per la previsione del raggiungimento della fase di pre-allarme.

Semplifichiamo ora le tabelle di contingenza sopra riportate ed analizziamo solamente la capacità dei modelli di prevedere il raggiungimento della soglia di pre-allarme (fissata a 4 metri), quando questa viene realmente raggiunta. Vediamo quindi quali sono le probabilità che il livello idrometrico si trovi sopra e sotto i 4 metri, all'istante di raggiungimento dei 4 metri. Dalle tabelle 3.9 si vede che STAFOM ha previsto un livello idrometrico almeno pari alla soglia di pre-allarme nel 22% dei casi, MISDc nel 17% dei casi ed HEC-RAS nel 18% degli eventi considerati. Tali percentuali sono basse, dunque sottolineiamo nuovamente che nessuno dei modelli sembra in grado di identificare la fase di pre-allarme quando questa occorre e che quindi essi non sembrano utili per pianificare, con tempo sufficiente, le operazioni elencate al paragrafo 3.1.

In conclusione è possibile affermare che, il valore delle previsioni dei modelli, all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato, è inferiore a quello delle previsioni all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato. Ricordiamo infatti che, nel suddetto caso, STAFOM sembrava essere in grado di collocare il picco idrometrico all'interno della corretta fascia di allerta quando l'altezza d'acqua prevista era almeno pari a 4.40 metri.

I modelli dovrebbero essere quindi ricalibrati al fine di ottenere delle previsioni accurate dell'intero idrogramma di piena, non solo del picco idrometrico.

STAFOM		osservato	
		>4	
previsto	>4	5	
	<4	18	

STAFOM		osservato	
		>4	
previsto	>4	0.22	
	<4	0.78	

MISDc		osservato	
		>4	
previsto	>4	4	
	<4	19	

MISDc		osservato	
		>4	
previsto	>4	0.17	
	<4	0.83	

HEC-RAS		osservato	
		>4	
previsto	>4	4	
	<4	18	

HEC-RAS		osservato	
		>4	
previsto	>4	0.18	
	<4	0.82	

Tabella 3.9 Distribuzioni di probabilità relative alla previsione del raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme: le frequenze assolute sono riportate a sinistra mentre le frequenze relative a destra

3.5 Conclusioni emerse dalle analisi

In complesso è stato rilevato che:

- ❖ i modelli idrologici/idraulici oggetto del presente studio tendono a sottostimare i livelli idrometrici quando la soglia di pre-allarme, nella sezione idrometrica di P. Felcino, viene raggiunta. Tra di essi STAFOM è lo strumento che fornisce i livelli idrometrici più vicini alla realtà, seguito dal MISDc;
- ❖ tutti i modelli tendono a posticipare l'istante temporale in cui si verifica il raggiungimento della soglia idrometrica in questione, o a non prevedere tale raggiungimento;
- ❖ gli strumenti analizzati non sembrano essere utili ai fini dell'identificazione della fase di pre-allarme e quindi della pianificazione degli interventi da svolgere, elencati al paragrafo 3.1;
- ❖ si può affermare che, in complesso, le previsioni dei modelli in merito al raggiungimento della soglia di pre-allarme sono risultate peggiori rispetto a quelle riguardanti il picco idrometrico (v. capitolo 2), a causa di quanto rilevato in merito alle altezze d'acqua previste ed al valore delle previsioni. Infatti, la sottostima dei livelli idrometrici è più accentuata ed il valore delle previsioni è inferiore rispetto a quanto emerso dalle analisi sul picco, in corrispondenza del raggiungimento della soglia osservato.

Inoltre, le analisi sull'altezza dei livelli idrometrici previsti all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato (paragrafo 3.2), sono risultate coerenti con quelle illustrate nel secondo capitolo, riguardanti i livelli idrometrici previsti all'istante di raggiungimento del picco idrometrico osservato (paragrafo 2.3.2), infatti, i livelli idrometrici vengono sottostimati e STAFOM si è rivelato lo strumento più accurato, seguito dal MISDc.

Al termine delle analisi sulla soglia idrometrica di pre-allarme si è quindi dedotta la necessità di procedere ad una ricalibrazione dei modelli al fine di stimare in modo preciso tutto l'idrogramma di piena. Sappiamo infatti che, per ora, i modelli sono calibrati per prevedere accuratamente il picco idrometrico (v. paragrafo 1.1).

CONCLUSIONI

Al termine del lavoro di tesi svolto si è pervenuti a varie osservazioni circa i comportamenti dei modelli idrologici/idraulici oggetto dello studio, che hanno permesso di formulare delle direttive sul futuro miglioramento dei modelli e sull'ottimizzazione del loro uso nella forma attuale.

Innanzitutto è opportuno ricapitolare brevemente quanto fatto.

I modelli considerati sono:

- ❖ il modello idrologico di trasferimento dell'onda di piena STAFOM-RCM;
- ❖ il modello idrologico afflussi-deflussi in continuo MISDc;
- ❖ il modello idrologico HEC-HMS accoppiato al modello idraulico HEC-RAS.

Essi vengono utilizzati in tempo reale dal CFD umbro per la previsione delle piene, ai fini della messa in atto di opportune misure per la gestione del rischio idraulico. I modelli sono stati utilizzati in tempo differito per riprodurre l'idrogramma di 23 eventi di piena occorsi nel territorio umbro tra il 1990 ed il 2010. Lo scopo della riproduzione degli eventi è quello di analizzare le performance degli strumenti di previsione e di poter quindi fornire delle direttive per l'ottimizzazione del loro uso in tempo reale nonché per eventuali miglioramenti futuri.

Prima del presente studio i modelli STAFOM e MISDc erano stati sottoposti ad una calibrazione, seguita da una validazione dei loro risultati. In particolare, la validazione era stata condotta considerando rispettivamente 2 anni (2008-2009) in cui sono occorsi 4 eventi di piena e 2 anni (2005 e 2008) in cui sono occorsi 2 eventi di piena nel territorio umbro. I modelli accoppiati HEC-HMS ed HEC-RAS erano invece stati sottoposti solo ad una calibrazione (v. capitolo 1). Tali calibrazioni e validazioni sono state basate rispettivamente sul miglioramento e sulla verifica dell'accuratezza dei modelli, quindi della loro capacità di prevedere l'intero idrogramma di piena ed il picco idrometrico, sia in termini di altezza d'acqua che in termini temporali. Inoltre la calibrazione di HEC-HMS ed HEC-RAS ha mirato ad ottenere un giusto compromesso tra stabilità numerica dei modelli e tempi di calcolo. I risultati delle validazioni sono ritenuti accurati dal CFD: il coefficiente NS medio di STAFOM e MISDc è risultato almeno pari al 70% e l'errore di STAFOM sul livello idrometrico al picco è risultato inferiore al 10% (v. capitolo 1).

L'analisi del picco idrometrico previsto è fondamentale per gli scopi del CFD umbro, cioè ai fini dell'esecuzione di interventi preventivi per limitare i danni derivanti dall'innalzamento del livello idrico. Nel caso l'altezza d'acqua raggiunga la soglia di esondazione bisogna infatti provvedere ad opportune azioni al fine di limitare l'impatto dell'evento sul territorio che, nei casi più estremi, possono implicare l'evacuazione della popolazione locale. I modelli oggetto dello studio

permettono di avere a disposizione un certo anticipo rispetto all'osservato e quindi consentono di migliorare l'efficacia della gestione dell'emergenza.

Lo studio svolto ha permesso di valutare le performance dei modelli su un periodo temporale più lungo rispetto a quello finora considerato e relativamente ad altri aspetti oltre al picco idrometrico, come il raggiungimento della soglia di pre-allarme previsto. Le analisi svolte hanno riguardato:

- ❖ l'intero idrogramma previsto;
- ❖ il picco idrometrico previsto;
- ❖ il raggiungimento della soglia di pre-allarme previsto (in tutti gli eventi di piena considerati il livello idrometrico ha raggiunto la soglia di pre-allarme).

L'ultimo elemento costituisce quindi una novità rispetto alle validazioni finora effettuate.

Ricapitoliamo ora i risultati emersi dalle analisi.

Per quanto riguarda la previsione dell'intero idrogramma di piena, le previsioni di STAFOM hanno fornito un coefficiente NS medio superiore allo 0.7, quindi il modello fornisce, secondo il CFD, degli idrogrammi che riproducono bene quelli reali. I risultati di MISDc hanno invece fornito un coefficiente NS medio intorno allo 0.6 e si può quindi ritenere che il modello preveda in modo discreto gli idrogrammi. Infine è stato rilevato che il coefficiente NS medio di HEC-RAS è negativo e dunque che il modello non sia in grado di prevedere dei buoni idrogrammi (v. capitolo 2)

Riguardo al picco idrometrico sono state svolte analisi di accuratezza delle previsioni dei modelli in merito:

1. al picco idrometrico previsto dai modelli;
2. al livello idrometrico previsto dai modelli all'istante di raggiungimento del picco idrometrico reale.
3. ai tempi di previsione del picco idrico.

Quanto al primo punto è emerso che MISDc ed HEC-RAS tendono a sottostimare il picco idrico mentre STAFOM presenta una sottostima dei picchi idrometrici in poco meno del 50% dei casi. In complesso STAFOM si è dimostrato il modello più accurato, seguito dal MISDc.

Le analisi in merito al secondo punto hanno messo nuovamente in luce la sottostima dei livelli idrici fornita dai modelli ed il fatto che STAFOM fornisca la previsione più accurata seguito dal MISDc. In complesso è emerso che l'accuratezza dei modelli relativamente alla previsione dei livelli idrometrici all'istante di raggiungimento del picco idrometrico è inferiore a quella relativa ai massimi idrometrici previsti (v. capitolo 2).

Dall'analisi di accuratezza sui tempi di previsione è stato invece rilevato che MISDc è lo strumento più accurato, seguito da STAFOM (v. capitolo 2)

In complesso, l'analisi di accuratezza sui picchi idrometrici, ha messo in luce l'esigenza di procedere ad una ricalibrazione dei modelli al fine di eliminare l'errore sistematico di sottostima, almeno per quanto riguarda MISDc ed HEC-RAS. La ricalibrazione dei modelli sarà oggetto delle attività del CFD e del CNR-IRPI, lo scopo dello studio è invece quello di fornire delle direttive ai fini dell'ottimizzazione dell'uso dei modelli in tempo reale. A tal fine è risultato quindi interessante comprendere se i modelli sono in grado di collocare il picco idrico all'interno della corretta fascia di allerta ed è quindi stata svolta una valutazione del valore delle previsioni, identificato come il beneficio che i modelli possono fornire a coloro che fanno uso delle previsioni nel caso possiedano la suddetta capacità. In seguito, il valore delle previsioni è stato generalizzato all'abilità dei modelli di distinguere gli eventi di piena che provocano esondazione da quelli che non la causano.

L'analisi del valore è stata condotta sia sui picchi idrometrici previsti che sui livelli idrici forniti all'istante in cui si è realmente verificato il picco idrometrico. La valutazione sui picchi idrometrici previsti ha evidenziato che STAFOM è l'unico modello in grado di collocare il picco idrometrico all'interno della corretta fascia di allerta quando il livello idrometrico previsto è almeno pari a 4 metri e che lo stesso è il modello che sa distinguere meglio gli eventi di esondazione dagli altri. Quindi esso è in grado di fornire delle informazioni utili per la predisposizione delle misure atte a mitigare il rischio idraulico. MISDc ed HEC-RAS non possono essere invece utilizzati come strumenti efficaci in questo senso.

Nel complesso STAFOM è quindi risultato il modello più accurato e questo coincide con quanto ci si aspettava poichè esso è l'unico modello che non simula i processi afflussi-deflussi che contribuiscono ad aumentare le incertezze di previsione. Ricordiamo però che STAFOM fornisce un anticipo massimo sull'osservato di 4 ore, pari alla metà di quello dato da MISDc ed HEC-RAS, quindi è opportuno valutare se i vantaggi forniti dalla maggiore accuratezza di STAFOM sono superiori al fatto che i tempi di previsione degli altri due modelli sono maggiori. Può darsi infatti che STAFOM fornisca una previsione con 1 ora di posticipo e quindi dia la possibilità di avere al massimo 3 ore per la messa in atto delle operazioni per limitare il rischio idraulico, mentre MISDc, che è risultato più accurato di HEC-RAS, dia una previsione posticipata di 3 ore, fornendo complessivamente al massimo 5 ore per l'attuazione delle necessarie operazioni. In questo caso MISDc si presenta come modello più utile, nonostante la sua previsione sia meno accurata.

I risultati dell'analisi sul valore dei livelli idrometrici previsti all'istante di raggiungimento del picco idrometrico reale ha fornito risultati che non si discostano molto dalla prima analisi ma che sembrano fornire un beneficio inferiore a coloro che utilizzano le previsioni per la gestione del rischio idraulico, infatti, STAFOM è sempre risultato l'unico modello in grado di collocare il picco idrometrico all'interno della corretta fascia di allerta, ma solo quando i livelli previsti sono almeno pari a 4.40 metri (v. capitolo 2).

In seguito alla valutazione del valore si è ritenuto utile capire se i modelli sono in grado di collocare il livello idrico del ramo di risalita degli idrogrammi all'interno della corretta fascia d'allerta. Al fine ultimo di fornire delle direttive necessarie ad ottimizzare l'utilizzo dei modelli in tempo reale, è stato preso in considerazione un punto preciso del ramo di risalita e cioè il raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme (v. capitolo 3), poiché esso rappresenta l'inizio della fase di pre-allarme e quindi l'avvio, se necessario, della fase operativa nella gestione delle emergenze. Anche relativamente al raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme sono state condotte un'analisi di accuratezza ed un'analisi del valore delle previsioni. L'analisi di accuratezza è stata svolta sulle altezze d'acqua fornite dai modelli all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato. Inoltre sono stati considerati i tempi di previsione del raggiungimento della soglia in questione. L'analisi del valore è stata fatta sui livelli idrometrici previsti all'istante di raggiungimento della soglia. Il valore delle previsioni è stato quindi identificato come la capacità dei modelli di collocare i livelli idrometrici all'interno della fase di pre-allarme quando questa si verifica ed in seguito è stato generalizzato all'abilità degli stessi di collocare il livello idrico sopra o sotto la soglia.

L'analisi di accuratezza ha messo in luce il fatto che tutti i modelli tendono a sottostimare i livelli idrometrici all'istante di raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme e che, tra essi, STAFOM è il modello che fornisce la previsione più precisa, seguito da MISDc. I risultati emersi si sono dimostrati coerenti con quelli sul picco idrometrico, ma la loro accuratezza è risultata inferiore rispetto a quella al picco.

L'analisi dei tempi di previsione ha evidenziato che la tendenza di tutti i modelli è quella di posticipare o di non prevedere il raggiungimento della soglia idrometrica di pre-allarme. Tale fatto è coerente con la sottostima del livello idrometrico all'istante di raggiungimento reale della soglia in gioco.

Infine, dall'analisi del valore delle previsioni all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme, è emersa l'incapacità dei modelli di prevedere l'inizio della fase di pre-allarme.

Si è quindi giunti a concludere che i risultati dei modelli relativamente alla previsione del picco idrometrico sono più accurati e possiedono più valore di quelli riguardanti la soglia di pre-allarme. Tale risultato è in accordo con quanto ci si aspettava, infatti, i modelli sono stati calibrati per prevedere in modo accurato il picco idrico.

Ai fini dell'utilizzo dei modelli in tempo reale è però fondamentale avere delle previsioni verosimili anche per quanto concerne il ramo di risalita degli idrogrammi, al fine di poter pianificare adeguatamente le operazioni da attuare durante ogni fase di allerta. È quindi necessario ricalibrare i modelli al fine di stimare in modo più preciso tutto l'idrogramma di piena ed in particolare il ramo di risalita.

Quanto all'utilizzo dei modelli allo stato attuale, appare opportuno stimare delle fasce di confidenza che possano quantificare l'incertezza legata alla previsione del raggiungimento della soglia di pre-allarme.

La necessità di un'efficace quantificazione dell'incertezza della previsione è stata sottolineata da diversi autori (Montanari, 2007; Krzysztofowicz, 2002; Todini, 2004, 2009) ed è oggetto di un'intensa attività di ricerca nel campo dell'idrologia (Beven, 2006; Montanari, 2007; Todini, 2008).

La necessità di associare un'incertezza alla stima futura fornita dalle modellistiche idrologico/idrauliche nasce dal fatto che la previsione è tutt'altro che una quantità esatta, come dimostrato dalla nostra analisi; infatti, questa non elimina l'incertezza relativa all'evoluzione dell'evento futuro, ma la riduce solamente. Di conseguenza, diventa fondamentale quantificare il grado di incertezza residua, che deve essere fornito, insieme alla grandezza prevista, all'autorità preposta alla gestione del rischio di piena, in modo tale che l'informazione completata dalla stima della sua affidabilità possa essere utilmente impiegata per indirizzare l'attività decisionale (Krzysztofowicz, 2001).

Sottolineiamo che il CFD ha già provveduto a stimare delle fasce di confidenza per quantificare l'incertezza dei risultati forniti dal modello STAFOM-RCM, basandosi sull'errore commesso dal modello nella previsione del picco idrico, ed estendendo tale incertezza a tutto l'idrogramma. Si ritiene però importante quantificare l'incertezza dei modelli anche riferendosi alle previsioni riguardanti il raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato. Sarebbe importante stimare l'incertezza sia relativamente al livello previsto all'istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato che relativamente ai tempi di previsione del raggiungimento di tale soglia. È infatti importante comprendere sia quanto il livello idrometrico previsto, in un determinato

istante, si discosta da quello reale che le tempistiche di previsione del livello idrico reale. Ad esempio, se in corrispondenza del raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato, il modello prevede una forte sottostima del livello idrico, ma il raggiungimento della soglia viene posticipato di poco tempo, la previsione del modello può essere considerata accurata se permette di avere un certo tempo a disposizione per la messa in atto delle operazioni necessarie alla gestione delle emergenze. L'obiettivo è quindi quello di stimare delle fasce di confidenza delle previsioni dei modelli che tengano conto sia degli errori in termini di altezza d'acqua che dei tempi di previsione. Inoltre, la bontà delle previsioni, potrebbe essere valutata determinando, in tempo reale, il coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe dei risultati forniti dai modelli fino all'istante di previsione. In tempo reale le simulazioni dei modelli vengono infatti fornite in continuo, con un determinato passo temporale (solitamente di 30 minuti), e con un anticipo di alcune ore sull'osservato; esse possono dunque essere confrontate con il livello idrometrico che nel frattempo si registra e può quindi essere calcolato il coefficiente NS.

Per collegare la bontà della previsione al coefficiente NS in tempo reale, e quindi stabilire quale valore del coefficiente può essere associato ad una previsione affidabile, bisognerebbe effettuare un'analisi su un numero maggiore di eventi di piena rispetto a quello considerato.

Appendice A – Codice di calcolo di STAFOM-RCM

Il codice del programma è scritto in MATLAB® e di seguito vengono specificati gli input ed i parametri che devono essere forniti al modello e vengono brevemente illustrati i passaggi più importanti. All'inizio del codice vengono caricati gli input, essi sono i livelli idrometrici osservati ad ogni passo temporale, e cioè ogni mezzora, nella sezione di monte e di valle che delimitano il tratto considerato. Gli input sono memorizzati in un file di testo in cui ogni riga corrisponde ad un passo temporale. Per ogni riga sono presenti: la data (anno, mese, giorno), l'ora (ora, minuti) ed il livello osservato a monte ed a valle. In seguito vengono caricati i parametri, e cioè: k , x , λ , δ , L , α , β , le tre soglie di criticità relative alla sezione di valle (soglia di attenzione, di pre-allarme e di allarme) e la soglia di esondazione della stessa. I parametri sono costanti e dipendono dal tratto considerato, ad eccezione di x che è posto pari a 0.5, indipendentemente dal tratto investigato. Sono note la geometria delle sezioni di monte e valle, che permettono di ricavare le aree bagnate partendo dal livello idrometrico, e la relazione funzionale livello-portata per la sezione di monte. Si ricorda inoltre che la relazione funzionale livello-portata per la sezione di valle si ricava dalla relazione $Q=\lambda h^\delta$. Più avanti, la scelta del modello, 1 o 2, a seconda che sia predominante rispettivamente il contributo di monte o quello laterale, viene fatta confrontando i tempi di inizio risalita dell'idrogramma di livello di monte e di quello di valle. Nello specifico, se il ramo di risalita dell'idrogramma di monte inizia prima di quello dell'idrogramma di valle viene scelto il modello 1, e viceversa. In seguito si ha la routine principale nella quale vengono calcolate tutte le grandezze che entrano nella formula (1.1), al fine di calcolare il livello previsto a valle. I parametri che rientrano nella (1.1) e che sono stati forniti all'inizio sono: λ , δ , $C1^*$ (funzione di k ed x), $C2^*$ (funzione di $C1^*$) ed L . Il livello idrometrico a valle all'istante t_f è fornito come input, la portata $Q_u(t_f)$ è calcolata dalla formula livello-portata per la sezione di monte, l'afflusso laterale $q(t_f)$ è funzione delle aree bagnate di monte e di valle (calcolate conoscendo la geometria della sezione) e dell'intervallo di previsione ed è calcolato tramite la formula (1.2). Infine ϵ viene calcolato con la formula (1.4), in cui q dipende dalla scelta del modello che è stata fatta (viene calcolato con la (1.2)), $Q_d(t_f)$, $Q_m(t_f-\Delta t)$, $Q_v(t_f-\Delta t)$ vengono calcolate con le relazioni livello-portata, ed i parametri $C1^*$, $C2^*$ ed L sono noti.

In ultimo viene applicata la correzione RCM secondo lo schema precedentemente descritto. Si ricorda che i parametri α e β sono stati forniti all'inizio.

Tutte le operazioni descritte, a parte la scelta del modello, vengono ovviamente ripetute per ogni passo di calcolo.

Il file di output del modello STAFOM-RCM è una matrice di tre colonne, che rappresentano: il livello osservato nella sezione di monte, quello osservato nella sezione di valle e quello previsto nella sezione di valle. Inoltre il programma fornisce una figura in cui compaiono i livelli osservati a monte e valle e previsti a valle e le soglie di criticità caratteristiche del tratto considerato.

Appendice B – Codice di calcolo di MOBIS

Il codice del programma è scritto in MATLAB®, esso è costituito da un'unica funzione, "[function MOBIS_RT_01](#)", e strutturalmente è suddiviso in 5 parti:

- 1) Lettura dei parametri da file di testo
- 2) Lettura dei file di ingresso
- 3) Routine principale che esegue per ogni istante temporale e per ogni bacino la simulazione del contenuto d'acqua
- 4) Creazione delle figure con i risultati della simulazione
- 5) Salvataggio del file di uscita

Nel seguito si riporta una breve descrizione delle diverse parti del programma con particolare attenzione a come creare i file di ingresso e dei parametri e come interpretare i risultati del modello stesso.

In MOBIS è necessario specificare 3 file per i parametri (alcuni file sono utilizzati anche dal programma MISD e pertanto alcune delle informazioni contenute nei file non sono utilizzate). Il primo file [BAS_PAR](#) contiene alcune caratteristiche principali relative alla struttura morfologica del modello semi-distribuito:

- riga 1: numero di sottobacini
- riga 2: numero di sezioni intermedie su cui calcolare l'idrogramma in uscita
- riga 3: numero di afflussi da sezioni di monte

Nel programma MOBIS viene utilizzata solo l'informazione relativa al numero di sottobacini.

Il file [fixed_par](#) contiene alcuni parametri fissi relativi all'esecuzione del programma:

- riga 1: Area totale del bacino in km²
- riga 2: passo di calcolo del modello MISD in ore
- riga 3: intervallo temporale dei dati in ingresso in ore
- riga 4: minimo tempo totale di calcolo del modello MISD in ore

Nel programma MOBIS viene utilizzata solo l'informazione relativa all'intervallo temporale dei dati in ingresso.

Il file [param_MOBIS](#) contiene i parametri del modello MOBIS per ciascun sottobacino, il numero di colonne è pari al numero di sottobacini:

- riga 1: rapporto tra il potenziale capillare medio e lo spessore di suolo, ψ/L
- riga 2: conducibilità idraulica a saturazione, K_s , relativa all'infiltrazione in mm/ora
- riga 3: conducibilità idraulica a saturazione, K_s , relativa alla percolazione in mm/ora

- riga 4: esponente della percolazione, $3+2/\lambda$
- riga 5: coefficiente per l'evapotraspirazione potenziale, b
- riga 6: quantità massima di acqua che può essere immagazzinata nello strato di terreno, W_{max} , in mm.

In MOBIS è necessario specificare 2 file di ingresso da inserire nella cartella INPUT. I due file sono:

- [DPT.txt](#)
- [SDin.txt](#)

Il file [DPT.txt](#) contiene i dati di pioggia e temperatura medi areali (calcolati con il metodo dei poligoni di Thiessen) per ciascun sottobacino. Essi sono variabili usualmente misurate da una rete di monitoraggio idrometeorologico. L'intervallo temporale dei dati di norma considerato è semiorario compatibile con i tempi operativi del monitoraggio in tempo reale.

Il file [SDin.txt](#) contiene il valore iniziale del grado di saturazione ($W(t)/W_{max}$) per ciascun sottobacino. Il file è composto da un numero di righe pari al numero di sottobacini, ciascuna contenente il valore del grado di saturazione, compreso tra 0 e 1.

Si riportano brevemente i passaggi più importanti della routine principale:

- inizializzazione delle variabili
- ciclo eseguito per ogni istante temporale e per ogni sottobacino:
 - a. calcolo dell'infiltrazione con la formula di Green-Ampt
 - b. calcolo dell'evapotraspirazione effettiva
 - c. calcolo della percolazione
 - d. calcolo del bilancio di contenuto d'acqua
 - e. memorizzazione del valore relativo al grado di saturazione

Le figure in uscita sono: una figura unica contenente in alto l'andamento temporale della pioggia e in basso l'andamento del grado di saturazione per ogni sottobacino.

Inoltre viene creata una figura contenente varie immagini, riferite a ciascun sottobacino, in cui compaiono l'andamento temporale della pioggia e del grado di saturazione. Infine si hanno una serie di figure che rappresentano, a sinistra, una mappa del valore del grado di saturazione per ciascun sottobacino e a destra l'andamento temporale del grado di saturazione dove un pallino giallo evidenzia l'istante relativo alla figura.

Il file di uscita di MOBIS contiene il valore del grado di saturazione medio areale $W(t)/W_{max}$ per ogni sottobacino ed è usato per determinare le condizioni iniziali di MISD.

Appendice C – Codice di calcolo di MISD

Il codice del programma è scritto in MATLAB®, esso è costituito da quattro funzioni:

a) [function MISD_RT_01](#)

b) [function GIUH](#): calcolo dell'idrogramma unitario con l'approccio geomorfologico (GIUH) utilizzato per il routing dei sottobacini. I passaggi eseguiti nella function sono:

- calcolo del lag con la formula (1.25),
- calcolo di h_p con la formula (1.23),
- inserimento dello GIUH presente nella cartella PARAM,
- calcolo dell'idrogramma unitario secondo la formula (1.22).

c) [function NASH](#): calcolo dell'idrogramma unitario con il metodo dell'invaso utilizzato per il routing delle aree direttamente drenanti. I passaggi eseguiti nella function sono:

- calcolo di K_R ,
- calcolo dell'idrogramma unitario secondo la formula (1.24).

d) [function hayami](#): calcolo dell'idrogramma unitario con l'approccio di hayami, secondo la formula (1.20), utilizzato per il trasferimento dell'onda di piena

La funzione principale ([function MISD_RT_01](#)) è suddivisa in 5 parti:

- 1) Lettura dei parametri da file di testo
- 2) Lettura dei file di ingresso
- 3) Routine principale che esegue per ogni istante temporale e per ogni bacino la simulazione delle portate dirette
- 4) Creazione delle figure con i risultati della simulazione
- 5) Salvataggio del file di uscita

Durante l'esecuzione della [function MISD_RT_01](#) vengono richiamate le function b), c) e d) sopra descritte.

Nel seguito si riporta una breve descrizione delle diverse parti del programma con particolare attenzione a come creare i file di ingresso e dei parametri e come interpretare i risultati del modello stesso.

In MISD è necessario specificare 4 file per i parametri da inserire nella cartella PARAM:

- [BAS_PAR](#)
- [fixed_par](#)
- [param_MISD](#)
- [CD](#)

Il file [BAS_PAR](#) contiene alcune caratteristiche principali relative alla struttura morfologica del modello semi-distribuito ed è lo stesso utilizzato da MOBIS.

Il file [fixed_par](#) contiene alcuni parametri fissi relativi all'esecuzione del programma ed è lo stesso utilizzato da MOBIS.

Il file [param_MISD](#) contiene i parametri del modello MISD per ciascun sottobacino, il numero di colonne è pari al numero di sottobacini:

- riga 1: valore della massima ritenzione potenziale del suolo per condizioni secche, S_r ($S_r = \alpha S_{CN(I)}$), in mm
- riga 2: valore della massima ritenzione potenziale del suolo per condizioni umide, S_s ($S_s = \beta S_{CN(III)}$), in mm
- riga 3: parametro legato al tempo di risposta dei bacini della relazione lag-area, η
- riga 4: parametro legato alle perdite iniziali del metodo SCS-CN, λ_1

Il file [CD](#) contiene i due parametri, celerità e diffusione, utilizzati per il trasferimento dell'onda di piena per ciascuna sezione dove si vuole conoscere la risposta del modello, il numero di colonne è pari al numero di sezioni:

- riga 1: celerità, c , in km/ora
- riga 2: diffusione, D , in km^2/ora

In MISD è necessario specificare 2 file di ingresso da inserire nella cartella INPUT:

- [DPQ.txt](#)
- [SDin_MISD.txt](#)

Vengono allungati i dati in ingresso del programma per effettuare una simulazione di lunghezza pari almeno a quanto specificato nel file [fixed_par](#).

Il file [DPQ.txt](#) contiene i dati di pioggia medi areali per ciascun sottobacino e di portata per le sezioni di monte considerate nel modello. Il file contiene anche la portata per ciascuno dei punti della rete di drenaggio (sezioni intermedie e sottobacini) dove i valori simulati sono confrontati con i dati osservati. Il numero di righe è pari al numero di intervalli temporali.

Il file [SDin_MISD.txt](#) contiene il valore iniziale del grado di saturazione, $W(t)/W_{\max}$ per ciascun sottobacino. Il file è composto da un numero di righe pari al numero di sottobacini ciascuna contenente il valore del grado di saturazione, compreso tra 0 e 1.

Si riportano brevemente i passaggi più importanti della routine principale:

- inizializzazione delle variabile

- calcolo della portata per ciascun sottobacino e trasferimento alla sezione di chiusura (e sezioni intermedie):
 - a. calcolo della pioggia effettiva con il metodo del Soil Conservation Service - Curve Number
 - b. convoluzione della pioggia effettiva in portata diretta per ciascun sottobacino considerando il GIUH per i sottobacini e il metodo dell'invaso per le aree direttamente drenanti
 - c. trasferimento della portata diretta alla sezione di chiusura (e sezioni intermedie) per ogni sottobacino
- calcolo della portata in uscita da ogni singolo sottobacini in m^3/s
- calcolo del contributo di ogni singolo sottobacino alla portata in uscita della sezione di chiusura e di ogni sezione intermedia in m^3/s
- trasferimento della portata relativa alle sezioni di monte alla sezione di chiusura (e sezioni intermedie)
- calcolo della portata totale alla sezione di chiusura e alle sezioni intermedie e memorizzazione variabili
- calcolo dell'accuratezza del modello per la sezione di chiusura

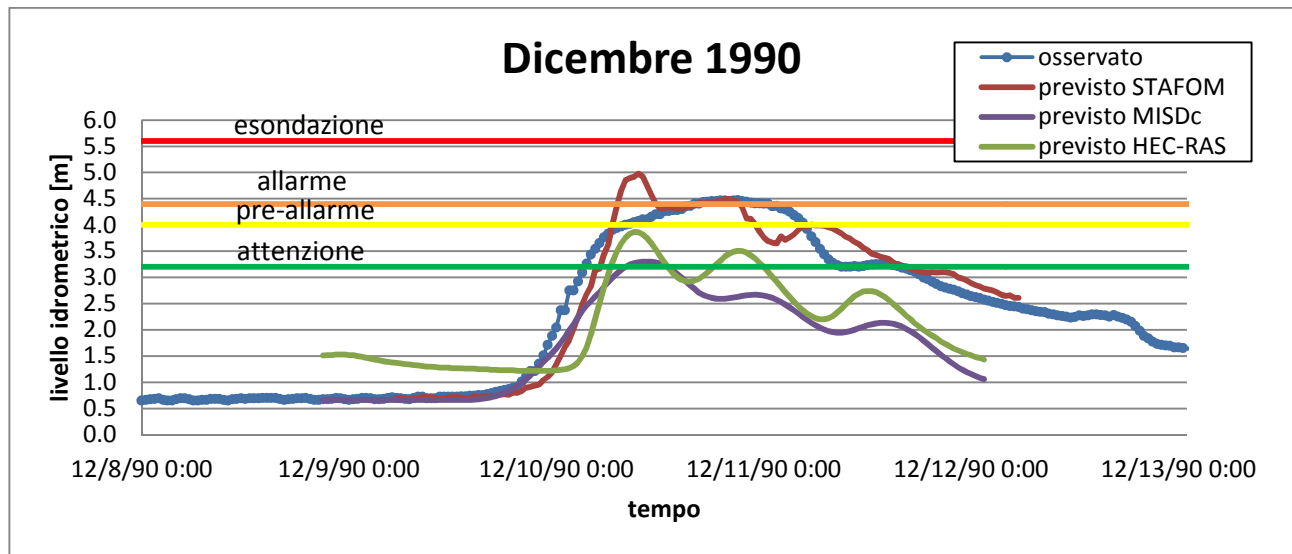
In uscita vengono fornite una serie di figure, pari al numero di sezioni dove viene confrontata la portata osservata e quella simulata, N_{confr} , dove viene mostrato in alto l'andamento temporale della pioggia e della pioggia effettiva e in basso l'andamento della portata simulata e osservata.

Inoltre viene creata una figura unica contenente il confronto tra le portate simulate e osservate per ogni sottobacino.

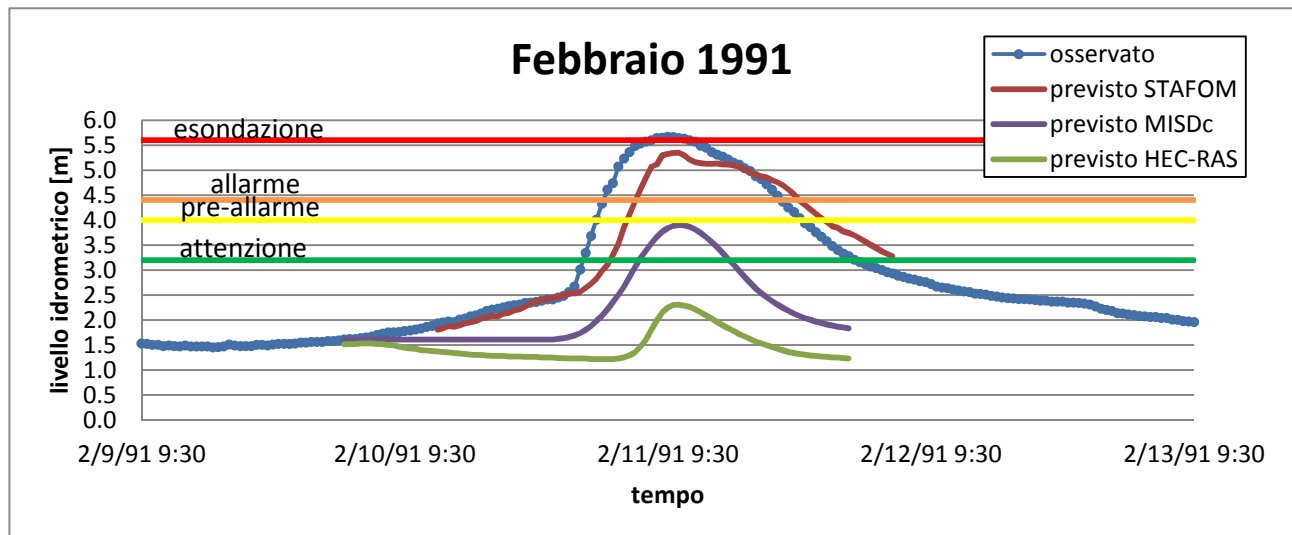
Il file di uscita [MISD_res.txt](#) contiene, per ogni sezione di confronto, la pioggia totale, la pioggia effettiva, la portata osservata e la portata simulata.

Appendice D - Grafici livello idrometrico osservato e previsto

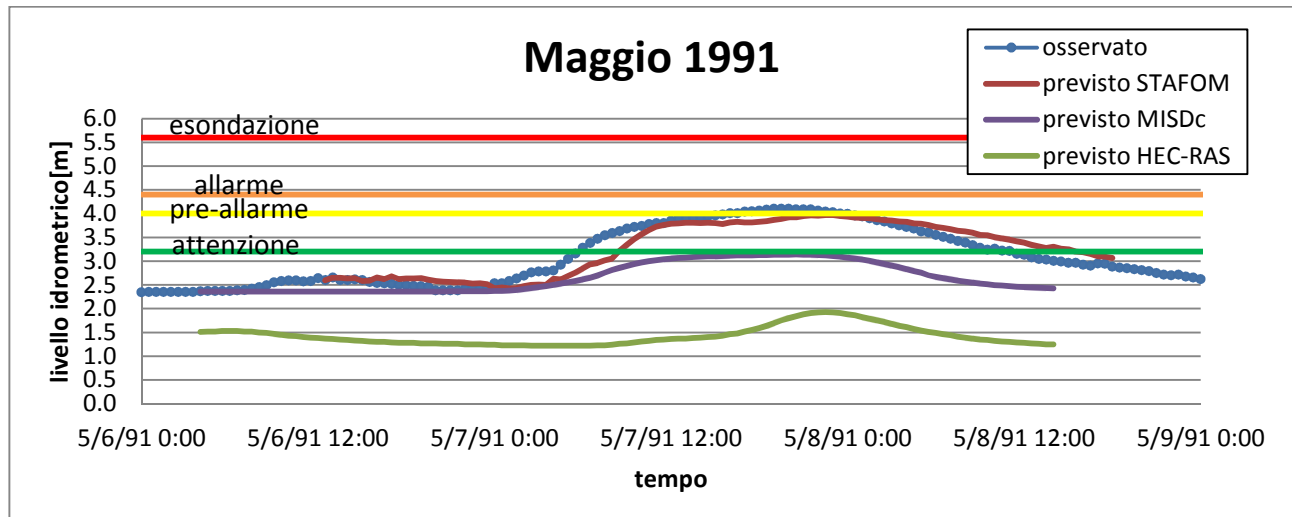
Evento 1:



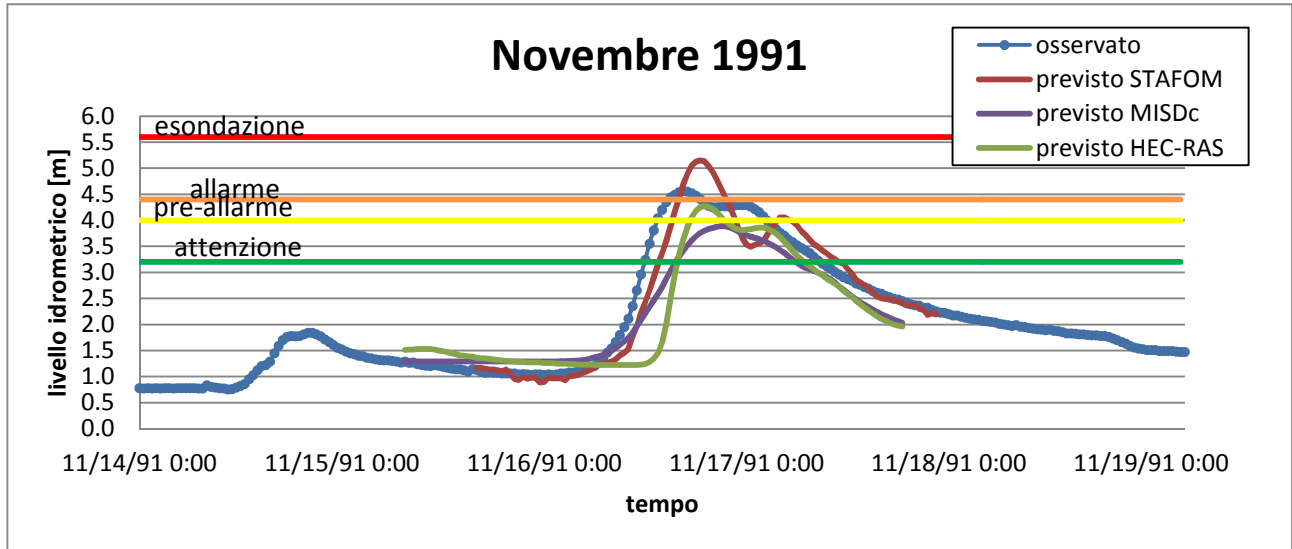
Evento 2:



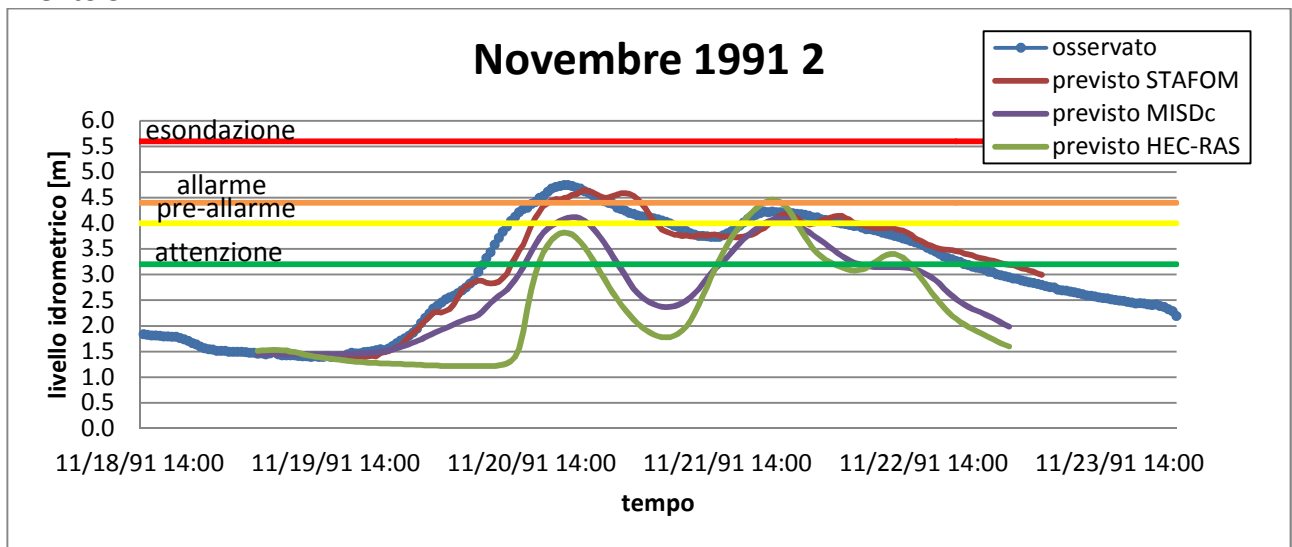
Evento 3:



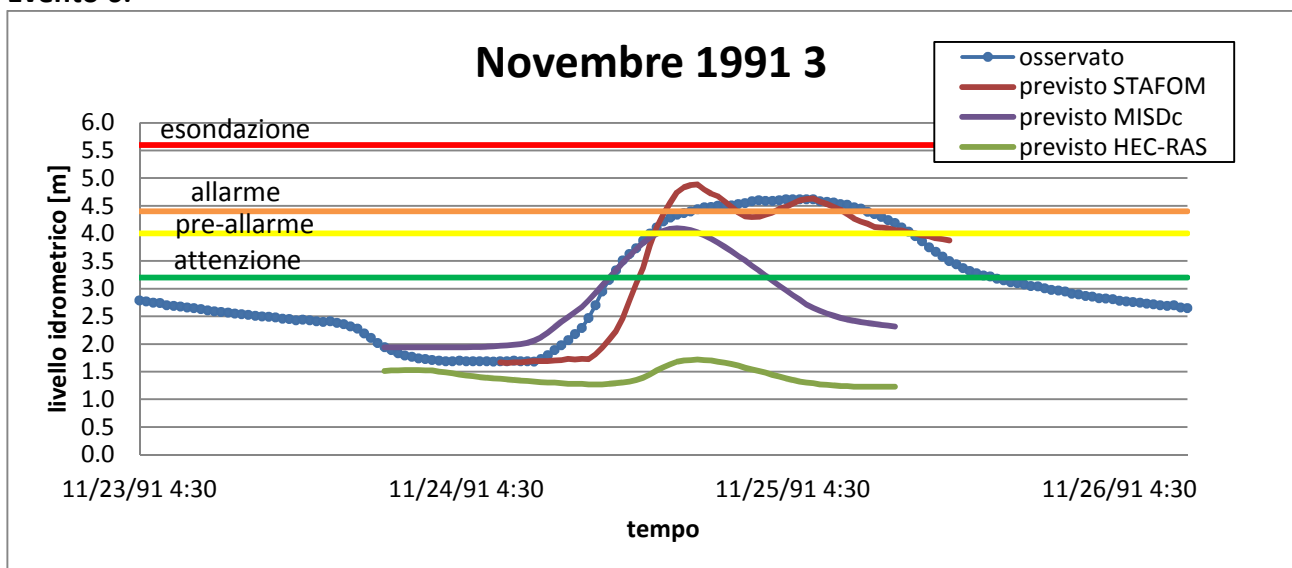
Evento 4:



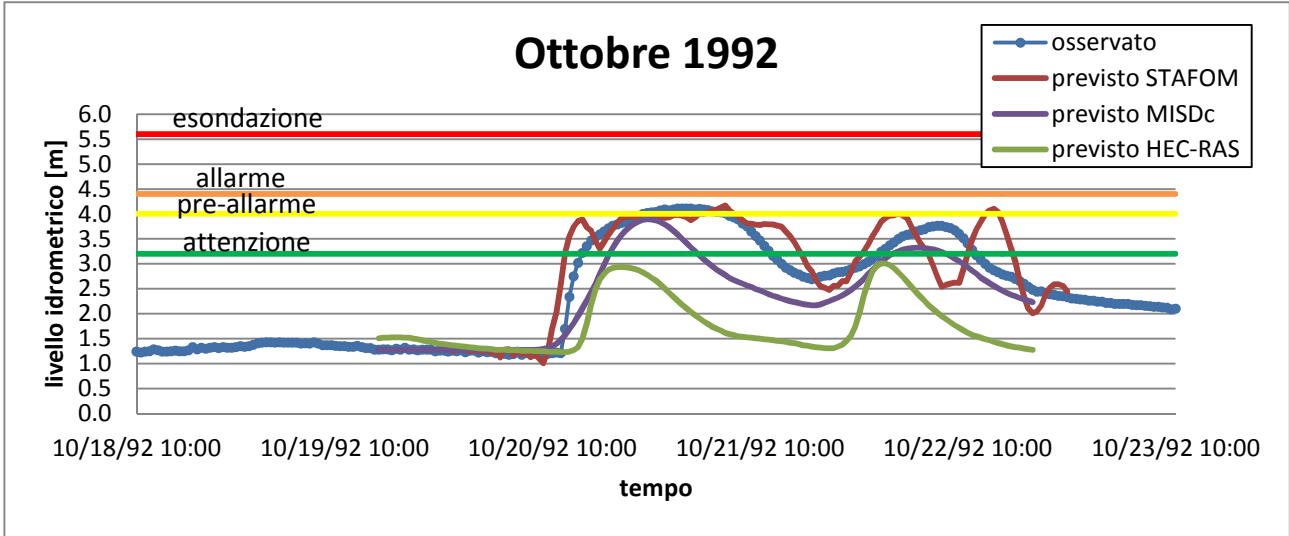
Evento 5:



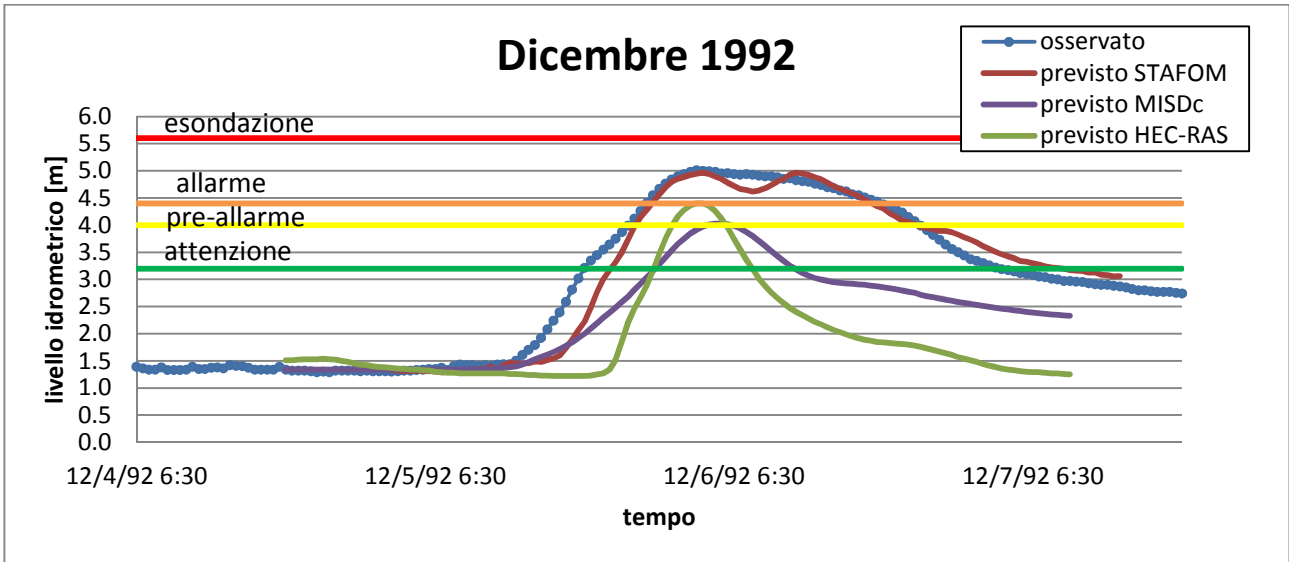
Evento 6:



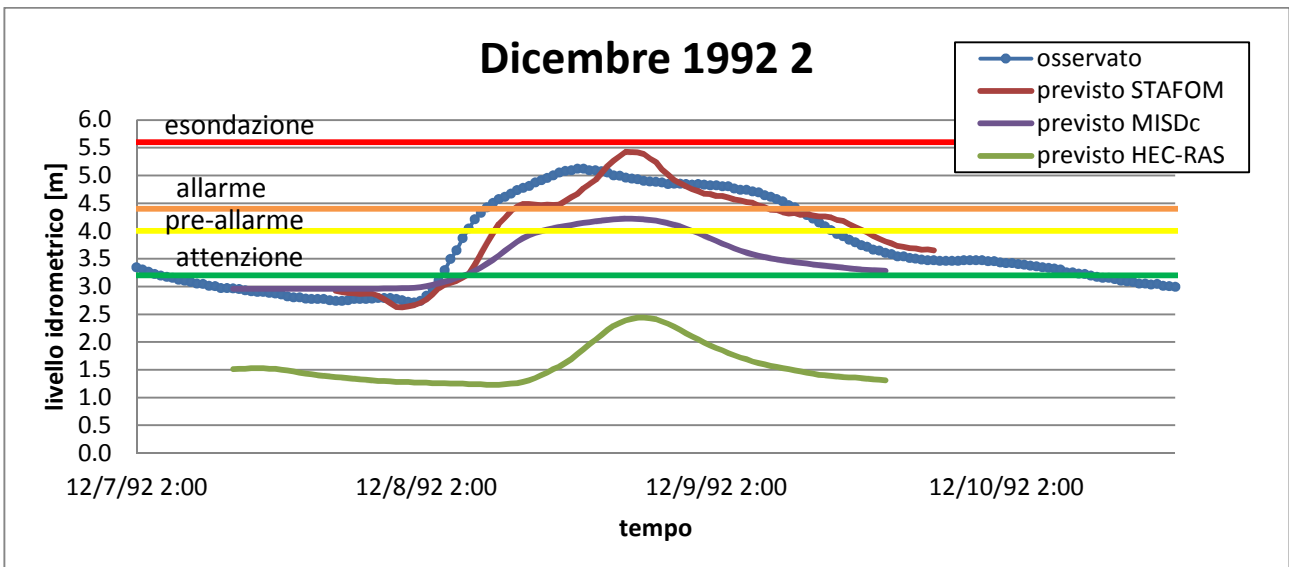
Evento 7:



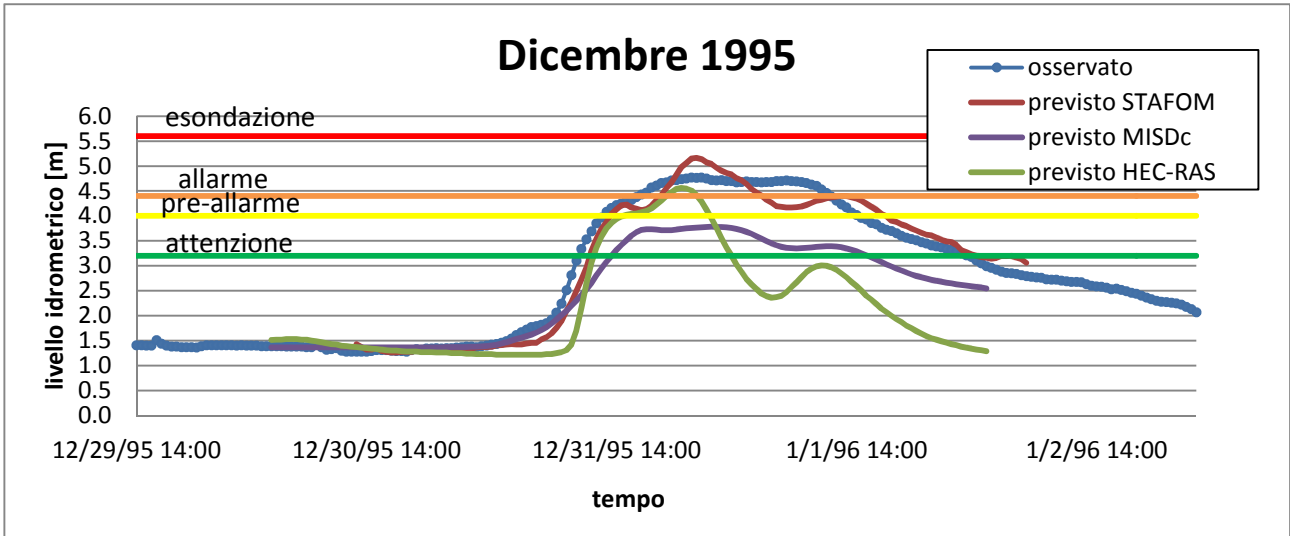
Evento 8:



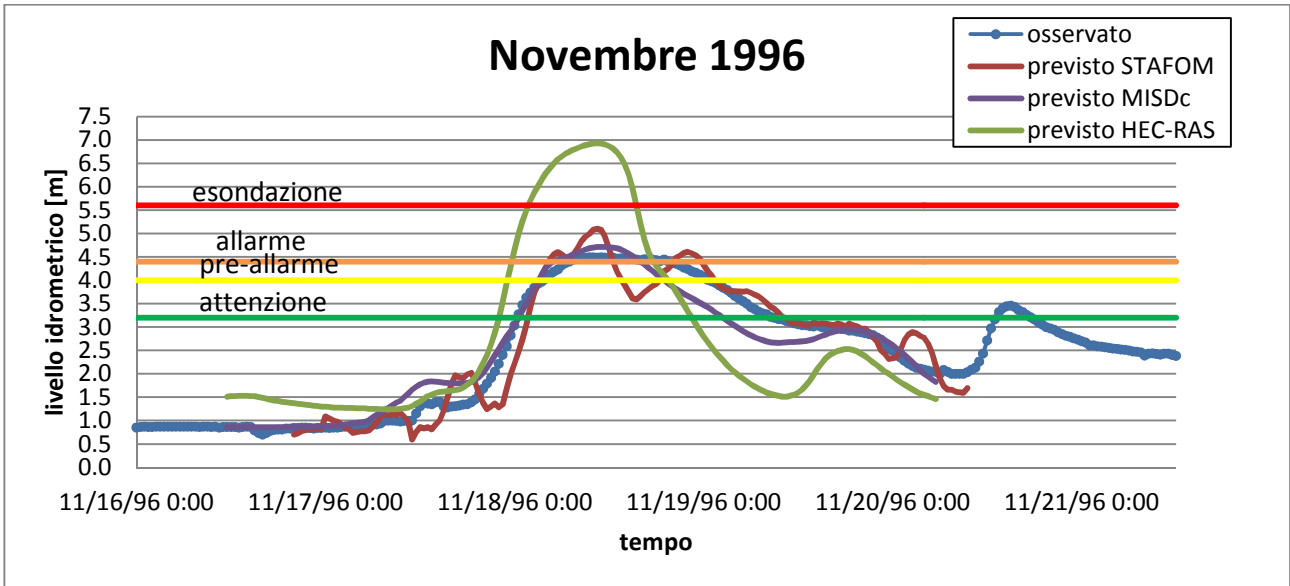
Evento 9:



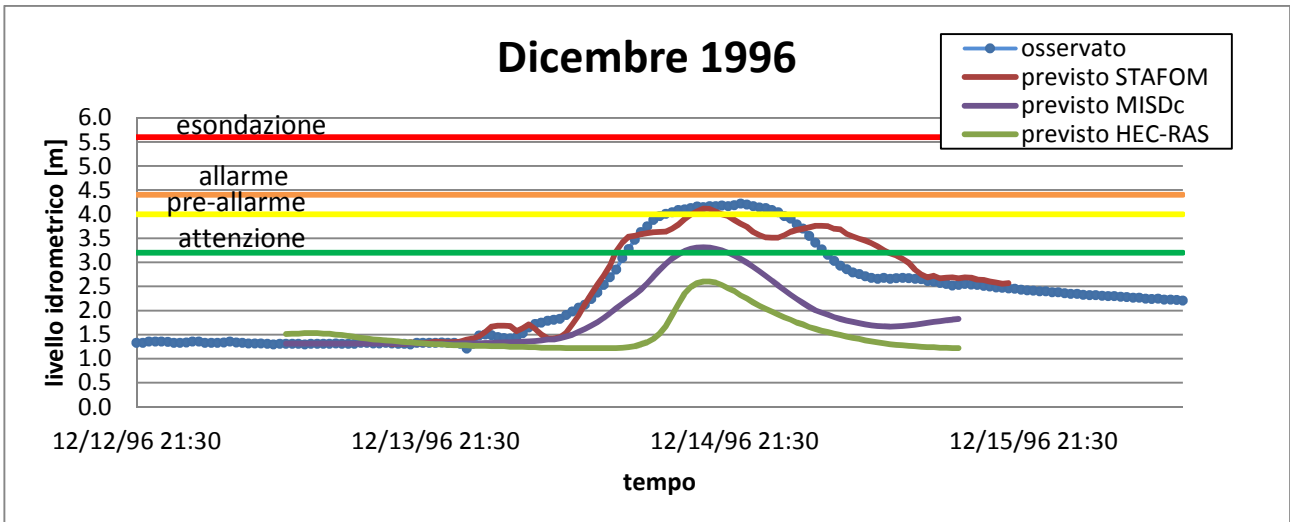
Evento 10:



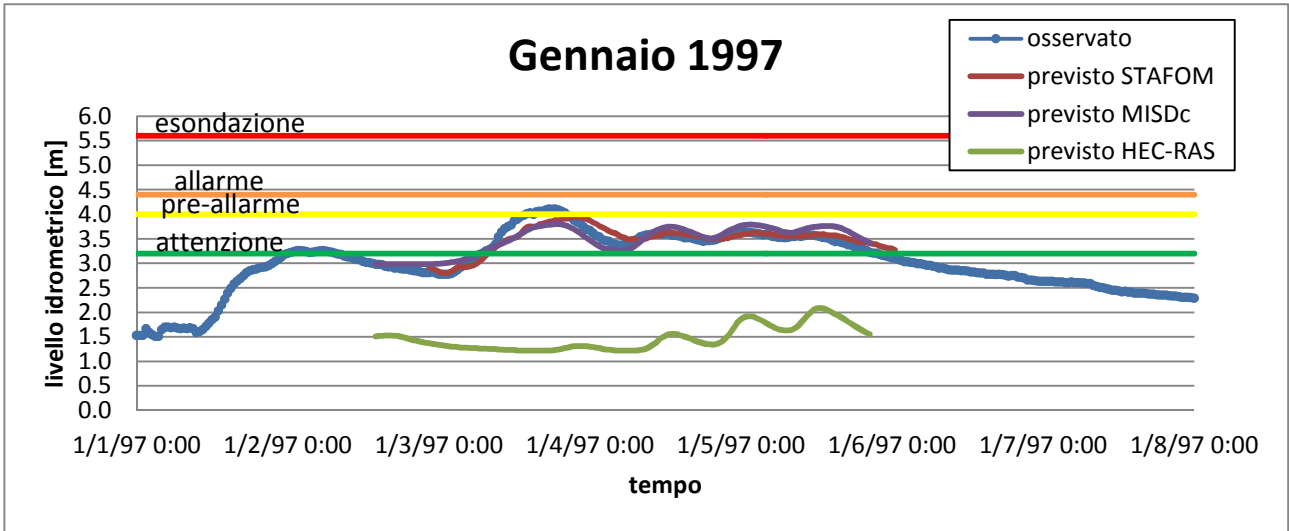
Evento 11:



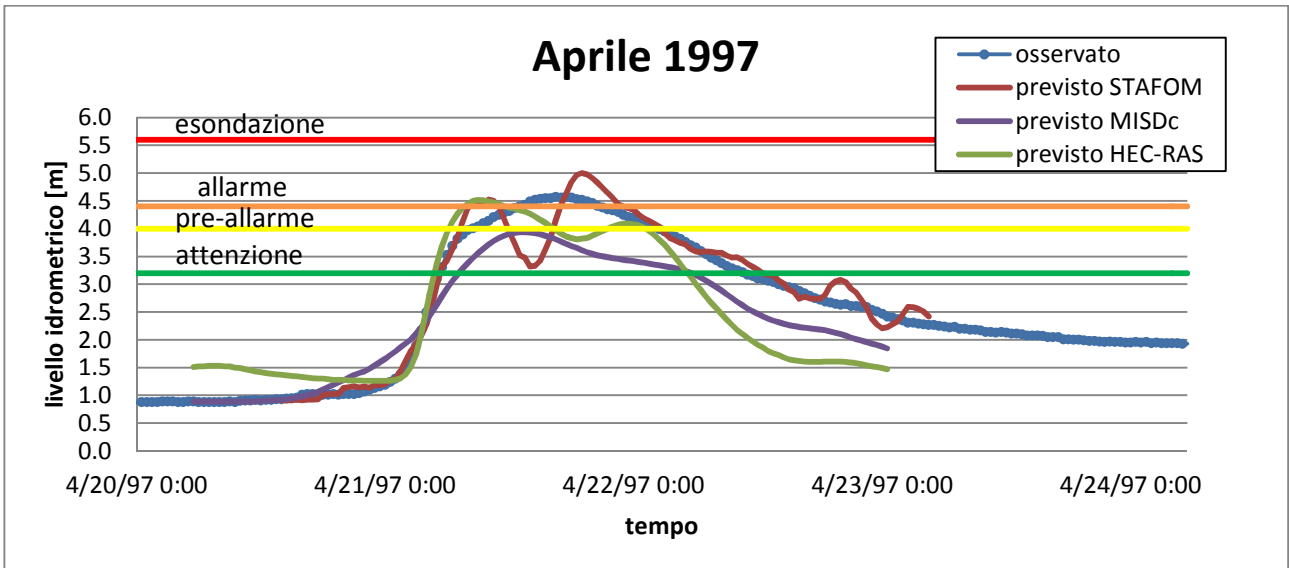
Evento 12:



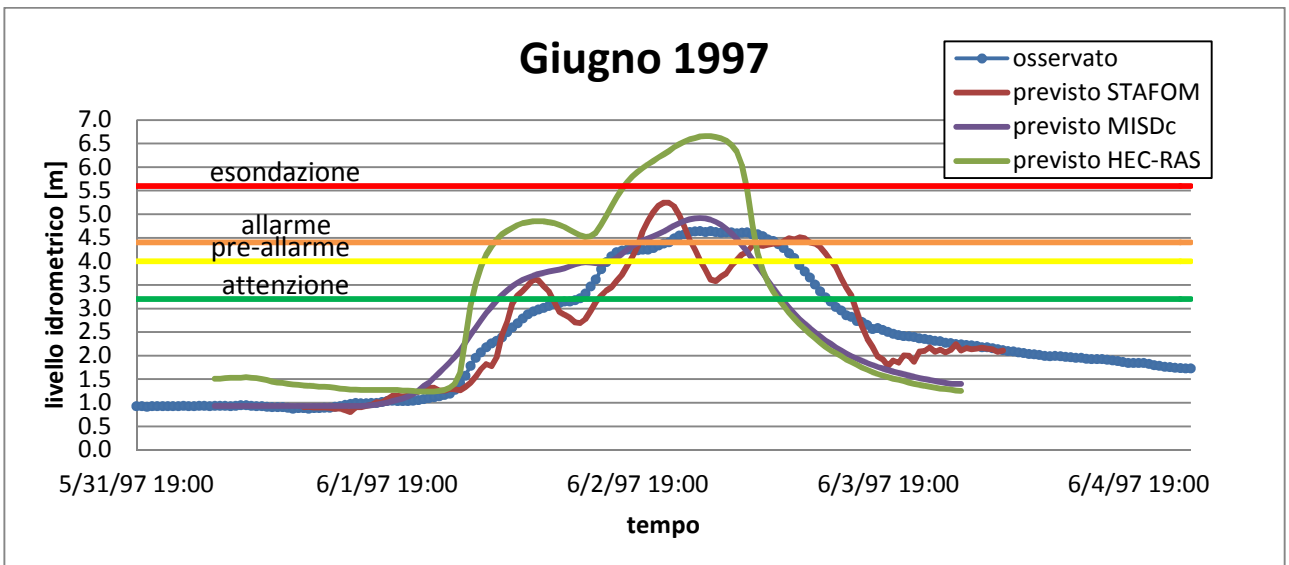
Evento 13:



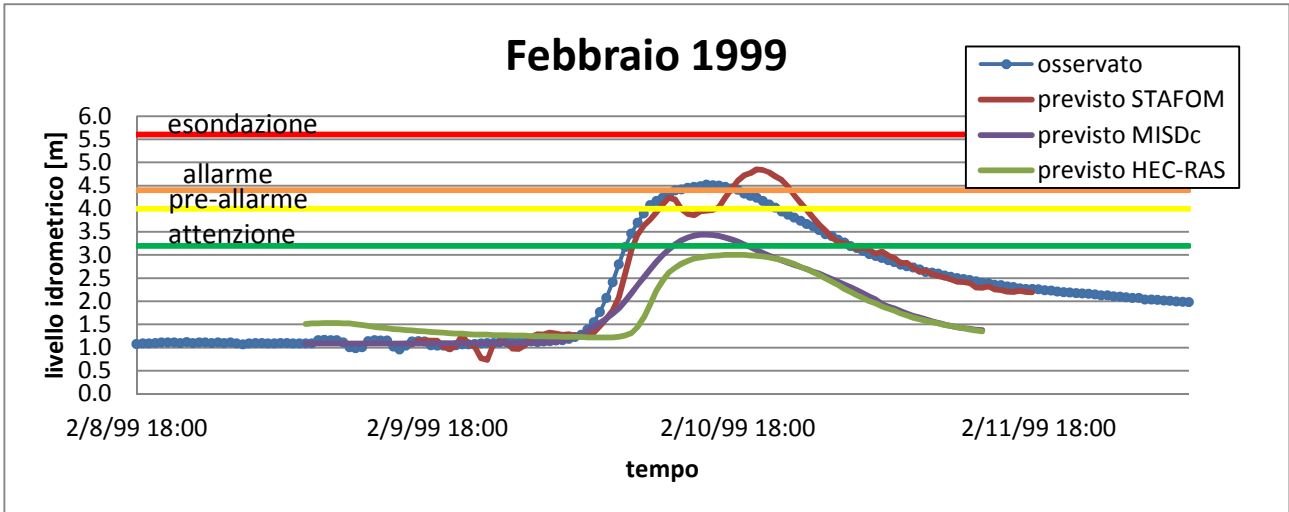
Evento 14:



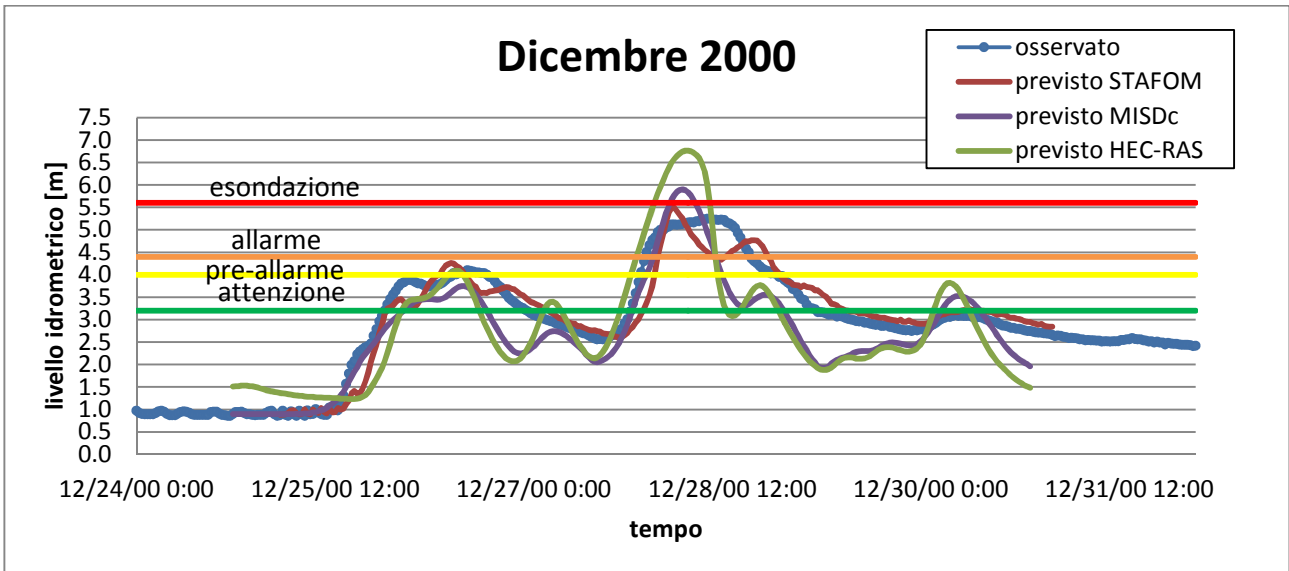
Evento 15:



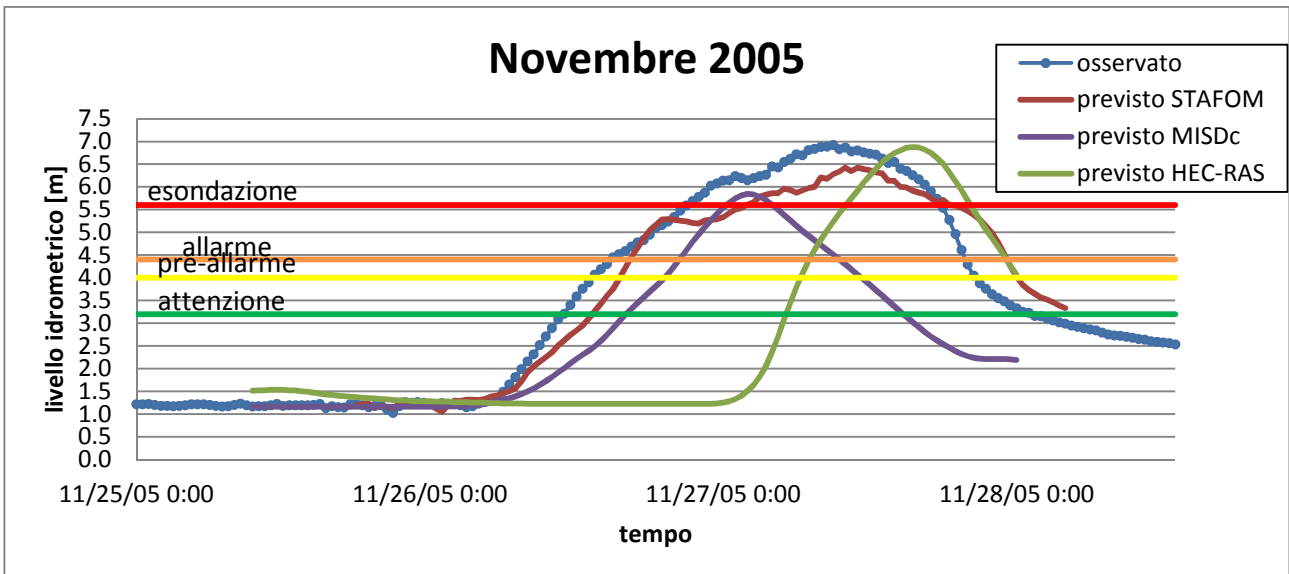
Evento 16:



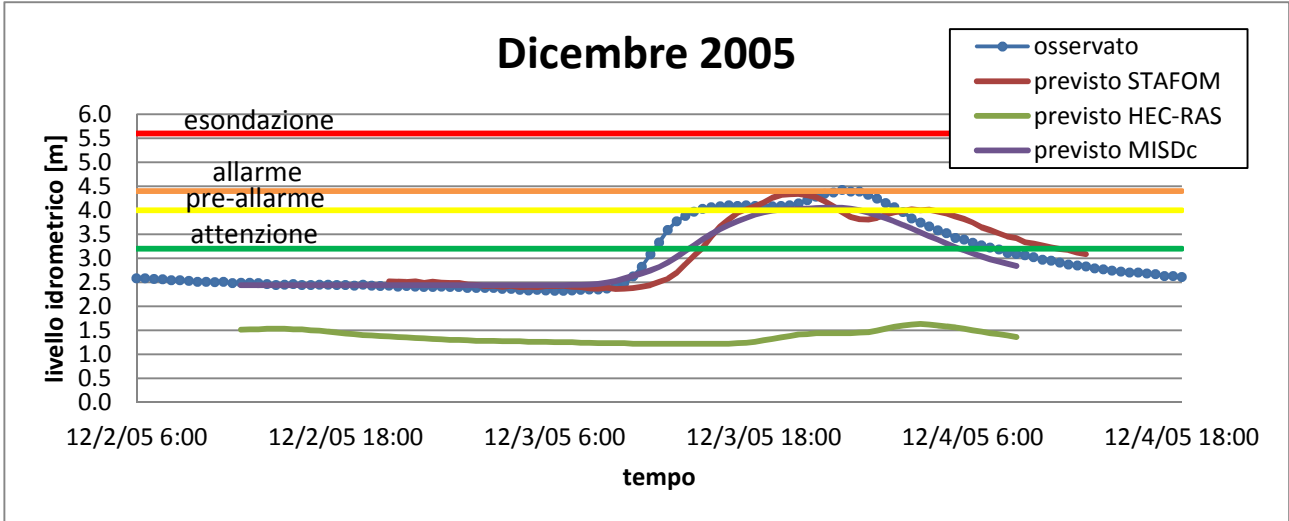
Evento 17:



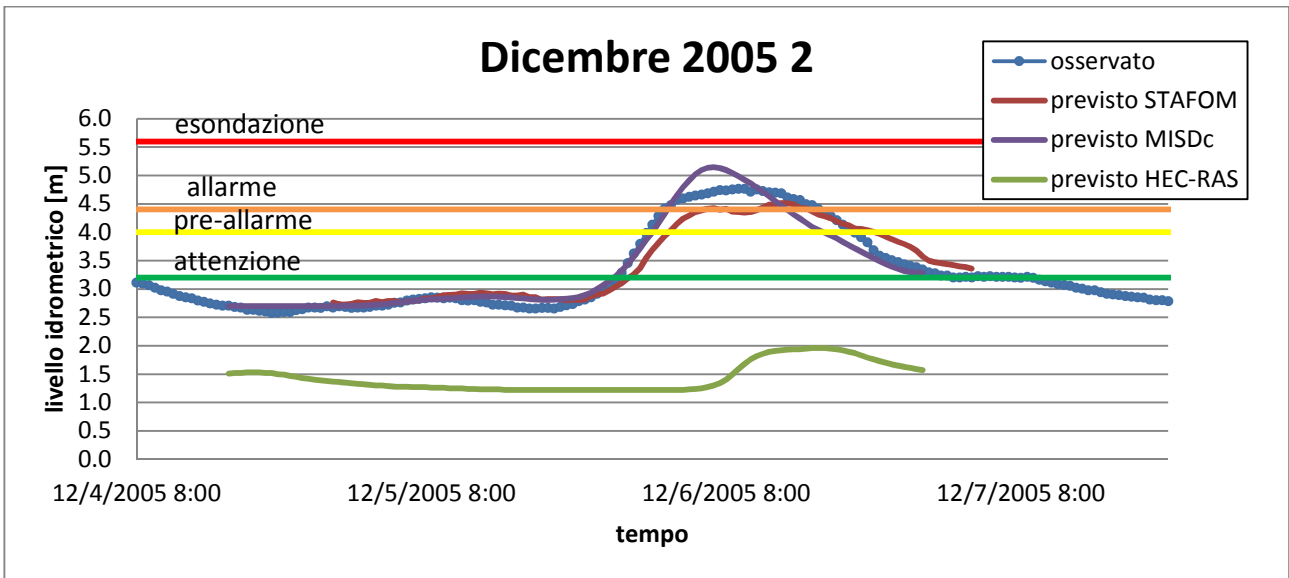
Evento 18:



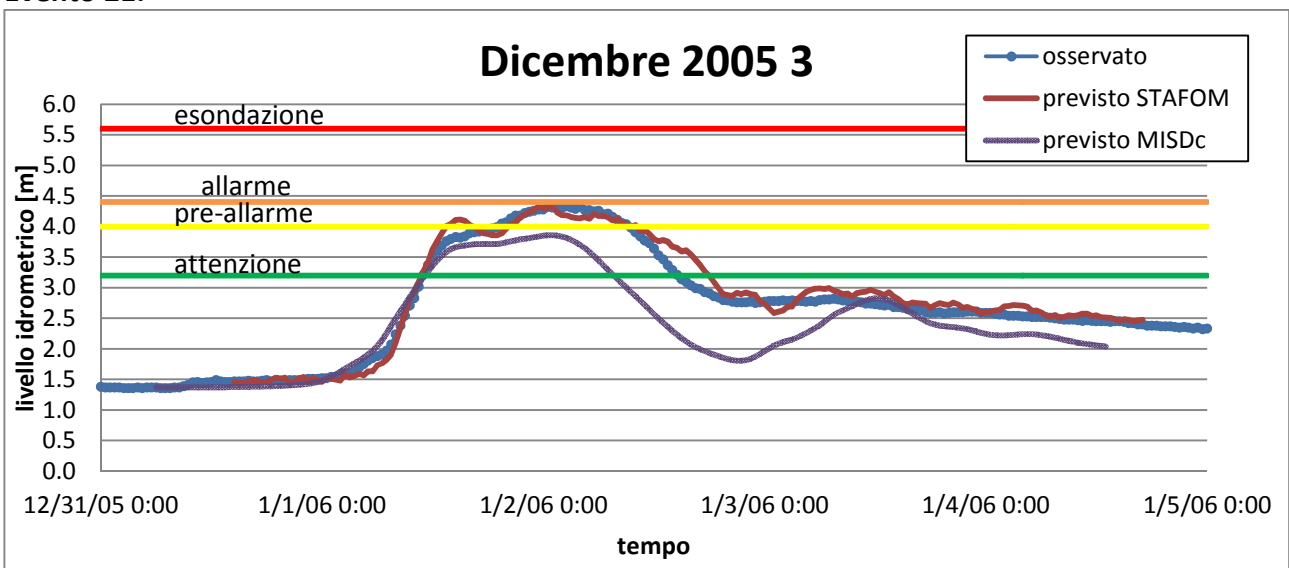
Evento 19:



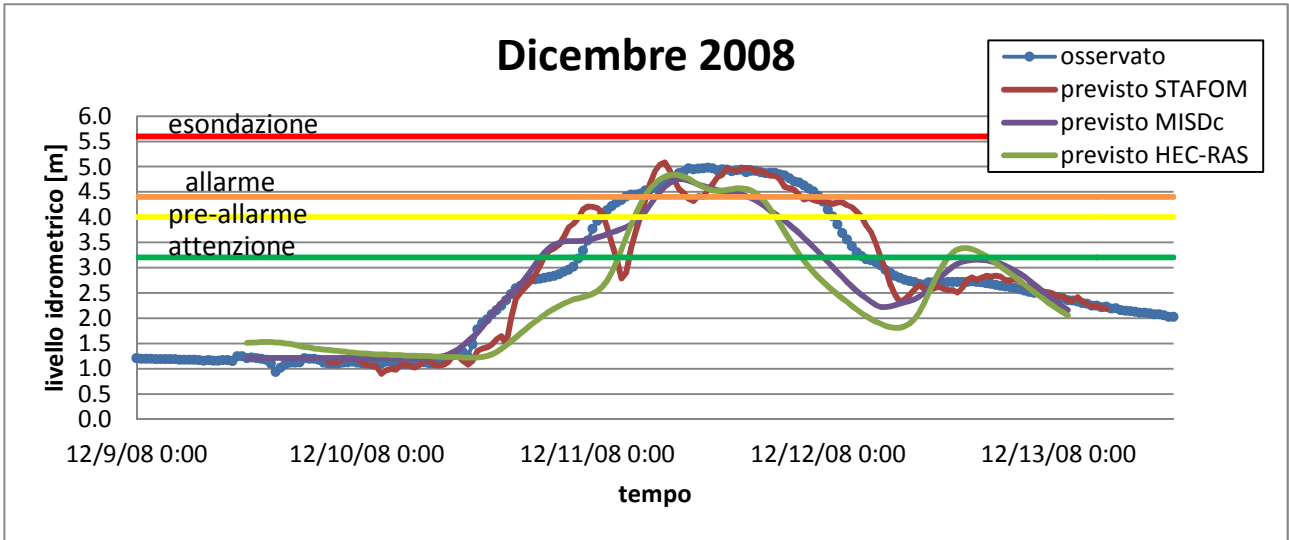
Evento 20:



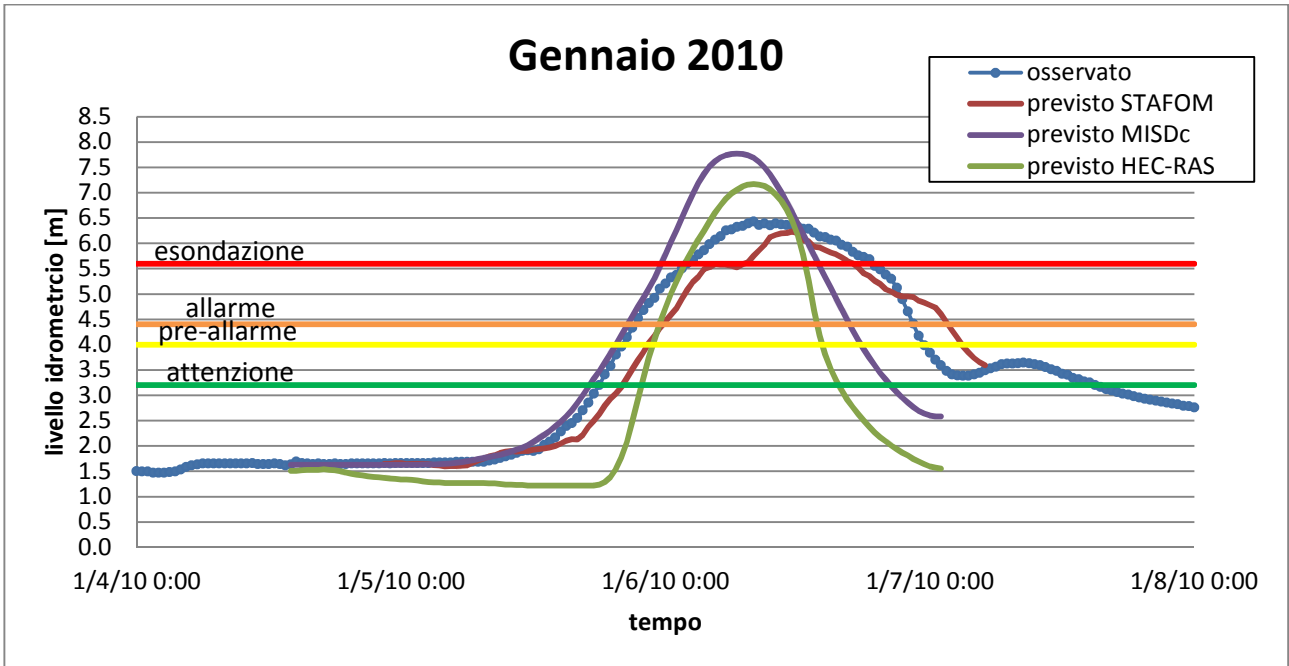
Evento 21:



Evento 22:

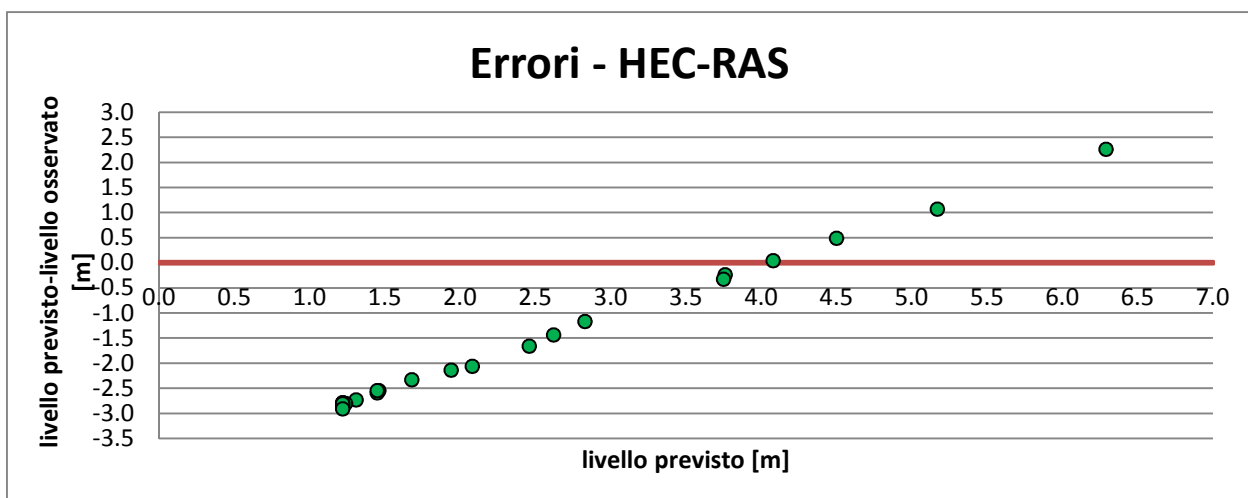
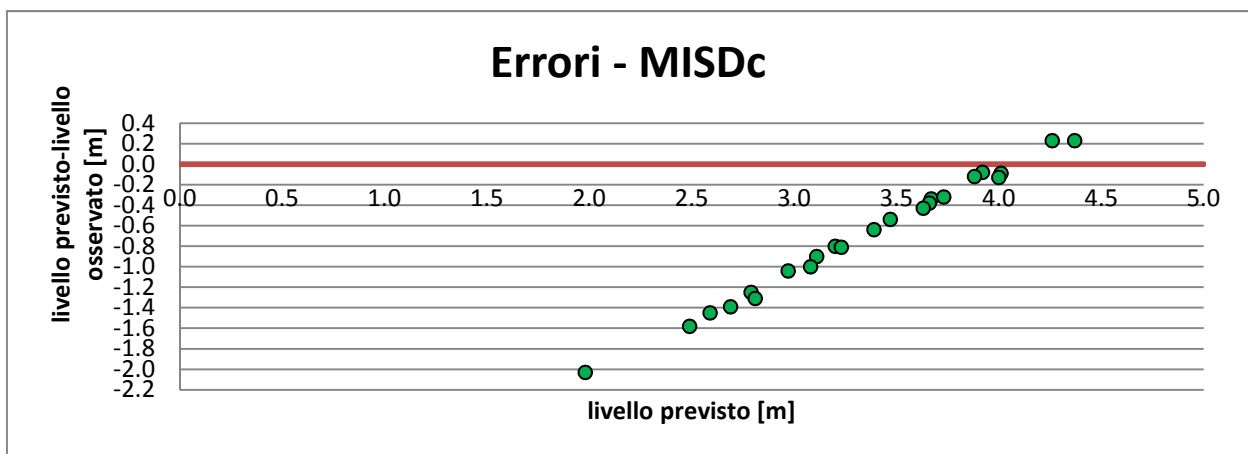
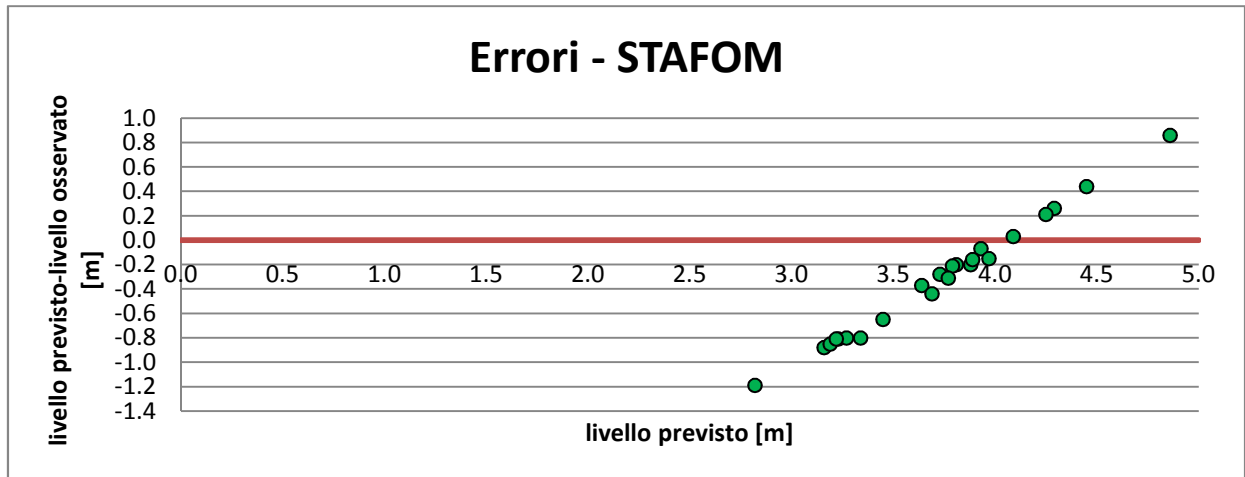


Evento 23:

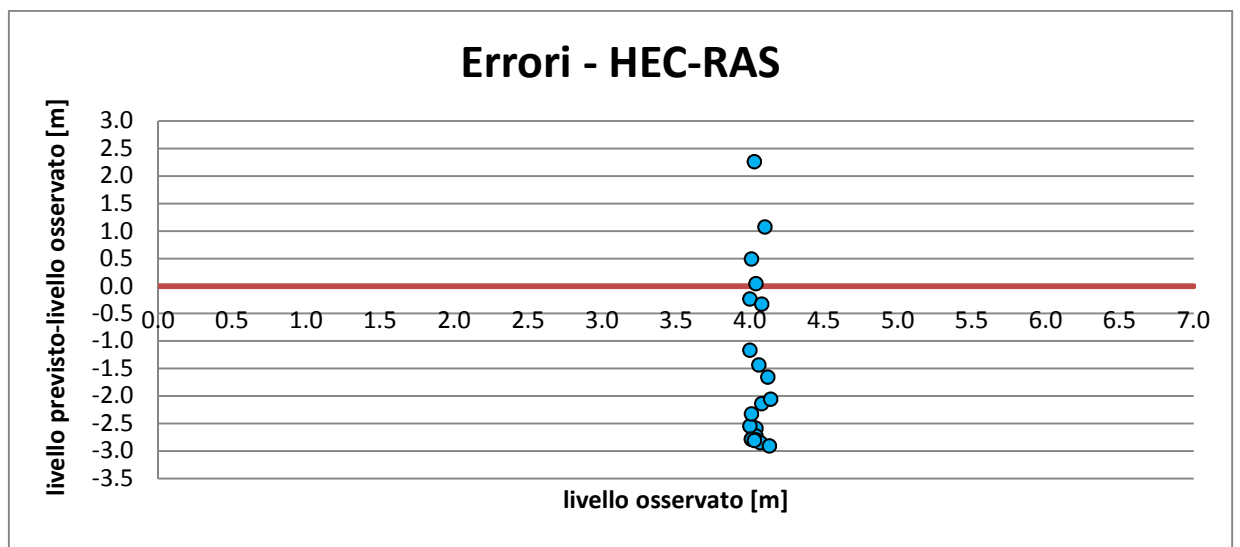
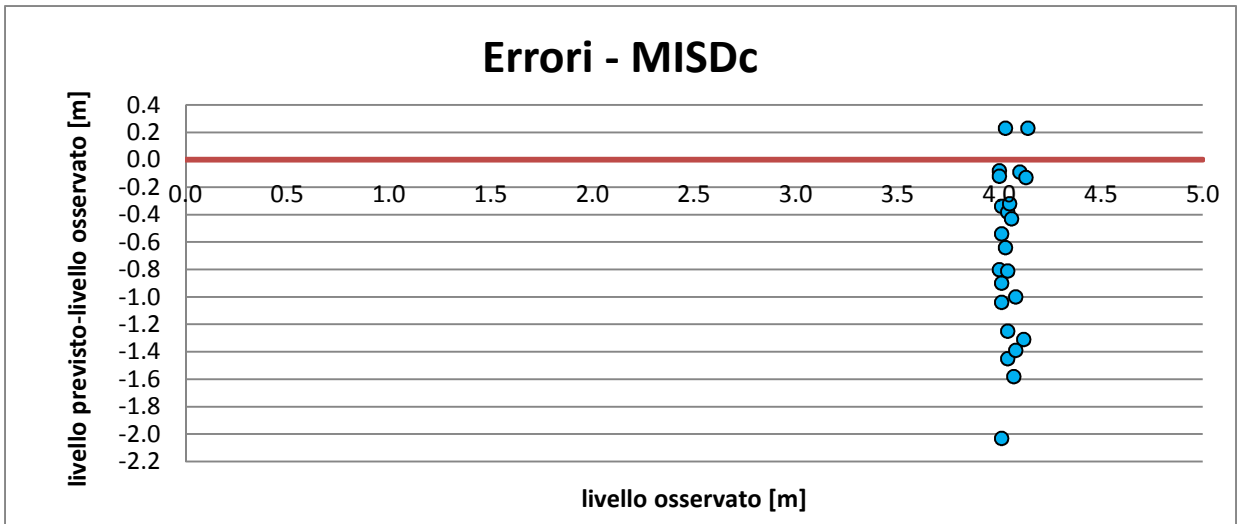
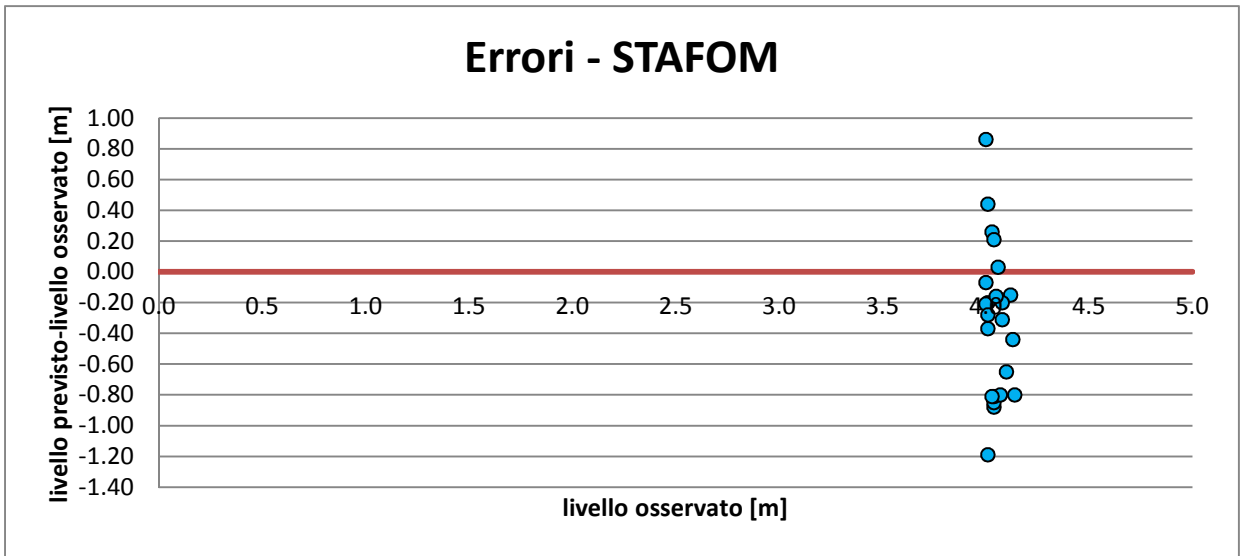


Appendice E – Grafici degli errori di previsione dei modelli all’istante di raggiungimento della soglia di pre-allarme osservato

Errori rispetto al livello idrometrico previsto:



Errori rispetto al livello idrometrico osservato:



BIBLIOGRAFIA

- A. Murachelli, V. Riboni, *Rischio idraulico e difesa del territorio* (2010), D. Flaccovio
- D. Molinari (2010), *Flood early warning systems performance: an approach at the warning chain perspective*
- Dir.P.C.M. 27 febbraio 2004
- F.T. Andrews, B.F.W. Croke, A.J. Jakeman (2011), *An open software environment for hydrological model assessment and development*, Environmental Modelling & Software pp. 1171-1185
- Kolbjørn Engeland, Benjamin Renard, Ingelin Steinsland, Sjur Kolberg (2010), *Evaluation of statistical models for forecast errors from the HBV model*, Journal of Hydrology 384 pp.142-155
- L. Brocca, F. Melone and T. Moramarco (2011), *Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting*
- L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2010), *Modello idrologico semi distribuito di tipo continuo (MISDC) per la valutazione del contenuto d'acqua e il preannuncio delle piene in tempo reale*
Rapporto finale
- L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2008), *Rapporto preliminare sulla modellistica di valutazione del contenuto d'acqua e afflussi-deflussi in continuo per applicazione al tempo reale*
- L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2009), *Rapporto tecnico sul codice MISD (Modello Idrologico Semi-Distribuito) implementato in MATLAB®*
- L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2009), *Rapporto tecnico sul codice MOBIS (Modello di Bilancio Idrologico del Suolo) implementato in MATLAB®*
- L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2009), *Rapporto tecnico sul Modello accoppiato di Bilancio Idrologico del Suolo (MOBIS) e Idrologico Distribuito (MISD) per la valutazione del contenuto d'acqua e il preannuncio delle piene in tempo reale*
- Mukesh Kumar Tiwari, Chandranath Chatterjee (2010), *Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs)*, Journal of Hydrology 382, pp. 20-33
- Murphy A.H. (1993), *What Is a Good Forecast? An Essay on the Nature of Goodness in Weather Forecasting*, Weather and Forecasting, 1993, Volume 8, Issue 2, pp. 281-293
- Murphy A.H., Brown B.G., Chen Y. (1989), *Diagnostic verification of temperature forecast*, Weather and Forecasting, Volume 4, pp. 485-501
- Murphy A.H., Winkler R.L. (1987), *A general framework for forecast verification*, Monthly Weather Review, 1987, Volume 115, pp. 1330-1338

- N. Berni, A. Viterbo, C. Pandolfo, M. Stelluti, S. Barbetta & L. Brocca (2008), *Effetti della distribuzione spaziale della pioggia e dell'uso del suolo sulla risposta idrologica a differente scala nell'alta valle del fiume Tevere*
- N. Berni, C. Pandolfo, F. Ponziani, M. Stelluti, & A. Viterbo (2010), *Centro Funzionale della Regione Umbria: previsione delle piene in tempo reale a supporto delle decisioni per la mitigazione del rischio idraulico*. XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, 14-17 settembre 2010.
- N. Berni, C. Pandolfo, F. Ponziani, M. Stelluti, F. Governatori Leonardi, R. Zauri, A. Viterbo (2009), *Rapporto d'evento Evento Meteo-Idropluviometrico Bacino Alto-Medio Tevere 4 - 16 Dicembre 2008*
- N. Berni, C. Pandolfo, F. Ponziani, M. Stelluti, R. Zauri, F. Governatori Leonardi, A. Viterbo (2010), *Evento Alluvionale del Bacino dell'Alto e Medio Tevere, 31 Dicembre 2009 – 11 Gennaio 2010*
- N. Berni, C. Pandolfo, F. Sisti, M. Stelluti (2007), *Definizione delle zone di allerta e delle soglie idro – pluviometriche nella Regione Umbria*
- Piano Provinciale di Emergenza Protezione Civile (2006)
- Raudkivi, A.J. (1979), *Hydrology: an Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modeling*, Pergamon, New York.
- S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (Gennaio 2008), *Il modello di previsione dei livelli idrometrici in tempo reale STAFOM: caratteristiche principali e valutazione dell'accuratezza dei risultati*
- S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (Maggio 2008), *Il modello di previsione dei livelli idrometrici in tempo reale STAFOM: caratteristiche principali e valutazione dell'accuratezza dei risultati*
- S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2009), *Il modello di previsione dei livelli idrometrici in tempo reale STAFOM: sperimentazione e modifiche del software operativo per il miglioramento dell'accuratezza e dell'utilità della previsione*
- S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2008), *Il modello di previsione dei livelli idrometrici in tempo reale STAFOM: sperimentazione preliminare sull'efficacia del software operativo*
- S. Barbetta, L. Brocca, F. Melone, T. Moramarco (2010), *Il modello di previsione dei livelli STAFOM: implementazione e sperimentazione Relazione finale*

Thornes J.E., Stephenson D.B. (2001), *How to judge the quality and value of weather forecast products*, Meteorological Applications, Volume 8, pp. 307-314

X. Sun, R.G. Mein, T.D. Keenan, J.F. Elliott (2000), *Flood estimation using radar and raingauge data*, Journal of Hydrology 239 pp. 4-18

Yves Trambly, Christophe Bouvier, Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot, Dragana Todorovik, Jean-Marc Domergue (2010), *Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modeling*, Journal of Hydrology 387 pp. 176–187