



L'ACQUA



ISSN 1125-1255 - Poste Italiane S.p.A. - Spedizione in abbonamento postale - D.L. 353/2003 (convertito in L. n. 46 del 27/02/04) art. 1 comma 1 - D.C.B. ROMA

Marco Mancini^{(a)*}, Giovanni Ravazzani^(a), Chiara Corbari^(a), Alessandro Ceppi^(a), Luigi Mille^(b),
Marco Laveglia^(b), Gabriele Lombardi^(c), Stefania Meucci^(c)

FILL: IL SISTEMA DI MONITORAGGIO E PREVISIONE PER LA LAMINAZIONE DINAMICA DEL LAGO D'IDRO^(*)

FILL: THE MONITORING AND FORECASTING SYSTEM FOR THE DYNAMIC FLOOD CONTROL OF LAKE IDRO

Il sistema FILL (Forecast Idro Lake Level) è stato predisposto come prodotto operativo su richiesta dell'Agencia Interregionale Po (AIPO) gestore del Lago d'Idro e della Regione Lombardia, per ottemperare alle esigenze di previsione e gestione dei livelli del lago anche ai fini della laminazione dinamica (www.fest.polimi.it/dashboards). La laminazione dinamica, ossia il diminuire preventivamente il volume di un serbatoio per ottenere la riduzione dell'idrogramma in uscita fino ad una portata compatibile con quella smaltibile in sicurezza nell'alveo a valle (introdotta dal DPCM 27/02/2004), è un'operazione di gestione moderna di un invaso, generalmente ad uso plurimo, che permette in teoria di salvaguardare la risorsa idrica invasata garantendo, allo stesso tempo, la protezione idraulica dei territori di valle, funzioni queste che come ben noto, sono in antitesi nella gestione di uno stesso volume. Tale modalità di gestione è possibile solo grazie alla moderna tecnologia che integra la previsione meteorologica, idrologica e idraulica in grado di prevedere con un anticipo temporale utile alla regolazione del serbatoio, gli idrogrammi in ingresso allo stesso. La conoscenza degli idrogrammi previsti permette poi di simulare gli effetti, sempre in previsione, della regolazione idraulica delle opere di scarico sui livelli idrici dell'invaso e, quindi, i relativi idrogrammi in uscita. Questi, sommati a quelli generati dal bacino idrografico residuo a valle del serbatoio, mostrano gli effetti della laminazione di piena indotta dal serbatoio sulle sezioni di valle. In tal modo è possibile produrre svasi preventivi ai fini di laminazione solo nel caso di onde di piena previste significative rispetto al volume del serbatoio per le sezioni a valle dell'invaso.

Il sistema FILL si basa su tale tecnologia supportata da un modello idrologico – idraulico a schema distribuito FEST-WB con funzionamento in continuo, che calcola in tempo reale, sulla base dei dati meteorologici osservati e previsti, gli afflussi pluviometrici e nivali e li trasforma in deflussi e relativi idrogrammi previsti in alveo. Ciò è calcolato in funzione della temperatura, della copertura nivale, delle condizioni di umidità del suolo, delle caratteristiche topografiche e geometriche del reticolo fluviale nonché delle principali opere di regolazioni presenti nel bacino in esame, come i serbatoi di Malga Boazzo e Malga Bissina.

Il testo espone i principali obiettivi e caratteristiche che un sistema di laminazione dinamica deve avere attraverso l'esperienza del sistema FILL riportando l'esposizione al convegno "Uso dei Serbatoi per la laminazione delle piene" (Bonafè e Brath, 2024) e descrive in modo sintetico i principali moduli che lo compongono, mostrando un esempio di laminazione dinamica.

Parole chiave: Laminazione dinamica, Lago d'Idro, Serbatoio regolato, Monitoraggio, Previsione di piena, Modello idrologico, Modello meteorologico.

The FILL dynamic flood control system (Forecast Idro Lake Level) was designed and implemented to support Regione Lombardia and The Interregional Agency for the Po River (AIPO, the Italian

^(a)Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale; ^(b)Agencia Interregionale per il fiume Po; ^(c)Modellistica e Monitoraggio Idrologico S.r.l.; *Piazza Leonardo da Vinci, 32, 20133 Milano, marco.mancini@polimi.it

^(*) Pubblicato in *Uso dei Serbatoi per la Laminazione delle Piene*, Bollettino ITCOLD (Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe), 2024.

acronym) in forecasting and managing the lake levels also for reservoir dynamic routing assessment (www.fest.polimi.it/dashboards). Dynamic flood control is defined as the reservoir manoeuvres, that reduce the reservoir water level in advance respect to the arrival of a forecasted flood dangerous for the downstream territory, attenuating the flood hydrograph. This reservoir management was introduced by the Italian Law DPCM 27/02/2004 with the idea that the dams and their reservoirs have to strongly reduce the downstream flood risk.

This reservoir management is only possible thanks to the modern technology that couples the meteorological forecast with hydraulic and hydrologic modelling, so that a same volume used for irrigation or power production can be also used for flood attenuation, by emptying it only before the arrival of a possible forecasted dangerous flood. The estimation of forecasted incoming hydrograph, the present reservoir storage and the hydrograph generated on the downstream residual basin allow to tune the dam manoeuvres on the maximum capacity of the downstream river cross sections.

The FILL system is based on several modules, each of them containing state of the art algorithms: i) the hydrological-hydraulic distributed model FEST-WB, which computes in real time the current and the forecasted hydrograph at any user defined river cross section considering the effects of upstream hydraulic structures; the meteorological and hydrological observed input data module, which retrieves the meteorological and river gauge stations from existing national / regional network; iii) the meteorological forecast input data module, which provides the forecasted meteorological variables from several weather models; iv) the satellite data module which provides observed and model simulated snow cover maps and the Snow Water Equivalent; v) the dam outlet manoeuvres module, where the user can interactively assign and test the opening degree of the lake regulation weir for the present and future time; vi) the data base module, where meteorological forecast and observed data are recorded for successive user re-analysis of reservoir response to the outlet manoeuvres and forecasted inflows; vii) the web control dashboard module, which displays the observed and forecasted variables as precipitation, temperature, reservoir level and inflow, outflow hydrograph, and river downstream discharges.

The paper discusses the main objectives and characteristics of a dynamic reservoir routing system based on the experience of operational Idro lake case study also discussed in the recent workshop on the reservoir routing (Bonafè and Brath, 2024)

Keywords: Dynamic Flood Control, Lake Idro, Monitoring, Regulated Reservoir, Flood Forecast, Hydrological Model, Meteorological Model.

1. IL LAGO D'IDRO E IL SUO SISTEMA DI REGOLAZIONE

Il bacino idrografico del fiume Chiese si estende per circa 1300 km² dal ghiacciaio dell'Adamello alla confluenza nel fiume Oglio e presenta una parte montana con topografia accentuata e una rimanente parte di pianura. Nella parte montana il Fiume Chiese costituisce l'immissario e l'emissario principale del Lago d'Idro situato nelle Prealpi Orobriche Bresciane. Il lago d'Idro comunemente noto come Eridio drena una superficie di circa 620 km² (Fig. 1).

Amministrativamente la quasi totalità del bacino imbrifero montano appartiene alla Provincia autonoma di Trento mentre la parte sub lacuale è in Regione Lombardia, aspetto non secondario per l'acquisizione e gestione dei dati meteorologici e idrometrici.

La regolazione del lago d'Idro, come ogni invaso ad uso multiplo, è oggetto di conflittualità tra interessi agricoli di valle, idroelettrici, turistici e di sicurezza idraulica dei territori rivieraschi e di valle. La regolazione del lago d'Idro iniziò con la concessione di derivazione alla società SEB Società Elettrica Bresciana (25/10/1917). La funzione di regolatore è oggi affidata ad AIPo che assolve la funzione di ente regolatore indipendente.

La regolazione avviene tramite (Fig. 2): una traversa che sbarrava l'emissario ed una galleria di scarico nota come Galleria degli agricoltori (terminata nel 1932) avente soglia di imbocco 7 metri al disotto della quota soglia della traversa di sbarramento così da consentire l'utilizzo della capacità d'invaso compreso fra quota 361,0 m s.l.m. e 365,0 m s.l.m. Si aggiunge a ciò la galleria di derivazione idroelettrica che alimenta la centrale di Vobarno.

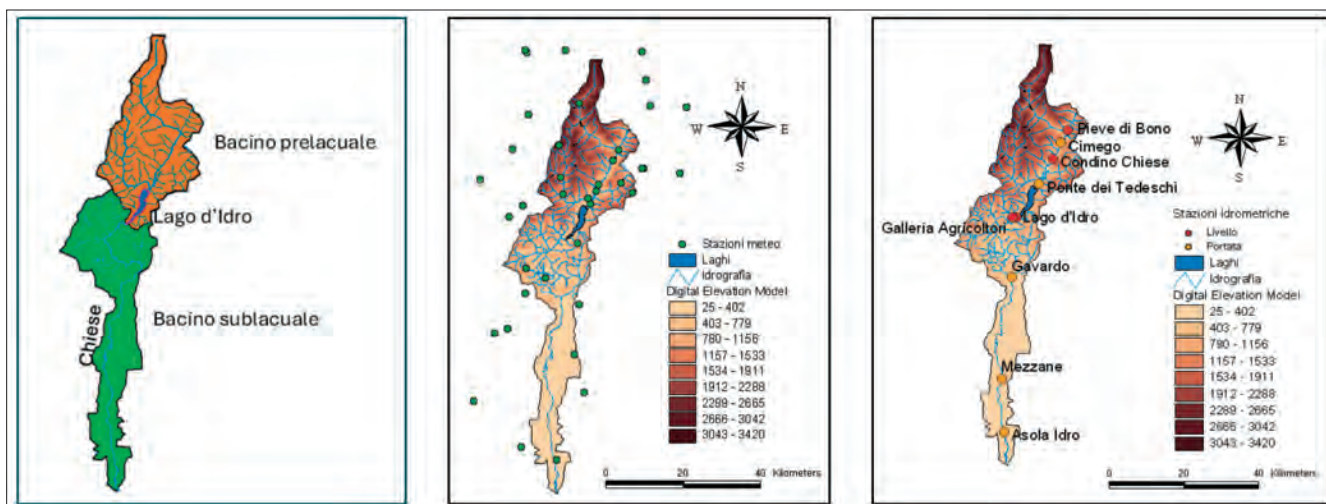


Figura 1 - Bacino idrografico del fiume Chiese con (sinistra) in evidenza il bacino idrografico prelacuale e sublacuale, le stazioni meteorologiche (centro), le stazioni idrometriche (destra).

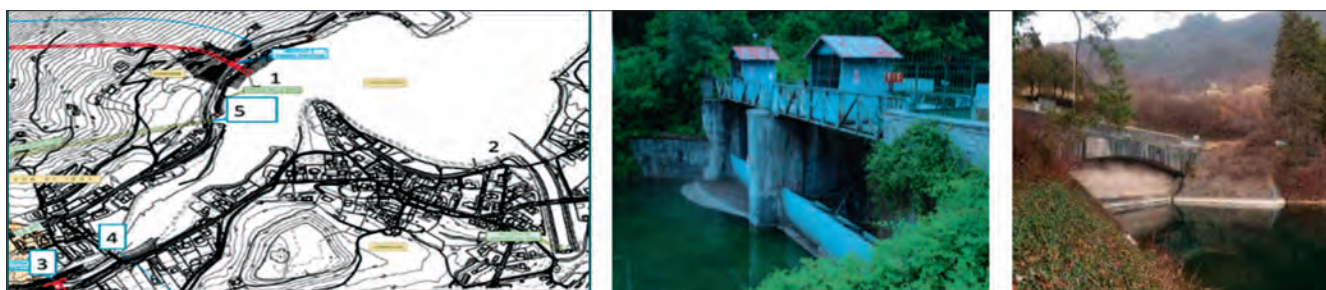


Figura 2 - Planimetria degli scarichi attuali (n°2, 3, 5) e di quelli in progetto (n°1, 4), del Lago d'Idro (sinistra); la traversa di regolazione esistente (centro); l'imbocco della galleria degli agricoltori (destra).

In particolare, la traversa di sbarramento è della tipologia mobile con due paratoie a settori ed è dotata di uno scarico di superficie. La galleria di scarico “degli Agricoltori” reimmette acqua a valle della traversa fungendo da scarico di fondo del serbatoio

La Regione Lombardia, per motivi di statica della galleria esistente, nonché di sicurezza idraulica, ha in fase di avanzata progettazione una nuova galleria più esterna alla esistente con scarico in zona non interessata da frana il cui funzionamento idraulico e modello fisico sono descritti in (Herrea Gomez et al., 2024).

2. OBIETTIVI E ARCHITETTURA DEL SISTEMA DI LAMINAZIONE DINAMICA

Il sistema FILL (www.fest.polimi.it/dashboard) è stato progettato e sviluppato dalla società Modellistica e Monitoraggio Idrologico (MMI S.r.l. www.mmidro.it) nata come spinoff del Politecnico di Milano aggiudicataria di una specifica selezione nel 2017. Il sistema, supporta la Regione Lombardia e l'Agenzia Interregionale per il fiume Po, AIPo, quale ente di regolazione del lago, nel processo decisionale di laminazione dinamica, ossia di svasso preventivo all'arrivo di un idrogramma di piena in modo da ridurre preventivamente il livello del serbatoio amplificandone il processo di laminazione al fine di rispettare le condizioni di sicurezza idraulica di valle, ma anche di garantire la sicurezza della diga e non ultimo di gestione ordinaria dei livelli.

Gli obiettivi principali sono:

- i) prevedere l'ingresso al lago di idrogrammi di piena con un orizzonte di previsione di sette giorni⁽¹⁾ nonché alle sezioni idrografiche significative a valle del lago sul fiume Chiese quali Gavardo, Mozzanica e Asola (Fig. 1);
- ii) verificare la pericolosità rispetto alle portate ammissibili lungo i centri abitati del fiume Chiese a valle del lago, in base alla magnitudine degli idrogrammi in ingresso e alla capacità di invaso attuale del lago;

⁽¹⁾ Tale orizzonte temporale è stato individuato in funzione dei massimi valori scaricabili a valle e dell'affidabilità operativa di diversi modelli di previsione meteorologica.

iii) definire in anticipo la regolazione delle opere di scarico (galleria degli Agricoltori, traversa di regolazione, centrale idroelettrica) per i sette giorni successivi anche in funzione delle previsioni di deflusso del bacino idrografico a valle del lago stesso.

Agli obiettivi principali vanno aggiunti, inoltre:

i) supporto alle opere provvisorie del cantiere per la realizzazione delle opere di imbocco della nuova galleria di scarico;

ii) regolazione del lago in funzione della domanda irrigua dei comprensori di valle in tempo reale.

Il sistema FILL permette di valutare in tempo reale se gli idrogrammi previsti in ingresso al lago determinino, in funzione del livello attuale del lago e delle possibili condizioni di regolazione degli scarichi, gli idrogrammi in uscita che congiuntamente agli afflussi del bacino residuo possano o meno superare le soglie di portata di sicurezza idraulica di valle.

Il calcolo degli idrogrammi da trasferire a valle avviene quindi in funzione della regolazione delle luci del lago nell'orizzonte di previsione del sistema (7 giorni), degli idrogrammi previsti in ingresso al lago, e dei livelli presenti nel serbatoio e degli idrogrammi del bacino residuo chiuso alle sezioni di valle. Il sistema utilizza diversi moduli basati su algoritmi robusti allo stato dell'arte della letteratura scientifica in tema di calibrazione dei modelli e previsione di piena di seguito descritti (Fig. 3).

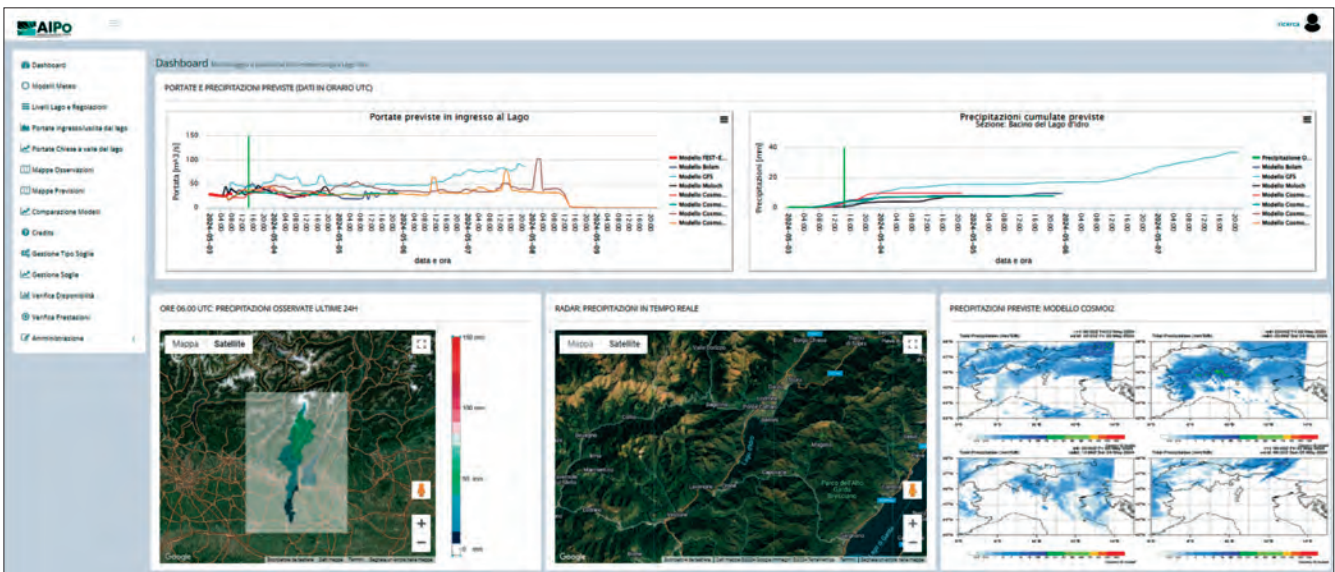


Figura 3 - Schermata iniziale del sistema FILL: in alto gli idrogrammi previsti con la più recente previsione meteorologica disponibile e simulati con i dati osservati. In basso una visione sinottica sulla precipitazione osservata sul bacino e prevista dai relativi modelli di previsione.

Il pannello di controllo permette di scegliere e visualizzare i moduli del sistema, le variabili in ingresso al serbatoio nonché quelle determinate dalla modalità di regolazione degli scarichi. La logica di visualizzazione scelta è stata quella di fornire una sintesi delle principali variabili in tempo reale. Sono visualizzabili le variabili osservate e previste sia in forma di serie storiche per assegnata sezione idrografica (precipitazioni ragguagliata, temperatura, livello, portate in ingresso e uscita al serbatoio, portate in alveo a valle del lago), che di immagini quali ad esempio la copertura nivale.

Il modello idrologico-idraulico FEST-WB, per la cui descrizione si rimanda a (Mancini, 1990; Montaldo et al., 2004; Rabuffetti et al., 2008; Corbari et al., 2011; Ravazzani et al., 2014, 2015, 2016), è stato scelto come motore del sistema per le sue prerogative rispetto agli obiettivi del prodotto operativo. Esso rientra in quella categoria nota nella letteratura scientifica come modelli idrologici distribuiti e permette di calcolare in tempo reale la formazione e propagazione del deflusso nel reticolo idrografico attuale e previsto per qualsiasi sezione idrografica, definita dall'utente sul grigliato di discretizzazione, considerando gli effetti delle opere idrauliche presenti lungo la rete idrografica come gli invasi naturali o regolati e le opere di derivazione. Nel caso specifico sono stati inseriti nel bacino a monte del lago d'Idro i due invasi di Malga Bissina e Malga Boazzo (Fig. 4) (ICOLD, www.progettodighe.it).

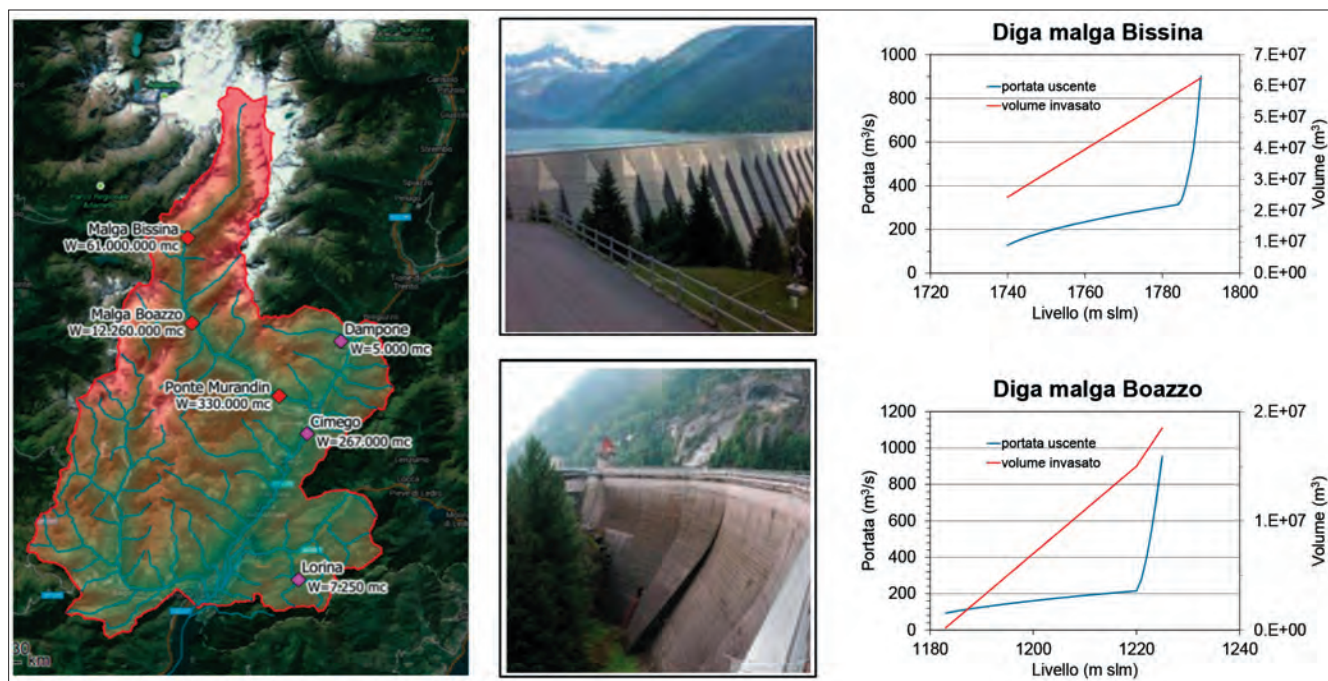


Figura 4 - Il bacino idrografico chiuso al lago d'Idro (620 km²) con i serbatoi di Malga Bissina e Malga Boazzo e le curve di invaso e di scarico (solo funzione della geometria di sfioro).

I due serbatoi sono significativi perché il loro volume di regolazione è circa uguale al volume di regolazione del lago d'Idro (70 M m³). In assenza di informazioni sul livello in tempo reale, nella calibrazione e nel funzionamento del sistema in tempo reale, i due laghi artificiali sono stati trattati come invasi non regolati, ossia con la loro geometria di sfioro senza la regolazione dell'ente gestore, in assenza di un accordo tra le due regioni.

Il modulo di input di dati meteorologici e idrologici osservati da stazioni di misura meteorologiche e idrologiche delle reti nazionale e regionali permette la calibrazione e le simulazioni dei processi idrologici idraulici ma soprattutto, nel funzionamento in tempo reale, di controllare l'errore di previsione dei modelli meteorologici e aggiornare la condizione iniziale dello stato del sistema (umidità del suolo e volume negli invasi) sulla base dei dati osservati.

Il modulo di lettura dei dati di previsione meteorologica fornisce al modello idrologico-idraulico le variabili meteorologiche previste dai più modelli di previsione meteorologica disponibili. L'approccio multi-modello permette di confrontare gli effetti della previsione di ciascun modello meteo, caratterizzato da una specifica risoluzione spaziale e temporale nonché da schemi di modellazione diversi, sulla previsione idrologica, in modo da quantificare l'incertezza di previsione. I modelli di previsione meteo utilizzati (Tab. I) sono prevalentemente modelli ad area limitata e interpolano, attraverso le equazioni di Navier-Stokes, su sotto griglie a maggiore risoluzione i valori previsti al contorno forniti da modelli a scala globale. In particolare, si è deciso, anche sulla base di esperienze pregresse (Ceppi et al., 2014, Lombardi et al., 2018), di utilizzare due famiglie di modelli ad area limitata oggi disponibili. La prima è quella di *modelli deterministici* ossia quelli che generano un'unica previsione per ciascuna variabile meteorologica. I modelli utilizzati sono: il modello Bolam e Moloch del CNR-ISAC (www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/index.html), il modello WRF del Centro Epson Meteo, ed il modello GFS, modello globale sull'intero pianeta con passo di griglia di ~50 km (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>).

La seconda famiglia di modelli utilizzata è quella nota come *modelli di ensemble* dove ogni corsa del modello ad area limitata genera un insieme di previsioni per ciascuna variabile meteo (la precipitazione ad esempio) ottenuta sempre con un approccio fisico perturbando la condizione iniziale ed al contorno del modello a scala globale. Nello specifico il sistema FILL utilizza il modello Cosmo-Leps, che presenta 20 simulazioni in previsioni per ciascuna variabile su un orizzonte temporale di 5 giorni e una ri-

soluzione spaziale di 7 km. Il sistema FILL calcola quindi tutti gli idrogrammi conseguenti alla previsione di ensemble e ne evidenzia per scelta di progetto il valore minimo e massimo (Ravazzani et al., 2016).

Nella *Tabella* seguente sono confrontate le caratteristiche dei modelli previsionali.

TABELLA I - Modelli di previsione meteorologica utilizzati nel sistema FILL e principali caratteristiche operative.

GFS (Global Forecast System)	Bolam	Moloch	Cosmo-Leps
Spatial Resolution: ~ 50 km (0.50°)	Spatial Resolution: ~ 8.3 km (0.075°)	Spatial Resolution: ~ 1.25 km (0.0113°)	Spatial Resolution: ~ 7.0 km (0.07°)
Temporal Resolution: 3 h	Temporal Resolution: 1 h	Temporal Resolution: 1 h	Temporal Resolution: 1 h
Vertical levels: 64	Vertical levels: 50	Vertical levels: 50	Vertical levels: 50
Deterministic model	Deterministic model	Deterministic model	Ensemble model
Forecast range: +144 h	Forecast range: +72 h	Forecast range: +45 h	Forecast range: +72 h
Run starting at: 00:00 UTC	Run starting at: 00:00 UTC	Run starting at: 03:00 UTC	Run starting at: 00:00 UTC

La scelta dei modelli di previsione e soprattutto del loro orizzonte temporale è anche dettata dai tempi caratteristici di svasso del serbatoio a sua volta condizionati dalle portate ammissibili a valle, che nel caso specifico sono stati determinati in sei giorni che implica che il sistema previsionale si deve estendere almeno su questi orizzonti previsionali che sono propri di alcuni modelli dei modelli considerati.

Il modulo di lettura dati satellitari della copertura nivale (Fig. 5) fornisce al modello idrologico FEST-WB i valori giornalieri / mensili della copertura nevosa per l'aggiornamento e controllo dell'equivalente idrico nivale (SWE, Snow Water Equivalent) calcolato dal modello idrologico. Le mappe di copertura nivale sono ricavate dal sensore satellite MODIS a bordo del satellite TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>) confrontati poi con i dati a terra dei nivometri di Daone e Tremalzo.

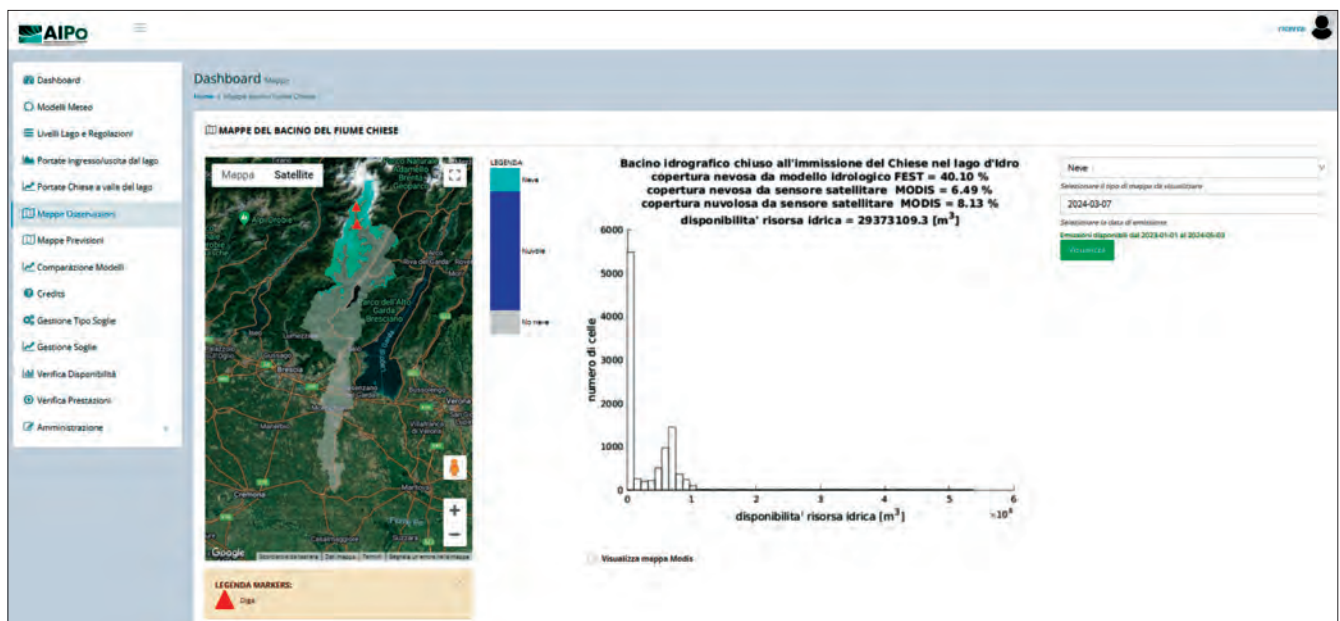


Figura 5 - Snow water equivalent delle aree occupate da neve (esempio per il 7/3/2024). In azzurro le aree coperte da neve (sinistra). Istogramma dei valori di equivalente idrico nivale a destra.

Il modulo di regolazione delle luci di scarico per lo svasso preventivo (Fig. 6) è una delle parti più interattive del sistema FILL perché permette di definire, su un orizzonte temporale di sette giorni, il grado di apertura delle luci di scarico di ciascuna delle opere di regolazione del lago e quindi di calcolare gli idrogrammi in uscita ed i relativi livelli del lago in funzione del modello di previsione meteorologica scelto e dei relativi idrogrammi di piena.

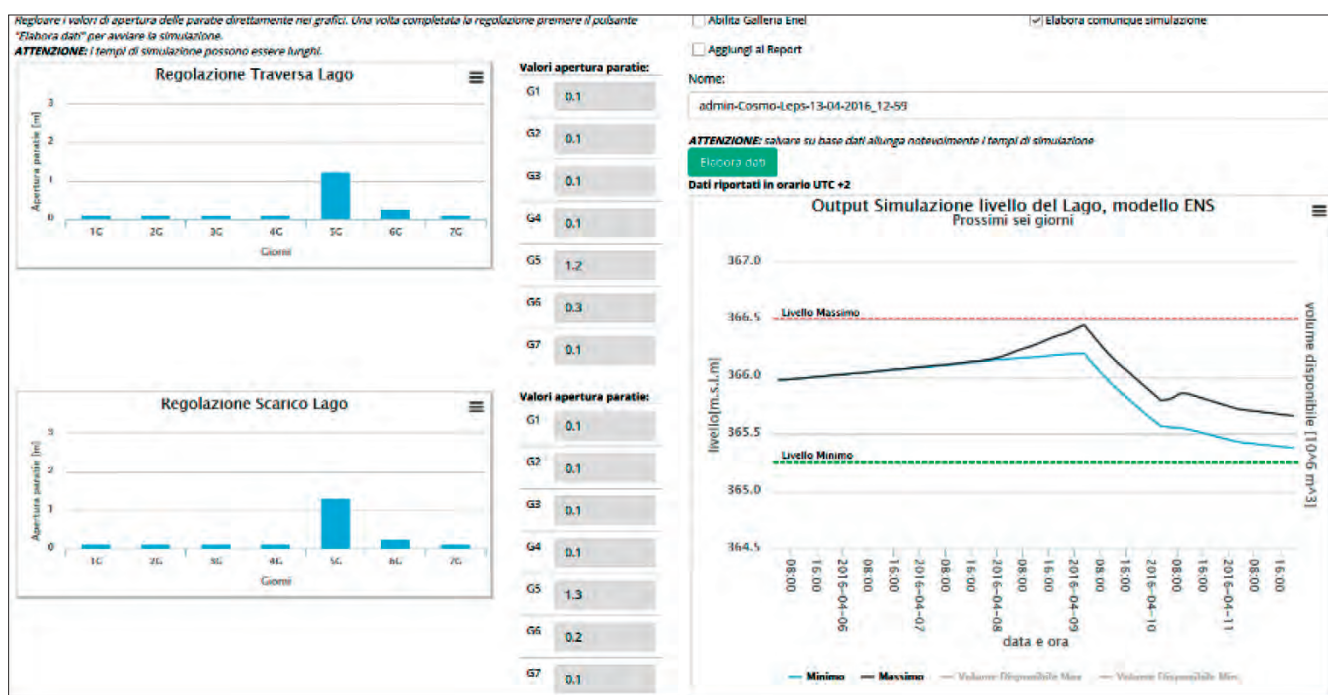


Figura 6 - Esempio di possibile regolazione dei due scarichi principali nei sette giorni di orizzonte temporale di previsione e relativi livelli previsti nel lago (max e min) in funzione degli idrogrammi max e min calcolati in base alle simulazione di ensemble del modello di previsione meteorologica.

3. CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

Il modello idrologico idraulico FEST-WB implementato sul bacino è stato oggetto di una procedura di calibrazione e validazione rispetto a misure nivometriche e di portata osservata.

La calibrazione dei parametri del modello della dinamica nivale utilizza i dati delle misure di altezza del manto nevoso acquisite dai nivometri di Daone e Tremalzo, e le mappe di copertura nivale misurate dal sensore satellite MODIS a bordo del satellite TERRA.

Il modello di fusione e accumulo della neve sviluppato nel modello idrologico si basa sulla sola temperatura dell'aria, interpolata rispetto alla quota topografica, e sulla presenza o meno di precipitazione (Corbari et al., 2009). La dinamica della copertura nivale è determinata da due valori soglia di temperatura che suddividono la precipitazione in neve e pioggia e dalla costante di fusione della neve. Sono quindi parametri di calibrazione il tasso di fusione e le due temperature soglia. La calibrazione del modello nivale è stata effettuata confrontando le misure di altezza di neve acquisite dai nivometri di Daone e Tremalzo con l'SWE simulato dal modello idrologico nei punti corrispondenti alle due stazioni. Nel confronto simulato-osservato bisogna tener presente che le due grandezze non sono direttamente confrontabili, ma è possibile valutare i tempi di accumulo e fusione della neve; cioè, viene valutato se la risposta simulata della neve alle temperature e precipitazioni misurate è in fase con le fasi di accumulo e fusione della neve osservate. Il modello basato sulla sola temperatura non calcola l'altezza di neve dallo SWE simulato essendo la densità della neve dato puntuale ed estremamente variabile con il grado di compattazione.

La calibrazione è stata eseguita sulla base delle altezze nivali orarie osservate dal 2005 al 2010 e su 47 immagini satellitari dal settembre 2005 al dicembre 2014, escludendo dall'analisi i periodi estivi. I valori delle costanti di calibrazione sono Sim00 son: $T_{sup} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{inf} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $c_m = 0.00000005 \text{ m/s/}^\circ\text{C}$ e $T_b = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 7).

La validazione del modello della dinamica nivale è stata effettuata utilizzando le osservazioni orarie di neve dall'inizio del 2011 alla fine del 2014 (4 anni di osservazioni). Il confronto osservato-simulato è stato eseguito, anche in fase di validazione, sia localmente in corrispondenza delle due stazioni nivometereologiche che in modo distribuito sull'intero bacino idrografico attraverso le osservazioni di neve del sensore satellite MODIS (Fig. 8).

La calibrazione del modulo della formazione e propagazione del deflusso è stata eseguita per le diverse sezioni di cui qui, per motivi di spazio, si riportano le sezioni a monte del lago, Ponte dei Tedeschi e

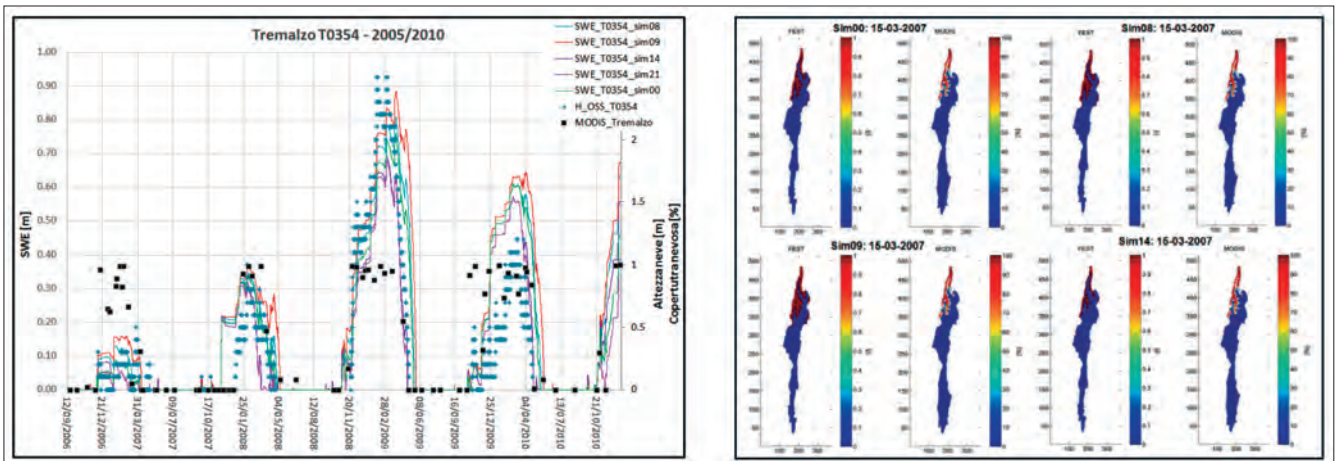


Figura 7 - Calibrazione dell'accumulo e fusione della neve puntuale e areale: (sinistra) confronto con dato nivometrico di Tremalzo (rombi blu) osservazione satellitare sul pixel (quadrato nero) in base alla evoluzione temporale del fenomeno (anni 2006-2010) calcolata dal modello (linee continua); (destra) confronto superficie nivale da sensore satellitare MODIS (esempio del 15/3/2007). Per ciascuna simulazione il confronto riporta per il modello codice = 0 no neve codice = 1 neve per il satellite la % di copertura nivale su pixel 1000 x 1000 m.

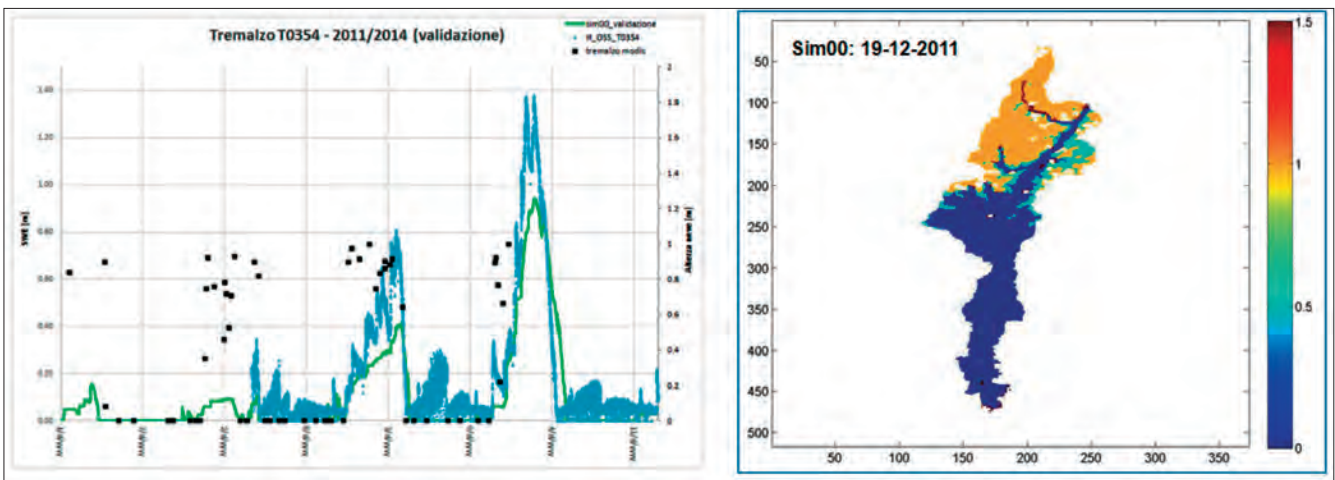


Figura 8 - Validazione dell'accumulo e fusione della neve puntuale e areale: (sinistra) confronto tra simulazione (anni 2011-2014) (linea verde), dato nivometrico(rombi blu) di Tremalzo(15s0 mslm) osservazione satellitare sul pixel (quadrato nero); (destra) confronto superficie nivale da sensore satellitare MODIS (esempio del 19/11/2011): in giallo (indice 1) i pixel in cui c'è neve sia per l'osservato (MODIS) che il simulato, in blu (indice 0) i pixel in cui non c'è neve sia per l'osservato che il simulato, in rosso (indice 1.5) i pixel in cui il modello FEST-WB sottostima la neve e in azzurro (indice 0.5) i pixel in cui il modello FEST-WB sovrastima la neve.

l'ingresso al lago e quella di Gavardo a valle (Fig. 1). La verifica del funzionamento del modello idrologico avviene verificando che portate di piena e volumi di piena cumulati siano simili a quelli osservati. La calibrazione avviene modificando le matrici dei parametri del suolo acquisiti in prima fase dalla cartografia tematica con dei fattori di correzione. Ciò viene eseguito partendo da monte verso valle per sezioni significative del bacino idrografico dove esiste il dato osservato (Boscarello et al., 2013).

I fattori di correzione dei parametri del suolo che minimizzano l'errore sui volumi cumulati e quello sulle portate al colmo vengono riportati nella Tabella II così come gli indici di errore. Gli anni di osservazioni sono quelli compresi tra il 2005 ed il 2010, eccetto il periodo gennaio-agosto 2005 relativo al periodo di inizializzazione del modello. Nelle Figure 9-12 si riportano i grafici dei confronti tra i volumi cumulati e le portate simulate e osservate a Ponte dei Tedeschi, nella sezione in ingresso al lago e a Gavardo. Il confronto tra le portate orarie simulate e quelle osservate a Ponte dei Tedeschi può essere fatto solo per alcuni eventi di piena, data l'influenza della regolazione giornaliera delle dighe a monte i cui dati di regolazione non sono disponibili. Il modello calibrato è stato quindi validato sulla base delle osservazioni di portata nei 4 anni dal 01-01-2011 al 31-12-2014 (Figg. 13 e 14).

TABELLA II - Fattori di correzione della permeabilità verticale del suolo superficiale (k_{sat}) e della permeabilità orizzontale subsuperficiale (k_{prof}) e indici di errore ottenuti sulla simulazione delle poratte al colmo e dei volumi cumulati, nei diversi sottobacini considerati in fase di calibrazione

Fattori di correzione parametri del suolo	Indici di errore			
	k_{sat}	k_{prof}	Err % volume cumulato	Err % portata al colmo
Sottobacino Ponte dei Tedeschi	1	10	3	+1
Sottobacino Ingresso lago	0.01	100	-2	+1
Bacino sublacuale	0,01	10	+3	+3

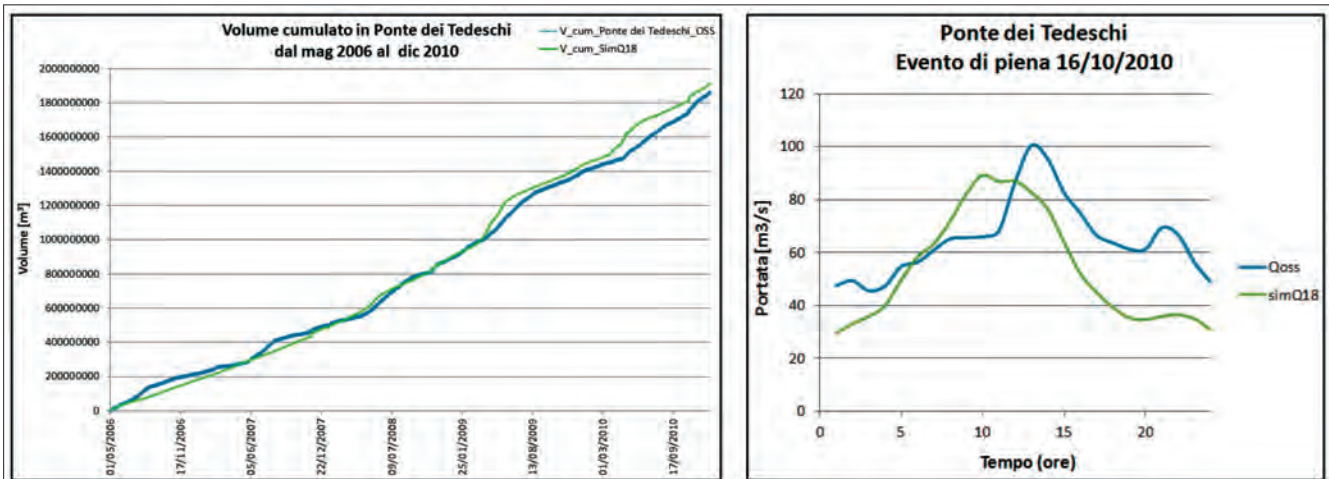


Figura 9 - Sezione di Ponte dei Tedeschi: volumi osservati e simulati (simQ18) (sinistra) ed esempio di riproduzione di uno degli idrogramma di piena (destra).

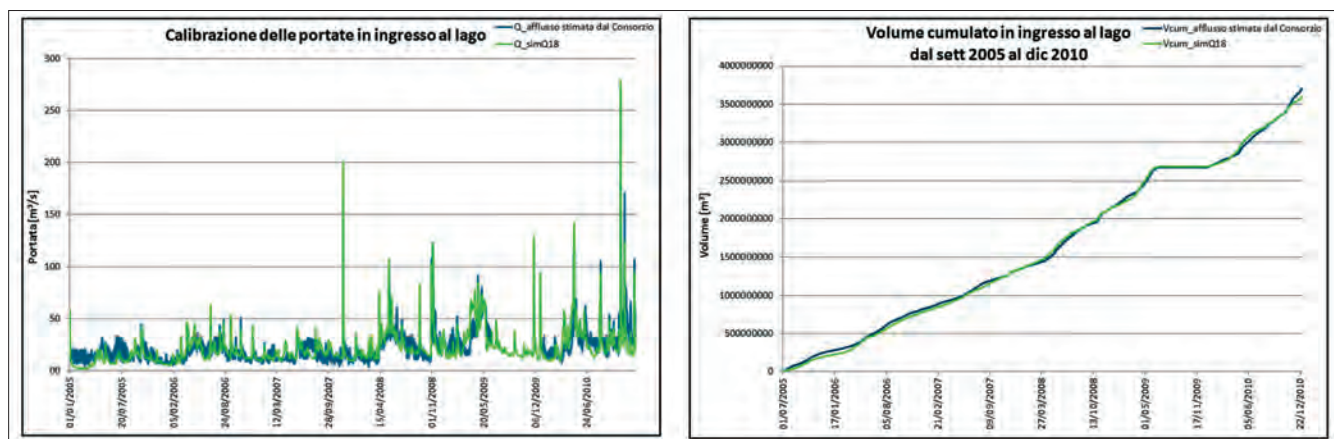


Figura 10 - Idrogrammi in ingresso al lago d'Idro (sinistra) e volumi cumulati simulati e osservati (destra).

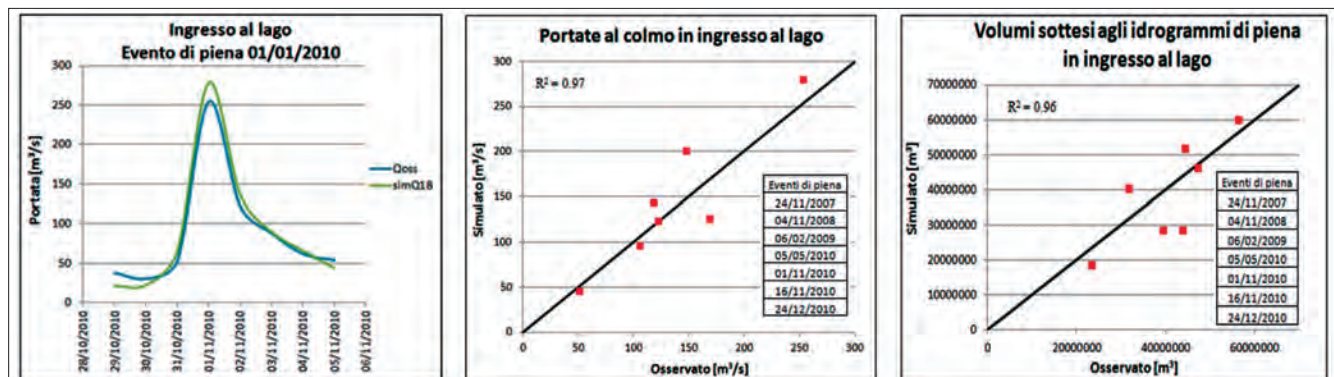


Figura 11 - Calibrazione: esempio di idrogramma di piena (SimQ18) in ingresso al lago (sinistra) e confronto tra colmi e volumi di piena osservati e simulati (destra).

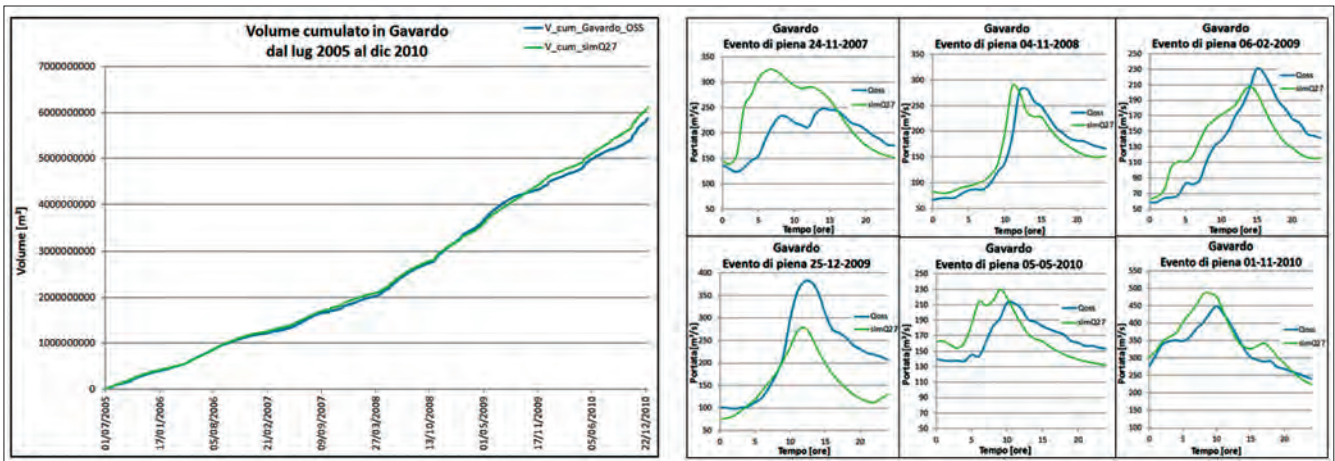


Figura 12 - Volumi misurati e simulati a Gavardo (SimQ27) e idrogrammi di piena ottenuti in fase di calibrazione del modello idrologico.

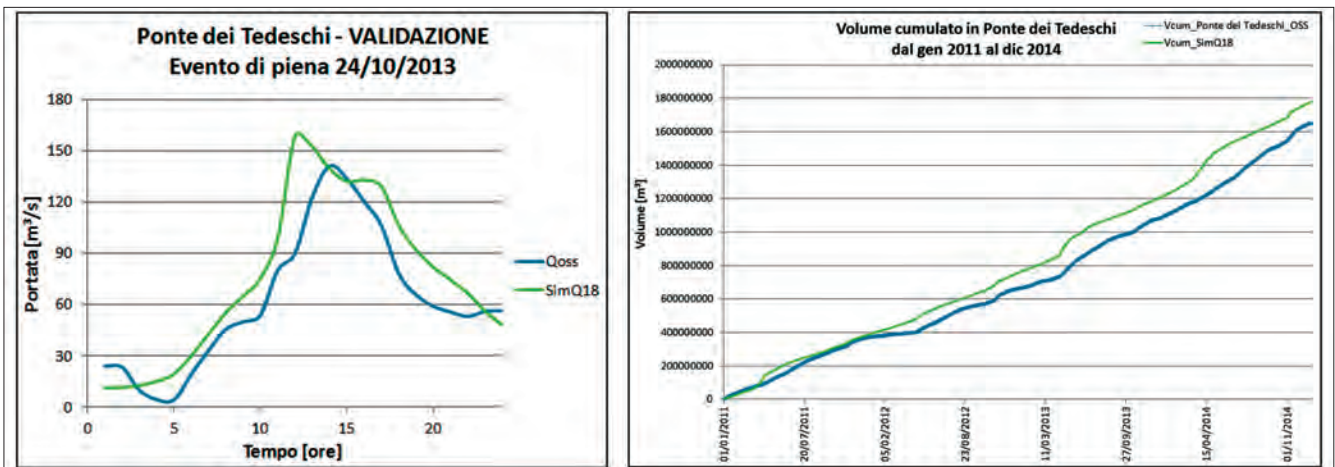


Figura 13 - Validazione a Ponte dei Tedeschi: esempio di idrogrammi di piena di evento e volumi cumulati (2011- 2014).

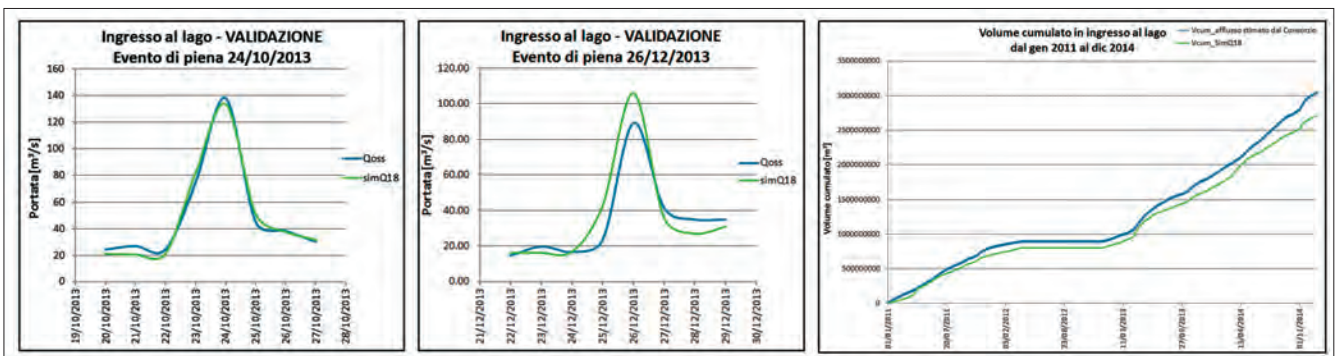


Figura 14 - Validazione ingresso al lago: esempio di idrogrammi di piena di evento e volumi (2011 – 2014).

4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA FILL PER LA LAMINAZIONE DINAMICA

In questa sezione viene presentato un esempio di funzionamento del sistema FILL con una rianalisi dell'evento (ricordato nella cronaca con il nome di tempesta Vaia), che ha interessato il bacino del lago tra il 27 ed il 31 ottobre 2018, con il massimo di precipitazione registrato il 28 ottobre 2018.

Accedendo alla web-dashboard, dal menù *Modelli Meteo* l'utente può selezionare uno dei modelli di previsione meteorologica disponibili. Nell'esempio (Fig. 15) è mostrata la precipitazione cumulata fornita dalla previsione effettuata il 27 ottobre 2018 dal modello probabilistico Cosmo-Leps che fornisce 20 corse di previsione generate perturbando la condizione iniziale. Per il modello meteorologico scelto

sono mostrati la cumulata di precipitazione prevista massima e minima confrontata con la precipitazione osservata ragguagliata sul bacino o sul bacino idrografico che alimenta il lago d'Idro.

L'utente può scegliere attraverso una pagina interattiva il grado di apertura delle paratoie di regolazione sia della galleria emissaria (Galleria degli Agricoltori) sia della traversa di regolazione per i sette giorni successivi alla data di emissione della previsione meteorologica. L'utente può quindi verificare, per lo scenario di regolazione impostato, i livelli previsti del lago (Fig. 15) e le portate previste nelle sezioni idrografiche a valle del lago (Fig. 16) confrontando gli idrogrammi previsti con la massima portata trasportabile in alveo per verificare preventivamente possibili rischi di esondazione.

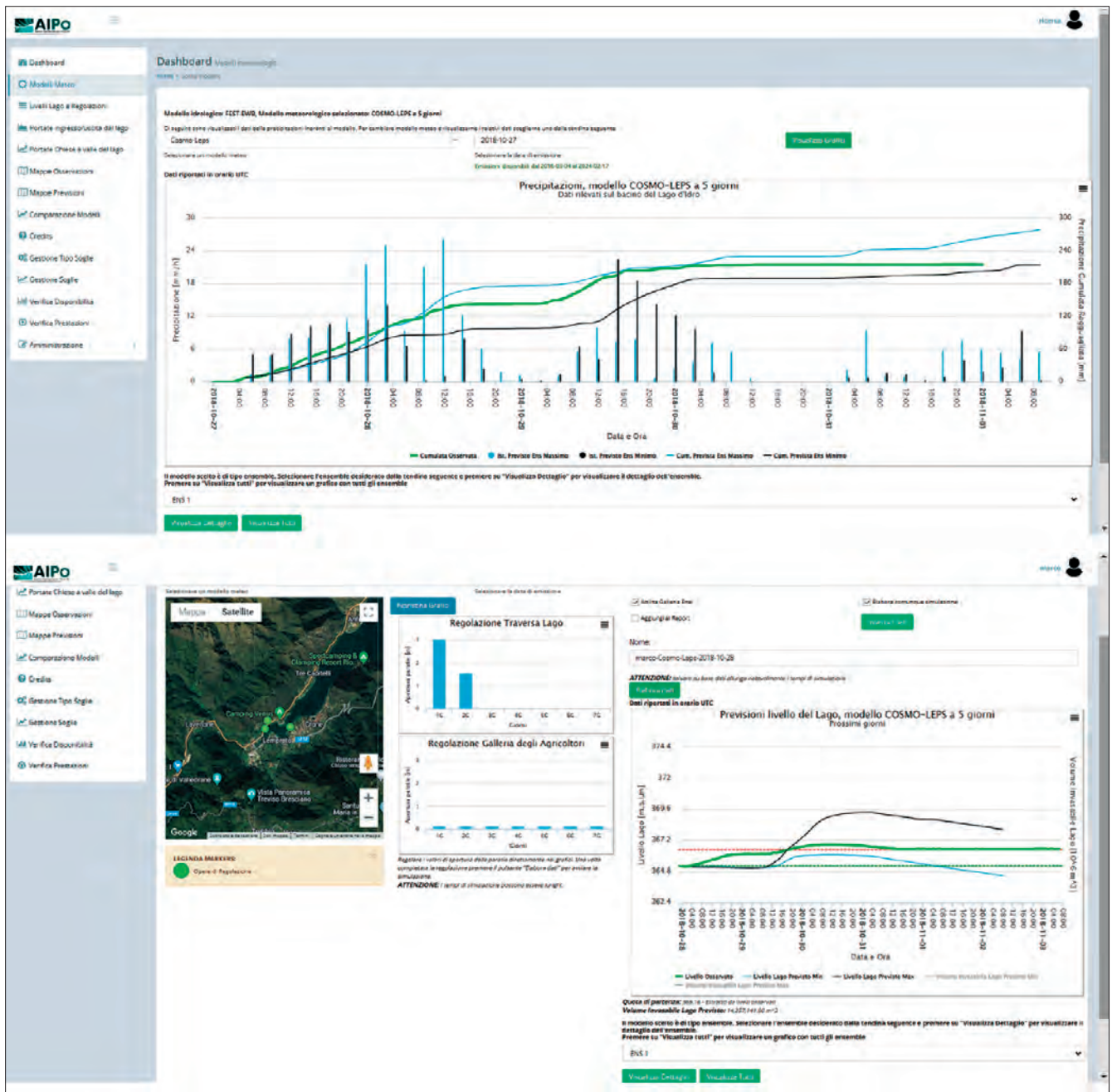


Figura 15 - (sopra) Previsione di precipitazione effettuata il 27 ottobre 2018 dal modello probabilistico Cosmo-Leps. Vengono mostrati i valori minimo e massimo previsti e la precipitazione osservata alle stazioni di misura mediate sul bacino idrografico che alimenta il lago d'Idro; (sotto) Pagina Livello Lago e Regolazioni che mostra la simulazione di uno scenario di apertura delle paratoie di regolazione. Il grafico a linee mostra il livello massimo e minimo previsto, oltre al livello osservato presente quando si sta analizzando un evento del passato. Le linee tratteggiate orizzontali mostrano la fascia di regolazione del lago.

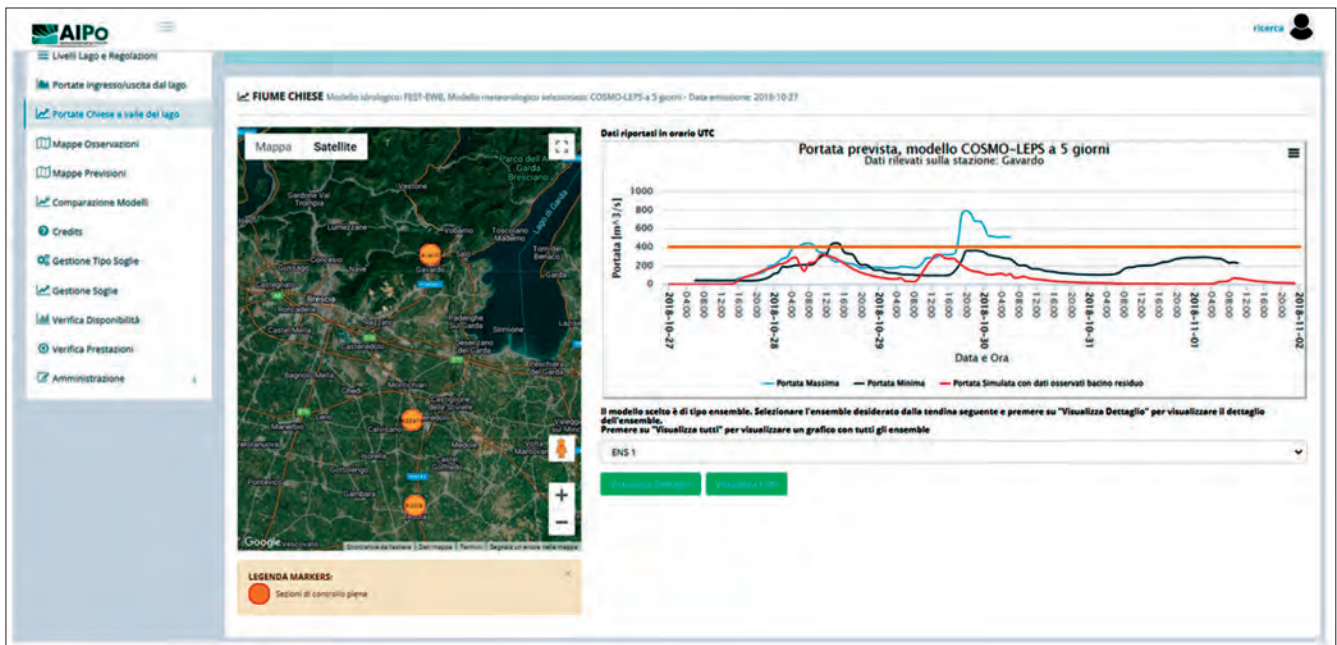


Figura 16 - Pagina *Portate Chiese a valle del lago* con cui l'utente può visualizzare la portata prevista nelle sezioni del fiume Chiese a valle del lago. Il grafico a linee mostra l'idrogramma di portata massimo e minimo previsto, quello simulato con la precipitazione osservata. La linea orizzontale di colore arancione mostra la portata massima transitabile.

5. CONCLUSIONI

La laminazione dinamica di un invaso regolato permette di svuotare preventivamente il serbatoio e predisporre un volume utile alla riduzione dei colmi di piena nelle sezioni di valle. La gestione dei serbatoi secondo il principio della laminazione dinamica richiede un sistema di previsione degli afflussi al serbatoio e di simulazione della pericolosità idraulica nelle sezioni di valle. L'articolo presenta il sistema FILL come uno dei primi esempi di sistema integrato funzionante sul bacino idrografico del fiume Chiese per la regolazione del lago d'Idro. Con il sistema FILL è possibile verificare le previsioni meteorologiche e gli afflussi in ingresso al lago, simulare diversi scenari di apertura dello sbarramento di regolazione, e prevedere gli effetti sulle sezioni di valle.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bonafè A., Brath A., 2024. *Usa dei Serbatoi per la laminazione delle piene. Piani di laminazione*. Giornata del GdL ITCOLD, Milano, www.itcold.it.
- Boscarello L., Ravazzani G., Mancini M., 2013. *Catchment multisite discharge measurements for hydrological model calibration*. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 158-167.
- Ceppi A., Ravazzani G., Corbari C., Salerno R., Meucci S., Mancini M., 2014. *Real time drought forecasting system for irrigation management*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3353-3366.
- Corbari C., Ravazzani G., Mancini M., 2011. *A distributed thermodynamic model for energy and mass balance computation: FEST-EWB*. *Hydrological Processes*, 25, 1443-1452.
- Corbari C., Ravazzani G., Martinelli J., Mancini M., 2009. *Elevation based correction of snow coverage retrieved from satellite images to improve model calibration*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 639-649
- Herrera Gómez L.V., Ravazzani G., Meucci S., Mancini M., 2024. *Flow Features of a Horseshoe Tunnel Bend*. *Journal of Hydraulic Research*, in press.
- Lombardi G., Ceppi A., Ravazzani G., Davolio S., Mancini M., 2018. *From Deterministic to Probabilistic Forecasts: The 'Shift-Target' Approach in the Milan Urban Area (Northern Italy)*. *Geosciences*, 8, 181.
- Mancini M., 1990. *La modellazione distribuita della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento*. PhD thesis. Politecnico di Milano, Istituto di Idraulica.

- Montaldo N., Mancini M., Rosso R.**, 2004. *Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model*. Hydrological Processes, 18(3), 545-563.
- Rabuffetti D., Ravazzani G., Corbari C., Mancini M.**, 2008. *Verification of operational quantitative discharge forecast (QDF) for a regional warning system – the AMPHORE case studies in the upper Po river*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 161-173.
- Ravazzani G., Amengual A., Ceppi A., Homar V., Romero R., Lombardi G., Mancini M.**, 2016. *Potentialities of ensemble strategies for flood forecasting over the Milano urban area*. Journal of Hydrology, 539, 237-253.
- Ravazzani G., Barbero S., Salandin A., Senatore A., Mancini M.**, 2015. *An integrated hydrological model for assessing climate change impacts on water resources of the upper po river basin*. Water Resources Management, 29(4), 1193-1215.
- Ravazzani G., Gianoli P., Meucci S., Mancini M.**, 2014. *Assessing downstream impacts of detention basins in urbanized river basins using a distributed hydrological model*. Water Resources Management, 28, 1033-1044.