

# GESTIONE SOSTENIBILE DELLE RISORSE IDRICHE E CAMBIAMENTO CLIMATICO: OTTIMIZZAZIONE DELLE REGOLE DI DERIVAZIONE DALL'INVASO DI RIDRACOLI

Mattia Neri<sup>1</sup> & Elena Toth<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna

## ASPETTI CHIAVE

- Modellazione del sistema idrico dell'invaso di Ridracoli, attraverso la trasformazione afflussi-deflussi sui bacini di alimentazione e la simulazione della gestione delle manovre su opere di presa, scarichi e derivazione dal serbatoio
- Ottimizzazione delle regole di derivazione mensili in funzione del livello di invaso
- Simulazione della disponibilità idrica futura forzando il sistema con un ensemble di scenari climatici

## 1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

Nelle regioni mediterranee, sempre più frequentemente colpite da condizioni di scarsità idrica, si prevede che il divario tra disponibilità idrica e domanda possa aumentare considerevolmente nel prossimo futuro a causa di fattori climatici e antropici. In uno scenario di crescente preoccupazione per i potenziali impatti del cambiamento climatico e delle future situazioni di siccità idrologica sulla disponibilità idrica, la gestione sostenibile delle diverse fonti idropotabili è di fondamentale importanza per garantire la resilienza dei sistemi di approvvigionamento idrico.

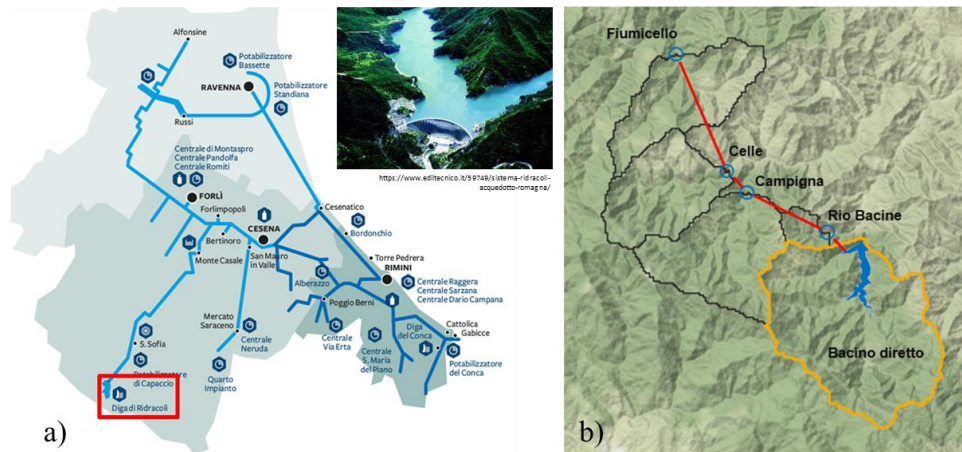
In tale contesto, la possibilità di ottimizzare la gestione dei serbatoi a scopo idropotabile attraverso modelli di simulazione del sistema idrico risulta fondamentale (e.g. *Cancelliere et al.*, 2005). Fra le diverse categorie di approcci per la gestione ottimale degli invasi, la cosiddetta “parameterization-simulation-optimization” (PSO, *Koutsoyiannis & Economou*, 2003) è una delle strategie di ottimizzazione più ampiamente utilizzate (e.g. *Zhang et al.*, 2017; *Giuliani et al.*, 2021): essa consiste i) nella costruzione di un modello di simulazione del bilancio idrico del sistema, ii) nella definizione di regole operative di gestione del serbatoio (tipicamente i rilasci), in funzione dello stato del sistema e/o delle relative forzanti, e infine iii) nell'ottimizzazione dei parametri che governano le regole di gestione tramite un algoritmo di ricerca iterativa.

Inoltre, nel contesto attuale, in cui risulta indispensabile la definizione di strategie di adattamento dei sistemi di approvvigionamento idropotabile al potenziale impatto dei cambiamenti climatici (*Felisa et al.*, 2022), è importante valutare l'efficacia delle regole di gestione dell'invaso, tipicamente ottimizzate in funzione della variabilità idro-climatica storica, per il soddisfacimento della domanda in condizioni di sollecitazione climatica futura (e.g. *Mereu et al.*, 2016, *Zhang et al.*, 2017).

Questo studio presenta il lavoro svolto, in collaborazione con Romagna Acque – Società delle Fonti S.p.A., per l'ottimizzazione delle regole di potabilizzazione dall'invaso di Ridracoli e per la valutazione della disponibilità idrica futura. Il serbatoio di Ridracoli è la principale fonte di approvvigionamento idropotabile della Romagna. Con una capacità di 33 milioni di m<sup>3</sup>, soddisfa circa la metà del fabbisogno di quasi un milione di abitanti e di milioni di turisti stagionali sulle tre province attraverso l'Acquedotto della Romagna (Figura 1a). L'invaso è alimentato dal bacino diretto del torrente Bidente e da quattro bacini limitrofi in sinistra idraulica allacciati all'invaso tramite opere di captazione e una galleria di gronda (Figura 1b).

La prima fase del lavoro si è concentrata sulla messa a punto di un modello di simulazione dell'intero sistema che comprende la modellistica afflussi-deflussi e un modello per la gestione del sistema costituito da opere di presa, galleria di gronda, invaso, scarichi e derivazione. Successivamente, il funzionamento del sistema è stato simulato considerando la forzante idrologica del periodo storico di riferimento per identificare quali regole di derivazione permettessero una gestione ottimale. Le regole di derivazione sono state ottimizzate con un algoritmo multi-obiettivo al fine di i) minimizzare i volumi di deficit idrico, intesi come i volumi di risorsa che, seppur richiesti dalla rete a valle, non risulta possibile potabilizzare e recapitare agli utenti, e al contempo ii) massimizzare i volumi potabilizzati sull'intero periodo di osservazione, riducendo quindi il più

possibile gli sfiori e alleggerendo lo stress idrico sulle altre fonti di approvvigionamento del territorio romagnolo, che sono prevalentemente sotterranee e quindi meno sostenibili e maggiormente energivore. Infine, il modello di funzionamento dell’intero sistema è stato sollecitato da un ensemble di scenari climatici, valutando la disponibilità idrica futura all’invaso e quantificando i volumi di deficit idrico futuri.



**Figura 1.** (a) Schema dell’Acquedotto della Romagna (<https://www.romagnacquae.it>) e (b) il sistema di alimentazione dell’invaso di Ridracoli: il bacino diretto all’invaso (arancione) e i quattro bacini (nero) allacciati al serbatoio attraverso il sistema di opere di presa (azzurro) e galleria di gronda (rosso).

## 2 MODELLO DI SIMULAZIONE DEL SISTEMA

Come anticipato, la fase preliminare del lavoro si è concentrata sulla messa a punto della catena modellistica per la simulazione dell’intero sistema, composta da i) modellistica afflussi-deflussi dei bacini che alimentano il serbatoio e ii) un modello per la gestione dell’intero sistema composto da opere di presa, galleria di gronda, invaso, scarichi e derivazione (qui chiamato “sistema invaso”).

La modellazione afflussi-deflussi del bacino diretto e dei bacini allacciati all’invaso è condotta con il TUW model (Parajka & Viglione, 2019), basato sul noto modello HVB, a parametri concentrati e a scala di simulazione giornaliera. Le forzanti meteorologiche storiche al modello sono stimate dal dataset grigliato europeo E-OBS (Cornes et al., 2018), precedentemente validato sull’area di studio rispetto alle misure al suolo. Il modello viene calibrato su ogni bacino massimizzando l’indice KGE fra portata osservata e simulata.

Il modello di gestione del “sistema invaso” è basato sull’equazione di bilancio idrico al serbatoio, che esprime la variazione di volume d’invaso nell’intervallo temporale di riferimento in funzione della portata in ingresso generata sul bacino diretto, dei volumi evaporati dal serbatoio e della portata sfiorata (funzione del solo livello di invaso), ma anche delle portate captate dalle opere di presa sui bacini allacciati e recapitate dalla galleria di gronda, delle portate rilasciate dagli scarichi e della portata derivata, recapitata alla centrale idroelettrica asservita all’invaso e all’impianto di potabilizzazione. Gli ultimi tre termini dipendono dalle regole di gestione del serbatoio che determinano le manovre sugli organi di presa, scarico e derivazione.

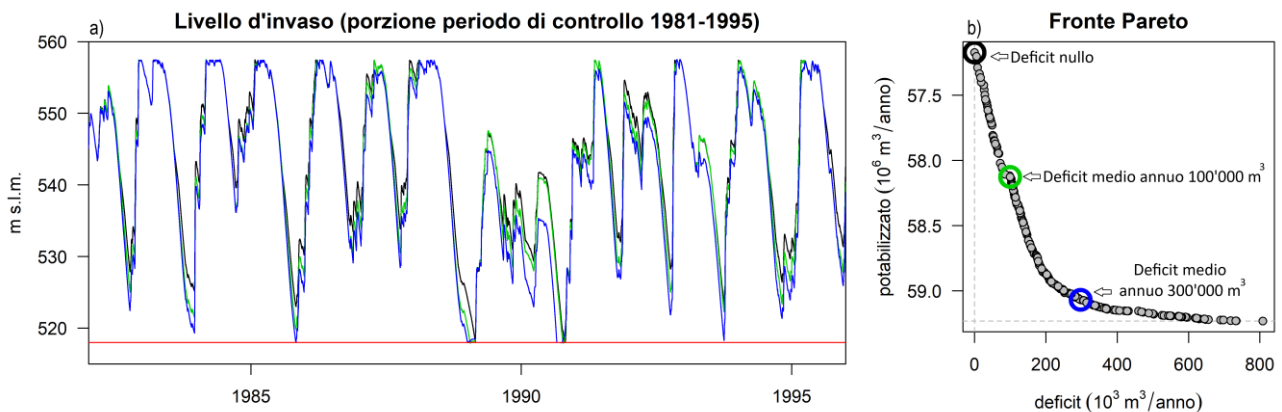
Le regole di gestione del serbatoio sono state ricostruite tramite l’analisi delle manovre storiche eseguite sui manufatti e tramite il confronto con i tecnici e i responsabili della società. Tale operazione ha permesso la definizione dei vincoli tecnici e normativi e delle condizioni al contorno. Quest’ultime includono in particolare la domanda idropotabile richiesta dagli utenti, fortemente variabile nei diversi mesi dell’anno vista la natura stagionale dei consumi turistici della costa romagnola. Per ogni mese dell’anno, il volume che deve necessariamente essere derivato dall’invaso – a meno di risultare in deficit - è stato calcolato come differenza tra le richieste degli utenti in tale mese e la capacità delle fonti alternative sul territorio. La determinazione dei valori più cautelativi della richiesta degli utenti ha richiesto un’analisi dedicata ai consumi storici in tutti i punti di consegna sul territorio dell’Acquedotto della Romagna, qui non riportata per brevità.

### 3 OTTIMIZZAZIONE DELLE REGOLE DI DERIVAZIONE DAL SERBATOIO

L’obiettivo della Società è quello di privilegiare l’utilizzo delle pregiate fonti in quota, e quindi massimizzare i volumi complessivamente potabilizzati da Ridracoli, al fine di ridurre lo sfruttamento delle altre fonti idropotabili (principalmente campi pozzi) sul territorio servito. Infatti, una gestione ottimale del serbatoio prevede la definizione di regole di derivazione che permettano non solo di accumulare sufficiente risorsa per poter superare le situazioni di crisi idrica garantendo i volumi minimi di approvvigionamento richiesti dagli utenti, ma anche di massimizzare i volumi complessivamente potabilizzati, riducendo gli sfiori e alleviando così lo stress idrico sulle altre fonti di approvvigionamento (tipicamente meno sostenibili dal punto di vista ambientale e più energivore).

A seguito di numerose interazioni con i tecnici della Società, si è stabilito un dominio di accettabilità delle regole e la forma funzionale delle curve di derivazione (variabili nei diversi mesi dell’anno) in funzione del livello di invasore. Inoltre, viene stabilito un livello di invasore critico al di sotto del quale la potabilizzazione viene interrotta: in tali condizioni si incorre in “deficit idrico”, quantificato come il volume che, seppur richiesto dalla rete a valle (in particolare da comprensori che non hanno fonti idriche alternative), non risulta possibile potabilizzare e recapitare agli utenti. Tale deficit rappresenta una misura di fallanza del sistema.

Il funzionamento del sistema è stato quindi simulato sul periodo storico di riferimento 1981-2010 (“periodo di controllo” degli scenari climatici AR5) ottimizzando i parametri delle curve mensili di derivazione, con l’algoritmo multi-obiettivo NSGA-II, al fine di i) massimizzare i volumi potabilizzati sull’intero periodo di osservazione e al contempo ii) minimizzare i volumi di deficit idrico. Dal fronte Pareto risultante dalla procedura di ottimizzazione (Figura 2b), si selezionano e analizzano le soluzioni più significative. In Figura 1a si riportano, a titolo esemplificativo, i livelli di invasore simulati per le tre soluzioni evidenziate sul fronte Pareto (Figura 1b) in corrispondenza della finestra temporale 1981-1995, che include la peggiore crisi idrica verificatasi durante il periodo storico di riferimento (biennio ‘89-’90). Nello specifico si evidenzia la soluzione più cautelativa corrispondente a deficit nullo (nero) e le due soluzioni che, a scapito di un deficit medio annuo di circa 100’000 (verde) e 300’000 (blu) m<sup>3</sup>, permetterebbero un incremento dei volumi medi annui potabilizzati rispettivamente di circa 1 (verde) e 2 (blu) milioni di m<sup>3</sup>, che nella gestione a deficit nullo risulterebbero invece a carico delle altre fonti di approvvigionamento.



**Figura 2.** (a) Livello di invasore simulato utilizzando le regole di derivazione ottimizzate per le tre soluzioni mostrate sul fronte di Pareto (b). La linea rossa fa riferimento al minimo livello per il quale si ammette la potabilizzazione, ovvero la soglia di inizio deficit.

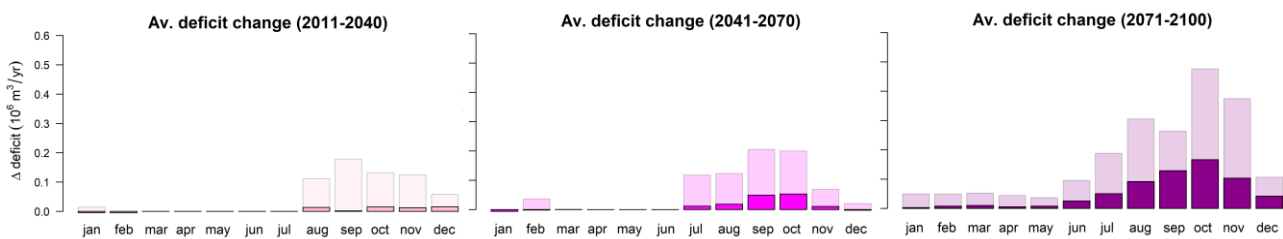
### 4 SIMULAZIONE DELLA DISPONIBILITÀ IDRICA FUTURA

Il secondo obiettivo dello studio è, come anticipato, la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sulla disponibilità idrica futura. A tale scopo, una volta ottimizzate le regole di derivazione, il modello di funzionamento dell’intero sistema bacini-opere di presa-galleria di gronda-invasore-derivazione viene sollecitato da un ensemble di scenari climatici. Nello specifico, si sono considerate dieci catene modellistiche GCM-RCM appartenenti all’iniziativa EURO-CORDEX (AR5) e disponibili anche in versione bias-corretta (Doso, 2016). L’efficacia della procedura di correzione delle serie di pioggia e temperatura sulla regione di

studio è stata preliminarmente verificata.

Il modello del sistema viene quindi forzato dalle serie temporali di precipitazione e temperatura giornaliera di ciascuna catena modellistica GCM-RCM prima sul periodo di controllo 1981-2010 e poi sui tre orizzonti temporali futuri 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, considerando lo scenario di emissioni RCP 8.5. I risultati permettono di valutare la disponibilità idrica futura all'invaso e in particolare di confrontare i volumi di deficit idrico futuri con quelli ottenuti sul periodo di controllo storico, valutandone l'incremento.

Si riporta un esempio dei risultati ottenuti utilizzando le regole di derivazione ottimizzate per la soluzione a deficit idrico nullo sul periodo storico: la Figura 2 mostra l'aumento dei deficit idrici medi mensili simulato forzando il sistema con le dieci catene GCM-RCM sui tre diversi orizzonti temporali futuri, rispetto a quello ottenuto sul periodo di controllo storico. Si può notare come il deficit mensile medio aumenti progressivamente nei decenni futuri, concentrandosi nei periodi estivi e autunnali: questo è coerente con la riduzione del volume mensile di precipitazione prevista dagli scenari climatici sull'area di studio (non riportate qui, per brevità).



**Figura 2.** Aumento (rispetto al periodo di controllo) dei deficit idrici medi mensili simulati forzando il sistema con le dieci catene GCM-RCM sui tre diversi orizzonti temporali futuri. Gli istogrammi pieni si riferiscono al valor medio ottenuto fra i dieci scenari, mentre gli istogrammi in trasparenza al valore massimo.

In conclusione, lo studio ha permesso la modellazione del complesso sistema di alimentazione multi-bacino e di gestione dell'invaso di Ridracoli, ottimizzandone le regole di derivazione quando sollecitato dalle forzanti meteorologiche storiche al fine di ridurre la fallanza del sistema e al contempo incrementare i volumi potabilizzati complessivamente dall'invaso (che riducono lo stress sulle altre fonti regionali, meno sostenibili e più energivore) sul periodo storico e su tre orizzonti temporali futuri. In particolare, è stato possibile stimare la riduzione attesa dei volumi potabilizzabili e l'incremento dei volumi di deficit idrico, cioè i volumi complessivi delle richieste degli utenti che non risulterebbero soddisfatte dal sistema nei decenni futuri.

*Lo studio è condotto nell'ambito del Partenariato Esteso RETURN, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.3 - D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005.*

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Cancelliere, A., Giuliano, G., Rossi G. & Nicolosi V. A reservoir operation DSS based on optimization and neuro-fuzzy techniques 2005, Proceedings of the 31st IAHR World Congress, 271 – 279.
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M. & Jones, P.D. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets., *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2018, 123, 9391–9409.
- Dosio, A. Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(10), 5488–5511.
- Felisa, G., Panini, G., Pedrazzoli, P. & Di Federico, V. Combined Management of Groundwater Resources and Water Supply Systems at Basin Scale Under Climate Change. *Water Resour Manage*, 2022, 36, 915–930.
- Giuliani, M., Lamontagne, J. R., Reed, P. M., & Castelletti, A. A state-of-the-art review of optimal reservoir control for managing conflicting demands in a changing world. *Water Resources Research*, 2021, 57, e2021WR029927.
- Koutsyannis, D., & Economou, A. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. *Water Resources Research*, 2003, 39(6), 1170–1187.
- Mereu, S., Sušnik, J., Trabucco, A., Daccache, A., Vamvakieridou-Lyroudia, L., Renoldi, S., Virdis, A., Savić, D. & Assimacopoulos, D. Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case study from Sardinia, *Science of The Total Environment*, 2016, 543, Part B, 1028-1038.
- Viglione, A. & Parajka, J. TUWmodel: Lumped Hydrological Model for Education Purposes, 2018.
- Zhang, W., Liu, P., Wang, H., Chen, J., Lei, X. & Feng, M. Reservoir adaptive operating rules based on both of historical streamflow and future projections, *Journal of Hydrology*, 2017, 553, 691-707.