



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

MODELLO NUMERICO DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO DEL LAGO DI MONATE (VA)

*Original*

MODELLO NUMERICO DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO DEL LAGO DI MONATE (VA) / Tomesani, Giulia; Soligno, Irene; Castellarin, Attilio; Montanari, Alberto; Cervi, Federico; Carnesecchi, Giovanni; Colombo, Andrea. - (2016). ((Intervento presentato al convegno IDRA 16 tenutosi a Bologna nel 14-16 settembre 2016.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2710569 since: 2018-07-06T12:44:13Z

*Publisher:*

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) Scuola di Ingegneria e

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

## MODELLO NUMERICO DEL COMPORTAMENTO IDROLOGICO DEL LAGO DI MONATE (VA)

Giulia Tomesani<sup>1</sup>, Irene Soligno<sup>2</sup>, Attilio Castellarin<sup>1</sup>, Alberto Montanari<sup>1</sup>,  
Federico Cervi<sup>1</sup>, Giovanni Carnesecchi<sup>3</sup> & Andrea Colombo<sup>3</sup>

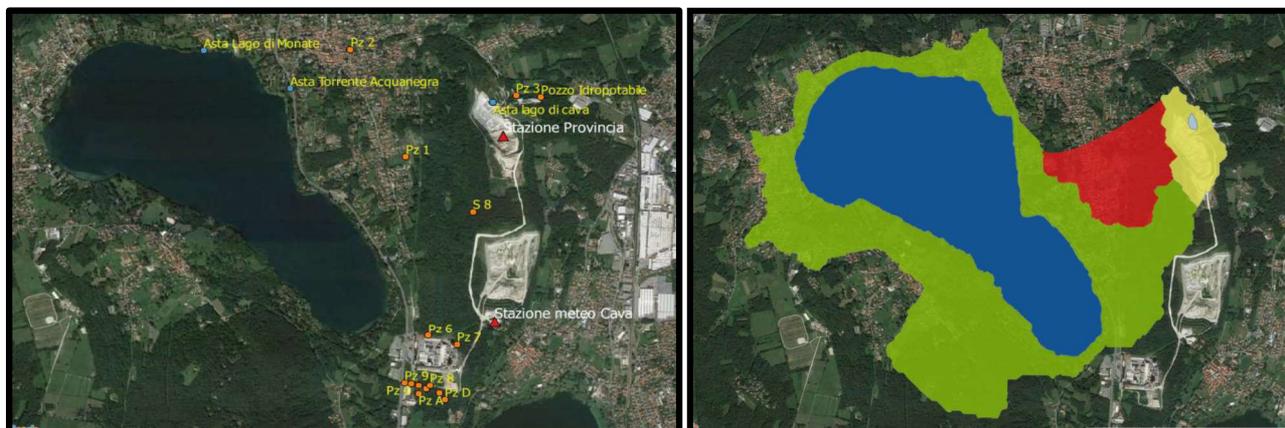
(1) Dip. di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna; (2) Dip. di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino; (3) Comune di Travedona-Monate (VA)

### ASPETTI CHIAVE

- Viene proposto un modello numerico concettuale del comportamento idrologico del bacino del Lago di Monate
- La calibrazione del modello proposto è stata condotta sfruttando simultaneamente sia le osservazioni di livello idrometrico del lago che misure freaticometriche
- Il modello proposto permette di valutare il bilancio idrologico del lago a scala annuale restituendo risultati in linea con quanto riportato in letteratura

### 1 AREA DI INDAGINE ED OBIETTIVO DELLO STUDIO

Il lago di Monate si trova in Provincia di Varese e bagna i comuni di Cadrezzate, Comabbio, Osmate e Travedona-Monate. La superficie dello specchio d'acqua è di circa 2.58 km<sup>2</sup>, mentre le profondità massima e media sono rispettivamente 34 e 18 m. Lo sviluppo della costa ammonta a 7.75 km, mentre la quota media dello specchio d'acqua è 266 m s.l.m. (v. Figura 1). Formatosi in epoca glaciale (quaternario artico-ghiacciaio Verbano), il lago di Monate è circondato da colline moreniche con quote massime che si attestano tra i 300 ed i 370 m s.l.m. Il lago è parte integrante del sistema di bacini lacuali composto dal lago di Comabbio a meridione, quello di Varese a levante e del lago Maggiore a ponente, nonché della bassa pianura delle torbiere della Brabbia, di Inarzo e di Cazzago. Il Lago non ha immissari, essendo prevalentemente alimentato di acque di origine sorgiva, ed ha un solo emissario, il Torrente Acquanegra, che si origina dalle sponde del lago presso Travedona-Monate e sfocia nel Lago Maggiore.



**Figura 1.** Area di studio: (sx) rete di monitoraggio meteo-climatico ed idrologico (idrometri in blu; piezometri in arancione; stazioni meteo in rosso); (dx) Lago di Monate (blu, 2.58 km<sup>2</sup>) e relativi bacini imbriferi superficiale (verde, 3.25 km<sup>2</sup>) e complessivo (verde e rosso, 3.83 km<sup>2</sup>); bacino imbrifero superficiale del laghetto di cava della Cava Faraona (giallo, 0.28 km<sup>2</sup>).

Il Lago di Monate costituisce un'emergenza ambientale di inestimabile valore per la purezza delle acque, l'eccellente stato delle sponde e la posizione strategica per il turismo, per la pesca e per le coltivazioni agricole. Infatti, la conformazione delle sue rive e la loro prevalente privatizzazione ha contribuito ad evitare che il lago di Monate fosse accerchiato da insediamenti industriali e dal turismo di massa, preservandone così la qualità delle acque. Grazie anche ad una ordinanza, in forza alla quale è vietata la navigazione a motore, il lago è tuttora uno dei pochissimi bacini prealpini di origine glaciale balneabile su tutta la superficie. Per tutte le unicità di cui sopra l'idrologia del Lago di Monate costituisce motivo di notevole interesse, anche scientifico, come testimoniano pubblicazioni pregresse di notevole valore.

Un elemento geologico essenziale per il bacino imbrifero del Lago di Monate è la presenza di un

substrato roccioso prevalentemente impermeabile, di età terziaria, che è disposto a strati inclinati verso O, ovvero verso il lago. Detto substrato è ricoperto da una coltre morenica di origine quaternaria, sede di acquiferi superficiali che alimentano il lago stesso (*Barnaba, 1987*). Una menzione particolare merita l'importante affioramento dei Calcari Nummulitici dell'Eocene, che fanno quindi parte del substrato prevalentemente impermeabile di origine terziaria, che è costituito da oltre 50 metri di calcari, brecciole e marne, regolarmente stratificati. Detta formazione è oggetto di coltivazione in cave aperte lungo il crinale di Santa Maria, presso Cava Santa Maria e Cava Faraona. La coltivazione ha esteso il proprio campo di azione progressivamente nel tempo, ed è attualmente oggetto di un ampliamento (concessionaria la Holcim Italia S.p.A.) che ha motivato il presente studio. Infatti, essendo la formazione di cui sopra interessata da attività estrattive, risulta particolarmente significativo stimare se le attività stesse possano interferire con sistemi acquiferi di particolare importanza. Allo scopo, è in atto un'approfondita campagna di monitoraggio ambientale pluriennale, curata proprio da Holcim Italia S.p.A., in base alla quale vengono raccolti dall'ottobre 2013, tra gli altri, dati meteo climatici, idrologici ed idraulici ad elevata risoluzione temporale.

L'obiettivo del presente studio è quello di approfondire il tema del bilancio idrologico del bacino del Lago di Monate e, in particolare, di proporre un possibile schema concettuale per la modellizzazione del comportamento idrologico del bacino del Lago di Monate che sia caratterizzato da una buona efficienza ed una elevata robustezza (ad es. limitato numero di parametri). L'esigenza di approfondire la comprensione del comportamento idrologico ed idrogeologico del bacino del Lago di Monate è legata alle possibili ripercussioni idrologiche dell'attività estrattiva in atto che, modificando anche sensibilmente la morfologia dei versanti nella zona di cava, potrebbe creare interferenze significative con la ricarica degli acquiferi superficiali della coltre morenica che alimentano il Lago di Monate.

## 2 INFORMAZIONE UTILIZZATA

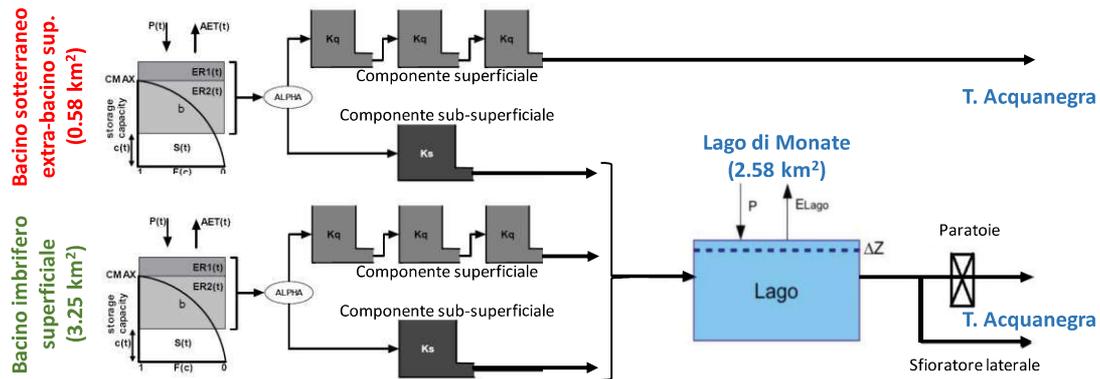
I dati meteo-climatici ed idrologici utilizzati nel presente studio coprono il periodo compreso tra il 1 ottobre 2013 ed il 13 ottobre 2015 e contemplano numerose variabili registrate a diverse risoluzioni temporali. In particolare, sono stati utilizzati dati di precipitazione oraria registrati alle stazioni meteo di Holcim S.p.A., presso Cava Santa Marta, e ARPA Prov. VA; dati di temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica orari, registrati sempre dalla stazione meteo di Holcim S.p.A.; dati giornalieri di radiazione solare totale e velocità media del vento, registrati per mezzo del radiometro installato presso la stazione evaporimetrica di ARPA Provincia di Varese; dati di livello idrometrico raccolti in continuo a passo temporale orario in corrispondenza di due distinti punti di misura e letture mensili del livello idrometrico, dati orari di livello piezometrico in corrispondenza di numerosi piezometri (v. Figura 1, sx). Dalle serie originali sono state ricavate le serie a passo giornaliero di precipitazione, livello idrometrico del lago e, sulla base delle informazioni meteorologiche ricondotte a passo giornaliero, si sono stimate le serie di evaporazione giornaliera dalla superficie lacustre e di evapotraspirazione potenziale del bacino imbrifero complessivo del Lago di Monate mediante l'equazione di Penman-Monteith (*Allen et al., 1998*).

Inoltre, sulla base delle rilevazioni ai piezometri è stato possibile perfezionare l'identificazione dello spartiacque sotterraneo nord-orientale del bacino imbrifero complessivo del Lago di Monate che, come già sottolineato in studi precedenti (*Barnaba, 1987*), non coincide con lo spartiacque topografico del bacino superficiale (v. Figura 1, dx). La ricostruzione delle freatimetrie mensili nell'area di interesse mostra come la isofreatica corrispondente alla quota media del Lago di Monate abbia una limitata variabilità temporale e sia localizzata tra i piezometri Pz1 e Pz2, con andamento prevalente SO-NE. Perimetrando l'area caratterizzata quote piezometriche superiori al livello medio del lago è stata delineata la porzione sotterranea del bacino imbrifero del Lago di Monate esterna al bacino superficiale (c.d. area rossa in Figura 1, dx). Le acque di origine meteorica che si infiltrano in tale porzione alimentano il lago, mentre quelle che defluiscono superficialmente vengono drenate direttamente dall'emissario Acquanegra.

## 3 MODELLO NUMERICO PROPOSTO: CALIBRAZIONE, VALIDAZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La simulazione della trasformazione afflussi-deflussi per il bacino imbrifero del Lago di Monate si è adottato il classico schema concettuale di HyMOD a cinque parametri (*Boyle, 2000*). Esso suppone che la capacità di ritenzione idrica del terreno sia variabile all'interno del bacino idrografico di interesse e ne

descrive la variabilità sul bacino attraverso una distribuzione di Pareto (v. Moore, 1985). Il modello HyMOD simula sia una componente rapida del deflusso, interpretabile come componente superficiale, che una lenta, che rappresenta invece i deflussi sub-superficiali. Nella presente trattazione lo schema di HyMOD a 5 parametri è stato utilizzato per rappresentare gli apporti idrici al Lago di Monate dell'intero bacino imbrifero superficiale (area verde in Figura 1, dx), simulandoli come somma delle due componenti rapida e lenta del deflusso; per la porzione sotterranea del bacino esterna allo spartiacque topografico (area rossa n Figura 1, dx) si è assunto invece che solo la componente lenta del deflusso raggiunga il lago (v. Figura 2).

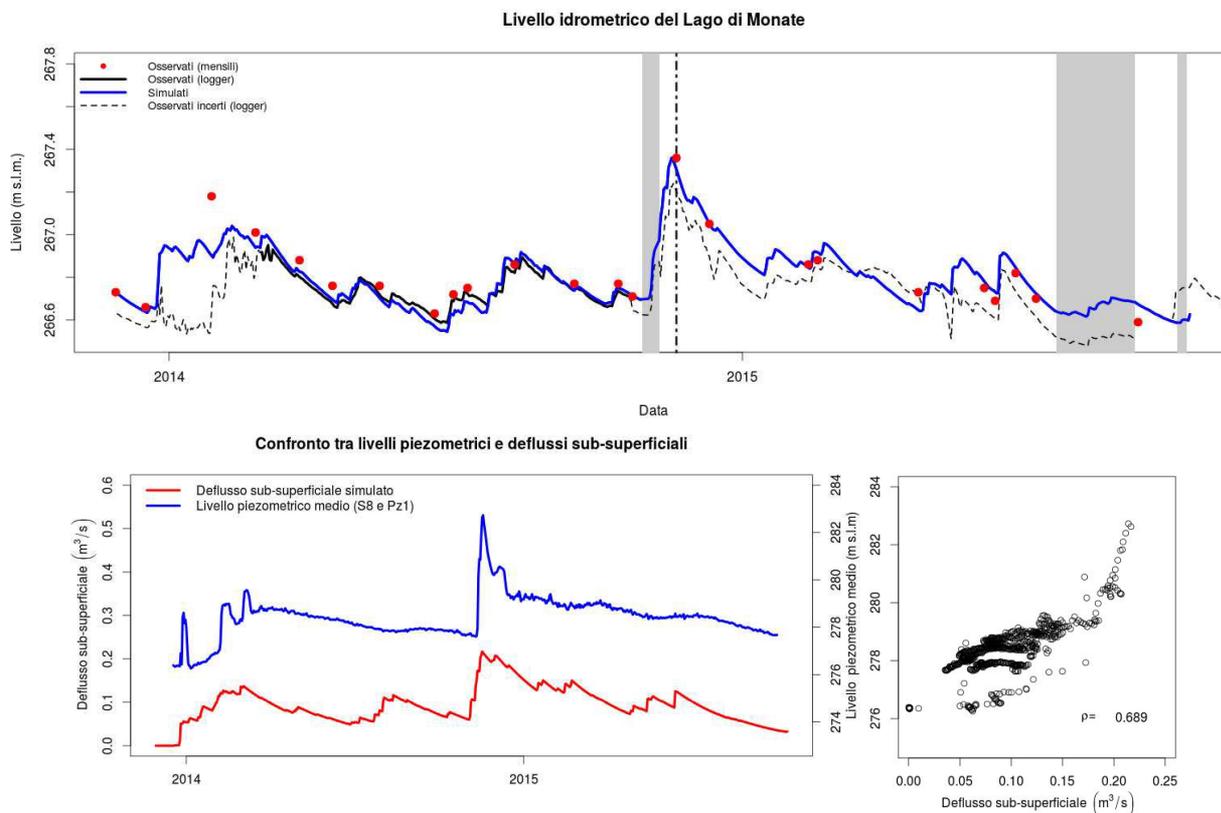


**Figura 2.** Schema del modello numerico concettuale proposto nello studio, sono visibili i due blocchi del modello idrologico HyMOD a cinque parametri (c.d. CMAX, b, ALPHA, Kq, Ks) utilizzati per simulare la trasformazione afflussi-deflussi nel bacino imbrifero superficiale ed in quello sotterraneo esterno allo spartiacque topografico (v. anche Figura 1 dx, aree campite in verde ed in rosso), oltre al blocco concettuale schematizzante il vero e proprio Lago di Monate.

Il complesso degli apporti idrici superficiali e sotterranei al Lago di Monate, simulati da HyMOD, viene successivamente utilizzato al fine di simulare a passo giornaliero le variazioni della quota assoluta del livello del lago e la portata interessante l'incile dell'emissario Acquanegra; la prima è stata valutata in base all'afflusso meteorico diretto ed all'evaporazione dalla superficie lacustre, la seconda attraverso la scala di deflusso costruita per la sezione d'incile, tenendo conto dei periodi di pulizia del letto del torrente, durante i quali vengono completamente chiuse le due paratoie piane poste nella sezione di incile, come anche dell'eventualità che lo scarico di troppo pieno del sistema di paratoie entri in funzione (v. Figura 2).

Disponendo di dati pluvio-idrometrici su di un periodo complessivo di circa due anni si sono utilizzati i dati raccolti nel primo anno di monitoraggio per la fase di calibrazione del modello ed i restanti in quella di validazione. I cinque parametri del modello HyMOD sono stati calibrati due volte tramite un algoritmo genetico (Sivanandam & Deepa, 2007; Scrucca, 2013) seguendo due distinte strategie di ottimizzazione. La prima ha massimizzato l'efficienza di Nash & Sutcliffe dei livelli medi giornalieri del Lago di Monate simulati dal modello, mentre la seconda ha massimizzato il prodotto tra l'efficienza di Nash & Sutcliffe precedentemente definita ed il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman tra le serie giornaliere di deflusso sub-superficiale simulato dal modello e la media delle letture piezometriche ai piezometri Pz1 e S8, entrambi situati in zone di contribuzione al deflusso sotterraneo (v. Figura 1).

I due modelli caratterizzati dai set di parametri così identificati sono stati validati sulle base delle informazioni disponibili per il secondo anno di monitoraggio. In particolare, entrambe le validazioni hanno preso a riferimento come indice di prestazione l'efficienza di Nash & Sutcliffe della riproduzione delle osservazioni mensili dei livelli del Lago di Monate (più attendibili di quelli osservati a passo giornaliero nel periodo di validazione, v. Figura 3). Essa è risultata pari a 0.48 nel primo caso (modello calibrato sui livelli) e 0.63 nel secondo (modello calibrato sui livelli e sui dati piezometrici). I risultati delle validazioni indicano che il modello più efficace in modalità predittiva è quello calibrato tenendo conto della correlazione esistente tra i deflussi sotterranei simulati e i valori medi di altezza idrometrica osservati nei piezometri Pz1 e S8. Considerare l'informazione derivante dalle misure piezometriche in fase di calibrazione dello schema concettuale proposto permette pertanto di migliorare decisamente le prestazioni del modello anche relativamente alla sola riproduzione dei livelli idrometrici del Lago di Monate.



**Figura 3.** Risultati delle simulazioni: (in alto) livelli idrometrici giornalieri del Lago di Monate osservati in continuo (linea nera, i valori usati in calibrazione sono in tratto grosso, in tratteggio i valori anomali) e a passo mensile (punti rossi), livelli simulati dal modello (linea blu), sono evidenziati i periodi di chiusura delle paratoie (aree campite in grigio) e la separazione tra periodo di calibrazione e validazione (linea nera verticale tratto-punto); (in basso) serie giornaliere dei livelli piezometrici medi osservati (tratto blu) e deflusso sub-superficiale simulato (tratto rosso) e diagramma di dispersione ( $\rho$  indica il coeff. di corr. di Spearman)

Utilizzando il modello sviluppato, calibrato e validato nel presente studio si è simulato il comportamento idrologico del Lago di Monate sull'intero periodo coperto dalle osservazioni pluvio-idrometriche (v. Figura 3, in alto). Le conseguenti valutazioni relative al bilancio idrologico del lago a scala annuale sono riportate in sintesi in Tabella 1 ed appaiono in linea con le indicazioni di letteratura.

Periodo	$P$ (mm)	$E$ (mm)	$ETP$ (mm)	$ETE$ (mm)	$q$ (m <sup>3</sup> /s)
Dal 1/12/2013 al 30/11/2014	2'594	914	710	603	0.22
Dal 1/12/2014 al 13/10/2015	1'205	876	650	495	0.14

**Tabella 1.** Bilancio idrologico del Lago di Monate: valori cumulati sui rispettivi periodi di riferimento di precipitazione osservata ( $P$ ) e evaporazione da lago ( $E$ ), evapotraspirazione potenziale ( $ETP$ ) ed effettiva ( $ETE$ ) stimate, o simulate dal modello; deflusso medio all'emissario ( $q$ ) simulato dal modello. Si sottolinea come *Barnaba* (1987) quantificasse il deflusso medio in 0.46, 0.11 e 0.24 m<sup>3</sup>/s per anni a piovosità scarsa (c.d. 1089 mm/anno), media (c.d. 1520 mm/anno) e abbondante (c.d. 2146 mm/a), in quest'ordine.

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M.. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Irrig. and Drain. Paper No. 56, United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.  
 Barnaba, P.F., Studio idrogeologico e ambientale del bacino del Lago di Monate (Varese), 1987.  
 Boyle, D.P. Multicriteria calibration of hydrological models, Ph.D. dissertation, Dep. of Hydrol. and Water Resour., Univ of Arizona, Tucson, 2000.  
 Moore, R.J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scale, Hydrol. Sci. J., 30(2), 273-297, 1985.  
 Scrucca, L. GA: A Package for Genetic Algorithms in R, Journal of Statistical Software, 53(4), 2013.  
 Sivanandam S.N. & Deepa, S.N. Introduction to Genetic Algorithms. Springer-Verlag, Berlin. 2007.