



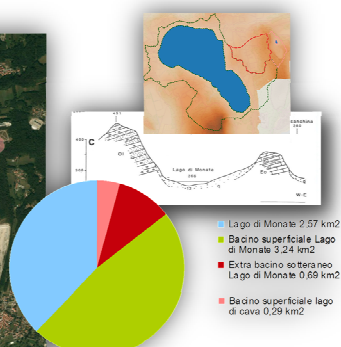
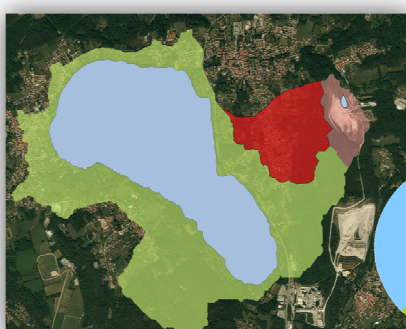
Università degli Studi di Bologna

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

Supporto tecnico-scientifico all'attività di monitoraggio in base al “Piano di Monitoraggio Ambientale” del Lago di Monate e analisi idrologiche, idrauliche e chimiche dei dati raccolti

(Convenzione di Ricerca fra Comune di Travedona Monate e DICAM)



Relazione Conclusiva

Responsabili Scientifici:

Prof. Ing. Alberto Montanari
Prof. Ing. Attilio Castellarin

Bologna, Giugno 2015

Hanno collaborato allo Studio:

Prof. Ing. Paolo Berry
Prof. Ing. Francesco Santarelli
Dott. Ing. Emanuele Baratti
Dott. Ing. Stefano Bonduà
Dott. Federico Cervi
Dott. Irene Soligno

Indice

Sommario	4
1. Coordinamento del monitoraggio e divulgazione tecnico-scientifica delle attività della Convenzione	6
2. Sistematizzazione ed elaborazioni preliminari dei dati raccolti	9
2.1 Attività di monitoraggio idrologico in corso	9
2.1 Dati meteo-climatici considerati	11
2.3 Elaborazioni preliminari condotte sui dati raccolti: stima dei flussi evapotraspirativi potenziali	15
2.3.1 Processi evapotraspirativi: cenni	15
2.3.2 L'Equazione di Penman-Monteith	17
2.3.3 Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale mediante l'Equazione di Penman-Monteith	19
2.4 Esempio di archivio digitale ed elaborati grafici	26
3. Considerazioni sui livelli piezometrici	29
4. Modello semplificato per il bilancio idrologico a passo giornaliero del Lago di Monate	30
4.1 Presentazione dell'area di studio	30
4.2 Il modello matematico HyMOD	37
4.3 Sperimentazione di HyMOD per il calcolo dei deflussi superficiali giornalieri: applicazione al laghetto di cava	42
4.3.1 Modello proposto	43
4.3.2 Applicazione	44
4.4 Modello numerico per il bilancio idrologico del Lago di Monate a scala giornaliera	48
4.4.1 Il modello HyMOD-6	49
4.4.2 Modello complessivo di bilancio idrologico per il Lago di Monate	50
4.4.3 Applicazione del modello	54
5. Considerazioni conclusive sui risultati delle simulazioni e sul bilancio idrologico preliminare del Lago di Monate	59
5.1 Discussione del grado di attendibilità delle simulazioni effettuate	59
5.2 Considerazioni conclusive: valutazioni quantitative preliminari sul bilancio idrologico del Lago di Monate	61
6. Conclusioni	65
Riferimenti Bibliografici	67
APPENDICE: Costruzione della scala di deflusso dell'incile Torrente Acquanegra ed osservazioni sulle misure di portata e livello derivanti dall'attività di monitoraggio condotta fino a ottobre 2014	1

Sommario

Il presente rapporto illustra in dettaglio le attività di supporto tecnico-scientifico condotte in seno alla convenzione tra Comune di Travedona - Monate ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. In particolare, l'obiettivo della convenzione è quello di mettere a punto uno schema di indagine per produrre un'analisi di dettaglio dei dati meteo climatici, idrologici ed idraulici, oltre che dei dati di qualità dell'aria, raccolti su di un orizzonte temporale pluriennale in base al Piano di Monitoraggio Ambientale del Lago di Monate. Detto piano, come noto, è associato alle attività estrattive previste dal progetto attuativo dell'ambito territoriale estrattivo (ATEc2) per la cava Cava Faraona e Cava Santa Maria, fra i comuni di Travedona-Monate e Ternate.

La convenzione si inserisce all'interno di un complesso sistema di attività rivolte allo sviluppo di una serie di analisi idrologiche, idrauliche e chimiche dei dati raccolti in base al Piano di Monitoraggio Ambientale precedentemente menzionato. In particolare, le attività specifiche sviluppate dal DICAM durante il periodo di riferimento del presente rapporto si sono concentrate sui seguenti aspetti:

- svolgimento di una serie di sopralluoghi presso l'area di cava ed i punti ove è prevista l'installazione dei sensori di misura e di incontri con la Committenza, presso la sede del Comune di Travedona-Monate, anche finalizzati alla divulgazione delle attività di indagine della convenzione e dei loro risultati, aventi cadenza indicativamente mensile;
- archiviazione e sistematizzazione dei dati raccolti in base al piano di monitoraggio ambientale relativamente a: variabili meteo-climatiche; livelli idrici delle acque superficiali e sotterranee; portate idriche naturali (Torrente Acquanegra) e scaricate dalla cava tramite sollevamento meccanico;

- messa a punto un modello idrologico semplificato che permetta di quantificare il bilancio idrologico del bacino del Lago di Monate sulla base dei dati di precipitazione, di livello piezometrico e di portata raccolti in base alle attività di monitoraggio.

I diversi aspetti elencati sono trattati in dettaglio nei successivi paragrafi del rapporto, che si chiude con un bilancio idrologico preliminare del Lago di Monate, fondato sulla base dati raccolta fino a novembre 2014, e sintetizzato anche nella tabella sottostante. In appendice viene allegato un rapporto specifico sulla costruzione della scala di deflusso per la valutazione delle portate del Torrente Acquanegra a partire da misure di livello idrico.

	T. Acquanegra osservazioni	T. Acquanegra simulazioni	Contributo superficiale	Contributo sott. da extra-bacino
Volumi [Mm³]	8.01	8.76	7.76	0.34
Deflussi [l/s]	254.1	277.9	246.2	10.7

Bilancio idrologico del Lago di Monate: valori cumulati e medi su un periodo di 11 mesi di: portata all'emissario osservata e simulata, deflusso sotterraneo e deflusso sotterraneo e superficiale. Il periodo di riferimento va da gennaio a novembre 2014; si sottolinea come la precipitazione cumulata complessiva sia quantificabile per l'area di studio ed il periodo di interesse in circa 2660 mm/a e come il deflusso medio annuo fosse stimato in Barnaba (1987) pari a 45.9, 109.3 e 240.3 l/s per anni piovosità scarsa (c.d. 1089 mm/anno), media (c.d. 1520 mm/anno) e abbondante (c.d. 2146 mm/a), in quest'ordine.

1. Coordinamento del monitoraggio e divulgazione tecnico-scientifica delle attività della Convenzione

Le attività sviluppate dai consulenti DICAM hanno previsto sia il coordinamento della raccolta dati curata da HOLCIM (ITALIA) S.p.A relativa al Piano di Monitoraggio Ambientale (v. Allegato B), attraverso lo svolgimento con cadenza temporale mensile di sopralluoghi alle stazioni di misura, sia la partecipazione dei consulenti DICAM a tavoli tecnici ed incontri presso istituzioni ed enti territoriali finalizzati al coordinamento delle attività di monitoraggio ed, infine, la partecipazione degli stessi consulenti ad eventi divulgativi ed aperti al pubblico per promuovere le attività legate al programma di monitoraggio presso la cittadinanza del Comune di Travedona-Monate.

In particolare, l'attività di monitoraggio è stata seguita dai consulenti DICAM prendendo parte personalmente alle campagne collegiali di raccolta dati svoltesi nelle date seguenti: 28/11/2013; 17/12/2013; 28/01/2014; 25/02/2014; 25/03/2014; 15/05/2014; 10/07/2014; 18/09/2014; 23/10/2014; 18/11/2014, conducendo anche dei monitoraggi ad hoc, come nel caso dei rilievi delle vibrazioni indotte dalle attività di coltivazione della Cava Faraona svolti in data 15/05/2014 a cura del Prof. Berry e del Dott. Ing. Bonduà. I verbali dei sopralluoghi redatti a cura del DICAM sono consultabili al sito (<http://www.comune.travedonamonate.va.it>).

I consulenti DICAM hanno inoltre partecipato ad incontri con la popolazione per la divulgazione delle attività connesse con l'attività di monitoraggio e dei risultati ad essa connessi, ne è un esempio la serata informativa svoltasi presso il Comune di Travedona-Monate in data 04/04/2014, durante la quale il Prof. Montanari ha relazionato sullo stato delle attività di monitoraggio ed in particolare sulla situazione delle falde acquifere e del lago in relazione al Piano Cave (lucidi consultabili al link: <http://www.comune.travedonamonate.va.it/news/presentazione-travedona-aprile2014.pdf>).

Infine, le attività sviluppate dai consulenti DICAM hanno avuto risalto anche nell'ambito di consessi scientifici internazionali. Durante il mese di dicembre 2014 il Prof. Montanari ha partecipato al Fall Meeting dell'American Geophysical Union (San Francisco, California, Stati Uniti, 15-19 dicembre 2014). Si tratta della più importante conferenza scientifica internazionale in materia di gestione delle risorse idriche e conservazione dell'ambiente. All'edizione del 2014 dell'AGU Fall Meeting hanno infatti partecipato quasi 24.000 ricercatori provenienti da tutto il mondo (i dettagli sono riportati alla pagina internet <http://fallmeeting.agu.org/2014/>). In tale occasione è stato presentato, sotto forma di poster, un contributo scientifico in merito all'esperienza condotta con il monitoraggio dell'impatto ambientale dei lavori di coltivazione di Cava Faraona e con lo studio del bilancio idrologico del Lago di Monate (v. Figura 1.1). Il contributo ha ricevuto un notevole successo di interesse. E' opinione di numerosi ricercatori, infatti, che il Lago di Monate rappresenti una unicità ambientale a livello internazionale e che l'attività di monitoraggio ed analisi in corso sia un esempio molto raro di sviluppo sostenibile e di oculata convivenza con il territorio. E' stato particolarmente apprezzato lo sforzo di collaborazione fra Amministrazione pubblica, istituzioni preposte alla ricerca e realtà industriali.

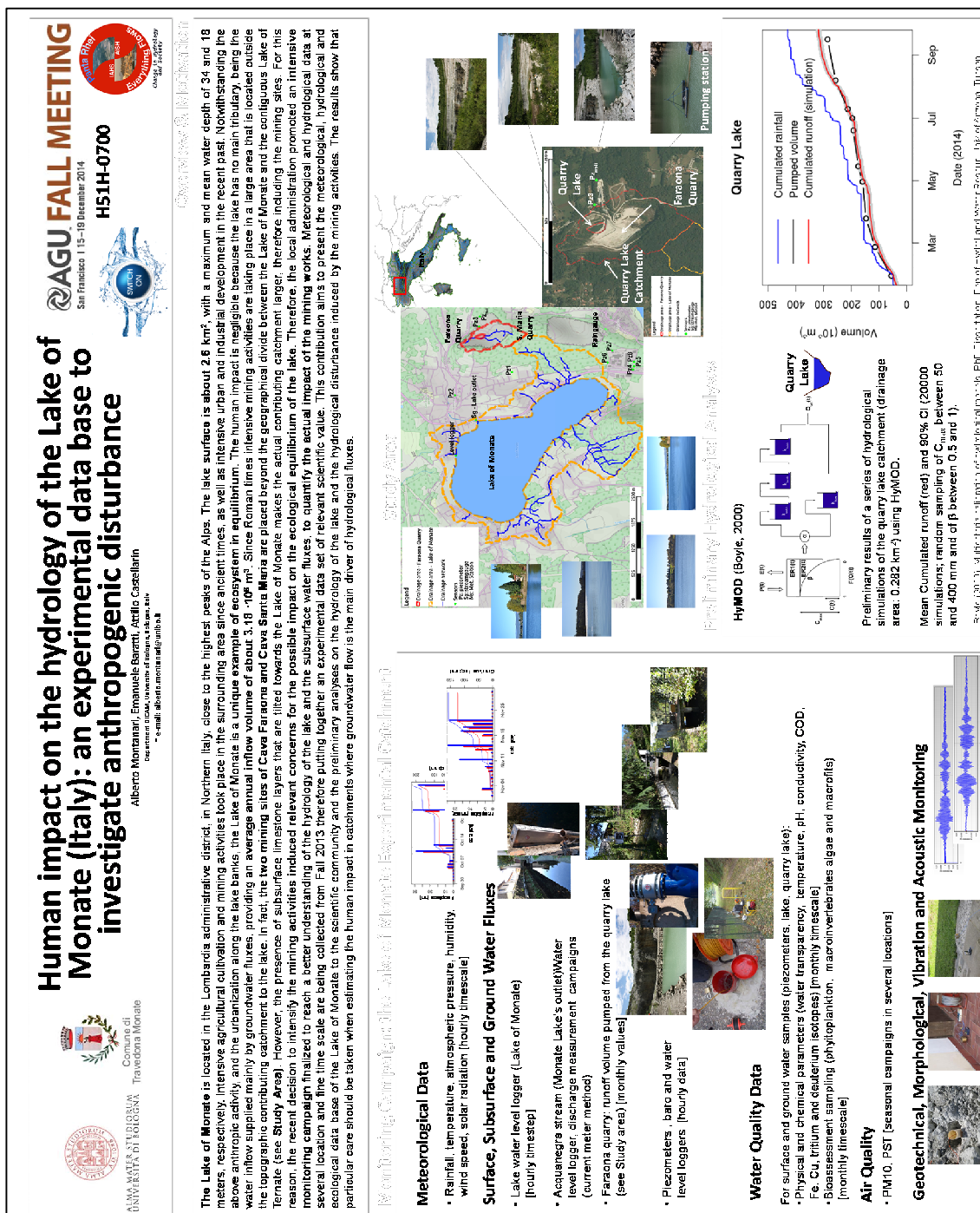


Figura 1.1- Poster dal Titolo: “ Human impact on the hydrology of the Lake of Monate (Italy): an experimental data base to investigate anthropogenic disturbance” presentato il 19/12/2014 alla conferenza internazionale AGU Fall Meeting 2014, tenutasi a San Francisco, CA, USA dal 15 al 19 dicembre 2014.

2. Sistematizzazione ed elaborazioni preliminari dei dati raccolti

2.1 Attività di monitoraggio idrologico in corso

Al fine di valutare le potenziali alterazioni idrologiche che l'ampliamento delle attività estrattive presso Cava Faraona potrebbero comportare, è stata pianificata ed implementata una fitta rete di monitoraggio a cura di Holcim s.p.a (v. Figura 2.1). Tale rete di monitoraggio è costituita da quattordici piezometri distribuiti sull'area in esame per effettuare rilievi piezometrici e, in alcuni casi, monitoraggi idrochimici.

Per quanto concerne il Lago di Monate è previsto un monitoraggio delle oscillazioni del pelo libero del lago sia manualmente, utilizzando l'asta idrometrica installata sulla sponda nord del lago, sia in continuo, tramite un data logger installato nel dicembre 2013. Sono state inoltre pianificate, con cadenza bimestrale a partire da agosto 2014, delle attività di campionamento delle acque del lago per effettuare indagini chimiche e biologiche delle stesse.

Per il Torrente Acquanegra, l'unico emissario del Lago di Monate, è prevista la rilevazione dei livelli idrometrici, della velocità della corrente e il rilievo della sezione dell'asta fluviale. A tal fine è stata installata un'asta idrometrica digitale che permette il monitoraggio in remoto del livello idrico del torrente.

Per quanto riguarda il Lago di Cava è prevista una misurazione, mensile per il primo anno e bimestrale per gli anni successivi, delle variazioni idrometriche e la registrazione dei volumi idrici emunti dal lago ed inviati verso il Lago di Varese. Il monitoraggio effettuato da parte di GEOlogica si è inoltre occupato di effettuare dei campionamenti delle acque del lago di cava per quantificare i parametri inerenti al contenuto di metalli, idrocarburi e materiali in sospensione delle acque del lago.



Figura 2.1: Localizzazione dei sensori di misura dei livelli idrometrici del Lago di Monate, del Torrente Acquanegra e del laghetto di cava. Localizzazione dei piezometri e della stazione meteo-climatica di Holcim S.p.A.

Per quanto riguarda le misurazioni meteo-climatiche presso la cava di Santa Marta è stata installata nel settembre 2013 una stazione termo-nivo-pluvimetrica di proprietà della Holcim SpA. In tale stazione vengono effettuate in continuo le registrazioni dei valori cumulati orari di precipitazione e dei valori medi orari di temperatura e pressione atmosferica. A circa 3 km di distanza da Cava Santa Marta è inoltre presente, presso Varano Borghi, una delle stazioni meteo-climatiche di Arpa Lombardia. Tale stazione fornisce valori orari di: Pioggia cumulata; Temperatura e umidità relativa (valori medi, massimi e minimi orari); Direzione e velocità del vento. Per il calcolo dell'evapotraspirato giornaliero, sono stati anche utilizzati valori di radiazione solare globale giornaliera. Non essendo presente un radiometro né presso la stazione di Varano Borghi né presso la stazione di Cava Santa Marta, sono stati utilizzati i valori di radiazione solare globale registrati presso la stazione di Somma Lombardo di Arpa Lombardia. Tale stazione è situata circa 16 km a sud rispetto a Varano Borghi, nelle vicinanze dell'Aeroporto di Malpensa (v. Figura 2.2).



Figura 2.2: Localizzazione delle stazioni meteo-climatiche di Somma Lombardo, Varano Borghi e Cava Santa Marta.

2.1 Dati meteo-climatici considerati

Le analisi descritte nel presente elaborato sono state prevalentemente svolte nell'ambito di una Tesi di Laurea Magistrale (Soligno, 2015), cui si rimanda per eventuali approfondimenti. Le indagini hanno considerato i seguenti dati meteoroclimatici:

- Dati pluviometrici orari, registrati presso le stazioni pluviometriche situate presso Cava Santa Marta (di Holcim SpA) e Varano Borghi (di Arpa).
- Dati di temperatura, pressione e umidità relativa; Valori massimi, minimi e medi orari misurati presso la stazione Arpa di Varano Borghi;
- Velocità media giornaliera del vento, misurata presso la stazione Arpa di Varano Borghi;
- Radiazione solare globale media giornaliera, misurata presso la stazione Arpa di Somma Lombardo.

Il primo passo intrapreso è stato quello di creare un archivio dati completo e idoneo per le successive analisi. A tal fine si è proceduto alla:

- Integrazione dei dati meteo-climatici mancanti;
- Valutazione delle grandezze a passo giornaliero.

L'archivio dati, infatti, presentava alcuni blocchi temporali, solitamente dell'ordine di poche ore, in cui non erano stati registrati valori. I valori mancanti erano relativamente pochi rispetto al totale; si è infatti rilevato su un totale di più di 9200 ore, la mancanza di dati per circa una cinquantina di ore. Tuttavia si è ritenuto opportuno integrare tali dati mancanti per poter fare, in seguito, delle stime coerenti per quanto riguarda le precipitazioni cumulate mensili e giornaliere e per la stima dell'evapotraspirazione potenziale.

L'integrazione dei dati è stata effettuata a partire dai valori registrati 24 ore prima e 24 ore dopo rispetto al dato mancante, nel modo seguente:

- Per i valori medi è stata calcolata la media fra i due valori;
- Per i valori massimi/minimi è stato preso il massimo/minimo fra i due valori;
- Per le precipitazioni è stato preso un valore pari a zero.

Una volta ottenuto un archivio dati a passo orario completo, si è proceduto nella valutazione delle grandezze a passo giornaliero, che è stata effettuata come segue:

- Per i valori medi è stata calcolata la media sul intervallo di 24 ore;
- Per i valori massimi/minimi è stato preso il massimo/minimo sul intervallo di 24 ore;
- Per le precipitazioni è stato preso il valore cumulato sul intervallo di 24 ore.

Sia per quanto riguarda l'integrazione dei dati mancanti che per le stime a passo giornaliero è stato utilizzato il programma di calcolo R (www.r-project.org). La scelta di effettuare le operazioni di aggiornamento dell'archivio dati in automatico deriva dalla

grande mole di dati presa in esame (si tratta di valori a passo orario che coprono un arco temporale maggiore di un anno), e dalla necessità di disporre di uno strumento che rendesse tale operazione di aggiornamento semplice e veloce, dal momento che le misurazioni sono tuttora in corso e ogni trimestre vengono aggiunti dati all'archivio.

Per quanto concerne il periodo considerato ovvero quello che va da ottobre 2013 a settembre 2014, rilevato dalla stazione termo-pluviometrica installata presso Cava Santa Marta, si è osservato un andamento delle temperature medie mensili che va da un massimo pari a 21,6 °C di giugno, ad un minimo di 5,3 °C di gennaio. Per ulteriori dettagli riguardo le temperature medie mensili si rimanda alla Tabella 2.1.

Mese/anno	9/13	10/13	11/13	12/13	1/14	2/14	3/14	4/14	5/14	6/14	7/14	8/14
T media [°C]	19,8	14	9,1	6,1	5,3	6,5	11,7	14,8	17,3	21,6	21,4	20,9

Tabella 2.1: Temperature medie mensili registrate presso la stazione termo-pluviometrica di Cava Santa Marta.

Per quanto riguarda le precipitazioni l'anno in esame è stato caratterizzato da un'elevata piovosità. La stazione di Cava Santa Marta ha infatti registrato, fra ottobre 2013 e settembre 2014, un valore cumulato annuale di 2224 mm, mentre secondo i dati pluviometrici registrati dalla stazione Arpa presso il comune di Ispra (situato circa a 4 km a nord dal Lago di Monate) il valore cumulato annuale medio tra il 1990 e il 2013 è stato di 1454 mm.

Anche esaminando la Tabella 2.2, che confronta i valori di precipitazione medi mensili registrati presso Cava Santa Marta nell'anno di monitoraggio e i dati medi mensili registrati presso la stazione Arpa di Ispra negli ultimi anni, si nota che l'anno in esame è stato particolarmente piovoso.

Mese	Pioggia media mensile (anno 2013-2014) [mm]	Pioggia media mensile (media anni precedenti) [mm]
Ottobre	6,9	5,2

Novembre	5,2	5,9
Dicembre	10,6	2,6
Gennaio	7,0	2,3
Febbraio	9,0	2,0
Marzo	3,8	2,5
Aprile	4,7	4,5
Maggio	2,6	5,0
Giugno	4,8	4,6
Luglio	8,4	3,3
Agosto	8,8	3,8
Settembre	1,5	5,5

Tabella 2.2: Pioggia giornaliera media mensile registrata presso Cava Santa Marta nel periodo fra ottobre 2013 e settembre 2014 e valore medio fra le piogge giornaliere medie mensili degli anni precedenti registrate presso la stazione Arpa di Ispra [mm/giorno].

Di seguito, in Tabella 2.3, si riportano inoltre i valori cumulati mensili registrati presso la stazione di Cava Santa Marta.

	Pioggia cumulata mensile [mm]
Ottobre 2013	215,2
Novembre 2013	157,2
Dicembre 2013	327,6
Gennaio 2014	216,0
Febbraio 2014	250,4
Marzo 2014	116,2
Aprile 2014	141,4
Maggio 2014	81,2
Giugno 2014	142,6
Luglio 2014	258,8
Agosto 2014	273,0
Settembre 2014	43,6
Ottobre 2014	88,8

Tabella 2.3: Pioggia cumulata mensile registrata presso Cava Santa Marta [mm/mese].

2.3 Elaborazioni preliminari condotte sui dati raccolti: stima dei flussi evapotraspirativi potenziali

Un elemento fondamentale per sviluppare un bilancio idrologico a scala annuale di un bacino imbrifero è la quantificazione dell'evapotraspirazione potenziale e, in un caso come quello del bacino del Lago di Monate, la valutazione dell'evaporazione dagli specchi liquidi. I dati meteorologici raccolti grazie all'attività di monitoraggio e sistematizzati ed uniformati in termini di passo temporale come descritto ha consentito di stimare le grandezze di interesse come di seguito descritto.

2.3.1 Processi evapotraspirativi: cenni

L'evapotraspirazione consiste nella quantità d'acqua che dal suolo passa nell'aria allo stato di vapore, generalmente si esprime in quantità di acqua per unità di superficie per unità di tempo. L'evapotraspirazione è il risultato dell'effetto congiunto dell'evaporazione dalle superfici bagnate e della traspirazione d'acqua che avviene attraverso gli stomi delle piante (v. Figura 2.3).

Si distingue in evapotraspirazione potenziale e in evapotraspirazione effettiva, ovvero la reale perdita d'acqua della coltura considerata il cui valore risulta solitamente inferiore a quello di evapotraspirazione potenziale che invece fa riferimento ad una condizione ambientale standard.

L'entità del fenomeno evapotraspirativo dipende dalle condizioni fisiche presenti nell'ambiente (radiazione solare, temperatura, umidità, vento) e dalla disponibilità d'acqua, la quale può essere a pelo libero oppure trattenuta in un mezzo poroso (Mugnai, 2004).

I principali elementi climatici che influenzano l'evapotraspirazione sono:

- *Temperatura dell'aria.* Si ha una maggiore evapotraspirazione se le temperature

sono elevate essendo un processo che assorbe calore dall'ambiente. Inoltre la massima quantità di vapore acqueo che può essere trattenuto dall'aria aumenta al crescere della temperatura.

- *Radiazione solare netta.* Parte dell'energia per il passaggio dalla fase liquida alla fase di vapore è fornito dalla temperatura dell'ambiente, ma la maggioranza dell'energia deriva dalla radiazione solare netta.
- *Umidità atmosferica.* L'intensità dell'evapotraspirazione è maggiore in caso di aria secca.
- *Pressione di vapore.* Esistono due tipi di pressione di vapore: la pressione di vapore reale e la pressione di vapore a saturazione, la differenza fra le due è il deficit di pressione di vapore che risulta essere un elemento molto importante per la valutazione dell'evapotraspirazione poiché regola il funzionamento stomatico delle piante. Se si ha un accrescimento delle temperature e della radiazione solare si ha un conseguente aumento del deficit di pressione di vapore che provoca un aumento della traspirazione fogliare (Mugnai, 2004).
- *Vento.* La presenza di vento induce un incremento di turbolenza a livello della superficie ed un conseguente aumento dell'evapotraspirazione.

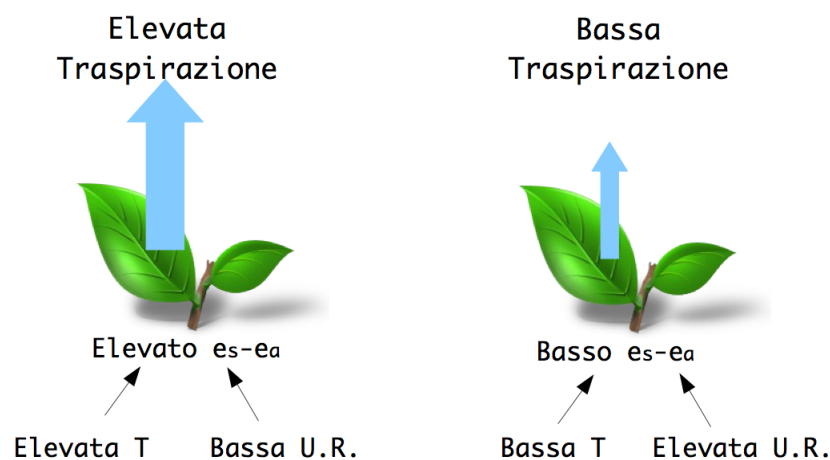


Figura 2.3: Dipendenza del grado di traspirazione fogliare dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria.

L'evapotraspirazione può essere valutata mediante metodi diretti, ad esempio effettuando misurazioni con dei lisimetri di precisione, oppure mediante metodi indiretti, ovvero utilizzando formule matematiche che mettono in relazione diverse variabili climatiche di più semplice misurazione.

Nel presente lavoro si è scelto di effettuare una stima dell'evapotraspirazione potenziale mediante l'equazione di Penman-Monteith modificata nel "Quaderno 56" della FAO (Allen et al., 1998). Si tratta di un metodo di complessa applicazione viste le molteplici variabili prese in considerazione, ma si tratta anche di uno dei metodi più precisi e attendibili.

2.3.2 L'Equazione di Penman-Monteith

La formulazione dell'equazione di Penman-Monteith tiene conto delle relazioni di bilancio energetico e di trasporto turbolento, introducendo inoltre due termini che considerano il processo che regola il passaggio del vapore acqueo dal mesofilo all'atmosfera attraverso gli stomi delle piante. I due parametri introdotti sono la resistenza superficiale (r_s) e la resistenza aerodinamica (r_a), essi valutano tramite un modello semplificato la maggiore o minore difficoltà che il vapore incontra a diffondersi nell'atmosfera.

L'equazione di Penman-Monteith è la seguente:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn-G) + \rho c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.1)$$

dove:

Rn = Radiazione netta [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

G = Flusso di calore del suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

c_p = Calore specifico dell'aria a pressione costante [$\text{KJ Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]

r_a = Resistenza aerodinamica [s m^{-1}]

r_s = Resistenza superficiale [s m^{-1}]

$e_s - e_a$ = Deficit di pressione di vapore [KPa]

ρ = Densità media dell'aria [Kg m^{-3}]

Δ = Pendenza della curva di saturazione [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

γ = Costante Psicrometrica [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

λ = Calore latente di evapotraspirazione [MJ Kg^{-1}]

La stima dell'evapotraspirazione mediante la formula di Penman-Monteith risulta particolarmente complessa, soprattutto per quanto riguarda la determinazione dei parametri di resistenza aerodinamica e di resistenza superficiale. Nel 1990 un gruppo di ricercatori convocati dall'organizzazione statunitense per l'agricoltura e l'alimentazione (FAO), ha riproposto l'equazione di Penman-Monteith facendo riferimento ad una coltura di riferimento e definendo di conseguenza i valori da utilizzare per r_s ed r_a . La procedura per il calcolo dell'evapotraspirazione è stata proposta nel 1998 dalla FAO nel "Quaderno 56" e ad oggi è considerata una delle procedure più affidabili per il calcolo indiretto dell'evapotraspirazione.

La coltura di riferimento ha le seguenti caratteristiche: un'altezza uniforme di 0,12 cm ed una completa copertura del suolo; Una resistenza superficiale pari a 70 s m^{-1} ; Un albedo di 0,23.

Dunque l'equazione di Penman-Monteith per la coltura di riferimento, esplicitando tutte le costanti e considerando un passo di calcolo giornaliero assume la seguente formulazione:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.2)$$

dove:

R_n = Radiazione netta [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

G = Flusso di calore del suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

T = Temperatura media dell'aria [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 = Velocità del vento misurata a 2 m di altezza [m s^{-1}]

$e_s - e_a$ = Deficit di pressione di vapore [kPa]

Δ = Pendenza della curva di saturazione [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

γ = Costante Psicrometrica [$\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

2.3.3 Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale mediante l'Equazione di Penman-Monteith

Nel presente lavoro si è effettuato il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale utilizzando un passo di calcolo giornaliero. La procedura per il calcolo segue le linee guida presentate nel "Quaderno 56" della FAO (Allen et al., 1998).

Per il calcolo sono necessari i seguenti dati metereologici:

- Temperatura dell'aria. In particolare è necessario disporre della temperatura media, minima e massima giornaliera.
- Pressione atmosferica media giornaliera.
- Umidità Relativa. Si sono utilizzati i valori massimi e minimi giornalieri.
- Velocità del vento. Ovvero la velocità media giornaliera del vento misurata ad un'altezza di 2 m rispetto al suolo.

- Radiazione Solare Globale. Anche in questo caso è necessario un valore medio giornaliero.

La formula di riferimento è la (2.2) presentata nel precedente paragrafo.

Il primo passo di calcolo interessa la costante psicrometrica, che relaziona la pressione parziale di vapore e la temperatura dell'aria. La costante psicrometrica è data dalla seguente equazione:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \cdot 10^3 \cdot P \quad (2.3)$$

dove:

c_p = calore specifico dell'aria a pressione costante, pari a $1.013 \cdot 10^{-3} \text{ [KJ Kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}]$

P = Pressione atmosferica [kPa]

λ = Calore latente di vaporizzazione, pari a $2.45 \text{ [MJ Kg}^{-1}]$

ε = Il rapporto tra il peso molecolare dell'aria secca e del vapore acqueo, pari a 0.622.

Nella valutazione dell'evapotraspirazione è fondamentale una corretta conoscenza della pressione di vapore. Infatti la quantità d'acqua presente nell'aria è direttamente legata alla pressione parziale di vapore. Quando si raggiunge un equilibrio nello scambio di molecole d'acqua tra l'aria e la superficie di evaporazione si dice che l'aria è satura, in quanto non può “immagazzinare” nuove molecole d'acqua. La pressione a cui corrisponde tale situazione di equilibrio è chiamata pressione di vapore a saturazione, che dipende dalla temperatura. Infatti maggiore è la temperatura maggiore è la capacità di immagazzinamento delle molecole d'acqua da parte dell'aria, poiché aumenta la pressione di vapore a saturazione.

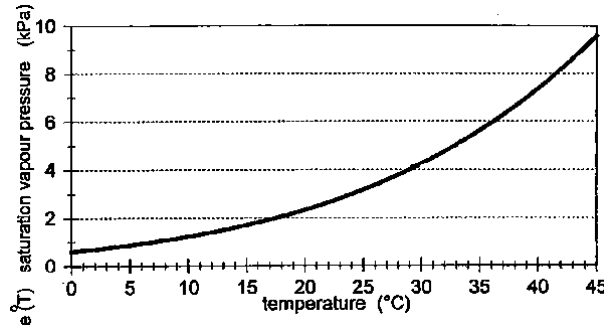


Figura 2.4: Dipendenza della pressione di vapore saturazione della temperatura (Allen et al., 1998).

Come si osserva in Figura 2.4, la pendenza della curva cambia esponenzialmente con la temperatura: a basse temperature si hanno basse pendenze, al contrario ad alte temperature si hanno pendenze elevate e quindi all'aumentare della temperatura si ha un maggiore aumento della pressione di vapore a saturazione. Per questo una corretta stima della pendenza della curva di saturazione è fondamentale per una corretta valutazione dell'evapotraspirazione.

La pendenza della curva di saturazione ad una data temperatura si calcola mediante la seguente equazione:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right)} \right]}{(T+237.3)^2} \quad (2.4)$$

dove T è la temperatura media giornaliera dell'aria in gradi centigradi.

La stima della pressione di vapore reale si può effettuare in vari modi, per esempio utilizzando dati psicrometrici oppure partendo dai valori di temperatura di rugiada. Nel presente lavoro, invece, si è scelto di calcolarla a partire dai dati di umidità relativa, utilizzando la seguente formula proposta nel "Quaderno 56" della FAO:

$$e_a = \frac{e(T_{min})^{\frac{U.R_{max}}{100}} + e(T_{max})^{\frac{U.R_{min}}{100}}}{2} \quad (2.5)$$

Dove $e(T_{\min})$ è la pressione di saturazione calcolata utilizzando il valore minimo giornaliero di temperatura dell'aria, mentre $e(T_{\max})$ è calcolata utilizzando la temperatura massima giornaliera; U.R è l'umidità relativa giornaliera.

La stima della pressione di vapore a saturazione dipende dalla temperatura ed è pari a:

$$e_s(T) = 0.6108 e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \quad (2.6)$$

Dove T è la temperatura dell'aria in gradi centigradi.

Data la non linearità di tale equazione è opportuno, per la stima del valore medio giornaliero della pressione di vapore a saturazione, fare una media aritmetica tra le pressioni di vapore a saturazione calcolate utilizzando la temperatura massima giornaliera e la temperatura minima giornaliera.

L'energia per il processo di evapotraspirazione dipende principalmente dall'entità dell'energia radiante. Per questo motivo nell'equazione di Penman-Monteith per tenere conto dei flussi energetici rispetto la superficie di evaporazione è presente il termine $(R_n - G)$, dove R_n è la radiazione solare netta e G è il flusso di calore del suolo.

Esistono complessi modelli per valutare il flusso di calore del suolo, ma dal momento che esso risulta essere molto minore rispetto al termine di radiazione solare netta, in particolare nel caso di suolo ricoperto di vegetazione e nel caso di calcoli con passo temporale giornaliero, il termine G viene assunto pari a zero (Allen et al., 1998).

I dati forniti da Arpa Lombardia interessano esclusivamente la radiazione solare globale, di conseguenza è stato necessario introdurre nuove ipotesi ed effettuare ulteriori calcoli per la stima della radiazione solare netta.

La radiazione solare netta è data dalla differenza tra la radiazione netta in arrivo ad onda corta (R_{ns}) e la radiazione ad onda lunga che lascia la superficie terrestre (R_{nl}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Naturalmente entrambe dipendono dal energia solare globale in arrivo sulla superficie (R_s). Nel presente lavoro tale termine è stato fornito da Arpa, che effettua in continuo delle misure della radiazione solare globale presso la stazione meteorologica di Somma Lombardo.

La radiazione solare netta in arrivo è quindi pari a:

$$R_{ns} = (1-a)R_s$$

Dove a è l'albedo, ovvero la frazione di energia solare riflessa da una particolare superficie. L'albedo per la coltura di riferimento considerata nel "quaderno 56" della FAO è pari a 0.23. Nel presente studio si è invece deciso di calcolare l'evapotraspirazione per diversi tipi di suolo. I diversi valori di albedo rispetto al tipo di superficie sono presentati nella seguente tabella:

Superficie	Dettagli	Albedo
Suolo	<i>Scuro e bagnato</i>	0.05 -
	<i>Chiaro e asciutto</i>	- 0.40
Sabbia		0.15 - 0.45
Erba	<i>Lunga</i>	0.16 -
	<i>Corta</i>	- 0.26
Coltivazioni agricole		0.18 - 0.25
Foresta		0.5 - 0.20
Acqua	<i>Basso angolo zenitale</i>	0.03 - 0.10
	<i>Alto angolo zenitale</i>	0.10 - 1.0
Neve	<i>Vecchia</i>	0.40 -
	<i>Fresca</i>	- 0.95

Tabella 2.2: Valori di albedo per diverse superfici (Ahrens, 2006).

La radiazione netta ad onda lunga (R_{nl}) è proporzionale alla temperatura assoluta della superficie elevata alla quarta, che quantitativamente è espressa dalla legge di Stefan-Boltzmann. Tuttavia la reale energia che lascia la superficie terrestre è minore rispetto a quella prevista dalla legge di Stefan-Boltzmann poiché parte viene intercettata dai costituenti atmosferici a effetto serra e nuovamente irraggiata verso il suolo. Quindi

l'umidità e la nuvolosità giocano un ruolo importante nella stima di R_{nl} , per questo motivo l'equazione proposta nel "Quaderno 56" della FAO prevede un termine correttivo rispetto alla legge di Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = \sigma \frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad (2.7)$$

dove:

R_{nl} = radiazione netta ad onda lunga uscente [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

T_{max} e T_{min} = temperatura massima e minima [K]

σ = Costante di Stefan-Boltzmann, pari a $4.903 \cdot 10^{-9}$ [$\text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

e_a = Pressione di vapore effettiva [kPa]

R_s = Radiazione solare globale [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

R_{so} = Radiazione solare in caso di cielo terso [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

Per la stima di R_{so} è stata utilizzata la seguente formula (Allen et al., 1998):

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

Dove z è la quota rispetto al livello del mare della stazione considerata e R_a è la radiazione extraterrestre che varia in base alla latitudine nei diversi giorni dell'anno. Di seguito viene riportata la tabella dei valori di R_a nel quindicesimo giorno di ogni mese dell'anno per la stazione considerata:

Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9

Tabella 2.3: Valori di radiazione solare extraterrestre per un sito a 46 gradi di latitudine nell'emisfero nord, il quindicesimo giorno del mese [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]. Per gli altri giorni del medesimo mese la variazione rispetto tale valore è inferiore al 1% (Allen et al., 1998).

Come già precedentemente esposto, la stima dell'evapotraspirato potenziale è stata fatta utilizzando differenti albedo a seconda dell'uso del suolo.

Nel caso del bacino del lago di cava sono stati considerati due differenti usi del suolo:

- La zona di cava, caratterizzata da un albedo pari a 0,37
- La zona boschiva, caratterizzata da un albedo pari a 0,18

Dunque l'evapotraspirato complessivo è pari alla media pesata, secondo le aree, tra i due valori di evapotraspirato.

In Figura 2.5 è rappresentata tale suddivisione che è stata effettuata, tramite il software QGIS, utilizzando un'immagine satellitare.



Figura 2.5: *Suddivisione in base agli usi del suolo del bacino del lago di cava.*

Un procedimento analogo è stato seguito per quanto riguarda il bacino del Lago di Monate e l'extrabacino sotterraneo del lago. In questo caso sono stati considerati tre differenti usi del suolo:

- Le zone residenziali, caratterizzata da un albedo pari a 0,37
- Le zone di prati e campi coltivati, caratterizzate da un albedo pari a 0,25

- La zona boschiva, caratterizzata da un albedo pari a 0,18

In Figura 2.6 è rappresentata tale suddivisione che è stata effettuata, tramite il software QGIS, utilizzando uno shape file degli usi del suolo della provincia di Varese.



Figura 2.6: *Suddivisione in base agli usi del suolo del bacino del Lago di Monate (arancione: zone residenziali; Verde chiaro: prati; Verde scuro: zone boschive).*

Dunque il risultato finale del processo di calcolo appena descritto è il valore cumulato giornaliero di evapotraspirato, con le dimensioni di un'altezza idrica [mm], per diversi usi del suolo.

2.4 Esempio di archivio digitale ed elaborati grafici

In chiusura di paragrafo si riporta un esempio dell'archivio digitale predisposto omogeneizzando le informazioni disponibili a passo giornaliero (Tabella 2.4) e tre esempi di rappresentazioni grafiche delle variabili meteorologiche monitorate (esempio relativo alla precipitazione, Figura 2.7).

Giorno	Mese	Anno	TMED	TMIN	TMAX	URMED	URMIN	URMAX	PAMED	PAMIN	PAMAX	Pcava	Parpa	UVento	RADg
1	10	2013	15.7	14.10	18.90	88.6	69.50	100.9	967.6	965.70	969.70	0.0	0.0	0.9	56.600
2	10	2013	16.6	15.00	20.10	85.8	64.30	97.8	973.6	969.60	978.40	0.0	0.0	0.8	67.800
3	10	2013	15.0	12.90	16.80	81.5	66.00	94.0	982.5	978.40	984.60	0.0	0.0	0.8	35.900
4	10	2013	13.6	12.40	16.10	80.8	66.40	92.5	984.8	984.00	985.80	0.0	0.4	0.8	50.700
5	10	2013	12.9	10.20	16.40	94.0	78.30	104.4	980.8	979.10	984.60	7.2	5.8	1.1	54.300
6	10	2013	13.4	11.50	15.10	101.1	91.40	104.7	979.3	978.60	980.20	5.8	6.4	0.9	33.500
7	10	2013	15.0	13.70	18.40	100.4	83.20	105.0	980.5	979.60	982.00	3.8	4.4	1.0	38.200
8	10	2013	14.8	12.60	19.70	92.6	67.30	104.4	981.5	980.00	982.30	0.2	0.0	1.1	77.400
9	10	2013	15.3	12.60	20.40	92.5	66.30	105.6	978.1	974.80	980.90	0.0	0.0	0.8	121.100
10	10	2013	13.6	5.80	15.60	100.0	90.60	105.8	968.0	959.60	974.90	47.8	38.4	2.4	27.400
11	10	2013	11.4	0.00	18.90	62.4	0.00	88.1	967.5	0.00	973.20	9.0	1.0	1.8	58.600
12	10	2013	8.9	5.60	14.90	91.3	62.00	105.5	974.7	971.40	977.70	24.8	18.4	1.2	89.800
13	10	2013	9.4	7.70	11.20	94.4	87.50	102.8	979.7	977.50	981.40	0.0	0.0	0.7	24.700
14	10	2013	11.5	9.20	15.10	91.6	76.40	100.6	979.8	978.20	981.60	0.0	0.0	0.5	41.500
15	10	2013	12.0	9.50	17.90	92.8	64.10	104.0	975.6	971.30	978.80	0.0	0.0	0.6	72.800
16	10	2013	14.8	9.20	24.10	78.4	34.70	104.3	968.6	966.60	971.40	0.2	0.2	0.9	161.400

Tabella 2.4: Esempio di archivio digitale utilizzato per il salvataggio delle grandezze monitorate (temperatura, umidità relativa, pressione, precipitazione, velocità del vento e radiazione solare).

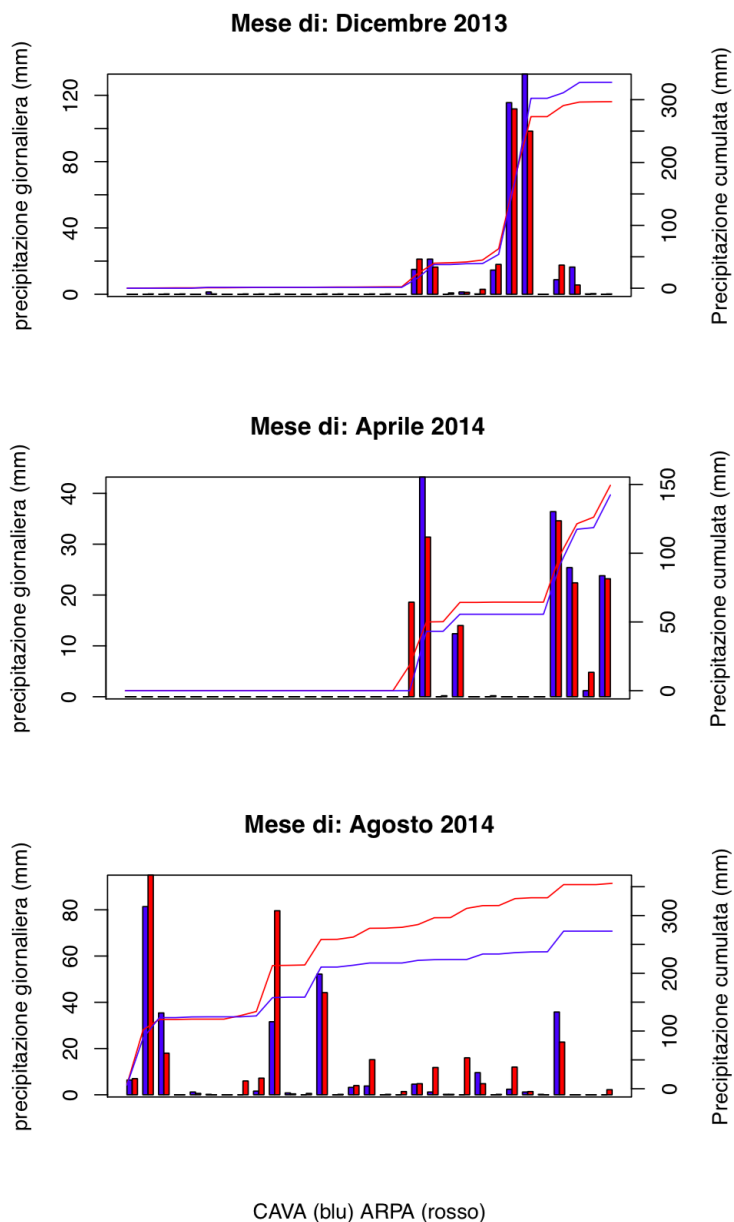


Tabella 2.4: Esempio di rappresentazione grafica delle altezze di precipitazione cumulata giornaliera osservate al pluviometrografo di S. Maria (CAVA) e di Varano Borghi (ARPA).

3. Considerazioni sui livelli piezometrici

L'analisi dei dati piezometrici raccolti durante il periodo autunno 2013 – estate 2014 ha messo in evidenza una geometria dell'acquifero complessa, con la probabile presenza di falde sospese e flussi preferenziali di scorrimento. Le rilevazioni effettuate nel piezometro PZ3, localizzato presso Cava Faraona, hanno mostrato assenza di acqua per gran parte del periodo di monitoraggio. Inoltre, le rilevazioni effettuate presso i piezometri PZ1 e PZ2, localizzati in prossimità dell'abitato di Travedona Monate, hanno evidenziato un andamento spaziale del livello di falda di difficile interpretazione. Alla luce quindi delle osservazioni effettuate in soli due piezometri, appare impossibile ipotizzare una configurazione geometrica dei livelli di falda. Alla luce di detta evidenza, si è recentemente concordata la collocazione di un ulteriore piezometro, la cui posizione è stata stimata basandosi sulle osservazioni piezometriche disponibili, che dovrebbe consentire una migliore caratterizzazione delle geometria dell'acquifero nel prosieguo del piano di monitoraggio.

4. Modello semplificato per il bilancio idrologico a passo giornaliero del Lago di Monate

Il modello idrologico sviluppato in questa sede si concentra sulla rappresentazione dei processi più significativi componenti il ciclo idrologico a scala del bacino del Lago di Monate ai fini della valutazione quantitativa del bilancio idrologico del lago, entro i margini di incertezza caratteristici di indagini di questo tipo. Le attività svolte, ed i risultati conseguiti, costituiscono oggetto principale di una Tesi di Laurea Magistrale (Soligno, 2015), cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

Il presente capitolo è così strutturato, vengono richiamate le caratteristiche morfologiche ed idrogeologiche più significative dell'area di studio, si presentano in maniera schematica i lineamenti teorici del modello concettuale matematico di letteratura (HyMOD; v. Boyle et al., 2001) adottato per schematizzare il meccanismo di produzione e propagazione dei deflussi superficiali, se ne mostra una prima applicazione al bilancio idrologico del laghetto di cava della cava Faraona, che mira a sondare l'idoneità dello schema concettuale a rappresentare i fenomeni di interesse per l'area in esame e, infine, si riporta una evoluzione del modello HyMOD messa a punto per rappresentare il bilancio idrologico del Lago di Monate.

4.1 Presentazione dell'area di studio

Il Lago di Monate, situato in provincia di Varese, bagna i comuni di Travedona-Monate, Osmate, Comabbio e Cadrezzate. La superficie dello specchio d'acqua è pari a 2,578 km² ed è ad una quota media di 266 m slm; La profondità media del lago è di 18 m, mentre la profondità massima è di 34 m. Il lago è alimentato da acque di origine sorgiva e dai deflussi meteorici in quanto non ha immissari significativi (la sola vena alimentante il lago è rappresentata dalla Roggia di Riale). Esso ha un solo emissario, il Torrente Acquanegra, il quale si origina dalle sponde a Nord-Ovest del lago e sfocia nel Lago Maggiore, dopo aver toccato i comuni di Travedona-Monate, Biandronno,

Bregano, Malgesso, Brebbia e Ispra, per un totale di circa 11 km di percorso. Il deflusso del torrente stato in passato stimato in circa 3,45 Mm³ l'anno (Barnaba, 1987).

Il lago è di origine glaciale ed è circondato da colline moreniche. Il bacino imbrifero è costituito da un substrato roccioso di età terziaria prevalentemente impermeabile. Tale substrato roccioso è ricoperto da una coltre morenica di origine quaternaria, che ha uno spessore molto vario: da pochi metri a qualche decina di metri e, localmente, lo spessore può raggiungere anche il centinaio di metri. L'area è inoltre interessata da un importante affioramento di Calcarei Nummulitici dell'Eocene, che sono oggetto di coltivazione da parte delle cave Santa Marta e Faraona, situate a est del lago (Barnaba, 1987, v. Figura 4.1).

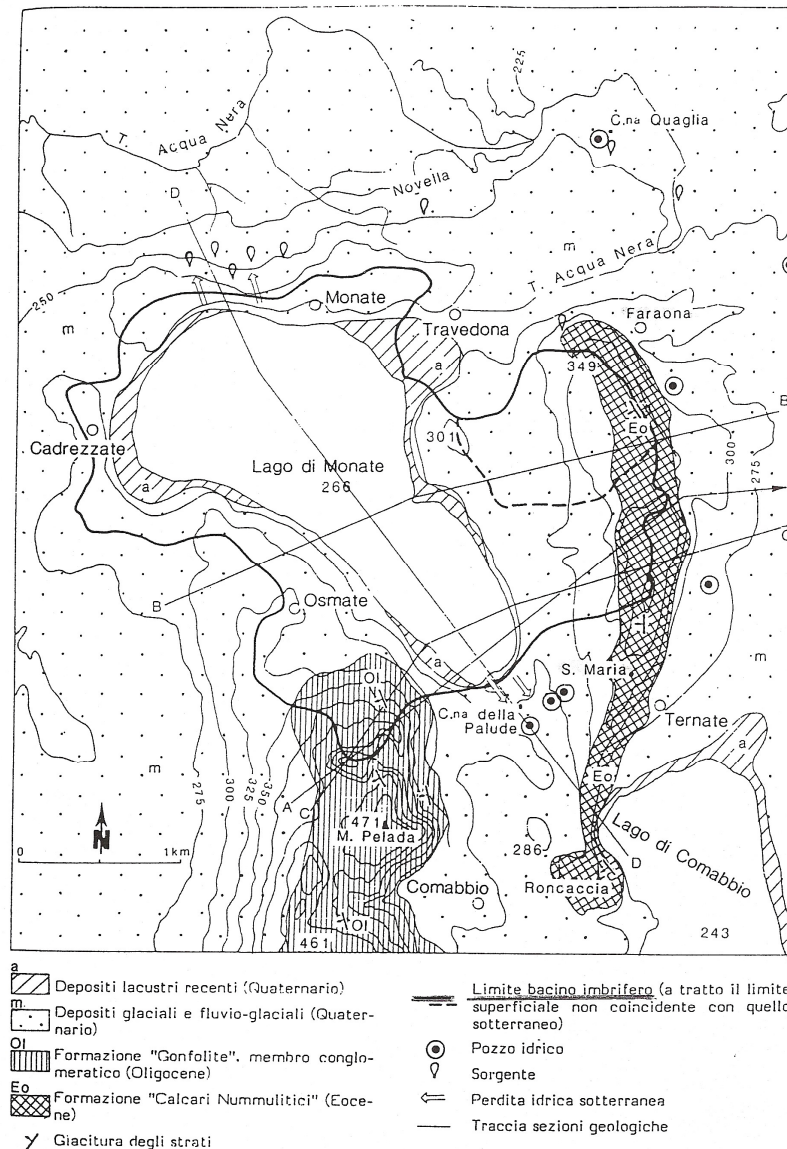


Figura 4.1 Carta idrogeologica del bacino del Lago di Monate (Barnaba, 1987).

Nonostante il substrato roccioso sia in prevalenza impermeabile è possibile che ci siano fessurazioni di origine primaria o tettonica che possano essere sede di vene d'acqua. Infatti nell'area in esame sono presenti pozzi acquedottistici ed industriali caratterizzati da un livello di superficie libera compatibile con i livelli del substrato roccioso. Dal momento che i pozzi, in particolare il pozzo situato ad est di Cava Faraona, hanno una rilevante importanza ed un'alimentazione permanente, che comprende quindi anche i

periodi di magra, non si può escludere che le dinamiche di alimentazione di tali pozzi siano ben più complesse rispetto alla sola alimentazione da parte del substrato quaternario e che quindi siano presenti fratture, seppur modeste, nel substrato roccioso (Montanari e Castellarin, 2012).

Il bacino idrologico superficiale del lago (v. Figura 4.2), ottenuto esclusivamente tramite considerazioni topografiche, è di 3,245 km², mentre la superficie lacustre è di 2,578 km². In figura è rappresentato con campitura verde il bacino superficiale ottenuto valutando il deflusso secondo un Modello Digitale di Elevazione del terreno (Digital Elevation Model, DEM) a risoluzione 5m fornito dalla Provincia di Varese.

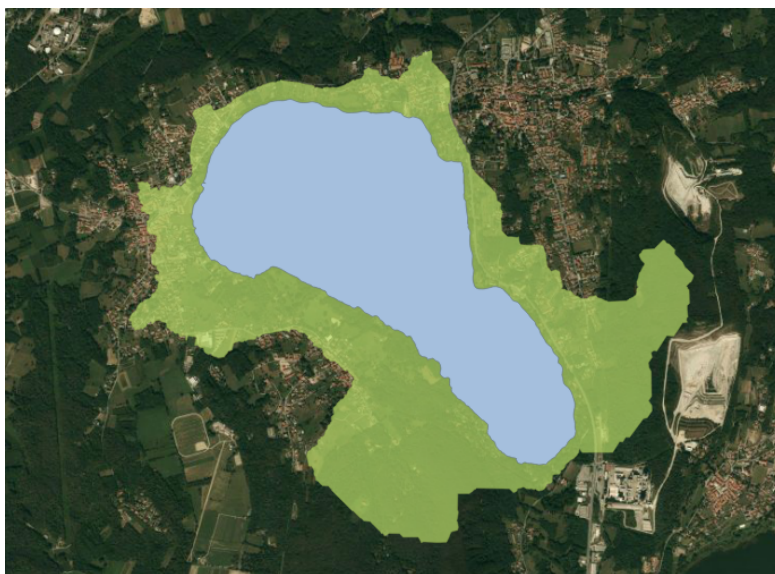


Figura 4.2: *Bacino superficiale del Lago di Monate ottenuto tramite l'analisi di un modello digitale delle quote del terreno (DEM) a risoluzione 5m.*

Tuttavia gli studi effettuati da Barnaba e pubblicati nello “Studio Idrogeologico e Ambientale del Bacino del Lago di Monate (Varese)” evidenziano che, data la stratigrafia dell'area a est del lago, lo spartiacque freatico non coincide con lo spartiacque topografico. Infatti nella zona a sud-est di Travedona gli strati eocenici risultano immergere verso occidente e, quindi, favoriscono il deflusso sotterraneo verso

il Lago di Monate. Dunque l'area del bacino idrologico risulta incrementata di 0,696 km², almeno per quanto riguarda i deflussi sotterranei. In Figura 4.3 viene rappresentato sia il bacino superficiale (in verde) sia l'extra bacino sotterraneo individuato da Barnaba (in rosso).

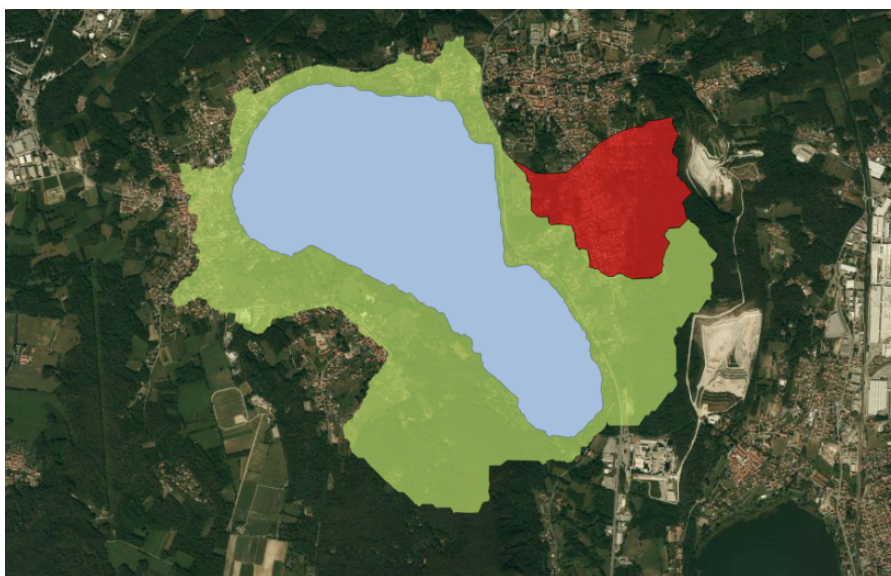


Figura 4.3: *Bacino superficiale del Lago di Monate (in verde) e stima del bacino sotterraneo (in rosso e verde).*

Come è già stato precedentemente evidenziato il Lago di Monate è di grande rilevanza e valore ambientale. Secondo il “Programma di tutela e uso delle acque”, pubblicato da Arpa Lombardia nel 2003, il Lago di Monate è uno dei pochi laghi della regione Lombardia dove è stato riscontrato un buono stato delle acque. Infatti in tale studio si è rilevato che lo Stato Ecologico del Lago (SEL), che viene valutato in base allo stato di trofia delle acque (tenendo quindi conto di: trasparenza, ossigeno ipolimnico, clorofilla e fosforo totale), risulta di classe due su cinque e, quindi, di buon livello. Anche lo Stato Ambientale del Lago (SAL) è stato valutato come “buono” (la scala è suddivisa in: elevato, buono, scadente, pessimo). Si vuole inoltre evidenziare che in tale studio solo il Lago di Monate e il Lago di Ganna hanno avuto una classificazione ambientale così positiva tra i laghi della regione Lombardia.

Un'ulteriore considerazione riguardo lo stato ambientale del lago riguarda la lentezza del ricambio idrico che lo caratterizza. Infatti, secondo gli studi effettuati da Barnaba, il valore di tempo teorico di rinnovo delle acque, che è dato dal rapporto tra il volume del lago (pari a 45 Mm³) e il deflusso medio annuale (assunto pari a 3,45 Mm³), risulta superiore ai 13 anni. Il lento ricambio delle acque è un aspetto importante per quanto riguarda la "salute" del lago, in quanto più è lento il ricambio, maggiore è la possibilità di accumulo del carico inquinante.

Nella zona attualmente coltivata di Cava Faraona si è formato, all'incirca a partire dall'anno 2007, un piccolo lago di raccolta acque. Tale lago si è presumibilmente originato per effetto del drenaggio generato dai lavori di scavo. Il laghetto è dotato di un impianto di pompaggio per il mantenimento della quota del pelo libero, in quanto i contributi idrici generati dal drenaggio operato dal fronte di scavo sarebbero significativi e non esauribili mediante le sole perdite per filtrazione ed evaporazione (Montanari e Castellarin, 2012).

Il lago di cava ha una superficie di circa 6.337 m². Il bacino del lago è stato stimato, come per il bacino superficiale del Lago di Monate, tramite valutazioni sulla superficie topografica dell'area utilizzando un Digital Elevation Model a passo 1 m generato a partire da un rilievo topografico di dettaglio della cava, ed è pari a 282.275 m² (v. Figura 4.4). In Figura 4.5, infine, è rappresentato il rapporto tra le diverse superfici dell'area presa in esame.



Figura 4.4: Bacino del lago di cava ottenuto dall'analisi del DEM a 5m di risoluzione.

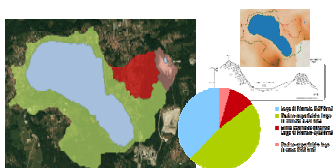


Figura 4.5: I due bacini oggetto di studio e rappresentazione delle diverse aree contribuenti (in alto a dx particolari relativi al DEM utilizzato nello studio ed alla sezione litostratigrafica proposta in Barnaba, 1987).

4.2 Il modello matematico HyMOD

Nel presente studio si è utilizzato il noto modello afflussi-deflussi HyMOD (Boyle et al., 2001). Di seguito verrà illustrata la teoria generale del modello, mentre si rimanda ai capitoli successivi la descrizione approfondita dell'applicazione del modello. Inoltre, per quanto riguarda il bacino del Lago di Monate, verrà proposta una modifica al modello HyMOD atta a descrivere anche i deflussi generati dai bacini sotterranei.

Il Modello HyMOD è di tipo concettuale a parametri concentrati, esso è stato proposto da Boyle et al. (2001) ed appartiene alla classe dei modelli PDM (*Probability Distributed Model*, proposto da Moore e Clark nel 1981). La capacità di ritenzione idrica del terreno è supposta variabile all'interno del bacino idrografico ed è descritta in termini di distribuzione di probabilità attraverso il modello di Pareto. Il principio su cui si basano il modello HyMOD e il PDM è che, a scala di bacino, sia più importante la frequenza con la quale le variabili idrologiche assumono un certo valore, piuttosto che la collocazione spaziale di accadimento della variabile. Naturalmente, affinché tale approccio sia analiticamente trattabile, è necessario adottare rappresentazioni semplificate dei meccanismi che governano la generazione del deflusso. In particolare il modello HyMOD utilizza una distribuzione di probabilità per rappresentare la variabilità spaziale della capacità di immagazzinamento del bacino $C(t)$. Dopo un certo intervallo temporale, nelle aree caratterizzate da una capacità di accumulo maggiore di $C(t)$, la precipitazione netta viene completamente invasata. Mentre nelle zone sature, dove la precipitazione netta eccede la capacità di immagazzinamento, si genera deflusso superficiale. Il deflusso viene successivamente suddiviso, tramite un parametro α , in deflusso superficiale, descritto tramite più serbatoi lineari posti in serie, tutti caratterizzati dalla medesima costante di invaso K_{quick} , e in deflusso profondo, rappresentato da un unico serbatoio lineare con costante di invaso K_{slow} (v. Figura 4.6).

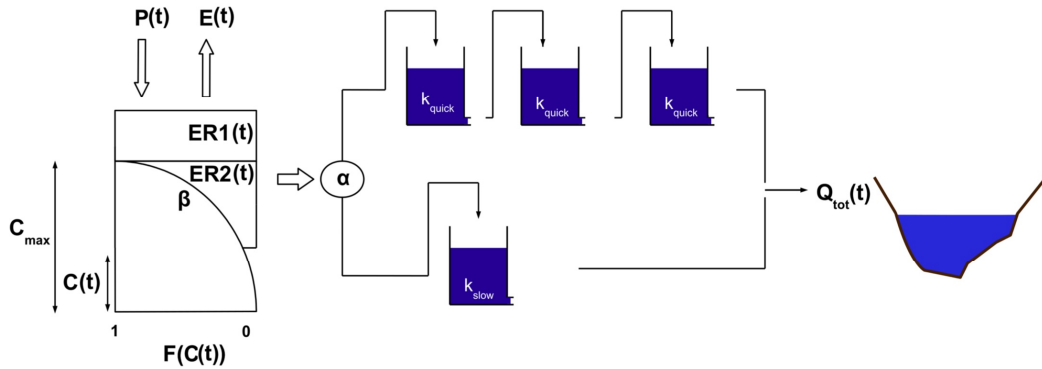


Figura 4.6: Rappresentazione schematica di HyMOD.

Per entrare più in dettaglio nella descrizione del modello, si può immaginare il bacino come un insieme infinito di punti indipendenti tra loro. Ogni punto è caratterizzato da una determinata capacità di ritenzione idrica e da un determinato livello idrico, tale livello verrà incrementato dalla precipitazione al netto dell'evapotraspirazione. Si avrà quindi generazione di deflusso nell'istante in cui il livello idrico supererà la capacità di ritenzione.

Data la variabilità spaziale delle caratteristiche del terreno, si avrà che anche la capacità di ritenzione idrica sarà differente nei diversi punti del bacino. In particolare, HyMOD descrive tale variabilità tramite una distribuzione di Pareto:

$$F(C(t)) = 1 - \left(1 - \frac{C(t)}{C_{max}}\right)^\beta \quad 0 \leq C(t) \leq C_{max} \quad (3.1)$$

Nella quale, per un determinato istante temporale t , $F(C(t))$ rappresenta la frazione di bacino dotata di capacità di ritenzione inferiore o uguale ad un valore assegnato $C(t)$, C_{max} [mm] la massima capacità di ritenzione del terreno, β [/] il grado di variabilità spaziale della capacità di ritenzione. La figura mostra un esempio della funzione $F(C(t))$ per diversi valori di β . Si noti in particolare che nel caso in cui β assuma valore pari a zero, il bacino sarebbe caratterizzato da una capacità di immagazzinamento costante,

mentre per un valore di β pari a uno C varierebbe uniformemente tra 0 e C_{max} (v. Figura 4.7).

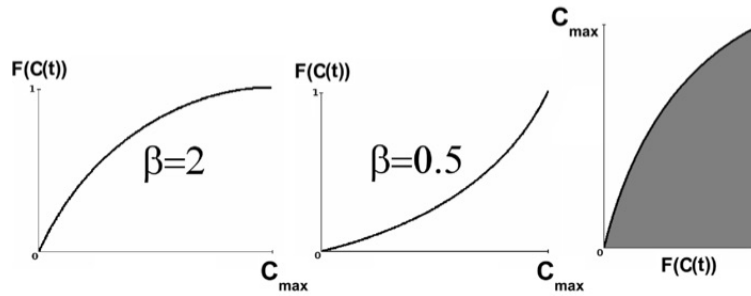


Figura 4.7: Possibili configurazioni della funzione di distribuzione della capacità di immagazzinamento del bacino $F(C(t))$ in funzione del parametro β . La capacità di ritenzione idrica del bacino è rappresentata in grigio.

Il volume idrico invasato nel bacino, per unità di area, vale:

$$W(t) = C(t) - \int_0^{C(t)} F(X(t))dX \quad (3.2)$$

Sviluppando tale integrale si ha:

$$\begin{aligned} \int_0^{C(t)} F(X(t))dX &= \int_0^{C(t)} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{X(t)}{C_{max}} \right]^\beta \right\} dX(t) \\ &= C(t) + \left[\frac{C_{max}}{\beta+1} \left[1 - \frac{X(t)}{C_{max}} \right]^{(\beta+1)} \right]_{(X(t)=0)}^{(X(t)=C(t))} \\ &= C(t) - \frac{C_{max}}{\beta+1} \left[1 - \left(1 - \frac{C(t)}{C_{max}} \right)^{(\beta+1)} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Sostituendo la (3.3) nella (3.2) si ha che il volume idrico $W(t)$ è:

$$W(t) = \frac{C_{max}}{\beta+1} \left[1 - \left(1 - \frac{C(t)}{C_{max}} \right)^{(\beta+1)} \right] \quad (3.4)$$

Attraverso la quale è possibile esprimere $C(t)$ come:

$$C(t) = C_{max} \left[1 - \left(1 - W(t) \frac{\beta+1}{C_{max}} \right)^{\left(\frac{1}{\beta+1} \right)} \right] \quad (3.5)$$

Procedendo per istanti di tempo finiti, ad un generico istante temporale t , noto il volume idrico $W(t)$ è possibile calcolare il volume idrico invasato $C(t)$ mediante l'equazione (3.5). Al passo temporale successivo la capacità di ritenzione vale:

$$C(t+1) = C(t) + P(t) \quad (3.6)$$

Con $C(t+1) = C_{max}$ se $C(t) + P(t) > C_{max}$

Si procede dunque nel calcolo di un primo contributo al deflusso rappresentato dalla eventuale eccedenza rispetto a C_{max} , secondo la relazione:

$$ER1 = \max \{ C(t) + P(t) - C_{max}, 0 \} \quad (3.7)$$

Che rappresenta il volume d'acqua superiore a C_{max} , direttamente destinato al deflusso.

Si calcola poi una seconda quota del deflusso derivante dal volume idrico che non viene trattenuto nel bacino poiché una frazione della superficie di bacino si è saturata. Questo secondo contributo vale:

$$ER2 = [C(t+1) - C(t)] - [W(t+1) - W(t)] \quad (3.8)$$

L'evapotraspirazione effettiva viene calcolata secondo la formula seguente:

$$E_{eff} = \left(1 - \frac{\frac{C_{max}-W(t)}{\beta+1}}{\frac{C_{max}}{\beta}+1} \right) E(t) \quad (3.9)$$

Il volume invasato $W(t+1)$ viene aggiornato sottraendo l'evapotraspirazione effettiva, in accordo alla relazione:

$$W(t+1) = \max \{ W(t) - E_{eff}(t), 0 \} \quad (3.10)$$

Il contributo totale al deflusso, pari a $ER(t) = ER1(t) + ER2(t)$, viene successivamente diviso in due parti: $\alpha ER(t)$ che rappresenta il contributo al deflusso superficiale (deflusso veloce) e $(1-\alpha)ER(t)$ che costituisce il deflusso profondo (deflusso lento). $\alpha ER(t)$ viene quindi propagato attraverso tre serbatoi in serie caratterizzati dal

parametro K_{quick} ; Mentre $(1-\alpha)ER(t)$ viene propagato attraverso un unico serbatoio con parametro K_{slow} .

Il modello HyMOD è quindi caratterizzato da 5 parametri:

- C_{max} [mm] che rappresenta la massima capacità di immagazzinamento idrica nel bacino;
- β [/] che controlla il grado di variabilità spaziale della capacità di immagazzinamento sul bacino;
- α [/] che controlla la separazione tra deflusso veloce e deflusso lento;
- K_{quick} [1/tempo] che rappresenta la costante di proporzionalità fra portata uscente dallo scarico di fondo e volume invasato nella serie di serbatoi che riproducono il deflusso veloce;
- K_{slow} [1/tempo] che rappresenta la costante di proporzionalità fra portata uscente dallo scarico di fondo e volume invasato nel serbatoio che riproduce il deflusso lento;

Tra i modelli afflussi-deflussi HyMOD è considerato un modello con un numero di parametri contenuto. Nonostante ciò è in grado di adeguarsi alle condizioni che si verificano in bacini completamente differenti, fornendo simulazioni soddisfacenti nella riproduzione dei deflussi. Inoltre il contenuto numero di parametri rende l'applicazione e la calibrazione del modello estremamente rapida. Diversi sono gli studi (v. ad es. Montanari, 2006) che hanno utilizzato HyMOD come modello di simulazione afflussi-deflussi.

4.3 Sperimentazione di HyMOD per il calcolo dei deflussi superficiali giornalieri: applicazione al laghetto di cava

Come già precedentemente menzionato, a partire dall'anno 2007 si è formato nella zona di Cava Faraona, per effetto del drenaggio generato dai lavori di scavo, un laghetto di raccolta acque la cui superficie è di circa 6.337 m².

Le portate idriche che interessano il lago sono non trascurabili, infatti esso è dotato di un impianto di pompaggio allo scopo di non far aumentare eccessivamente il pelo libero. Dati i consistenti volumi idrici coinvolti, si è ritenuto necessario effettuare un bilancio idrologico che interessasse il bacino del lago di cava al fine di valutare l'effettivo impatto delle attività di coltivazione sull'area di studio.

È importante inoltre sottolineare che l'attività estrattiva sotto falda è vietata dal Piano Cave della Provincia di Varese (art. 31), dunque è essenziale comprendere se il laghetto è in parte alimentato da acque di falda o meno.

Di seguito si illustra quindi la metodologia che è stata seguita nel presente lavoro, da un lato, per verificare (in assenza di calibrazione) la bontà del modello considerato nel rappresentare il meccanismo di produzione del deflusso superficiale alimentante il laghetto di cava e, dall'altro, per valutare se il lago di cava è, per effetto dei lavori di scavo, in parte alimentato dal drenaggio di flussi profondi non provenienti dal bacino topografico del laghetto di cava.

Come già menzionato presso il lago di cava è presente un impianto di sollevamento che viene azionato ogni 20-40 giorni con lo scopo di mantenere il livello del pelo libero del lago all'incirca costante. I volumi pompati dal lago di cava sono sempre stati monitorati e registrati, in questo modo è possibile quantificare i contributi idrici in arrivo al lago per ogni intervallo di tempo che intercorre tra una lettura del volume sollevato e la successiva.

4.3.1 Modello proposto

Allo scopo di valutare la provenienza dei volumi idrici presenti nel lago di cava si è quindi impostato un bilancio idrologico, derivante esclusivamente dai contributi meteorici, che potesse essere confrontato con i volumi idrici pompati dal lago. Lo scopo di tale confronto è di valutare se il lago è principalmente alimentato da deflussi meteorici o se è presente un contributo idrico derivante dall'intercettazione di deflussi profondi per effetto dei lavori di coltivazione.

Il modello predisposto è spiegato concettualmente nella schematizzazione in Figura 4.8.

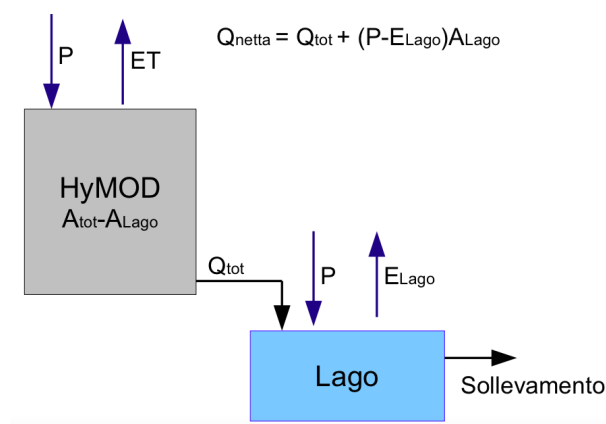


Figura 4.8: Rappresentazione schematica del modello proposto per il bilancio idrologico del bacino del laghetto di cava.

Il modello proposto è composto da due blocchi. Il primo blocco simula il deflusso su tutto il bacino del lago di cava eccetto che sull'area occupata dal lago stesso, per un totale quindi di 282.275 m². Per simulare il deflusso è stato scelto il modello di trasformazione afflussi-deflussi HyMOD (Boyle et al., 2001), precedentemente descritto. Il secondo blocco interessa esclusivamente il lago di cava e ha come input le precipitazioni in arrivo direttamente sulla superficie lacustre, l'evaporazione che interessa il lago e il deflusso simulato sul bacino tramite HyMOD.

Il primo blocco, che riguarda il bacino prevede come input le precipitazioni cumulate giornaliere e l'evapotraspirato potenziale giornaliero (si rimanda per un

approfondimento riguardo la stima di quest'ultimo valore al precedente capitolo riguardo il calcolo dell'evapotraspirato). Il modello proposto prevede che tutto il deflusso simulato mediante HyMOD arrivi al lago di cava, diventando quindi uno degli input del secondo blocco.

Il secondo blocco, che interessa il lago di cava, ha quindi come input: il deflusso simulato, la precipitazione diretta sul lago e l'evaporazione dal lago. Il modello proposto prevede che il pelo libero del lago sia costante, dunque tutto ciò che eccede il pelo libero viene considerato "portata netta". Tale portata rappresenta il volume idrico in eccesso rispetto al pelo libero, cioè il volume che dovrà essere sollevato ed allontanato. La portata netta è quindi l'output del modello ed è definita dalla relazione:

$$Q_{\text{netta}} = Q_{\text{tot}} + (P - E_{\text{lago}})A_{\text{lago}} \quad (3.11)$$

Dove: Q_{tot} è il deflusso simulato sul bacino tramite HyMOD; P è la precipitazione cumulata giornaliera che, avendo come dimensione un'altezza idrica [mm], deve essere moltiplicata per la superficie del lago; E_{lago} è l'evaporazione dal lago, anch'essa ha come dimensione un'altezza e dunque viene moltiplicata per la superficie lacustre.

Come già precedentemente menzionato i valori dei volumi sollevati dal lago di cava sono stati registrati; Dunque, mediante un confronto tra la portata netta cumulata e il volume sollevato, è possibile valutare se i volumi idrici pompati derivano dai deflussi meteorici o se tali volumi derivano anche dal drenaggio di flussi profondi. In altre parole, se i volumi di pompaggio eccedono il valore cumulato di portata netta allora è plausibile che il lago sia alimentato da volumi idrici che non derivano esclusivamente da contributi meteorici.

4.3.2 Applicazione

Nel presente lavoro il bilancio idrologico del bacino del lago di cava è stato effettuato sul periodo che va da ottobre 2013 a ottobre 2014. Si ricorda che il fine di tale bilancio è di comprendere la validità del modello matematico di trasformazione afflussi-deflussi

scelto per la rappresentazione del meccanismo di produzione dei deflussi superficiali nell'area in esame e, indirettamente, verificare l'ipotesi che i volumi idrici che alimentano il lago di cava siano prevalentemente acque di origine meteorica piovute nell'area di cava. Le verifiche sono state sviluppate confrontando i volumi di deflusso superficiale simulati dal modello con i volumi sollevati meccanicamente dal lago che, come si è già ricordato, deve essere drenato artificialmente per mantenere la quota del pelo libero entro i limiti desiderati (v. Tabella 4.1).

Data	Volume totale scaricato alla data della lettura [m³]
28/01/14	55.976
25/02/14	114.329
25/03/14	146.938
30/04/14	159.760
15/05/14	175.258
19/06/14	192.495
01/07/14	196.570
10/07/14	212.832
07/08/14	256.678
16/09/14	285.504
28/10/14	315.670

Tabella 4.1: Volumi idrici emunti dal laghetto di cava nel periodo di monitoraggio.

Si ricorda inoltre che il modello proposto utilizza HyMOD, dunque è caratterizzato dalla presenza di 5 parametri: C_{max} , β , α , K_{slow} , K_{quick} .

Poiché i volumi di pompaggio monitorati sono da raffrontare con i risultati ottenuti dalla simulazione, essi non possono essere utilizzati come variabili su cui basare il processo di calibrazione. Pertanto è stato impostato un processo di parametrizzazione alternativo, basato sulla frequenza di non superamento di ogni parametro che caratterizza il modello, costruita sulla base di dati di letteratura e su tecniche di ricampionamento delle variabili casuali note in letteratura come tecniche Monte Carlo (v. Soligno, 2015). Utilizzando la base dati predisposta nell'ambito del progetto MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment, Duan et al., 2006) sono stati considerati 14 piccoli bacini strumentati, situati in aree geografiche diverse rispetto a quella in esame, che sono

monitorati da diversi anni. Su ognuno di questi bacini HyMOD era stato ottimizzato secondo la funzione obiettivo di Nash & Sutcliffe fornendo quindi, per ognuno dei 14 bacini, un set di parametri calibrati. Successivamente si è provveduto a costruire, per ognuno dei 5 parametri, l'andamento della frequenza di non superamento. Tramite il programma di calcolo R si è quindi impostato un algoritmo che estraesse, con probabilità uniforme, un valore di frequenza di non superamento a cui corrisponde un determinato valore assunto dal parametro. Naturalmente tale algoritmo attua ad ogni simulazione il procedimento appena descritto 5 volte, una per ogni parametro. L'algoritmo ripete quindi questo processo un numero molto elevato di volte, nel caso in esame sono state effettuate 10.000 simulazioni, restituendo un numero di output pari al numero di simulazioni effettuate.

Quindi nel caso di 10.000 simulazioni, si ha come risultato 10.000 serie di portate naturali simulate, ognuna ottenuta con un diverso set di parametri. Si noti che i 10.000 valori assunti da Cmax nelle altrettante simulazioni avranno lo stesso andamento di frequenza di non superamento di quello dei 14 valori di Cmax di partenza, poiché è proprio tramite tale distribuzione che sono stati pescati i diversi valori di Cmax. Ovviamente questa considerazione vale anche per gli altri parametri del modello.

Ad ogni simulazione corrisponde quindi un output, nel caso in esame si tratta della portata netta cumulata a passo giornaliero. Avendo effettuato 10.000 simulazioni si hanno quindi a disposizione 10.000 portate nette cumulate a passo giornaliero. Per individuare i valori più probabili è stato implementato un algoritmo che procede nel calcolo dei percentili. Ad ogni passo temporale si calcola la media e i percentili al: 5%, 25%, 75% e 95%.

Per comprendere meglio tale procedimento si pensi all'output del modello come ad una matrice in cui ogni colonna corrisponde ad una simulazione ed ogni riga corrisponde ad un giorno (se per esempio si attuano 10.000 simulazioni per un anno di dati, la matrice sarà di dimensioni 365 X 10.000). I percentili vengono quindi calcolati riga per riga,

ovvero giorno per giorno, sulla base di tutte le simulazioni (ovvero tutte le colonne) riferite al medesimo istante temporale.

Il risultato finale del modello non è quindi una curva univoca, ma si avrà una curva che esprime la media dei risultati, a cui è associato un intervallo di incertezza esprimibile tramite lo spazio compreso fra le curve dei percentili 25% e 75% e fra le curve dei percentili 5% e 95%. Si veda dunque la Figura 4.9 che esprime il risultato della simulazione.

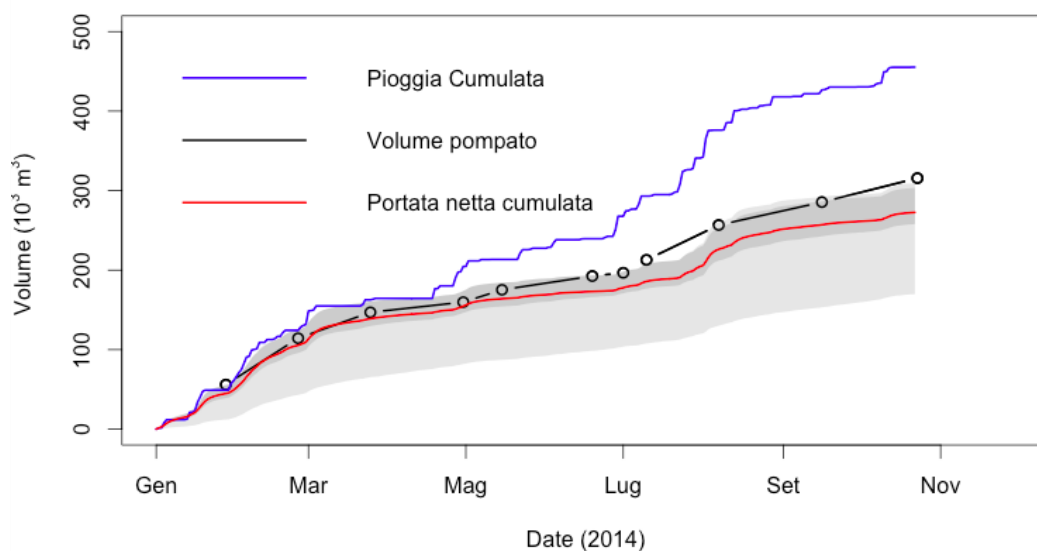


Figura 4.9: Simulazione della portata netta cumulata in arrivo al lago di cava. Dove: la linea rossa è il valore medio delle simulazioni, la banda grigio scuro è l'area fra i percentili 25% e 75%, la banda grigio chiaro è l'area fra i percentili 5% e 95%. Sono inoltre rappresentati i volumi di pompaggio cumulati e la pioggia cumulata.

A valle della sperimentazione, data la vicinanza tra la cumulata dei volumi pompati dal lago e la cumulata media dei deflussi naturali o la fascia grigio scuro delle cumulate maggiormente frequenti si può affermare che:

- il modello matematico HyMOD, applicato in assenza di calibrazione, appare essere uno schema di calcolo idoneo a valutare i deflussi superficiali a base giornaliera per l'area in esame;
- l'applicazione del modello fornisce risultati in buon accordo con l'ipotesi che i volumi idrici meccanicamente sollevati dal laghetto di cava abbiano origine prevalentemente dovuta al drenaggio delle acque meteoriche sui piazzali di cava.

4.4 Modello numerico per il bilancio idrologico del Lago di Monate a scala giornaliera

Il modello per la stima del deflusso sul bacino del Lago di Monate è stato predisposto sulla base delle conoscenze geologiche ed idrogeologiche riguardanti il bacino. Come già evidenziato nell'inquadramento dell'area di studio, analisi pregresse, in particolare lo "Studio Idrogeologico e Ambientale del Bacino del Lago di Monate (Varese)" (Barnaba, 1987), hanno evidenziato che lo spartiacque freatico non coincide con lo spartiacque topografico. Infatti, nella zona a sud-est di Travedona, gli strati eocenici risultano immergere verso occidente, favorendo quindi il deflusso sotterraneo verso il Lago di Monate.

Il modello che viene proposto in questo contesto deve quindi permettere di valutare sia il deflusso superficiale generato dal bacino topografico che i deflussi sotterranei, provenienti dall'area sottesa dal bacino topografico, ma anche dalla porzione di bacino sotterraneo localizzata al di là dello spartiacque topografico avente il substrato roccioso immergente verso ovest, ovvero in direzione del lago. In Figura 4.10 l'area in verde corrisponde al bacino superficiale del lago di Monate, in questa zona sia il deflusso superficiale che quello sotterraneo alimentano il Lago di Monate; l'area in rosso rappresenta invece l'extrabacino sotterraneo individuato in base a studi pregressi (v. ad es. Barnaba, 1987). Detta zona si trova al di là dello spartiacque topografico, dunque il deflusso superficiale che si genera in quest'area non raggiunge il Lago di Monate. Al contrario, data la conformazione degli strati del sottosuolo, è plausibile che la stessa

zona generi un deflusso profondo che contribuisca all'alimentazione del Lago di Monate.

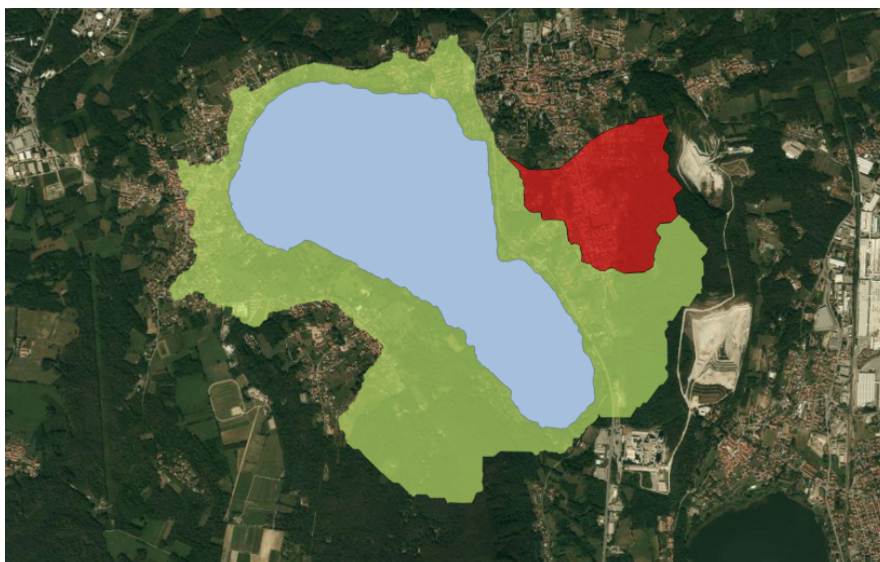


Figura 4.10: Lago di Monate (in azzurro), bacino superficiale (in verde), bacino sotterraneo (area in rosso e in verde).

4.4.1 Il modello HyMOD-6

Il modello HyMOD precedentemente illustrato è stato modificato in questo contesto per poter meglio rappresentare le caratteristiche peculiari del bacino imbrifero del Lago di Monate. In particolare, nel modello originale è stata introdotta una rappresentazione semplificata del deflusso profondo attraverso lo schema del serbatoio lineare e, dunque, attraverso l'inserimento di un ulteriore parametro, K_{sott} . La portata uscente da tale serbatoio, modulata tramite il parametro K_{sott} , rappresenta il deflusso sotterraneo. Pertanto, in questo caso, il volume idrico immagazzinato dal bacino non diminuisce per il solo contributo evapotraspirativo (come avviene nel modello HyMOD originale), ma anche per effetto del deflusso sotterraneo. Il modello messo a punto, in ragione del

numero di parametri complessivo (c.d. 6: C_{max} , β , α , K_{quick} , K_{slow} , K_{sott}) è stato denominato HyMOD-6.

Per una maggiore comprensione della modifica introdotta si veda la Figura 4.11 dove vengono rappresentati schematicamente HyMOD ed HyMOD-6.

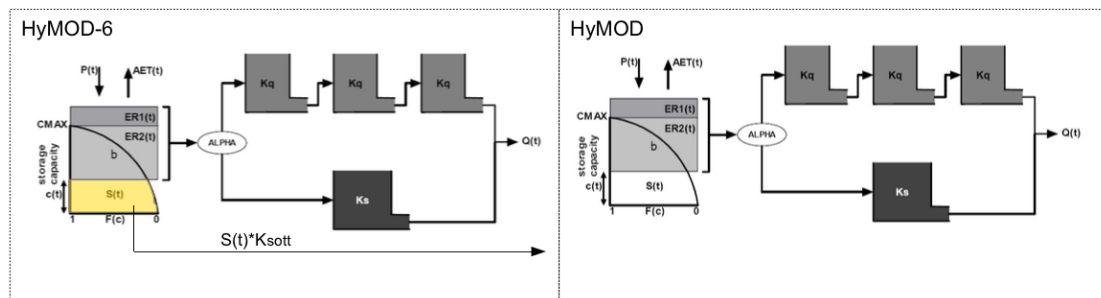


Figura 4.11: Rappresentazione schematica di HyMOD-6 e di HyMOD.

4.4.2 Modello complessivo di bilancio idrologico per il Lago di Monate

Utilizzando lo schema concettuale denominato HyMOD-6 si è costruito il modello matematico complessivo per la simulazione in continuo a passo temporale giornaliero del ciclo idrologico del Lago di Monate. Detto modello complessivo è schematizzato in Figura 4.12.

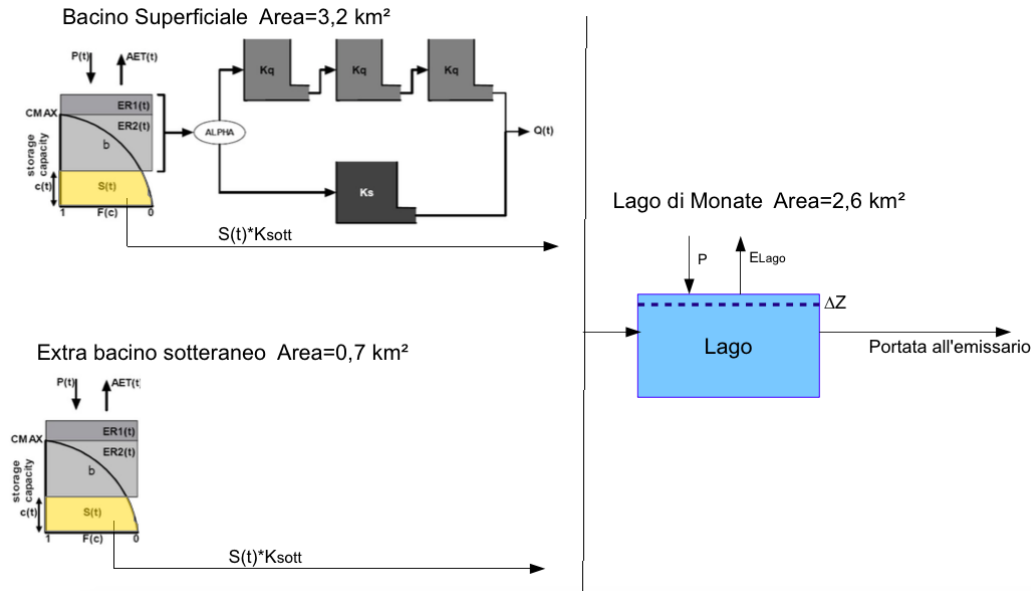


Figura 4.12: Rappresentazione schematica del modello proposto per il bilancio idrologico del bacino del Lago di Monate

In generale il modello prevede come dati in input:

- la precipitazione cumulata giornaliera;
- l'evapotraspirato potenziale cumulato giornaliero;
- l'evaporazione dal lago cumulata giornaliera;
- il livello del lago nell'istante iniziale della simulazione.

L'output del modello è la simulazione dei livelli del lago e della portata del torrente a passo giornaliero.

Volendo presentare i blocchi di calcolo in maggior dettaglio si può mettere in evidenza come un primo blocco riguardi il bacino topografico del Lago di Monate, escluso il lago stesso. La superficie di tale bacino è ricavata esclusivamente mediante considerazioni riguardo le quote del terreno, considerando quindi la linea di spartiacque topografico. Pertanto il primo blocco genera sia deflusso superficiale che deflusso sotterraneo tramite il modello HyMOD-6 precedentemente descritto. Il secondo blocco del modello riguarda l'area che in Figura 4.10 è evidenziata in rosso e che nel presente elaborato

viene denominata “extrabacino sotterraneo”. Questa zona contribuisce solo dal punto di vista sotterraneo al deflusso verso il Lago di Monate, dal momento che tale area è situata al di là dello spartiacque topografico e quindi il deflusso superficiale che si genera in questa zona non alimenta il Lago di Monate. Come nel primo blocco del modello, anche in questo caso è stato utilizzato HyMOD-6 per la stima del deflusso profondo, escludendo naturalmente il contributo superficiale. Il terzo blocco del modello interessa il Lago di Monate, avente superficie di 2,6 km². Date le consistenti dimensioni del lago si è ritenuto di non poter procedere analogamente a quanto si era fatto nella predisposizione del modello per il bacino del lago di cava. Infatti, nel modello proposto per il lago di cava, era stata introdotta l'ipotesi di pelo libero costante e, grazie a tale ipotesi, la stima dei volumi idrici si riduceva ad un elementare bilancio di massa. Nel caso del Lago di Monate si è invece ritenuto eccessivamente semplificativo assumere tale ipotesi, pertanto la portata del torrente Acquanegra è stata stimata mediante la scala di deflusso che relaziona biunivocamente portate e livelli.

Il primo e il secondo blocco del modello proposto hanno come input la pioggia e l'evapotraspirato potenziale e come output i deflussi simulati tramite il modello HyMOD-6. Mentre il terzo blocco, costituito dal Lago di Monate, ha come input:

- il deflusso superficiale ed il deflusso sotterraneo che interessano il bacino superficiale, simulati mediante HyMOD-6;
- il deflusso sotterraneo dell'extrabacino sotterraneo, anch'esso simulato mediante HyMOD-6;
- la pioggia e l'evaporazione che interessano direttamente il lago.

Pertanto date tali variabili come input del terzo blocco, la variazione del pelo libero viene stimata tramite la seguente relazione:

$$\Delta Z = \frac{Q_{tot} \cdot \Delta t}{A_{lago}} + (P - E) \quad (3.12)$$

Dove ΔZ è la variazione del livello del lago, A_{lago} è la superficie lacustre; Q_{tot} è il deflusso complessivo generato tramite HyMOD-6 nel bacino superficiale e nell'extrabacino sotterraneo; Δt è il passo di calcolo utilizzato nella simulazione; P ed E sono rispettivamente la pioggia e l'evaporazione dal lago che hanno le dimensioni di un'altezza idrica.

È quindi possibile stimare il livello del lago ad ogni passo di calcolo tramite la relazione:

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + \Delta Z \quad (3.13)$$

Conoscendo dunque il livello del lago ad un dato istante temporale è possibile stimare la portata del Torrente Acquanegra tramite la scala di deflusso che relaziona il livello del lago con la portata del torrente.

Pertanto la portata dell'emissario ad un dato istante è pari a:

$$Q_{torrente}(t + \Delta t) = a(Z(t + \Delta t) - Z_0)^b \quad (3.14)$$

Dove a e b sono i coefficienti della scala di deflusso; Z_0 è il livello di riferimento, mentre $Z(t+\Delta t)$ è il livello del lago all'istante $t+\Delta t$ e $Q_{torrente}(t+\Delta t)$ è la portata all'emissario nel medesimo istante (riguardo a maggiori dettagli scala di deflusso utilizzata nello studio si faccia riferimento al rapporto tecnico allegato in Appendice).

Naturalmente ad ogni passo temporale la portata in uscita del lago causerà una diminuzione del volume idrico presente nel lago stesso. Dunque nella simulazione, al termine di ogni passo di calcolo, sarà aggiornato il livello del pelo libero del lago tramite la seguente relazione:

$$Z(t + \Delta t)_{aggiornato} = Z(t + \Delta t) - \left(\frac{Q_{torrente} \cdot \Delta t}{A_{lago}} \right) \quad (3.15)$$

4.4.3 Applicazione del modello

Il modello proposto per il bilancio idrologico del bacino del Lago di Monate presenta un set di 6 parametri: C_{max} , β , α , K_{slow} , K_{quick} , K_{sott} . Dove K_{sott} è un parametro introdotto nell'ambito del presente lavoro per la descrizione dei deflussi sotterranei, mentre gli altri 5 parametri sono quelli caratteristici del modello di trasformazione afflussi-deflussi HyMOD (Boyle et al., 2001).

Col fine di individuare per il bacino in esame il set di parametri ottimale è stata utilizzata una procedura di calibrazione automatica, utilizzando come funzione obbiettivo l'Efficienza di Nash e Sutcliffe (1970):

$$F(\theta) = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [x(t) - \hat{x}(t)]^2}{\sum_{t=1}^N [x(t) - \bar{x}]^2} \quad (3.16)$$

Dove: θ è il vettore dei parametri del modello, N corrisponde al numero di dati simulati, x indica la variabile osservata e $\hat{x}$ quella simulata, mentre $\bar{x}$ indica il valore medio dei dati osservati.

Il valore dell'Efficienza di Nash e Sutcliffe (NSE) varia tra $-\infty$ e 1: Se i valori simulati si adattano perfettamente ai dati osservati allora si ha un'efficienza pari a 1, mentre nel caso in cui le predizioni del modello corrispondano alla media dei dati osservati allora NSE assume un valore pari a zero. In generale maggiore è NSE migliore è l'efficacia del modello nell'adattarsi al caso reale.

Dunque nella procedura di calibrazione si è ricercato, tramite un algoritmo indiretto, il set di parametri che massimizzasse NSE valutato sulla base delle osservazioni disponibili. Per il calcolo di NSE si è fatto riferimento alle osservazioni di livello medio giornaliero del lago, ed ai corrispondenti valori simulati dal modello. La misurazione dei livelli del Lago di Monate viene effettuata sia in continuo, mediante data logger, sia manualmente con cadenza mensile, mediante l'asta idrometrica installata sulla sponda

nord del lago. Tuttavia i livelli rilevati con le due metodologie di rilevamento risultano discordanti, infatti in generale i livelli monitorati manualmente risultano maggiori rispetto ai livelli derivanti da data logger (v. Figura 4.13 e Appendice). Ne consegue che nella calibrazione del modello si è ritenuto opportuno utilizzare i dati di livello monitorati in continuo solo di alcuni mesi dell'anno di monitoraggio, scartando quindi i periodi in cui i dati monitorati dal data logger sono stati considerati incoerenti rispetto a quelli monitorati mediante asta idrometrica.

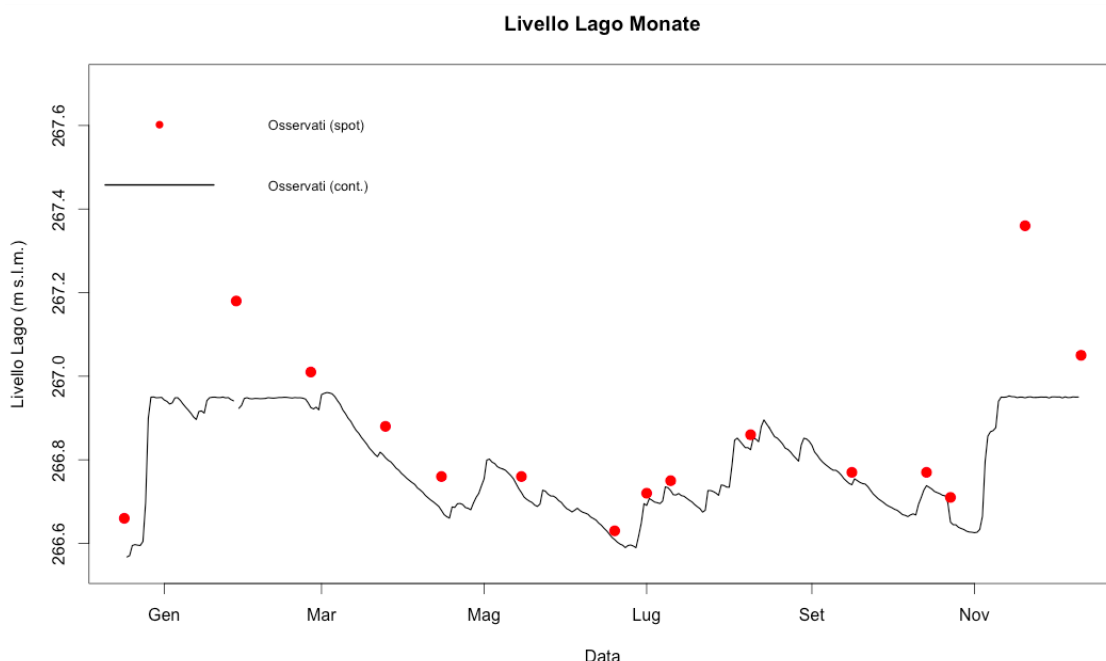


Figura 4.13: Livelli monitorati in continuo (data logger) e mensilmente (asta idrometrica).

Analizzando il grafico di Figura 4.13 si osserva come i livelli siano maggiormente discordanti quando i valori sono elevati. Inoltre, per quanto riguarda i livelli monitorati in continuo, sembrerebbe che lo strumento non sia in grado di rilevare correttamente i livelli che superano i 266,4 m s.l.m. Infatti, se si osserva il periodo di gennaio e febbraio 2014, si nota un andamento quasi costante del livello, tale problematica si ripete anche nel periodo da metà novembre in poi.

Date le considerazioni sulla scarsa affidabilità del monitoraggio in continuo, la calibrazione è stata effettuata scartando i periodi in cui il data logger ha rilevato livelli del lago eccessivamente discordanti dai dati rilevati mediante l'asta idrometrica.

La procedura di calibrazione si è dunque basata sui dati di livello osservati nei seguenti periodi: Tra il 25/02/2014 e il 15/04/2014 e fra il 7/10/2014 e il 10/22/2014. Sono stati quindi scartati i periodi in cui il monitoraggio del data logger è stato considerato anomalo (gennaio-febbraio 2014, novembre-dicembre 2014). Inoltre non è stato considerato nella calibrazione il periodo fra metà aprile e metà luglio, in quanto si ritiene plausibile che in tale periodo i livelli del lago siano stati alterati da manovre effettuate sulle paratoie localizzate in prossimità del punto di misura.

Al termine della procedura di calibrazione si è ottenuto il set di parametri ottimali, relativamente alla riproduzione dei livelli del lago nei periodi considerati, indicati in Tabella 4.2, cui corrisponde un'efficienza di Nash di circa 0.70.

C_{max} [mm]	β [/]	α [/]	K_{slow} [d⁻¹]	K_{quick} [d⁻¹]	K_{sott} [d⁻¹]
450,00	1,19	0,45	0,15	0,10	0,01

Tabella 4.2: Set di parametri ottenuto dalla calibrazione.

I parametri identificati non rappresentano un set conclusivo. Approfondimenti ulteriori sono infatti necessari anche in ragione della limitata disponibilità di osservazioni sulla base delle quali è stato possibile calibrare il modello. L'andamento dei livelli del lago simulati tramite il modello proposto, utilizzando il set di parametri in Tabella 4.2, è riportato in Figura 4.14.

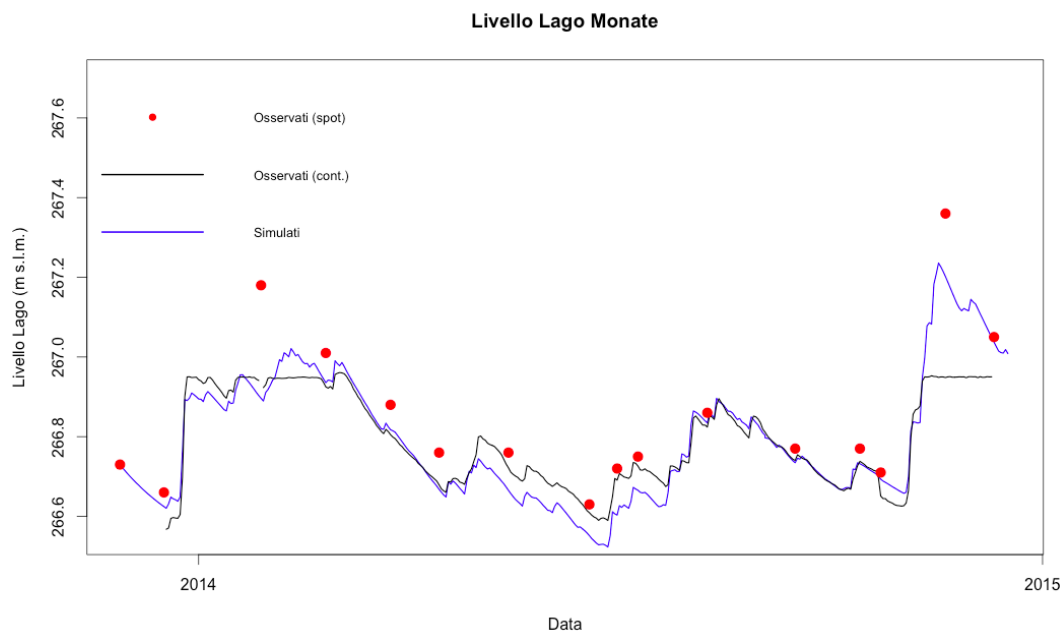


Figura 4.14: Simulazione dei livelli del Lago di Monate dal 28/11/2013 al 17/12/2014 (linea blu); Valori osservati in continuo dei livelli mediante data logger (linea nera) e valori rilevati manualmente mediante asta idrometrica (punti rossi).

La portata all'emissario è stata quindi simulata mediante la scala di deflusso descritta in Appendice, a partire dai livelli simulati dal modello proposto nell'ambito del presente elaborato ed è rappresentata in Figura 4.15 a confronto con la portata desumibile sulla base della stessa scala di deflusso utilizzando le osservazioni di livello.

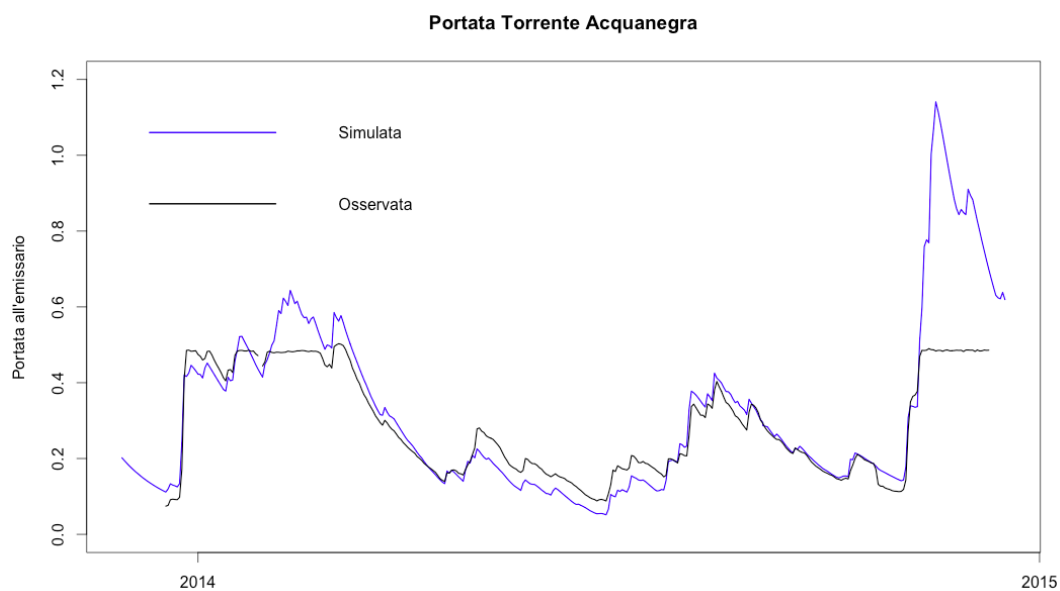


Figura 4.15: Portata simulata del Torrente Acquanegra [m^3/s] e portata osservata (calcolata mediante la scala di deflusso a partire dai livelli del lago monitorati tramite data logger).

5. Considerazioni conclusive sui risultati delle simulazioni e sul bilancio idrologico preliminare del Lago di Monate

5.1 Discussione del grado di attendibilità delle simulazioni effettuate

I diagrammi riportati in chiusura del precedente capitolo 3 (c.d. Figure 4.14 e 4.15) hanno messo in evidenza che nel periodo tra i primi di maggio e metà luglio la i livelli giornalieri del Lago di Monate e delle portata al T. Acquanegra simulati attraverso il modello proposto sottostimino le corrispondenti variabili osservate. Tuttavia non è certo che tale sottostima sia dovuta a problematiche legate alla simulazione. Essa potrebbe infatti essere causata da interventi esterni che hanno influenzato i livelli del lago. In prossimità dei punti di misura dei livelli, sono posizionate delle paratie (v. Figura 5.2) di cui non si conoscono le modalità di manovra. Tale problematica è stata più volte sollevata dagli addetti al monitoraggio (si vedano a tal proposito le relazioni di prodotte per conto di Holcim S.p.A. nell'ambito del piano di monitoraggio).

Si vuole inoltre far notare che i risultati della simulazione nel periodo di gennaio e febbraio 2014 e nel periodo da novembre 2014 in poi, confermano l'ipotesi di un mal funzionamento della strumentazione per rilevare la quota del pelo libero del lago in continuo (v. Figura 5.3). Detta tesi è avvalorata dal fatto che alcuni cittadini, che hanno le loro abitazioni vicino alle sponde del Lago di Monate, hanno segnalato problemi di allagamenti localizzati a seguito dell'innalzamento delle acque del lago nel periodo di metà novembre. Alla luce delle segnalazioni effettuate dalla popolazione in quei giorni e dal risultato della simulazione pare quindi altamente probabile che il data logger abbia avuto dei malfunzionamenti nel rilevare i livelli del lago nei periodi segnalati.

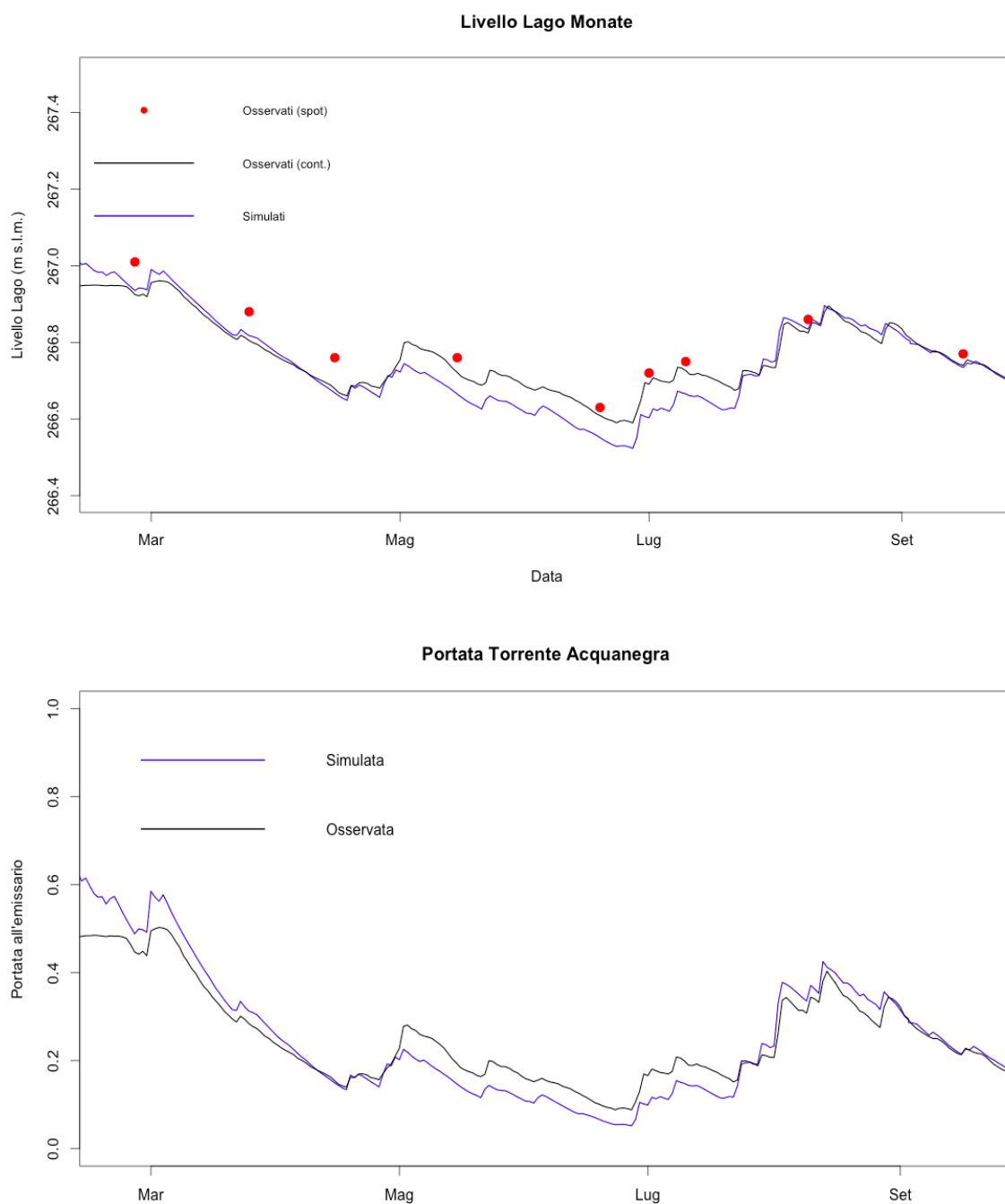


Figura 5.1: Periodo di sottostima (tra maggio e luglio 2014) della simulazione rispetto ai livelli osservati e conseguente sottostima delle portate simulate per l'emissario.



Figura 5.2: Paratie localizzate in prossimità dei punti di misura del livello

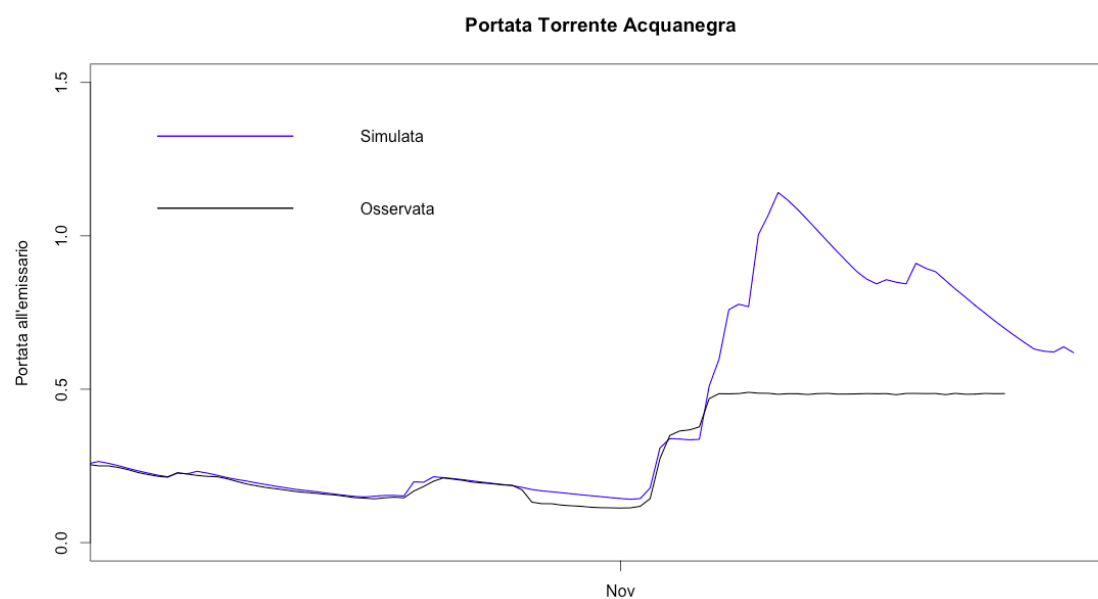


Figura 5.3: Evento di piena del Torrente Acquanegra per la quale la portata simulata ha superato il valore di $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2 Considerazioni conclusive: valutazioni quantitative preliminari sul bilancio idrologico del Lago di Monate

La Figura 5.4 propone una rappresentazione della portata complessiva del Torrente Acquanegra simulata attraverso il modello messo a punto nello studio (tratto blu),

confrontata con i contributi simulati relativamente ai deflussi superficiali in arrivo al lago (tratto rosso) ed a quelli simulati per il contributo del sotterraneo (tratto nero).

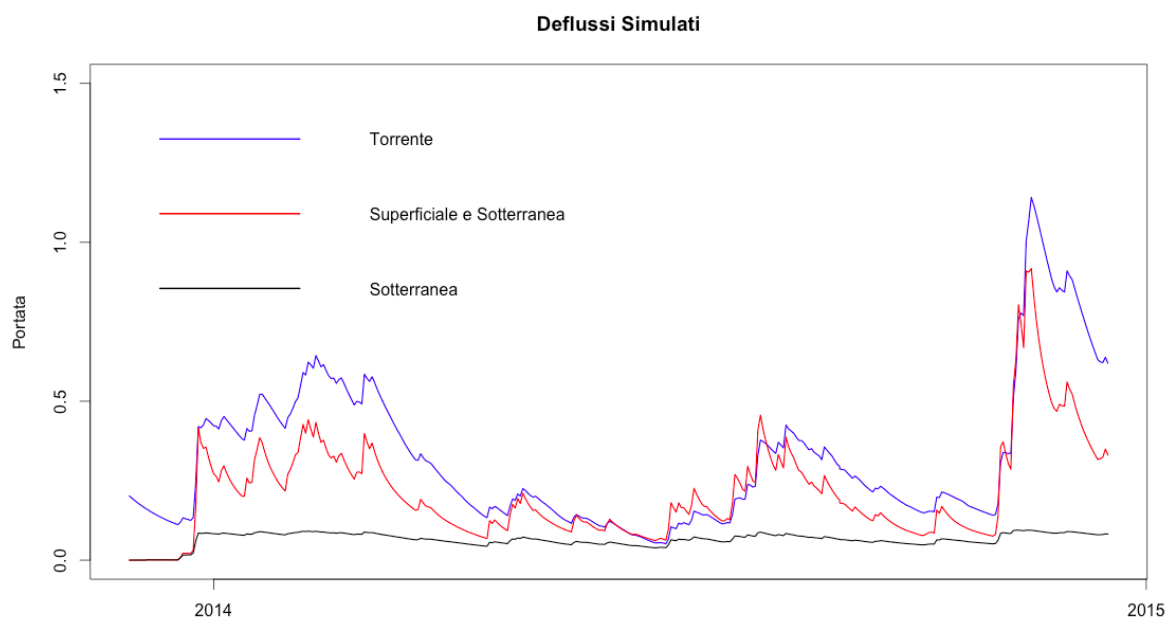


Figura 5.4: Simulazione dei deflussi tramite il modello HyMOD-6 sul bacino (linea rossa), simulazione dei deflussi sotterranei e della portata dell'emissario.

Dal grafico si nota che il modello simula i deflussi rispettando la fisica dei processi idrologici. Infatti il deflusso superficiale presenta una maggior variabilità di quello sotterraneo poiché è maggiormente correlato all'andamento temporale delle precipitazioni, ma anche di quello complessivo che risente dell'effetto di laminazione dei colmi di portata esercitato dal Lago di Monate. I deflussi sotterranei sono caratterizzati da una variabilità molto inferiore e per essi non si riscontrano brusche variazioni in occasione degli eventi di precipitazione.

In Tabella 5.1 si riportano i valori cumulati sull'intero periodo di riferimento di altezza di precipitazione, evaporazione, evapotraspirazione potenziale ed effettiva ottenuta dal modello. Gli stessi valori sono presentati in Tabella 5.2 a scala mensile.

	Pioggia	EVAP	ETP	ETE
Cumulato [mm]	2.594	1.027	816	333

Tabella 5.1: Periodo dicembre 2013 - novembre 2014, valori cumulati di precipitazione (Pioggia), evaporazione dal Lago di Monate (EVAP), evapotraspirazione potenziale (ETP), evapotraspirazione effettiva (ETE).

Data	Pioggia	ETP	ETE	Evap.lago
dicembre	327.6	10.64903	2.225541	15.77026
gennaio	216.0	14.50387	9.155004	18.71060
febbraio	250.4	20.66356	13.935833	26.88561
marzo	116.2	68.74263	34.259853	86.69192
aprile	142.4	95.30425	30.744071	120.12277
maggio	81.2	128.97967	46.818042	158.78916
giugno	142.6	133.18954	37.183362	165.85259
luglio	258.8	121.43076	53.355699	153.07396
agosto	273.0	102.87132	57.702066	130.78672
settembre	43.6	70.58796	26.428312	89.20724
ottobre	88.8	35.48690	12.192955	43.40060
novembre	653.8	13.34725	9.264029	17.71036
Tot.annuale	2594.4	815.75673	333.264769	1027.00178

Tabella 5.2: Periodo dicembre 2013 - novembre 2014, valori cumulati mensili in mm di precipitazione (Pioggia), evapotraspirazione potenziale (ETP), evapotraspirazione effettiva (ETE), evaporazione dal Lago di Monate (Evap.Lago).

Sulla scorta delle simulazioni condotte si riporta in Tabella 5.2 la sintesi delle simulazioni in termini di deflussi del T. Acquanegra per il periodo gennaio novembre 2014. In particolare la tabella consente di confrontare i valori osservati del deflusso (espresso in termini di volumi idrici complessivi e di portata media) con quelli simulati evidenziando anche il contributo superficiale ed il contributo sotterraneo del solo extra-bacino (area rossa in Figura 4.10). A conferma della bontà delle simulazioni è interessante sottolineare come la precipitazione cumulata complessiva sia quantificabile nel periodo di interesse per il bacino del Lago di Monate in circa 2660 mm/a (v. Tabella 5.1) e come il deflusso medio annuo fosse stimato in Barnaba (1987) pari a 45.9, 109.3

e 240.3 l/s per anni piovosità scarsa (c.d. 1089 mm/anno), media (c.d. 1520 mm/anno) e abbondante (c.d. 2146 mm/a), in quest'ordine.

	T. Acquanegra osservazioni	T. Acquanegra simulazioni	Contributo superficiale	Contributo sott. da extra-bacino
Volumi [Mm³]	8.01	8.76	7.76	0.34
Deflussi [l/s]	254.1	277.9	246.2	10.7

Tabella 5.2: Valori cumulati e medi su un periodo di 11 mesi di: Portata all'emissario osservata e simulata, deflusso sotterraneo e deflusso sotterraneo+superficiale (generato dal modello HyMOD-6). Periodo da gennaio a novembre 2014.

6. Conclusioni

Le analisi effettuate nell'ambito del primo anno di attività del Piano di Monitoraggio hanno riguardato molteplici elementi di qualità ambientale. Questi hanno spaziato dall'impatto a breve termine delle attività di cava sulla qualità dell'aria ed in termini di vibrazioni indotte, alle analisi a lungo termine volte a stimare l'impatto delle attività stesse sulla qualità delle acque sotterranee e lacustri e sul bilancio idrologico del Lago di Monate.

E' rilevante osservare che il monitoraggio fino ad ora condotto non ha evidenziato elementi di criticità ulteriori rispetto a quanto preliminarmente stimato. Questa evidenza conferma l'attendibilità della pianificazione effettuata, nonché l'efficienza e l'organizzazione del Piano di Monitoraggio.

E' importante tuttavia sottolineare che le analisi effettuate hanno messo in luce considerevoli incertezze nella stima del bilancio idrologico sia del Lago di Monate che del Lago di Cava. Dette incertezze hanno messo in evidenza la necessità di modificare il Piano di Monitoraggio al fine di procedere a rilievi più accurati del deflusso del Torrente Acquanegra ed al fine di meglio monitorare la dinamica dei deflussi sotterranei. Inoltre, è apparso indispensabile, alla luce delle incertezze di cui sopra, che le elaborazioni idrologiche siano ripetute su un arco temporale più esteso, quale quello decennale previsto dal Piano di Monitoraggio, al fine di meglio comprendere le dinamiche del bilancio idrologico rispetto a diverse condizioni idro-meteo-climatiche.

Ridurre le incertezze di cui sopra appare indispensabile al fine di poter valutare l'impatto a scala spaziale e temporale di dettaglio delle attività di escavazione. Se, da un lato, le osservazioni fino ad ora raccolte consentono di escludere impatti macroscopici, d'altro canto non possono essere esclusi impatti a scala locale, dovuti ad esempio ad intercettazione di flussi idrici minori, che non possono essere messi in evidenza in presenza delle incertezze attuali.

Si ribadisce quindi con convinzione che l'esperienza del Piano di Monitoraggio debba essere proseguita con un continuo sforzo di definizione delle strategie di osservazione più convenienti ed efficienti.

Riferimenti Bibliografici

Ahrens C.D., An introduction to Weather, Climate, and the Environment, Meteorology Today, 2006.

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), Società Cooperativa Tipografica di Padova, 1987.

Boyle D. P., Gupta H. V., Sorooshian S., Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, Water Resources Research, 2000.

Duan Q., Schaake J., Andréassian V et al., Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops, Journal of Hydrology 320, 2006.

Holcim (Italia) SpA, Progetto di Gestione Produttiva dell'Ambito Territoriale Estrattivo ATEc2 – Studio di Impatto Ambientale – Comuni di Travedona Monate e Ternate (VA), 2010.

Montanari A., Castellarin A., Studio idrologico finalizzato all'analisi del bilancio idrico e dell'equilibrio ambientale del Lago di Monate (Varese), 2012.

Montanari A., Dispense del corso di gestione delle risorse idriche, 2006.

Monteith, J., Evaporation and the environment, In: 19th Symposium of the Society of Experimental Biology. Cambridge, UK, 1965.

Mugnai S., Elementi di ecofisiologia vegetale, Quaderno ARSIA 5, 2004.

Nash J.E., Sutcliffe J.V, River flow forecasting through conceptual models par I – A discussion of principles, Journal of Hydrology, 1970.

Penman H.L., Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proceedings of the Royal Society, 1948.

Provincia di Varese, Assessorato alla Tutela Ambientale, Piano Cave della Provincia di Varese, 2005.



Università degli Studi di Bologna

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

APPENDICE: Costruzione della scala di deflusso dell'incile Torrente Acquanegra ed osservazioni sulle misure di portata e livello derivanti dall'attività di monitoraggio condotta fino a ottobre 2014

Indice

<i>Osservazioni disponibili</i>	<i>1</i>
<i>Scala di deflusso per il T. Acquanegra.....</i>	<i>4</i>
<i>Conclusioni.....</i>	<i>10</i>

Osservazioni disponibili

Le indagini qui sinteticamente illustrate impiegano diverse informazioni idrometriche raccolte per il Lago di Monate e l'incile del Torrente Acquanegra. In particolare, oltre alle misure dirette di portata, sono stati impiegati tutti i dati contemporanei di livello del Lago di Monate e dell'incile del Torrente Acquanegra raccolti con cadenza mensile, come previsto dal piano di monitoraggio. I dati sono illustrati in Tabella 1.

Tabella 1. Dati di livello e portata raccolti durante i sopralluoghi mensili.

Data	L. Monate (m da Rif.)	L. Monate (m s.l.m.)	Acquanegra (m da Rif.)	Acquanegra (m s.l.m.)	Area (m ²)	Velocità media (m/s)	Portata (m ³ /s)
11/28/2013	0.85	266.73*	0.46	266.76*	1.66	0.14	0.24
12/17/2013	0.78	266.66*	0.39	266.69*	1.45	0.12	0.18
01/28/2014	1.30	267.18	0.75	267.05	2.61	0.23	0.60
02/25/2014	1.13	267.01	0.74	267.04	2.58	0.31	0.79
03/25/2014	1.00	266.88	0.63	266.93	2.22	0.26	0.57
04/15/2014	0.88	266.76	0.50	266.80	1.80	0.15	0.27
05/15/2014	0.88	266.76	0.48	266.78	1.73	0.16	0.28
06/19/2014	0.75	266.63	0.38	266.68	1.40	0.07	0.10
07/01/2014	0.84	266.72	NA	NA	NA	NA	NA
07/10/2014	0.87	266.75	0.50	266.80	1.80	0.12	0.22
08/09/2014	0.98	266.86	0.49	266.79	1.76	0.13	0.23
09/16/2014	0.89	266.77	0.50	266.80	1.80	0.11	0.20
10/10/2014	NA	NA	0.43	266.73*	1.57	0.08	0.12
10/14/2014	0.89	266.77	0.50	266.80	1.80	0.12	0.22
10/23/2014	0.83	266.71	0.47	266.77	1.70	0.05	0.09
11/20/2014	1.48	267.36	1.07	267.37	3.66	0.249	0.91
12/11/2014	1.17	267.05	0.78	267.08	2.71	0.275	0.75

**Dato ricostruito sulla base delle informazioni disponibili*

Oltre ai dati riportati in Tabella 1 si dispone anche delle misurazioni a passo orario della quota del pelo libero in corrispondenza dell'asta idrometrica relativa al Lago di Monate (da dicembre 2103 in avanti, ultimo dato utilizzato per questo rapporto 23/10/2014) ed in corrispondenza della sezione di misura della portata all'incile del T. Acquanegra (indicativamente da ottobre 2014, fino ai primi di gennaio 2015). Le serie temporali a passo orario/semi-orario sono illustrate in Figura 1.

La Figura 2 confronta i diversi dati di livello registrati per il Lago di Monate ed evidenzia una forte incongruenza nel primo periodo di osservazione (indicativamente da novembre 2013 a maggio 2014) tra le osservazioni in continuo (linea blu) e quelle raccolte manualmente con cadenza mensile (punti rossi), ed una incongruenza meno marcata, ma comunque non trascurabile, per le osservazioni successive.

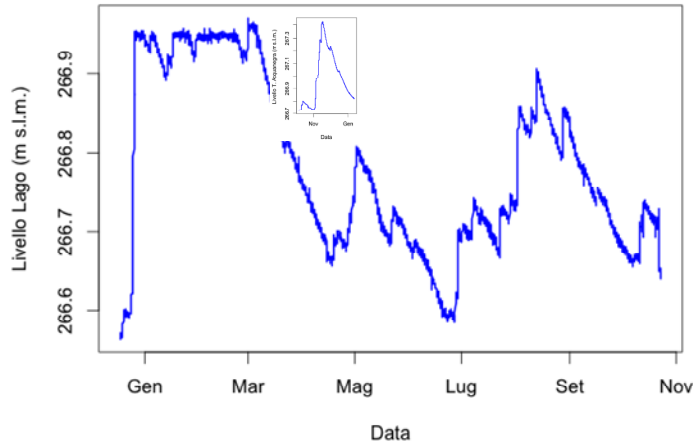


Figura 1. Serie temporali della quota del pelo libero del Lago di Monate (presso idrometro, sinistra) e dell'incile del T. Acquanegra (sezione di misura delle portate, destra).

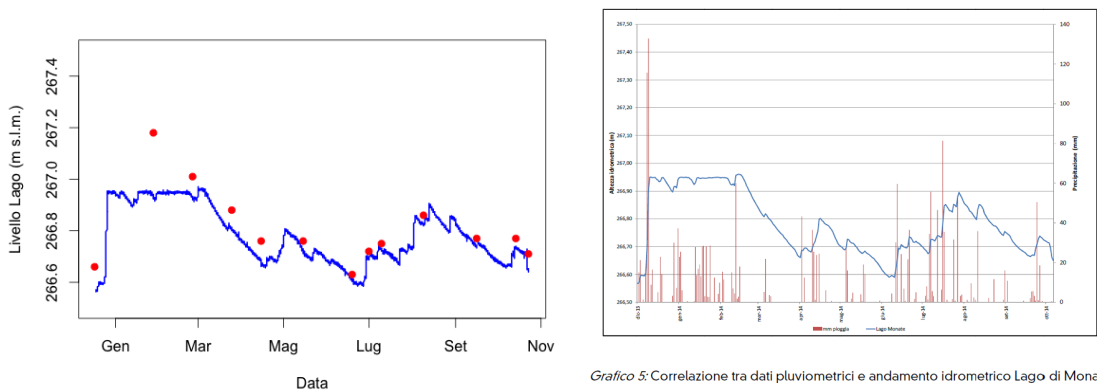


Grafico 5: Correlazione tra dati pluviometrici e andamento idrometrico Lago di Monate

Figura 2. Pannello di sinistra: confronto tra le due serie temporali della quota del pelo libero del Lago di Monate raccolte durante la campagna di monitoraggio (dati raccolti in continuo, linea blu; dati raccolti manualmente, punto rosso); pannello di destra: serie riportata nei rapporti Geologica.

A parere degli scriventi è fondamentale che l'incongruenza evidenziata venga chiarita e risolta dal momento che entrambe le misure sono egualmente importanti:

- le misure a cadenza mensile, come si mostrerà nel seguito, sono fondamentali per la costruzione della scala di deflusso;
- le misure in continuo sono invece necessarie per la chiusura del bilancio idrologico del Lago di Monate.

Scala di deflusso per il T. Acquanegra

Per la predisposizione di una scala di deflusso attendibile per il T. Acquanegra sono state valutate tre diverse soluzioni sulla base dei dati riportati in Tabella 1.

A – Scala di deflusso basata sui livelli osservati al T. Acquanegra

La prima possibilità investigata è stata, come naturale, quella di predisporre una scala di deflusso che stimasse le portate in uscita dal Lago di Monate sulla base dei livelli letti al T. Acquanegra, in corrispondenza della sezione di misura diretta delle portate. Per la definizione della scala di deflusso si è impiegata l'usuale espressione a due parametri riportata nel seguito,

$$Q = a \cdot h^b = a \cdot (z_{mslm} - z_{fondo})^b \quad (1)$$

dove Q indica la portata in m³/s, h il livello idrico misurato a partire dal fondo del T. Acquanegra, a e b rappresentano i due parametri della relazione, z_{mslm} e z_{fondo} la quota in metri sul livello del mare del pelo libero e del fondo del canale nella sezione di misura delle portate. La Figura 3 riporta i punti sperimentati e la curva (1) calibrata con il metodo ai minimi quadrati.

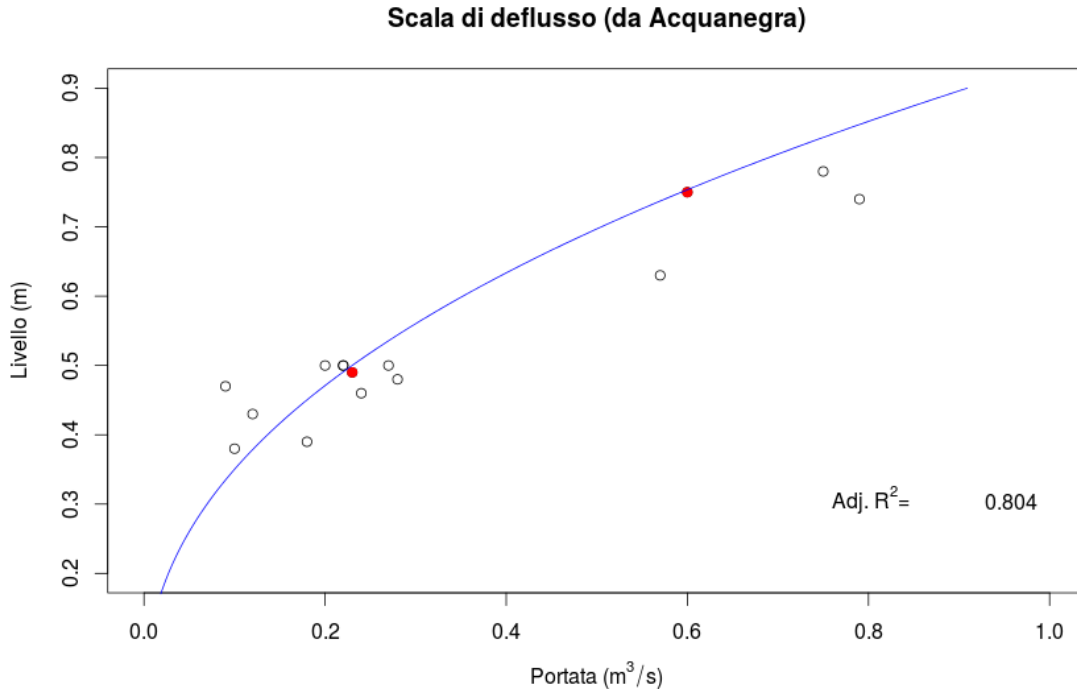


Figura 3. Scala di deflusso calibrata sui dati sperimentali portate – livello corrispondente all’incile del T. Acquanegra (per i punti rossi si veda nel seguito).

Come indicato dall’indice prestazionale R^2 corretto, piuttosto lontano da 1, e dalla dispersione dei dati sperimentali, la scala di deflusso così determinabile è affetta da incertezza significativa e sottolinea l’esiguità del campione di osservazioni a disposizione.

B – Scala di deflusso basata sui livelli osservati al Lago di Monate (caso B)

Una seconda possibilità verificata nello studio è stata quella di costruire una scala di deflusso sulla base dei valori di livello osservati per il Lago di Monate (caso B), che ha il vantaggio considerevole di poter utilizzare gli oltre 12 mesi di osservazioni continue di livello (se ritenute attendibili, v. Figura 2 e paragrafo precedente). L’espressione utilizzata è ancora la (1) con diverso significato del termine z_{mslm} , che in questo caso identifica la quota assoluta del livello del lago in corrispondenza del punto di misura. Oltre che per il vantaggio sottolineato precedentemente, la strategia è stata ritenuta

valida data l'elevata correlazione tra le misure del livello nel lago e nel T. Acquanegra, sintetizzata in Figura 4.

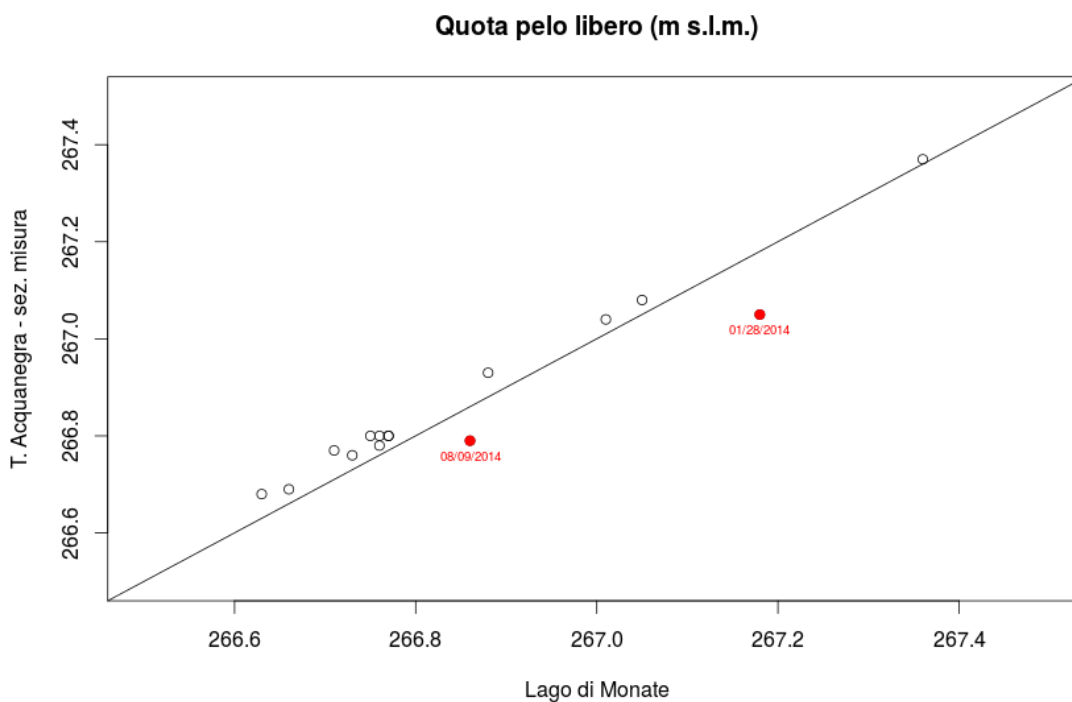


Figura 4. Livelli misurati al Lago di Monate ed all'incile del T. Acquanegra.

In Figura 4 sono riportate due osservazioni in controtendenza (con annesse date, punti in rosso), che possono essere state causate da condizioni meteorologiche anomale (presenza di venti particolari), ma soprattutto valori delle quote assolute del pelo libero al T. Acquanegra sempre (ad esclusione dei due casi segnalati) significativamente superiori alle corrispondenti quote nel lago, fatto anomalo che richiede di essere chiarito.

La Figura 5 riporta la scala di deflusso e ne sintetizza le prestazioni, che sono risultate leggermente inferiori a quelle del modello precedentemente descritto (R^2 aggiustato è inferiore in questo caso). La figura mostra chiaramente quanto siano anomale le due osservazioni del livello del lago evidenziate in precedenza.

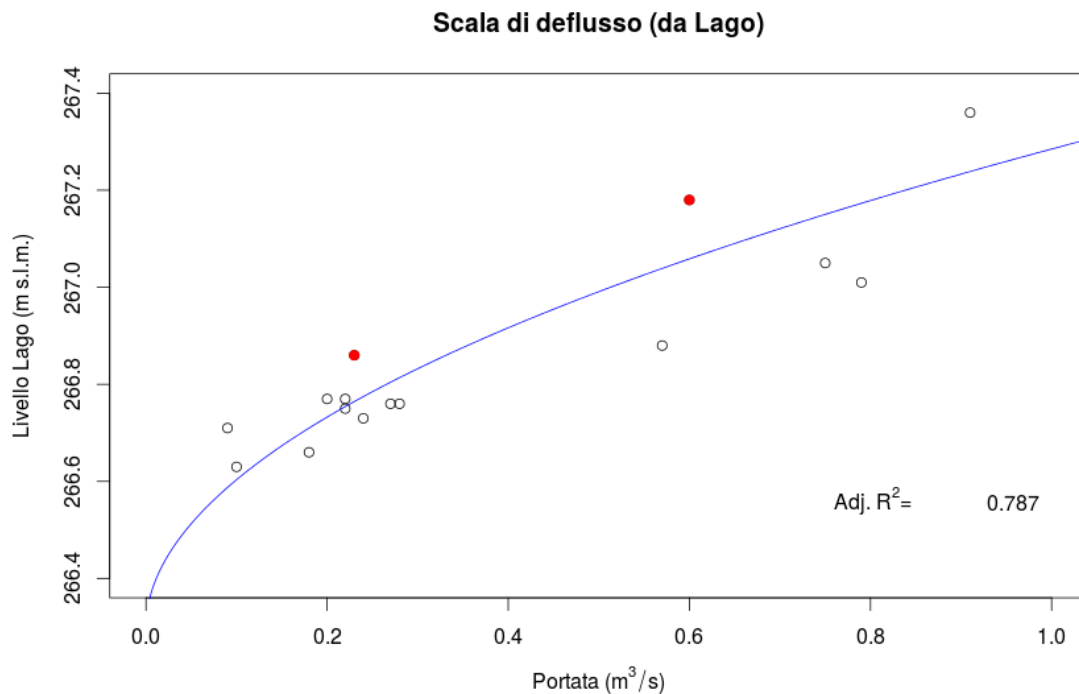


Figura 5. Scala di deflusso basata sui livelli al Lago di Monate (caso B).

C – Scala di deflusso basata sui livelli osservati al Lago di Monate, no dati anomali (caso C)

Data l'anomalia si è proceduto alla stima di una terza ed ultima scala di deflusso (caso C) che utilizzasse tutte le quote assolute del pelo libero al Lago di Monate ad eccezione delle due osservazioni anomale. I risultati sono riportati in Figura 6 con le usuali notazioni. Come rivela l'indice prestazionale questa è la scala di deflusso che meglio interpreta le osservazioni disponibili (il valore di R^2 è il maggiore tra i tre).

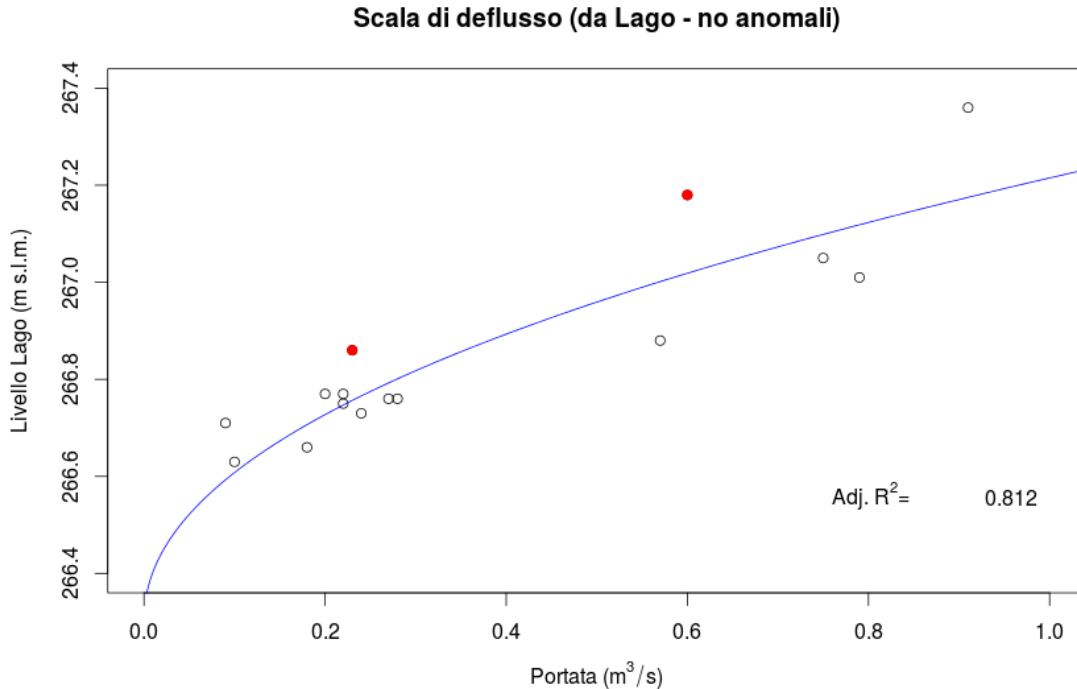


Figura 6. Scala di deflusso basata sui livelli al Lago di Monate, trascurando i due dati anomali (caso C).

Sulla base delle tre scale di deflusso predisposte si sono ricavate le stime in continuo delle portate in uscita dal Lago di Monate, riportate in Figura 7. L'andamento delle portate di Figura 7 mette chiaramente in evidenza alcuni aspetti:

- le tre diverse *scale di deflusso A, B e C* portano a stime simili nel campo delle portate medio-basse;
- vi sono differenze marcate tra le stime delle portate ottenute sulla base delle misure di livello al Lago (*scale di deflusso caso B e C*, v. sopra) nel campo delle portate elevate;
- le differenze tra le stime di portata così ottenute portano a differenze significative nel calcolo della portata media defluita sul periodo considerato, esse sono pari a:
 - 260.7 l/s per la scala di deflusso che usa tutti i dati (caso B);
 - 308.7 l/s per la scala di deflusso che esclude i 2 dati anomali (caso C);

a proposito si ricorda che nel Barnaba (1987) si stimano le portate medie del T. Acquanegra in 45.9, 109.3, o 240.3 l/s per anni con piovosità scarsa, media, o abbondante, in quest'ordine.

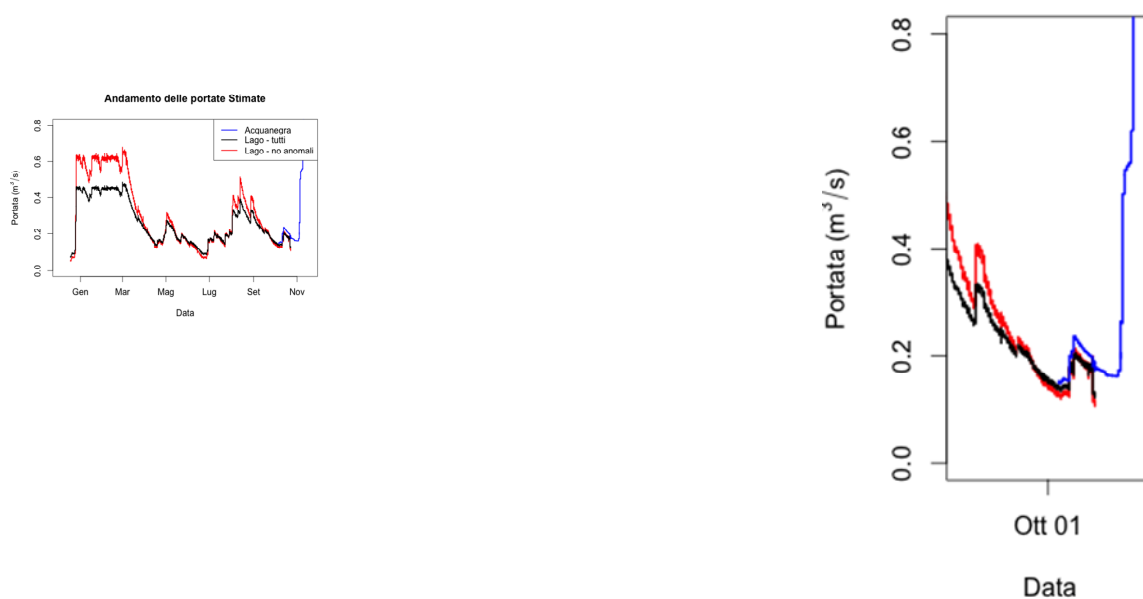


Figura 7. Idrogrammi in termini di portata ricavati sulla base delle tre scale di deflusso predisposte nell'analisi (il pannello di destra riporta un ingrandimento dell'ultimo periodo temporale).

Conclusioni

Sulla base dei risultati ottenuti sembra di poter concludere che la *scala di deflusso caso C* (v. Figura 6) sia la più attendibile tra le tre predisposte. Essa impiega la seguente espressione:

$$Q = a \cdot h^b = a \cdot (z_{mslm} - z_{fondo})^b = 1.2067 \cdot (z_{mslm} - 266.3)^{2.114} \quad (2)$$

dove Q indica la portata in m^3/s , h il livello idrico misurato a partire dal fondo del T. Aquanegra, a e b rappresentano i due parametri della relazione, z_{mslm} e z_{fondo} la quota in metri sul livello del mare del pelo libero e del fondo del canale nella sezione di misura delle portate.

Con riferimento all'attendibilità della scala di deflusso identificata, si ricorda che l'anno idrologico appena concluso è stato un anno particolarmente piovoso, in cui le precipitazioni cumulate nella località di interesse sono risultate pari a più del doppio della precipitazione media annuale storica. Relativamente all'attendibilità della scala in esame preme sottolineare che:

- su essa gravano le incertezze legate all'esigua dimensione del campione;
- inoltre, sull'attendibilità dello strumento predisposto gravano anche le anomalie attualmente presenti nei dati disponibili (v. paragrafo "Osservazioni disponibili");
- in particolare,
 - è importante **ricostruire al più presto un andamento attendibile dei livelli nel Lago di Monate nel periodo che va da novembre 2013 a maggio 2014**, per non perdere irrimediabilmente un periodo significativo dell'attività di monitoraggio svolta;
 - è indispensabile **allineare le misure del livello nel Lago di Monate in continuo con quelle manuali fatte in occasione dei sopralluoghi**: al di là delle forti discrepanze tra le due nel periodo Nov./13 - Mag./14 permangono infatti differenze significative anche nel periodo successivo, che suggeriscono di rivedere le due serie per intero;

- è indispensabile **verificare le osservazioni di livello al T. Acquanegra rispetto a quelle al Lago di Monate**, che risultano più basse delle precedenti nella stragrande maggioranza dei casi (v. Figura 4), fatto fisicamente non giustificabile;
- è infine necessario **chiarire se le due osservazioni anomale in Figura 4 siano legate a condizioni meteoclimatiche anomale o se siano invece affette da errori di misura.**