

Scuola di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l' Ambiente e il Territorio  
- Environmental and Land Planning Engineering -



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

---

GLI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO  
CLIMATICO SUL REGIME IDROLOGICO E  
SULLA DINAMICA BATTERICA: IL CASO  
STUDIO DEL FIUME LAMBRO

---

TESI DI LAUREA MAGISTRALE DI:

EDOARDO PALONI 952660

RELATORE: PROF. ING. DANIELE BOCCHIOLA

CORRELATORE: ING. FLAVIA FUSO

Anno accademico 2021/2022



# Abstract

With the decrease in rainfall and the increase in temperatures, the water resources are altered both in terms of quantity (less water availability) and qualitative (increase in growth phenomena with consequent migration of bacterial organisms into water). The aims of this study is to evaluate the effects of climate change on hydrological and bacterial dynamics in the Lambro river basin.

The Poli-Hydro model was used to simulate the hydrology, while a simplified model was built on the basis of existing models for the simulation of bacterial dynamics.

The calibration of the hydrological model was performed with the observed flow data in a section of the river over the control period 2010-2021, while the calibration of bacterial dynamics model was based on the bacterial concentration values (expressed as colony forming units on volume of water - cfu/100ml) obtained from laboratory analysis carried out on samples collected along the river in two separate samplings period, in the year 2021.

After the calibration phase, the two models were used to simulate river flows and bacterial dynamics in the area of interest up to the middle of the century. The new climate drivers were obtained from 6 global circulation models and 4 socio-economic scenarios of the AR6.

The results show a general increase in temperature on an average monthly and annual scale, a variation in the rainfall regime with strong decreases during the summer period and a general increase in the bacterial concentration in the river.

Deepen this issues is important to preserve this resource and to face with any future water crises.



# Sommario

Con la diminuzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature, le risorse idriche risultano essere alterate sia dal punto di vista quantitativo (minor disponibilità idrica) che qualitativo (aumento dei fenomeni di crescita con conseguente migrazione in acqua di organismi batterici).

Lo scopo del seguente elaborato di tesi è quello di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle dinamiche idrologiche e batteriche nel bacino del fiume Lambro.

Per simulare l'idrologia è stato utilizzato il modello Poli-Hydro, mentre per la simulazione delle dinamiche batteriche è stato costruito un modello semplificato sulla base di modelli già esistenti.

Il modello idrologico è stato calibrato con i dati di portata osservata in una sezione del fiume nel periodo di controllo 2010-2021, mentre il modello di simulazione della dinamica batterica è stato calibrato sui valori di concentrazione batterica (espressi come unità formanti colonie su volume d'acqua - ufc/100ml) ottenute da analisi di laboratorio effettuate su campioni raccolti lungo il corso del fiume in due distinte campagne, nell'anno 2021.

Successivamente alla fase di calibrazione, i due modelli sono stati utilizzati per simulare le portate fluviali e la dinamica batterica nel bacino d'interesse fino a metà secolo. I nuovi driver climatici sono stati ottenuti da 6 modelli di circolazione globale e 4 scenari socioeconomici dell'AR6.

I risultati mostrano un aumento generale della temperatura a scala media mensile ed annuale, una variazione del regime di precipitazioni con forti diminuzioni durante il periodo estivo ed un generale incremento della concentrazione batterica nel fiume. Risulta quindi importante approfondire queste tematiche per preservare questa risorsa e per far fronte ad eventuali crisi idriche future.



# INDICE

Abstract.....	I
Sommario.....	III
Indice delle figure .....	VIII
Indice delle tabelle.....	XI
1 INTRODUZIONE.....	1
1.1 Inquadramento territoriale .....	2
2 DATI UTILIZZATI .....	5
2.1 Dati di temperatura e precipitazione.....	5
2.2 Dati di radiazione .....	6
2.3 Portate.....	7
2.4 Modello digitale di elevazione .....	8
2.5 Uso del suolo .....	9
2.6 Raccolta campioni.....	14
3 MODELLO IDROLOGICO.....	18
3.1 Struttura del modello .....	18
3.2 Fusione nivale e glaciale.....	19
3.3 Evapotraspirazione.....	20
3.4 Serbatoio sotterraneo.....	21
3.5 Flow routing.....	21
3.6 Simulazione.....	22
3.7 Calibrazione modello.....	23
3.8 Bacini di simulazione.....	24
3.9 Calibrazione modello idrologico .....	26
3.10 Validazione modello idrologico.....	29
4 MODELLO DELLA DINAMICA BATTERICA.....	31
4.1 Batteri di riferimento .....	31

4.2	Confronto con modelli esistenti .....	33
4.2.1	Crescita batterica.....	33
4.2.2	Comparto suolo .....	37
4.2.3	Temperatura suolo.....	37
4.2.4	Trasporto batterico.....	41
4.2.5	Decadimento batterico .....	44
4.3	Calibrazione modello della dinamica batterica .....	45
5	CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	47
5.1	Modelli di circolazione globale (GCM).....	47
5.2	Scenari climatici dell'IPCC .....	47
5.3	GCM utilizzati .....	50
5.4	Downscaling.....	50
5.4.1	Precipitazione .....	51
5.4.2	Temperatura .....	52
5.5	Limitazione dei modelli GCM.....	52
5.6	Risultati .....	52
5.6.1	Temperatura .....	53
5.6.2	Precipitazioni .....	54
5.6.3	Portata .....	56
5.6.4	Concentrazione batterica.....	60
6	CONCLUSIONI .....	62
7	BIBLIOGRAFIA .....	64
8	APPENDICE .....	68



# Indice delle figure

Figura 1.1: Inquadramento territoriale del bacino di riferimento per il corrente caso di studio .....	3
Figura 2.1: Posizione delle stazioni meteo di misura all'interno del bacino di riferimento .....	6
Figura 2.2: Posizione dell'idrometro all'interno del bacino di riferimento .....	7
Figura 2.3: Modello digitale di elevazione per il bacino di riferimento.....	9
Figura 2.4: Mappa di uso del suolo per il bacino di riferimento .....	10
Figura 2.5: Mappa dei valori di CN per il bacino di riferimento .....	11
Figura 2.6: Mappa della copertura vegetativa per il bacino di riferimento .....	12
Figura 2.7: Fase di raccolta dei campioni d'acqua .....	14
Figura 2.8: Mappa della posizione dei punti di campionamento all'interno del bacino di riferimento.....	15
Figura 2.9: Contenitore utilizzato per il campionamento.....	16
Figura 3.1: Andamento della temperatura media mensile in funzione della quota altimetrica .....	23
Figura 3.2: Andamento della precipitazione media mensile in funzione della quota altimetrica .....	23
Figura 3.4: Bacini di simulazione senza idrometro .....	25
Figura 3.3: Bacino con idrometro di Milano via Feltre .....	25
Figura 3.5: Confronto idrogramma modellato ed osservato a scala media mensile per l'intero periodo di calibrazione (2010-2017) .....	26
Figura 3.6: Confronto idrogramma modellato e simulato a scala giornaliera anno 2021 .....	26
Figura 3.7: Andamento portate medie modellate e osservate a scala annuale ....	28
Figura 3.8: Andamento contributi simulati del deflusso a scala media mensile (2010-2017) .....	28
Figura 3.9: Andamento portate medie modellate e osservate a scala annuale ....	29
Figura 3.10: Andamento portate medie modellate e osservate a scala media mensile (2018-2021).....	29
Figura 4.1: Suddivisione dei diversi gruppi batterici appartenenti alla famiglia delle enterobacteriae.....	32

Figura 4.2: Rappresentazione dell'andamento della funzione di Gompertz; curva 1: concentrazione batterica $N$ superiore alla capacità portante $C$ ; caso 2: concentrazione batterica $N$ inferiore alla capacità portante $C$ .....	34
Figura 4.3: Andamento capacità portante al variare della temperatura .....	36
Figura 4.4: Suddivisione degli strati del comparto suolo per il modello batterico..	37
Figura 4.5: Variazione mensile di Temperatura dell'aria e del suolo a diversi livelli di profondità [29].....	39
Figura 4.6: Andamento della Temperatura dell'aria e del suolo nell'arco della prima metà di un anno.....	40
Figura 4.7: Andamento della Temperatura dell'aria e del suolo nell'arco della seconda metà di un anno .....	40
Figura 4.8: Trasporto batterico nel suolo con $dS>0$ e $Q_s=0$ .....	42
Figura 4.9: Trasporto batterico nel suolo saturo con $Q_s>0$ .....	43
Figura 4.10: Confronto tra l'andamento della concentrazione batterica modellata alla sezione di chiusura del bacino e dei risultati dei campionamenti .....	46
Figura 5.1: Andamenti futuri in funzione di diversi scenari climatici di a) emissione di $CO_2$ , b) concentrazione di $CO_2$ , c) forzante radiativa antropogenico, d) temperatura media globale.....	50
Figura 5.2: Variazione percentuale di portata alla sezione di chiusura a scala media annuale di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	56
Figura 5.3: Variazione percentuale di portata alla sezione di chiusura a scala media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020.....	57
Figura 5.4: Confronto portata alla sezione di chiusura a scala media mensile di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020.....	59



## Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Coordinate geografiche ed altitudine delle stazioni di riferimento per i dati in input (Prec=precipitazione; Temp=temperatura; Rad=Radiazione solare; Liv Idro=livello idrometrico) .....	8
Tabella 2.2: Tabella dei valori di CN definita in base ai diversi gruppi idrologici del suolo e per il DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali) della Regione Lombardia, in particolare per la copertura del territorio della Valtellina .....	13
Tabella 2.3: Risultati analisi batteriologiche (rispettivamente della 1° e della 2° campagna) eseguite sui campioni di acqua prelevati (P.B.=Depuratore di Peschiera Borromeo; S.S.G.= Depuratore di Sesto San Giovanni; SUP=superficie) .....	16
Tabella 2.4: Posizione e profondità dei punti di campionamento scelti lungo il fiume Lambro .....	17
Tabella 3.1: Parametri definitivi del modello idrologico.....	27
Tabella 3.2: Risultati indici statistici a scala mensile e giornaliera per il periodo di calibrazione .....	27
Tabella 3.3: Risultati indici statistici a scala mensile e giornaliera per il periodo di validazione .....	30
Tabella 4.1: Fattori mensili correttivi di temperatura.....	39
Tabella 4.2: Parametri del modello batterico .....	45
Tabella 5.1: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per gli scenari 2.6 e 4.5, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	53
Tabella 5.2: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per gli scenari 7.0 e 8.5, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	54
Tabella 5.3: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	54

Tabella 5.4: Variazione della precipitazione cumulata a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	55
Tabella 5.5: Variazione della precipitazione cumulata a scala media mensile e media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020.....	55
Tabella 5.6: Confronto tra variazione percentuale di portata e di precipitazione cumulata a scala media annuale, di ogni scenario analizzato per i modelli ec_earth3, cesm2, mpi_esm; nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020.....	59
Tabella 5.7: Confronto tra variazione percentuale di portata e di precipitazione cumulata a scala media annuale, di ogni scenario analizzato per i modelli cmcc_cm2, miroc6, hadgem3; nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020.....	60
Tabella 5.8: Andamento della concentrazione batterica a scala media mensile ed annuale per tutti i modelli negli scenari 2.6 e 4.5, nel periodo 2041-2050 per ogni modello e scenario .....	60
Tabella 5.9: Andamento della concentrazione batterica a scala media mensile ed annuale per tutti i modelli negli scenari 7.0 e 8.5, nel periodo 2041-2050 per ogni modello e scenario .....	61
Tabella 5.10: Variazione percentuale della concentrazione batterica alla sezione di chiusura a scala media mensile ed annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020 .....	61
Tabella 8.1: Risultati restanti delle analisi relative alla prima campagna di campionamento (PBM=Peschiera Borromeo monte; PBV=Peschiera Borromeo valle; SSGM=Sesto San Giovanni monte; SSGV=Sesto San Giovanni vale; 5-50cm=profondità di campionamento; ***=crescita aspecifica sulla piastra) .....	68
Tabella 8.2: Risultati restanti delle analisi relative alla seconda campagna di campionamento (PBM=Peschiera Borromeo monte; PBV=Peschiera Borromeo valle; SSGM=Sesto San Giovanni monte; SSGV=Sesto San Giovanni vale; 5-50cm=profondità di campionamento) .....	69



# 1 INTRODUZIONE

Gli effetti del cambiamento climatico sul ciclo idrologico dei bacini della pianura padana sono già notevoli [1].

Tra le principali evidenze vi sono l'incremento complessivo delle temperature, lo scioglimento e conseguente contrazione della superficie coperta da ghiacciai, la variazione nella distribuzione e nell'intensità delle precipitazioni, nonché l'incremento della frequenza di fenomeni "estremi" (inondazioni, periodi di siccità, etc.) [2] [3] [4] [5] [6].

I sistemi di acque sotterranee, sebbene maggiormente coperti grazie alla presenza di suolo e roccia, non sono immuni dai cambiamenti climatici sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo [7].

Tra le principali cause di inquinamento delle acque vi sono la dispersione di acque reflue non trattate nel suolo o nei corsi d'acqua superficiali con conseguente migrazione verso le acque di falda e l'utilizzo intensivo di pesticidi e fertilizzanti di cui la maggior parte si sversa nel sistema aria-suolo andando ad inquinare le falde [8].

L'insieme di questi processi genera delle condizioni favorevoli per l'accrescimento e diffusione di microrganismi nel suolo.

L'intensità del fenomeno di proliferazione e di infiltrazione nelle acque superficiali di falda dipende da alcuni fattori come: la temperatura, la precipitazione sul terreno, la profondità della falda e la composizione del terreno [9] [10].

I primi due fattori sono impattati direttamente dal cambiamento climatico quindi, nell'ipotesi di un aumento delle temperature e di una variazione delle precipitazioni, anche la presenza di microrganismi batterici verrà modificata.

Da quanto detto risulta evidente come il cambiamento climatico, sebbene apparentemente in maniera indiretta, avrà delle conseguenze serie sulla qualità delle risorse idriche che devono essere prese in considerazione per preservare le acque sotterranee come futura fonte di acqua potabile.

Gli scopi principali della tesi sono i seguenti:

- 1) Riprodurre l'andamento delle principali componenti del ciclo idrologico dell'area di studio, tramite il modello idrologico *Poli-Hydro*;

- 2) Riprodurre gli andamenti di crescita e diffusione dei batteri coliformi totali nell'area di studio tramite la creazione di un modello matematico semplificato rispetto ad altri già esistenti;
- 3) Analizzare variazioni future del ciclo idrologico e batterico nell'area di studio tramite l'utilizzo dei più recenti scenari climatici, così da fornire supporto alla gestione delle possibili alterazioni dovute ai cambiamenti climatici.

Il lavoro è suddiviso nel seguente modo.

Il Capitolo 1 introduce l'inquadratura territoriale. Nel Capitolo 2 è presentata la raccolta ed elaborazione dei dati in input richiesti dal modello *Poli-Hydro* e la fase di raccolta dei campioni d'acqua per le analisi batteriologiche dell'area.

Nel Capitolo 3 è descritto il modello idrologico comprensivo dei risultati di calibrazione e validazione mentre nel Capitolo 4 si descrive il modello semplificato della dinamica batterica, anche questo comprensivo dei risultati di calibrazione. Nel Capitolo 5 sono descritti gli scenari utilizzati per la rappresentazione dei possibili effetti futuri dovuti ai cambiamenti climatici con la raccolta dei risultati sia del modello idrologico che batterico e confronto con la situazione attuale. Infine, nel Capitolo 6 sono discusse le conclusioni.

## 1.1 Inquadratura territoriale

L'area di studio si posiziona all'interno della regione Lombardia, in Nord Italia, nel bacino idrografico del fiume Lambro (*Figura 1.1*).

La sorgente del fiume Lambro è situata a quasi 1000 m di altitudine e percorre la pianura milanese e lodigiana fino a raggiungere il fiume Po.

Il suo bacino misura 1950 km<sup>2</sup> e la piovosità media è di circa 1450 mm contro una media regionale di 1250 mm.

Durante il suo percorso, lungo circa 130 km, il Lambro attraversa diverse città densamente popolate ed industrializzate come Monza e Milano, fino a sfociare nel Po a Senna Lodigiana. La direzione è regolare poiché non influenzata da particolari strutture orografiche, mentre la portata è modesta e variabile data l'assenza di ghiacciai nel bacino di alimentazione.

La sua configurazione risale a epoche recenti della storia geologica della pianura Padana e l'attuale percorso si è creato in seguito al progressivo ritiro dei ghiacciai.



Figura 1.1: Inquadramento territoriale del bacino di riferimento per il corrente caso di studio

Dopo aver attraversato la parte montana, compresa tra le sorgenti ed Erba, il fiume perde gran parte dell'energia acquisita in questo tratto e rallenta bruscamente per gettarsi nel lago di Pusiano.

Di qui inizia la parte collinare del suo corso, dove si susseguono avvallamenti ed alture dalla chiara morfologia glaciale, per poi completare il suo corso nella pianura lombarda, nel tratto che si estende dal parco di Monza fino al Po.

Nella pianura milanese la morfologia diventa più monotona non tanto per il tracciato ma per i caratteri della valle che con i suoi insediamenti urbani tende a nascondere il fiume.

Ancora più a sud, da San Donato Milanese, la valle del Lambro si apre ed il corso diventa tortuoso e mutevole [11].

La portata del fiume aumenta nella zona pianeggiante in gran parte a causa dell'apporto di sistemi di afflusso artificiali:

- I collettori del consorzio dell'alto Lambro che scaricano a San Rocco di Monza;
- Lo sfioratore della Martesana, subito prima di Milano;
- I collettori della zona est Milano, con scarico nel territorio di Peschiera Borromeo;
- I grandi colatori di Milano (Vettabbia e Redefossi) che scaricano a Melegnano;
- Il colatore detto Lambro meridionale di Milano che si congiunge al tratto principale a Sant'Angelo Lodigiano;
- Il colatore Addetta che collega il canale della Muzza al Lambro nella zona di Melegnano.

In generale il clima della regione è di tipo continentale e caratterizzato da inverni freddi ed estati calde. A causa però dell'estensione del territorio si possono individuare variazioni sensibili anche in zone non troppo distanti tra loro a causa della presenza di rilievi, dell'esposizione rispetto ai venti dominanti e della presenza di grandi bacini lacustri capaci di conferire caratteri Mediterranei al clima delle aree immediatamente adiacenti.

La zona di studio comprende una porzione del bacino idrografico del Lambro con un'area di estensione pari a 687 km<sup>2</sup> e sezione di chiusura situata nella zona del depuratore di Sesto San Giovanni.

## 2 DATI UTILIZZATI

Per rappresentare il ciclo idrologico e la dinamica batterica, si ricorre all'utilizzo di più modelli matematici che necessitano di diversi dati in input.

Per la modellazione idrologica si utilizza in questo studio il modello semi-distribuito fisicamente basato *Poli-Hydro* che necessita di serie giornaliere di temperatura, precipitazione e radiazione in input, più varie mappe dell'area di studio ottenute dal software Arcgis-Pro.

Nel caso della dinamica batterica, si è costruito un modello semplificato che utilizza in input serie giornaliere di temperatura, di portata (modellata tramite *Poli-Hydro*) più la mappa relativa al fattore di ritardo ottenuta con Arcgis-Pro. I modelli sono poi stati rispettivamente calibrati con i dati di portata osservati e con i risultati delle analisi di laboratorio, derivanti da campagne di raccolta di dati presentate nei successivi capitoli.

### 2.1 Dati di temperatura e precipitazione

I dati di temperatura e precipitazione sono stati forniti da ARPA Lombardia [12] e coprono il periodo compreso tra il 2010 ed il 2021. Le serie hanno andamento giornaliero sia per la temperatura media [°C] che per la precipitazione cumulata [mm/d].

Le stazioni scelte ricadono tutte all'interno del bacino di analisi e sono state selezionate per avere un dataset in input il più omogeneo possibile, evitando eccessivi valori vuoti (Nodata) nell'arco temporale della simulazione.

Tutte le stazioni di misura mostrate in Figura 2.1, forniscono dati per entrambi i parametri e per il periodo di analisi scelto pari a 12 anni (2010-2021).

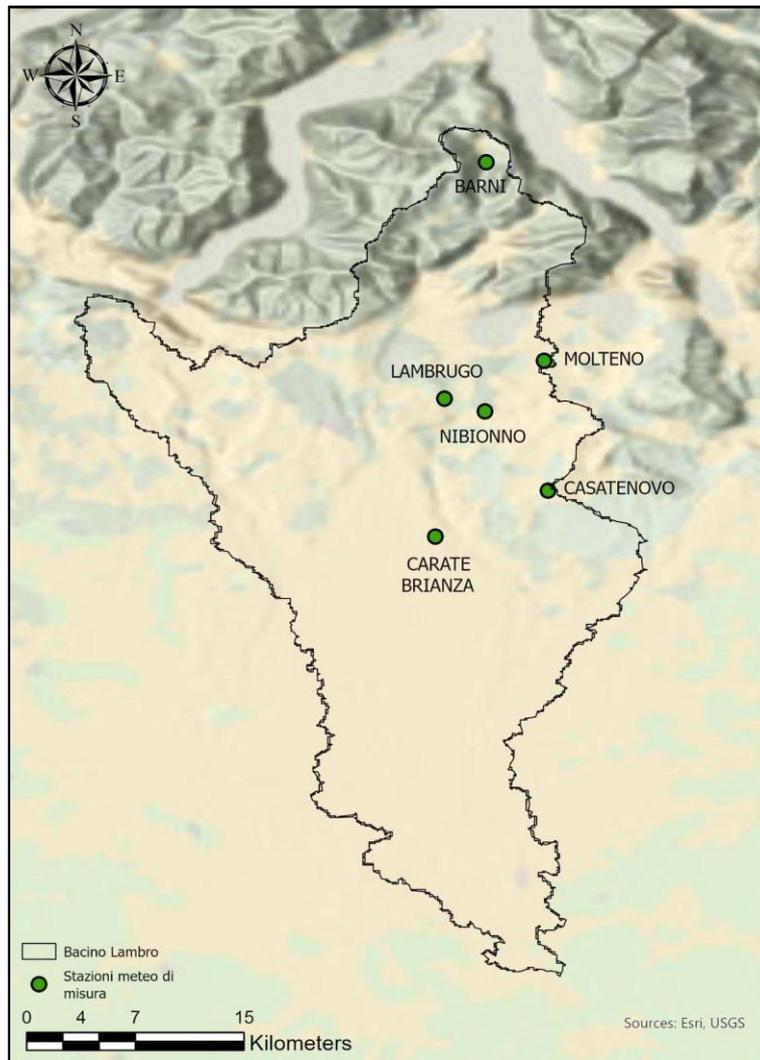


Figura 2.1: Posizione delle stazioni meteo di misura all'interno del bacino di riferimento

## 2.2 Dati di radiazione

Poiché la radiazione è un parametro campionato con minore frequenza spaziale rispetto ad altri, i dati ottenuti provengono solamente da due delle sei stazioni considerate. Sebbene in quantità inferiore, grazie alla ridotta estensione del bacino, i dati risultano comunque essere sufficienti per garantire la rappresentatività e il corretto funzionamento del modello di calcolo.

Le serie hanno andamento giornaliero e misurano la radiazione media sul terreno [W/m<sup>2</sup>].

## 2.3 Portate

Per la calibrazione e validazione del modello idrologico è risultato sufficiente selezionare una sola stazione di misura del livello idrometrico, situata a Milano via Feltre, rappresentante dell'andamento dell'intero bacino.

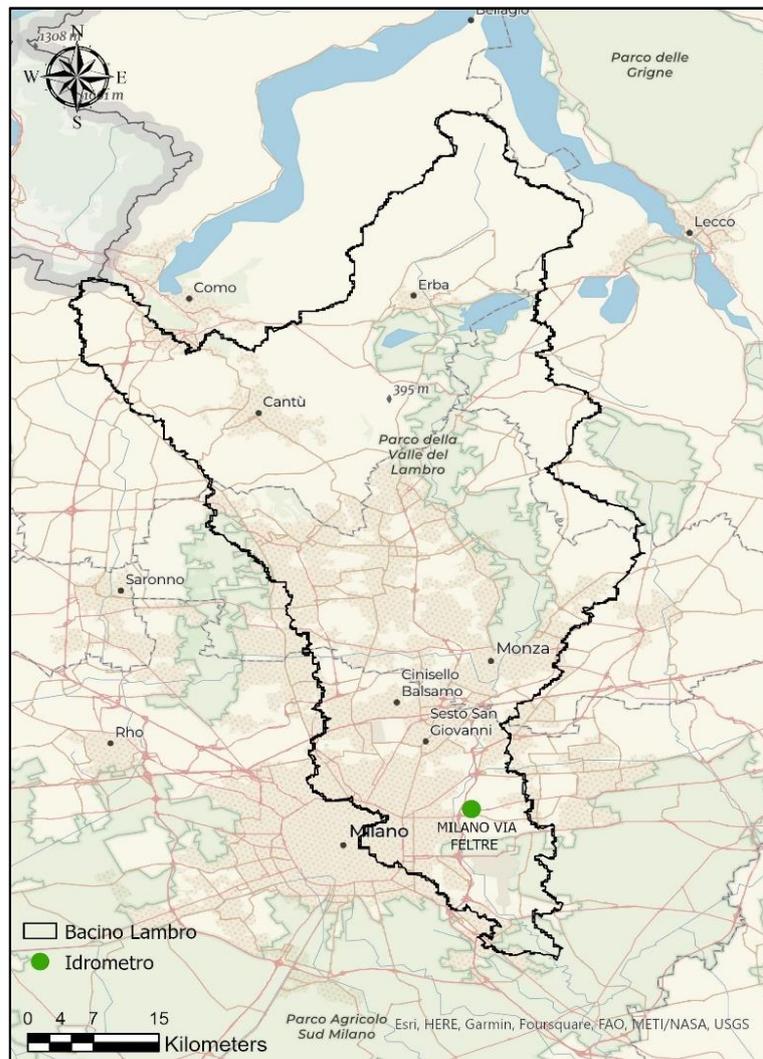


Figura 2.2: Posizione dell'idrometro all'interno del bacino di riferimento

La scelta è derivata dall'ipotesi che, a valle dell'idrometro, non siano presenti fenomeni tali da non garantire la rappresentatività dei dati per l'intero bacino.

L'altezza misurata del livello idrometrico [m] è stata quindi trasformata in una misura di portata [m<sup>3</sup>/s] ed utilizzata come riferimento per il confronto tra idrogramma osservato e modellato. Si riassumono in *Tabella 2.1* le informazioni sia climatiche che idrometriche, relative alle stazioni utilizzate.

Tabella 2.1: Coordinate geografiche ed altitudine delle stazioni di riferimento per i dati in input (Prec=precipitazione; Temp=temperatura; Rad=Radiazione solare; Liv Idro=livello idrometrico)

Stazione	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Quota [mslm]	Parametri
Barni	45.91	9.27	625	Prec, Temp
Casatenovo	45.70	9.31	360	Prec, Rad, Temp
Nibionno	45.75	9.27	310	Prec, Temp
Molteno cimitero	45.78	9.31	278	Prec, Temp
Lambrugo	45.76	9.24	273	Prec, Temp
Carate Brianza	45.67	9.23	250	Prec, Rad, Temp
Milano via Feltre	45.49	9.25	127	Liv Idro

## 2.4 Modello digitale di elevazione

Il modello digitale del terreno rappresenta la distribuzione delle quote di un territorio in formato raster e la sua analisi, effettuata tramite il software Arcgis Pro, è necessaria per lo studio dell'area.

Il raster di partenza, fornito dal Geoportale [12], è stato elaborato per ottenere in uscita un DEM di dimensioni pari all'area di studio e con celle di lato 100 m.

Partendo dal nuovo DEM, sono state ricavate le varie mappe da utilizzare in input nel modello idrologico.

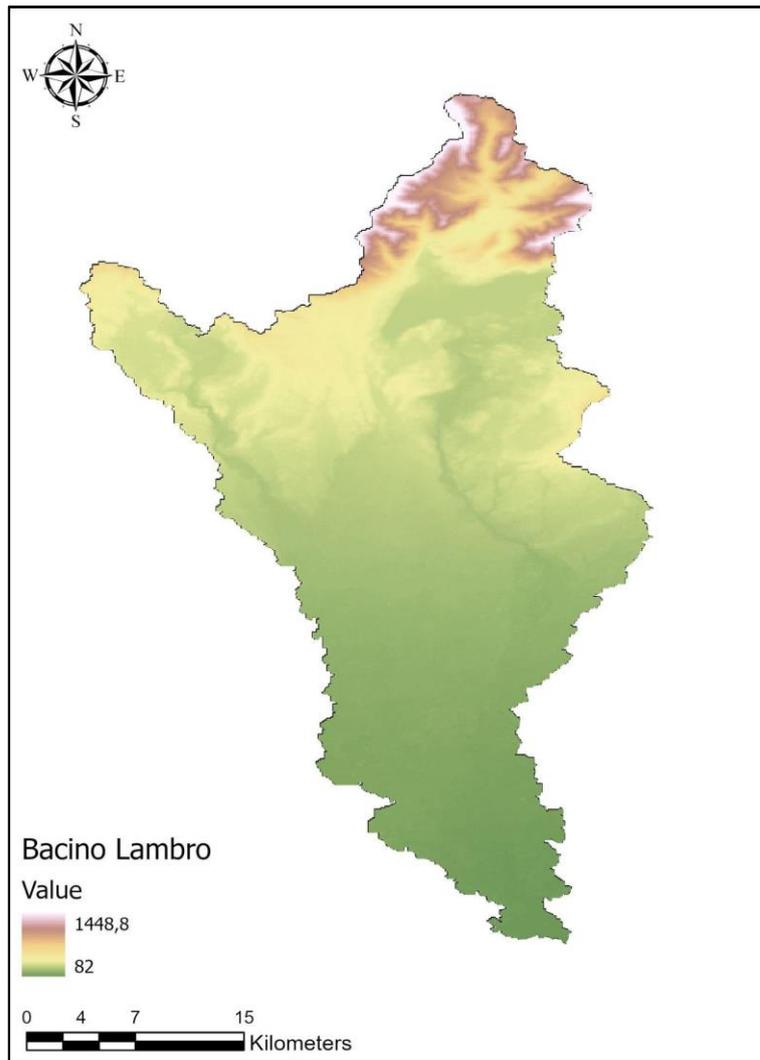


Figura 2.3: Modello digitale di elevazione per il bacino di riferimento

## 2.5 Uso del suolo

Le informazioni di copertura del suolo, fornite sempre dal Geoportale [12], sono necessarie perché influenzano vari parametri utilizzati nella modellazione del deflusso dell'acqua attraverso il terreno.

La mappa iniziale, rappresentante l'intera area europea e comprendente un totale di 45 classi di copertura, è stata ritagliata e scalata con le stesse dimensioni delle celle del DEM.

Una volta considerata solo l'area del bacino di studio, le classi si riducono a 21 come mostrato in *Figura 2.4*.

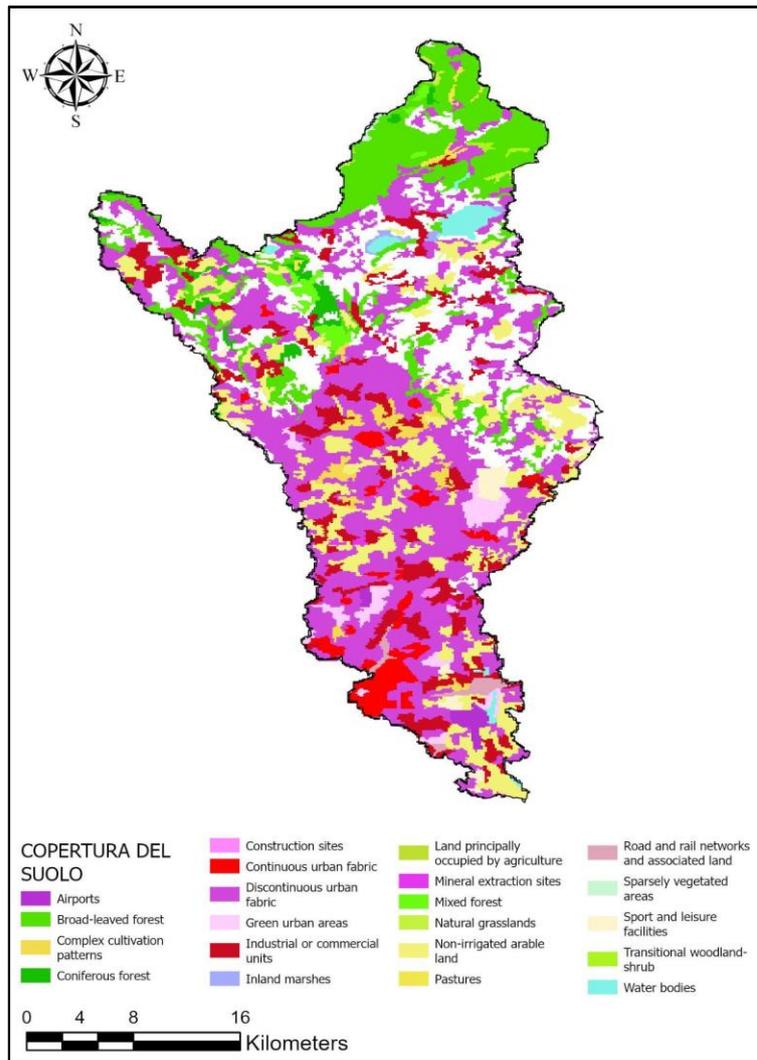


Figura 2.4: Mappa di uso del suolo per il bacino di riferimento

Dalla copertura del suolo è possibile ricavare le 3 mappe da usare in input nel modello idrologico:

1. la mappa relativa al Curve Number (CN) necessaria per poter valutare la permeabilità del terreno all'acqua;
2. la mappa della vegetazione necessaria per poter valutare l'evapotraspirazione effettiva;
3. la mappa del ghiaccio necessaria per considerare eventuali riserve idriche.

Quest'ultima non è mostrata poiché nel bacino non sono presenti zone con ghiaccio perenne e quindi i valori sulla mappa risultano essere tutti nulli.

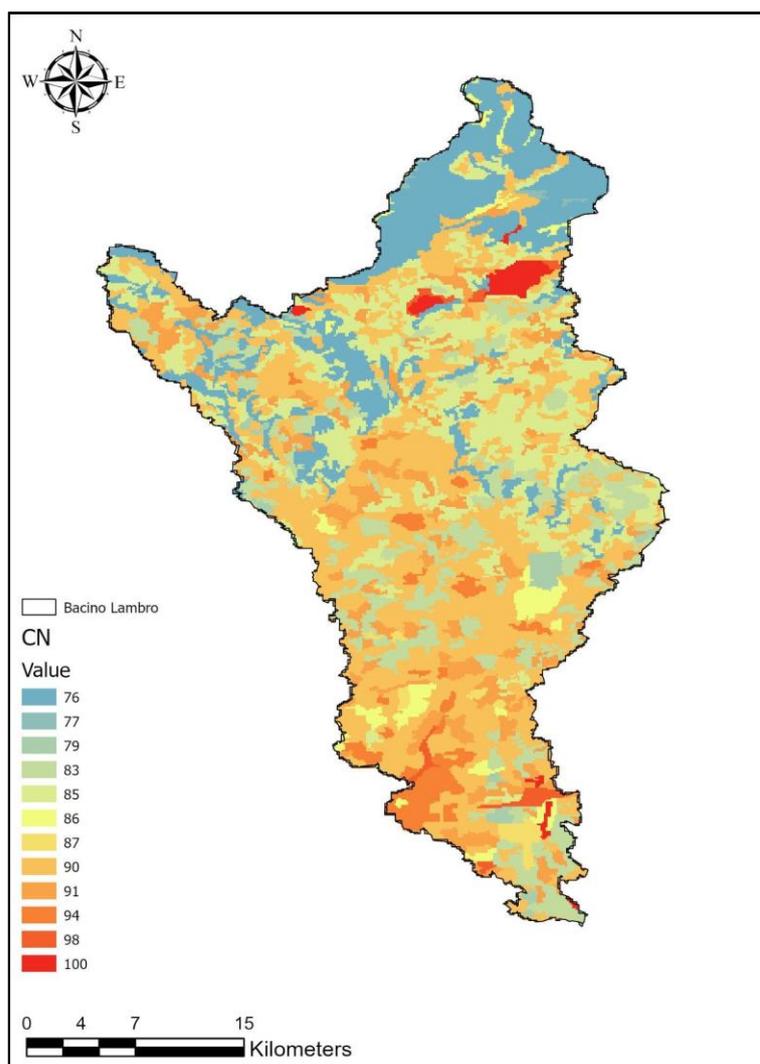


Figura 2.5: Mappa dei valori di CN per il bacino di riferimento

Il Curve Number è un parametro con valori compresi tra 0 e 100 ed è utilizzato per descrivere la permeabilità del terreno; questo dato è necessario per poter valutare la velocità con cui si formano i deflussi superficiali. A zone poco permeabili corrispondono valori di CN elevati e l'acqua, non riuscendo a permeare il suolo, genera un deflusso superficiale quasi nell'immediato. A valori bassi corrispondono invece terreni permeabili che riescono quindi ad immagazzinare una certa quantità di acqua nel suolo prima di generare deflussi.

La parte bassa della mappa (*Figura 2.5*) presenta valori di CN elevati a causa della presenza di zone fortemente urbanizzate e quindi poco permeabili per colpa di edifici o di altri tipi di coperture impermeabili (marciapiedi, strade, etc.). La parte alta invece, grazie alla maggior presenza di vegetazione, presenta una maggiore permeabilità e di conseguenza valori di CN più esigui.

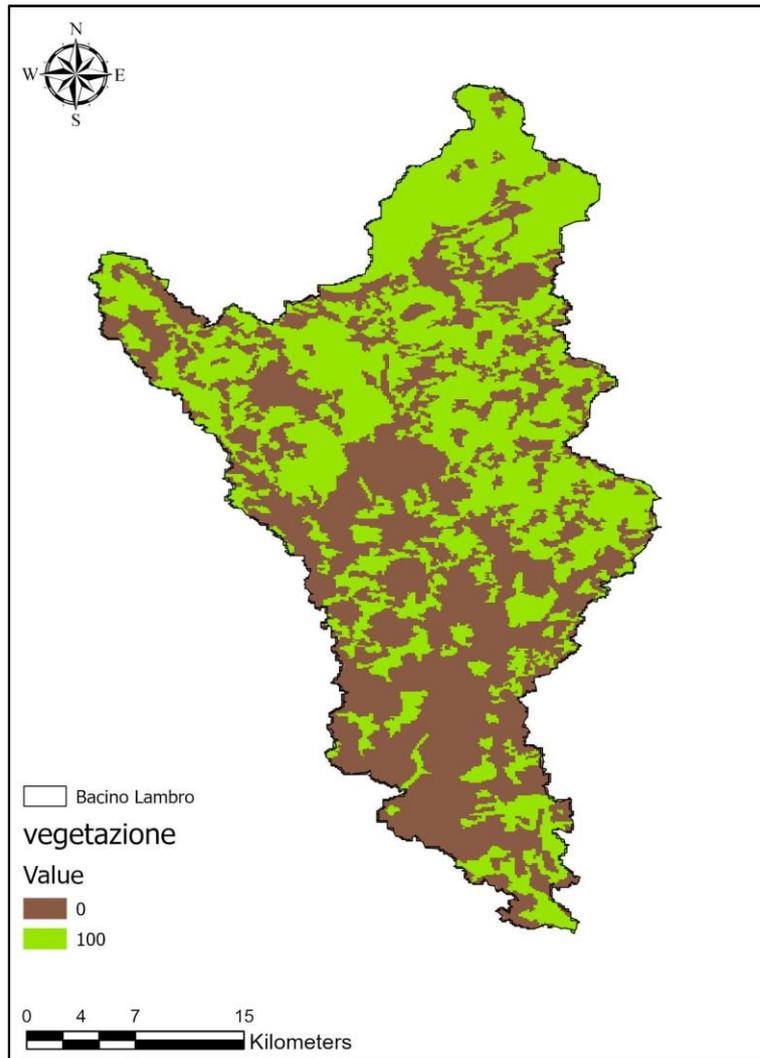


Figura 2.6: Mappa della copertura vegetativa per il bacino di riferimento

La mappa in *Figura 2.6* mostra la copertura vegetativa dell'area, questo dato è necessario per poter valutare la componente data dall'evapotraspirazione nel bilancio idrologico.

In *Tabella 2.2* sono mostrati i valori di CN a seconda dell'uso e del tipo idrologico di suolo [13].

Nella corrente analisi è stato considerato un suolo di tipo C costituito principalmente da argilla sabbiosa con scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Tabella 2.2: Tabella dei valori di CN definita in base ai diversi gruppi idrologici del suolo e per il DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali) della Regione Lombardia, in particolare per la copertura del territorio della Valtellina

USO DEL SUOLO	Gruppo idrologico del suolo			
	A	B	C	D
<b>AREE CON SEMINATIVI</b>				
Seminativo semplice	67	75	83	87
Seminativo arborato	69	79	85	89
Orti familiari non in ambito urbano	69	79	85	89
Risaie	65	72	83	87
<b>AREE LEGNOSE AGRARIE</b>				
Frutteti e frutti minori	65	75	82	86
Vigneti	67	77	83	87
Frutteti con vigneti	66	76	82	86
Oliveti	65	75	82	86
Castagneti da frutto, pioppeti, arboricoltura da legno	67	78	85	89
<b>AREE CON PRATI E BOSCHI</b>				
Prati permanenti di pianura	54	74	81	85
Prati permanenti di pianura con coltivazioni foraggere, associati a seminativi	59	75	83	87
Prati permanenti con la presenza diffusa di filari arborei	69	81	86	89
Prati e pascoli	49	71	86	89
Boschi di latifoglie e conifere	42	65	76	80
<b>AREE CON VEGETAZIONE NATURALE</b>				
Vegetazione palustre, delle torbiere, di zone spondali e spesso inondate	98	98	98	98
Vegetazione rupestre e dei detriti	68	79	86	89
Vegetazione arbustiva, cespuglieti ed in evoluzione verso forme forestali	46	67	77	84
<b>AREE STERILI</b>				
Accumuli detritici, affioramenti litoidi privi di vegetazione, aree estrattive, discariche, ambiti degradati soggetti ad uso diverso	72	82	87	90
Aree sabbiose, ghiaiose e spiagge	25	55	70	77

## AREE IDRICHE

Ghiacciai e nevai	36	60	73	79
Laghi, bacini e specchi d'acqua, alvei fluviali e corsi d'acqua superficiali	100	100	100	100

## AREE URBANIZZATE

Tessuto urbano continuo	89	92	94	95
Tessuto residenziale discontinuo	77	85	90	92
Tessuto residenziale rado e nucleiforme	60	75	84	89
Tessuto residenziale sparso	55	71	80	85
Insedimenti industriali, artigianali, commerciali, grandi impianti di servizi pubblici e privati	81	88	91	93
Insedimenti produttivi agricoli	62	76	83	87
Cantieri, aeroporti ed eliporti	72	82	87	89
Parchi, giardini, aree verdi incolte interne all'urbanizzato	68	79	86	89
Campeggi, impianti sportivi, strutture turistiche e ricreative	49	69	79	84

## 2.6 Raccolta campioni

Per raccogliere informazioni sulle caratteristiche biologiche del fiume Lambro, sono state effettuate 3 distinte campagne di campionamento, due nel periodo invernale (novembre - dicembre) ed una nel periodo primaverile (aprile).



*Figura 2.7: Fase di raccolta dei campioni d'acqua*

Sulla base dell'ubicazione dei depuratori di Sesto San Giovanni e di Peschiera Borromeo sono stati scelti i punti di campionamento, a monte e a valle degli scarichi

di ciascuno di essi. Si è effettuata questa scelta anche a dimostrazione della bassa influenza degli scarichi dei depuratori sulla qualità complessiva, ed in generale non elevata, del fiume Lambro.

Per ciascun punto sono stati effettuati 4 prelievi di acqua all'interno dell'alveo del fiume, per un totale di 16 campioni per campagna.

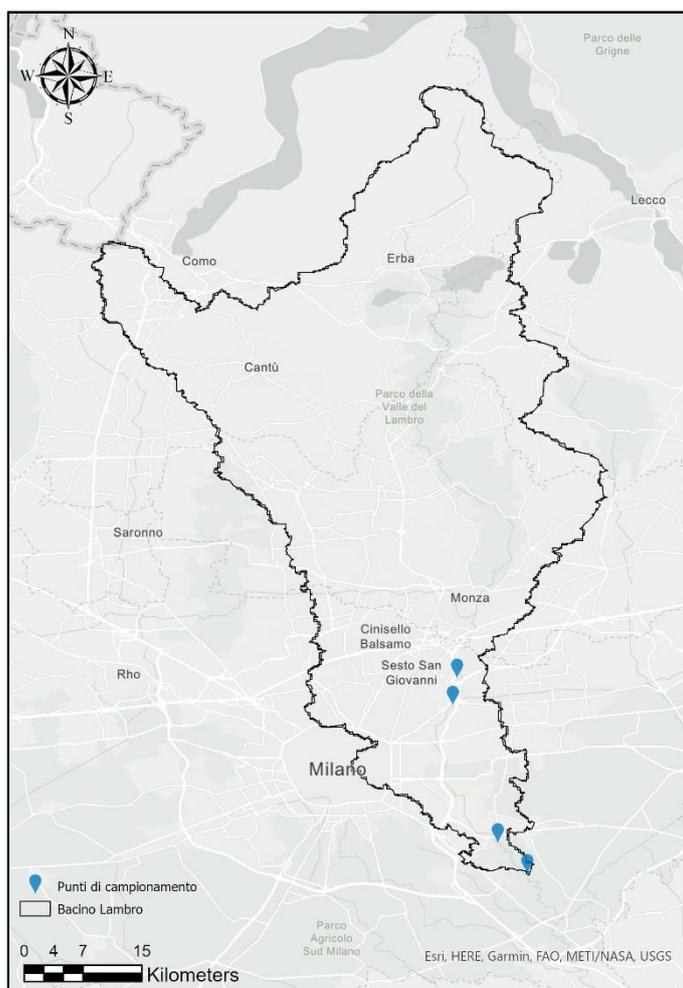


Figura 2.8: Mappa della posizione dei punti di campionamento all'interno del bacino di riferimento

I prelievi sono stati effettuati a due diverse profondità dal pelo libero dell'acqua per ridurre possibili errori dovuti al trasporto o sospensione di sedimenti dal fondo alveo, che potessero alterare la rappresentatività dei risultati.

Sono stati utilizzati due diversi tipi di contenitori, entrambi costituiti da materiale plastico e con una capienza pari a 500 ml.

La differenza tra i due contenitori è data dalla presenza di un film interno avente lo scopo di garantire la sterilità ed evitare la contaminazione con agenti esterni prima del prelievo. Per i contenitori non trattati internamente è stata prevista una fase

preliminare di risciacquo, eseguita con la stessa acqua del fiume, avente lo scopo di rimuovere eventuali residui prima della fase di campionamento stesso. Per i contenitori trattati internamente è stato previsto il diretto prelievo dei campioni, per evitare il dilavamento del film interno.



Figura 2.9: Contenitore utilizzato per il campionamento

La stessa procedura di prelievo è stata utilizzata nei diversi punti e periodi di campionamento, mantenendo al minimo le condizioni di disturbo, legate soprattutto alla sospensione del materiale depositato sul fondo alveo.

Una volta raccolti, i campioni sono stati analizzati in laboratorio ed i risultati sono mostrati in *Tabella 2.3* e nell'APPENDICE (restante analisi effettuate sui campioni).

*Tabella 2.3: Risultati analisi batteriologiche (rispettivamente della 1° e della 2° campagna) eseguite sui campioni di acqua prelevati (P.B.=Depuratore di Peschiera Borromeo; S.S.G.= Depuratore di Sesto San Giovanni; SUP=superficie)*

	<b>Coliformi totali UFC/100 ml</b>	
	P.B. monte 5 cm dalla superficie	6000
P.B. monte 50 cm dalla superficie	11000	5000
P.B. valle 5 cm dalla superficie	11000	10000
P.B. valle 50 cm dalla superficie	6000	6000
S.S.G. monte 5 cm dalla superficie	5000	6000
S.S.G. monte 50 cm dalla superficie	5000	11000
S.S.G. valle 5 cm dalla superficie	10000	11000
S.S.G. valle 50 cm dalla superficie	6000	6000

Non è stato ottenuto alcun risultato relativo alla prima campagna di campionamento a causa di errori in laboratorio. In particolar modo, nelle analisi batteriche, è stata

rilevata la presenza di un numero talmente elevato di organismi in piastra da impedirne la conta visiva. Ciò ha determinato la scelta di effettuare una diluizione dei campioni nelle successive analisi, garantendone così la corretta riuscita.

*Tabella 2.4: Posizione e profondità dei punti di campionamento scelti lungo il fiume Lambro*

<b>Punto di campionamento</b>	<b>Lat [°]</b>	<b>Long [°]</b>	<b>Profondità di campionamento [cm]</b>	<b>Profondità alveo [cm]</b>
Sesto San Giovanni monte	45.53	9.26	5 50	100
Sesto San Giovanni valle	45.51	9.26	5 50	95
Peschiera Borromeo monte	45.42	9.29	5 50	90
Peschiera Borromeo valle	45.40	9.31	5 50	125

### 3 MODELLO IDROLOGICO

Si utilizza in questo studio il modello *Poli-Hydro* [14] in grado di riprodurre i principali processi idrologici che si verificano nel bacino, stimando in particolare il deflusso superficiale e sotterraneo e le relative portate risultanti alle sezioni di chiusura selezionate.

Tramite relazioni matematiche si legano alcune variabili di input quali precipitazione, temperatura e radiazione, con la variabile di output ovvero la portata.

Questo modello utilizza una parametrizzazione semplificata dei principali processi fisici che regolano le relazioni stesse: fusione nivale, ablazione e fusione glaciale, deflusso sotterraneo e superficiale, variazione del contenuto d'acqua nel suolo ed evapotraspirazione. Tutti i processi sopra elencati sono presi in considerazione nella corrente analisi tranne che per il ghiaccio a causa di mancanza di aree glaciali.

Il modello inoltre è spazialmente distribuito, quindi implementato sul bacino suddiviso in una griglia regolare di celle quadrate 100 m x 100 m, ognuna con i propri parametri fisici, per descrivere al meglio la variabilità spaziale dei fenomeni.

#### 3.1 Struttura del modello

Il modello idrologico è basato sull'equazione di conservazione della massa d'acqua nel suolo tra due passi temporali successivi.

La formula del bilancio è la seguente:

$$S^{t+\Delta t} = S^t + R + M_s + M_i - ET - Q_g$$

3.1

con:

S: contenuto d'acqua nel suolo [mm];

R: precipitazione liquida [mm];

M<sub>s</sub>: fusione nivale [mm];

M<sub>i</sub>: fusione glaciale [mm];

ET: evapotraspirazione effettiva [mm];

Q<sub>g</sub>: deflusso sub-superficiale [mm];

t: istante temporale [d];

Δt: intervallo temporale [d].

Il bilancio è effettuato a scala giornaliera ed una volta nota la variazione del contenuto d'acqua, si calcola il deflusso superficiale sulla base del massimo contenuto d'acqua ammissibile nel suolo, tramite la seguente formula:

$$\begin{cases} Q_s = S^{t+\Delta t} - S_{\max} & S^{t+\Delta t} > S_{\max} \\ Q_s = 0 & S^{t+\Delta t} < S_{\max} \end{cases}$$

3.2

con:

$S_{\max}$ : massimo contenuto d'acqua del suolo [mm];

$Q_s$ : deflusso superficiale [mm].

Il valore di  $S_{\max}$  è valutato cella per cella sulla base del valore di CN assegnato attraverso il metodo del Curve Number (SCS-CN) proposto dal Soil Conservation Service (SCS) dell'USGS [15].

$$S_{\max} = S_0 \cdot \left( \frac{100}{\text{CN}} - 1 \right)$$

3.3

con valore iniziale di  $S_0$  nullo, rappresentate uno stato di imbibimento iniziale del suolo.

## 3.2 Fusione nivale e glaciale

La fusione glaciale è nulla a causa della mancanza di aree perennemente ghiacciate mentre quella nivale ha un ruolo molto marginale a causa della scarsa presenza di neve per le basse altitudini raggiunte nel bacino. In entrambi i casi, il calcolo del rispettivo contributo si basa sul metodo del Degree Day tramite la seguente formulazione:

$$M_s = DD_s \cdot (T - T_t)$$

$$M_i = DD_i \cdot (T - T_t)$$

3.4

con:

$M_{s,i}$ : fusione nivale e glaciale [mm];

$DD_{s,i}$ : fattore di fusione nivale e glaciale [mm/°C/d];

$T_s$ : temperatura oltre la quale si ha fusione [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T$ : temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ].

La precipitazione nevosa è calcolata direttamente dalla precipitazione liquida utilizzando una temperatura soglia ( $0^{\circ}\text{C}$ ) oltre la quale la pioggia viene considerata neve. Si calcola quindi la quantità di pioggia equivalente ad un'altezza di manto nevoso (SWE) tramite la seguente formulazione:

$$\begin{aligned} \text{SWE}^{t+\Delta t} &= \text{SWE}^t + P_{\text{snow}} - M_s - \text{ET}_{\text{eff,snow}} \\ \text{ET}_{\text{eff,snow}} &= 0.2\text{ET}_p \end{aligned}$$

3.5

con:

SWE: snow water equivalent [mm];

$P_{\text{snow}}$ : precipitazione nevosa [mm];

$M_s$ : fusione nivale [mm];

$\text{ET}_{\text{eff,snow}}$ : evapotraspirazione effettiva della neve [mm];

$\text{ET}_p$ : evapotraspirazione potenziale [mm].

### 3.3 Evapotraspirazione

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale si utilizza la formula di Hargreaves dipendente dalla temperatura e dalla radiazione in libera atmosfera (non al suolo).

$$\text{ETP} = 0.0023 \cdot S_0 \cdot \sqrt{\delta_t} \cdot (T + 17.8)$$

3.6

con:

ETP: evapotraspirazione potenziale [mm];

$S_0$ : equivalente di acqua nella radiazione extraterrestre [mm/d];

$\delta_t$ : escursione termica media giornaliera [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T$ : temperatura media giornaliera [ $^{\circ}\text{C}$ ].

L'evapotraspirazione effettiva si calcola come somma della traspirazione effettiva e dell'evapotraspirazione effettiva del suolo.

$$ET = E_s + T_s$$

$$E_s = \alpha \cdot (\theta) \cdot ETP \cdot (1 - f_v)$$

$$T_s = \beta \cdot (\theta) \cdot ETP \cdot f_v$$

3.7

con:

ET: evapotraspirazione effettiva [mm];

$E_s$ : evapotraspirazione effettiva del suolo [mm];

$T_s$ : traspirazione effettiva del suolo [mm];

$\theta$ : contenuto d'acqua del suolo [-];

$f_v$ : frazione vegetata del suolo [-].

### 3.4 Serbatoio sotterraneo

Il deflusso sub-superficiale ricarica il serbatoio sotterraneo; questo è calcolato in funzione del contenuto d'acqua del suolo e della conducibilità idraulica tramite la seguente formulazione:

$$Q_g = K \cdot \left( \frac{S}{S_{max}} \right)^{k_g}$$

3.8

con:

$Q_g$ : deflusso sub-superficiale [mm];

K: conducibilità idraulica [mm/d];

S: contenuto d'acqua del suolo [mm];

$S_{max}$ : massimo contenuto d'acqua del suolo [mm];

$k_g$ : esponenziale di correzione [-].

K e  $k_g$  sono calibrati sulla base della corrispondenza tra idrogramma osservato e simulato.

### 3.5 Flow routing

Il bilancio viene applicato ad ogni cella del bacino e la portata generata viene spedita alla sezione di chiusura tramite l'algoritmo lineare di Nash. Questo è un algoritmo di flow routing semi distribuito secondo cui l'idrogramma unitario istantaneo (IUH),

definito come l'idrogramma di piena che si origina in un bacino in seguito ad un impulso unitario, è descritto dalla seguente formulazione:

$$h(t) = \frac{1}{k \cdot (n - 1)!} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

3.9

con:

h: idrogramma istantaneo unitario [-];

n: numero di serbatoi [-];

k: coefficiente di esaurimento costante [-];

t: istante temporale [d].

Sono stati utilizzati due sistemi in parallelo, uno per la rappresentazione del deflusso superficiale ed una per quello sub-superficiale.

### 3.6 Simulazione

Il modello necessita in input dati di temperatura (minima, massima e media) e di precipitazione, per poter rappresentare l'andamento dei parametri in ogni cella per l'intera durata della simulazione.

Per descrivere i dati dell'intero bacino viene individuata un'area di influenza di ciascuna stazione grazie alla formazione di poligoni di Thiessen. L'area di influenza non tiene in considerazione la quota delle celle con cui i parametri in input variano, per tal motivo è stato inserito un gradiente di precipitazione e temperatura per scalare i dati alla quota corretta. Il gradiente è stato individuato a partire da una correlazione lineare tra la quota di ciascuna stazione e la temperatura/precipitazione media mensile.

La temperatura diminuisce con la quota mentre la precipitazione aumenta sebbene con diversa inclinazione in base al periodo. In *Figura 3.1* e in *Figura 3.2* sono rappresentati gli andamenti dei gradienti per alcuni mesi dell'anno.

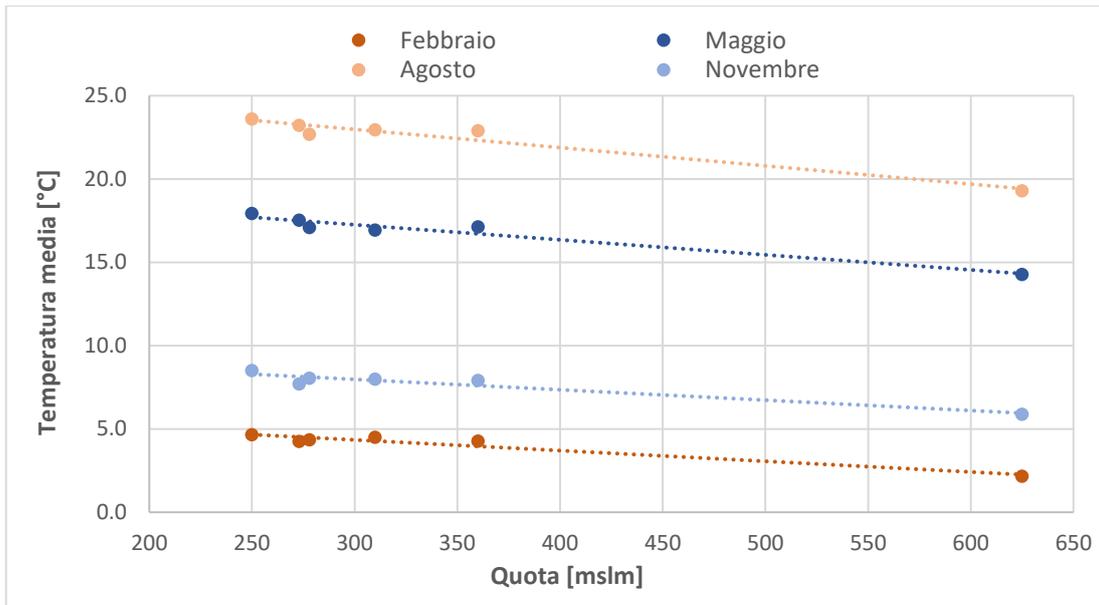


Figura 3.1: Andamento della temperatura media mensile in funzione della quota altimetrica

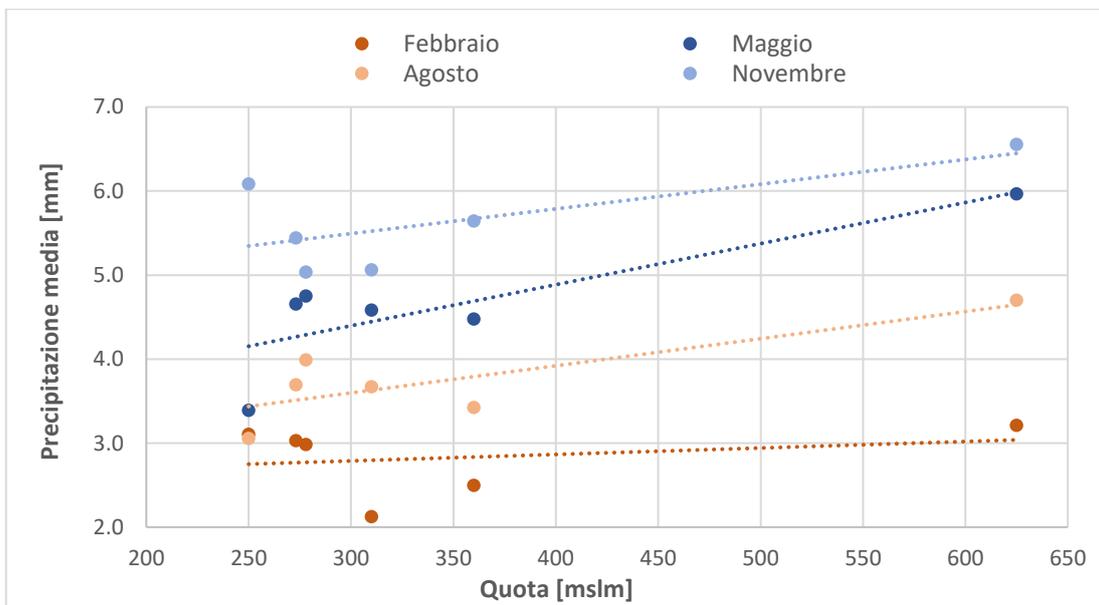


Figura 3.2: Andamento della precipitazione media mensile in funzione della quota altimetrica

### 3.7 Calibrazione modello

L'obiettivo della calibrazione è quello di ottenere un idrogramma di portata modellata che riproduca al meglio la portata osservata.

I parametri di calibrazione sono i seguenti:

- K: permeabilità del suolo [mm/h];
- $k_g$ : esponente della portata  $Q_g$  [1/h];
- $S_{fatt}$ : fattore moltiplicativo di  $S_{max}$  [-];

- $t_{lag}$ : tempi di lag superficiali e sub-superficiali per valutare il tempo che intercorre tra il picco di precipitazione ed il picco dell'idrogramma [h];
- DDS: fattore di fusione nivale [mm/°C/d].

L'incremento della permeabilità del suolo genera un aumento di velocità del deflusso sub superficiale e di conseguenza un aumento delle portate, l'aumento del fattore moltiplicativo riduce i picchi dell'idrogramma in quanto aumenta il contenuto d'acqua ammissibile nel suolo, i tempi di lag anticipano o ritardano la posizione del picco, l'esponente di  $Q_g$  corregge la portata mentre il DDS anticipa o posticipa la fusione nevosa.

Gli idrogrammi (osservato e modellato) vengono confrontati per valutare la loro similarità e vengono calcolati due indicatori statistici (errore percentile e Nash-Sutcliffe Efficiency) per la misura dell'errore.

$$e = \frac{\overline{Q_m} - \overline{Q_0}}{\overline{Q_0}}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})}$$

3.10

con:

$\overline{Q_m}$ : media delle portate simulate [m<sup>3</sup>/s];

$\overline{Q_0}$ : media delle portate osservate [m<sup>3</sup>/s];

$Q_m^t$ : portata simulata all'istante t [m<sup>3</sup>/s];

$Q_0^t$ : portata osservata all'istante t [m<sup>3</sup>/s].

Gli indici permettono di valutare se si sta sovrastimando ( $e > 0$ ) o sottostimando ( $e < 0$ ) la portata e se la corrispondenza tra simulato e osservato è buona ( $NSE \rightarrow 1$ ) o cattiva ( $NSE < 0$ ). Il confronto è stato effettuato a scala mensile e giornaliera.

### 3.8 Bacini di simulazione

La simulazione è stata svolta su tutti e 5 i bacini dell'area di studio, sebbene la calibrazione e validazione è stata eseguita solo sul bacino intermedio situato a Milano Via Feltre (unica sezione di chiusura con misurazione del livello idrometrico) come raffigurato in *Figura 3.4*.

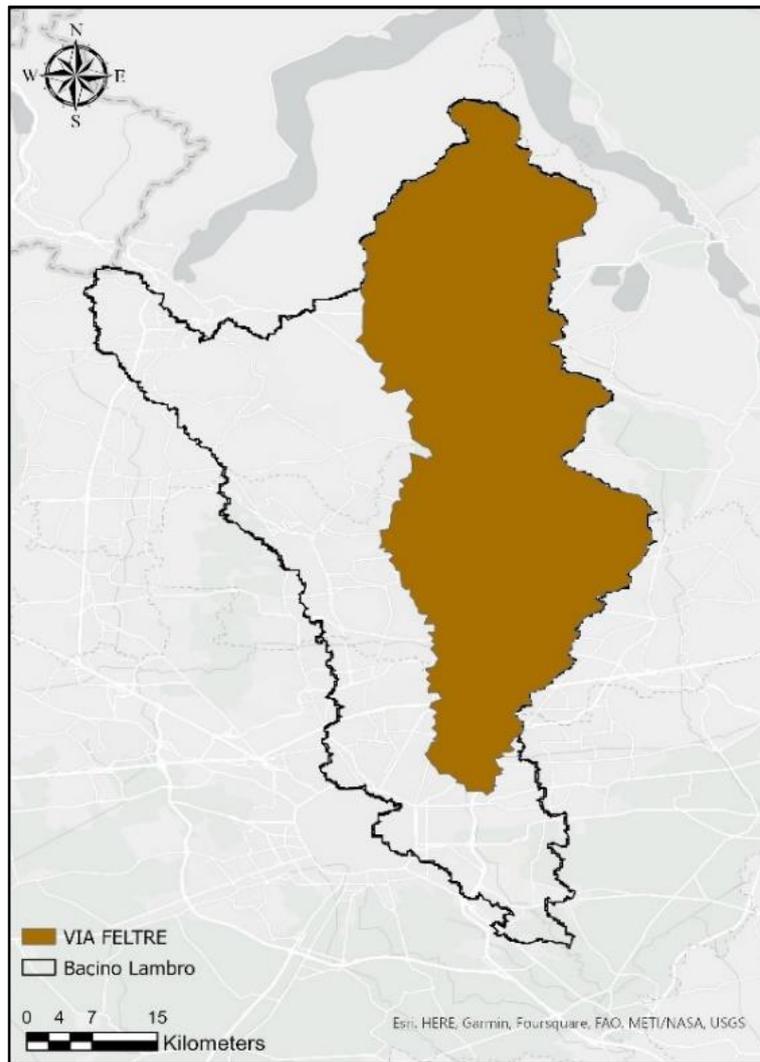


Figura 3.4: Bacino con idrometro di Milano via Feltre

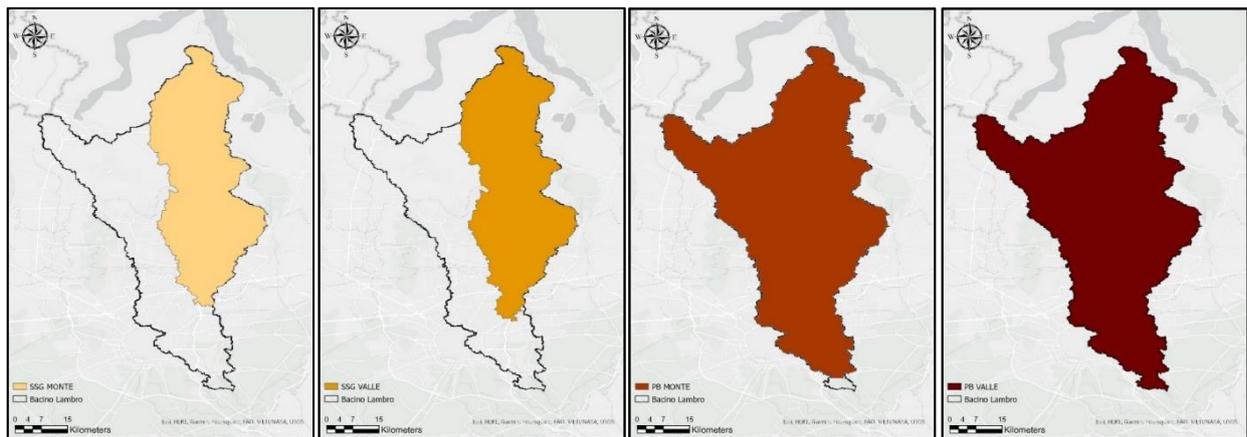
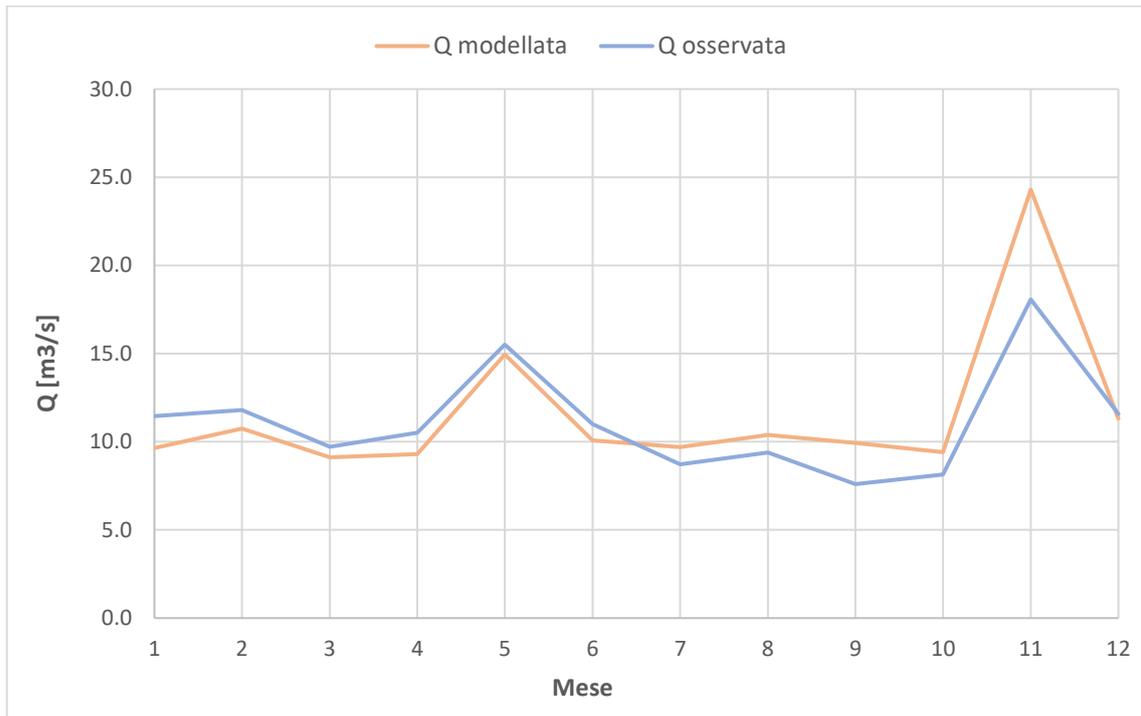


Figura 3.3: Bacini di simulazione senza idrometro

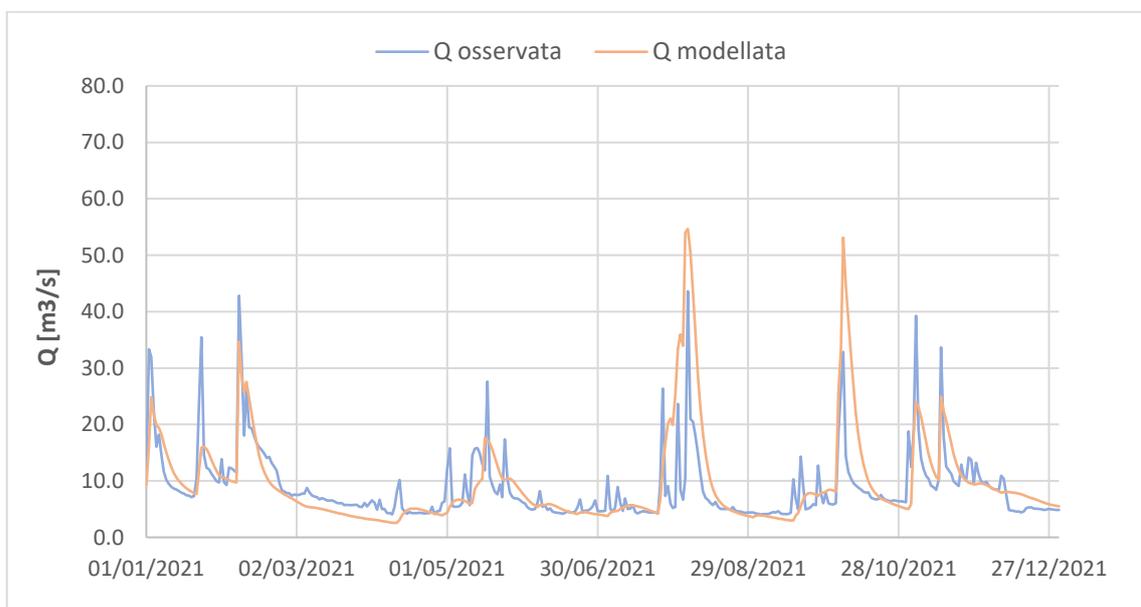
### 3.9 Calibrazione modello idrologico

In *Figura 3.5* ed in *Figura 3.6* sono mostrati gli andamenti dell'idrogramma simulato e di quello modellato a scala media mensile e giornaliera (anno 2021).

I dati utilizzati per la calibrazione coprono il periodo dal 2010 al 2017, mentre i restanti anni (2018 - 2021) sono stati utilizzati per la validazione.



*Figura 3.5: Confronto idrogramma modellato ed osservato a scala media mensile per l'intero periodo di calibrazione (2010-2017)*



*Figura 3.6: Confronto idrogramma modellato e simulato a scala giornaliera anno 2021*

Il periodo di validazione non deve contenere variabili dipendenti da quello della calibrazione, ne deve mostrare particolari andamenti diversi rispetto al periodo di calibrazione.

In *Tabella 3.1* sono elencati i dati finali di calibrazione del modello idrologico mentre in *Tabella 3.2* sono riportati i valori degli indici di errore a scala mensile e giornaliera per gli anni di calibrazione.

*Tabella 3.1: Parametri definitivi del modello idrologico*

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>	<b>Unità di misura</b>
S <sub>fatt</sub>	2.5	-
K	2.5	mm/d
k <sub>g</sub>	1	-
t <sub>lag_sup</sub>	140	h
t <sub>lag_sub</sub>	150	h
DD <sub>snow</sub>	3.4	mm/(d·°C)

*Tabella 3.2: Risultati indici statistici a scala mensile e giornaliera per il periodo di calibrazione*

<b>Anno</b>	<b>Scala mensile</b>		<b>Scala giornaliera</b>	
	<b>NSE</b>	<b>e</b>	<b>NSE</b>	<b>e</b>
<b>2010</b>	0.77	0.15	0.58	0.14
<b>2011</b>	-0.31	0.06	-0.10	0.10
<b>2012</b>	-0.31	0.19	0.04	0.19
<b>2013</b>	0.45	0.08	0.43	0.17
<b>2014</b>	0.84	0.09	0.59	0.07
<b>2015</b>	0.00	-0.05	0.02	-0.03
<b>2016</b>	0.09	-0.19	0.25	-0.17
<b>2017</b>	-0.52	-0.05	-0.31	-0.04
<b>2010-2017</b>	0.67	0.04	0.50	0.05

Nella *Figura 3.7* e *Figura 3.8* sono riportati rispettivamente l'andamento medio annuale della portata modellata e osservata alla sezione di chiusura situata a Milano Via Feltre per il periodo di calibrazione e l'andamento medio mensile dei vari contributi modellati del ciclo idrologico.

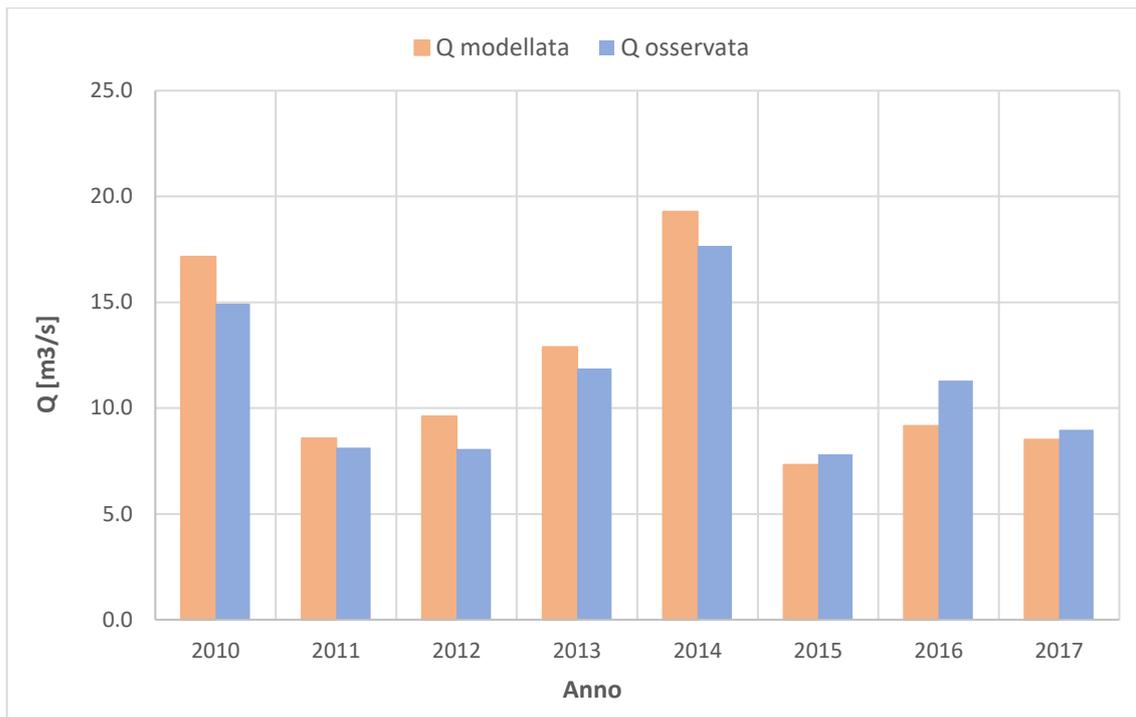


Figura 3.7: Andamento portate medie modellate e osservate a scala annuale

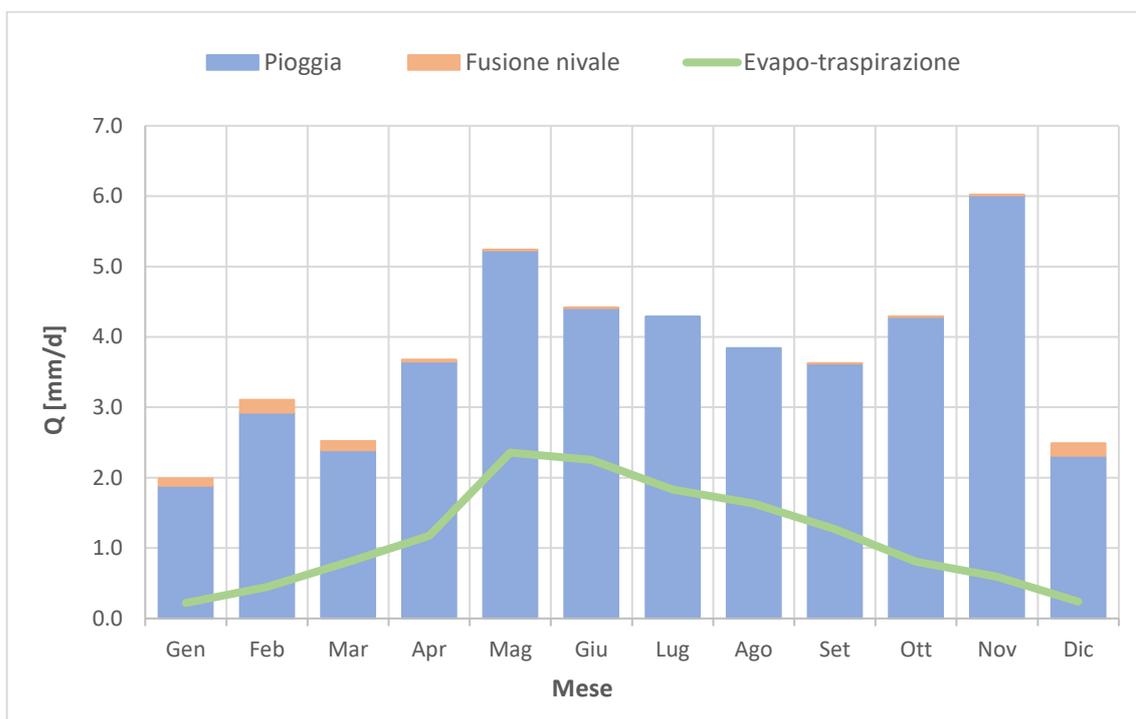


Figura 3.8: Andamento contributi simulati del deflusso a scala media mensile (2010-2017)

### 3.10 Validazione modello idrologico

In *Tabella 3.3* sono rappresentati i risultati degli indici di errore statistici mentre, in *Figura 3.9* ed in *Figura 3.10* sono mostrati i confronti tra le portate modellate ed osservate, rispettivamente a scala media annuale ed a scala media mensile.

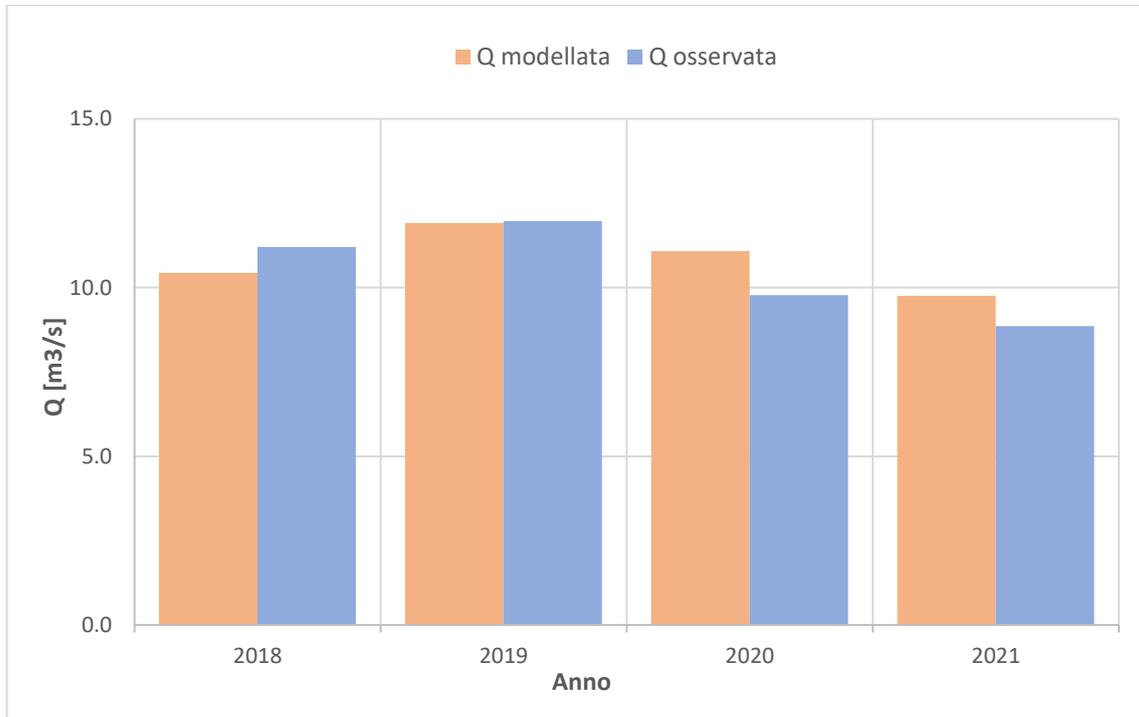


Figura 3.9: Andamento portate medie modellate e osservate a scala annuale

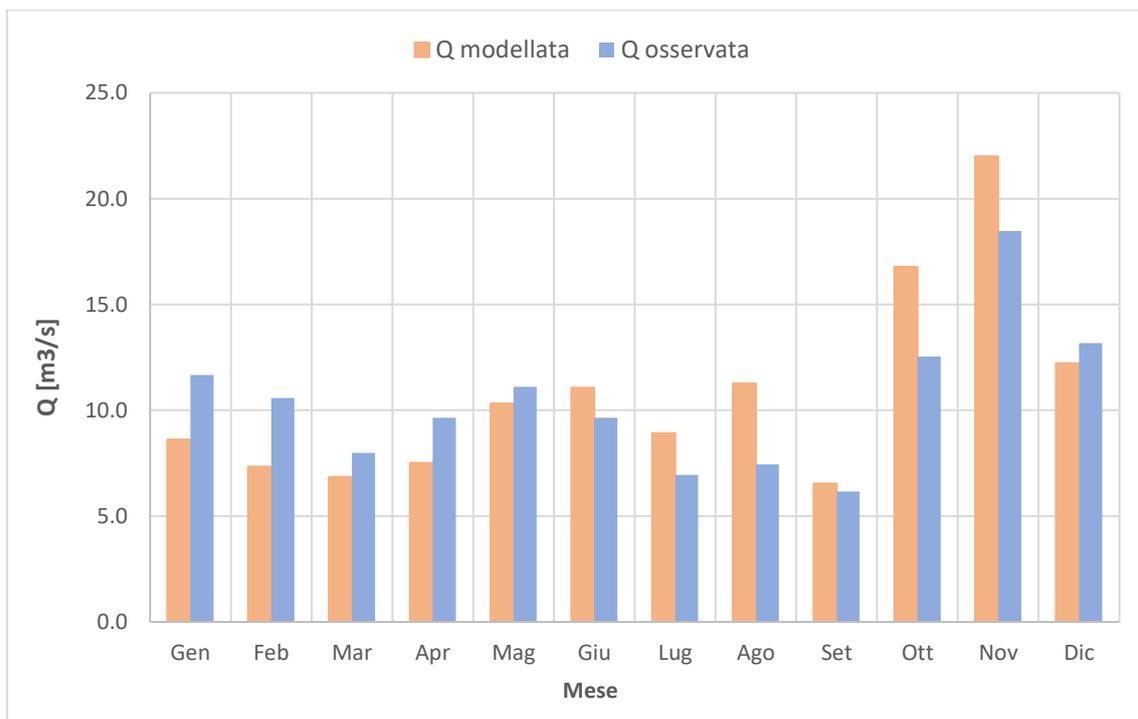


Figura 3.10: Andamento portate medie modellate e osservate a scala media mensile (2018-2021)

Tabella 3.3: Risultati indici statistici a scala mensile e giornaliera per il periodo di validazione

<b>Anno</b>	<b>Scala mensile</b>		<b>Scala giornaliera</b>	
	<b>NSE</b>	<b>e</b>	<b>NSE</b>	<b>e</b>
<b>2018</b>	0.61	-0.07	0.06	-0.05
<b>2019</b>	0.69	-0.01	0.40	0.05
<b>2020</b>	0.18	0.13	0.08	0.14
<b>2021</b>	0.26	0.10	-0.02	0.12
<b>2018-2021</b>	0.57	0.03	0.21	0.07

## 4 MODELLO DELLA DINAMICA BATTERICA

Sebbene sia opinione diffusa che le acque sotterranee abbiano elevate caratteristiche chimico-fisiche-biologiche grazie all'effetto filtro effettuato del terreno nei confronti degli inquinanti, l'aumento delle portate di pioggia e di conseguenza dei fenomeni di trasporto ed infiltrazione degli stessi, possono essere causa di contaminazione.

Tra i vari contaminanti degli acquiferi si possono trovare microrganismi di origine batterica, la cui presenza nelle acque destinate al consumo umano è un rischio non trascurabile.

Studi epidemiologici e valutazione del rischio (Risk assesment) sono utilizzati in maniera complementare per la salvaguardia della salute umana ma spesso, quando si parla di rischio microbiologico, presentano delle limitazioni.

Le principali difficoltà riguardano l'enumerazione dei batteri a causa di elenchi di patogeni incompleti e metodi di rilevamento poco sensibili, incertezza sull'infettività e variazione nella diffusione delle acque [16].

### 4.1 Batteri di riferimento

I coliformi totali sono un gruppo di batteri comunemente presenti in diversi ambienti, tra cui suolo o acqua dove sopravvivono e si riproducono, ma anche nell'intestino dei mammiferi compresi gli esseri umani [17].

Nell'acqua, i coliformi non hanno sapore, odore o colore e possono essere rilevati solo attraverso un esame di laboratorio. I batteri coliformi totali non sono suscettibili di causare malattie, ma la loro presenza indica che l'approvvigionamento idrico può essere potenzialmente vulnerabile alla contaminazione da parte di microrganismi più dannosi.

I coliformi sono microrganismi aerobi o anaerobi facoltativi non sporigeni; al loro interno comprendono diverse specie, tra cui gli *Escherichia coli* ed al microscopio appaiono a forma di bastoncino con colorazione Gram-negativa, il che indica una precisa struttura della parte cellulare.

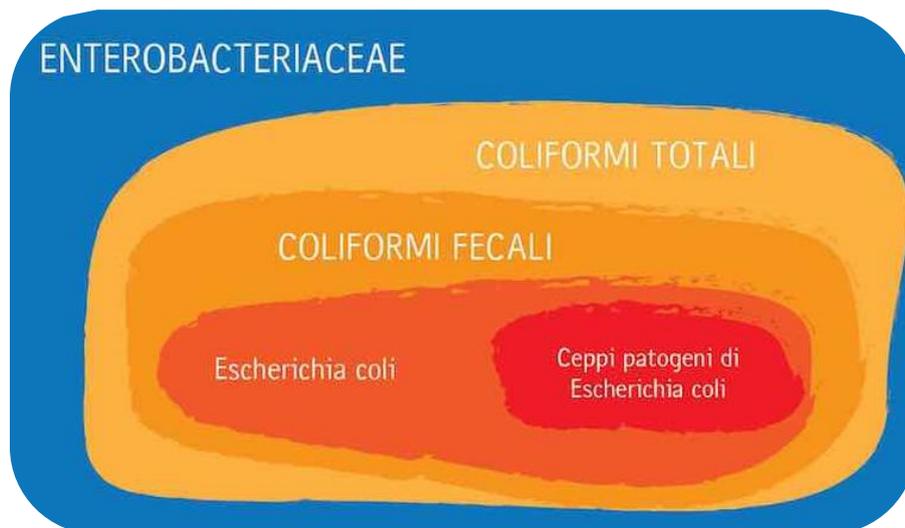


Figura 4.1: Suddivisione dei diversi gruppi batterici appartenenti alla famiglia delle enterobacteriae

Generalmente le acque filtrate dal terreno hanno elevate caratteristiche fisico-chimiche, questo accade perché le sostanze vengono adsorbite dalle particelle di suolo in maniera inversamente proporzionale alla propria grandezza.

Un grammo di suolo può contenere da 10 milioni fino ad 1 miliardo di batteri e, sebbene con elevata biodiversità, alcuni gruppi sono dominanti rispetto ad altri, ne è un esempio il gruppo dei protobatteri a cui appartengono l'Escherichia coli [18].

I microrganismi possono rimanere intrappolati nel suolo per periodi di tempo variabili poiché, durante la fase di attraversamento, l'acqua deadsorbe le sostanze e le trasporta nel suo percorso. Lo spostamento dei microrganismi dipende per lo più dalla natura del suolo, dallo stato di saturazione e dal flusso dell'acqua che percola e scorre nel terreno [19].

Esperimenti di laboratorio hanno mostrato come il trasporto di batteri coliformi, in una colonna contenente una mistura di fanghi e suolo, sia consistente solo con forti piogge, inoltre solamente una minima parte del quantitativo iniziale di batteri è stato trovato nel percolato in uscita dalla colonna [20].

Sebbene in quantità ridotta, esistono svariate prove sull'esistenza dei microrganismi anche negli acquiferi profondi.

Uno studio del 1985 ha dimostrato come i Gram negativi sia il maggior costituente tra i gruppi di batteri presenti nell'acquifero [21], mentre studi più recenti hanno riscontrato la presenza di virus e batteri nelle acque sotterranee a profondità molto elevate, fino a 450 m [22].

## 4.2 Confronto con modelli esistenti

La dinamica batterica è molto complessa da descrivere a causa dei molteplici fenomeni ed interazioni che intercorrono nel sistema acqua-suolo.

Il trasporto principale di microrganismi nel suolo avviene attraverso l'acqua di infiltrazione, tramite il deflusso superficiale e i sedimenti; il principale fenomeno che invece limita lo spostamento è l'adsorbimento.

Alcune particelle individuali di batteri possono interagire con altre andando a formare dei ponti, all'interno dei pori, limitando altri microrganismi a spostarsi nella direzione del flusso. Sebbene questi processi siano diversi tra loro, è molto difficile considerarli come fenomeni separati [23].

Uno studio sulla lisciviazione dei batteri all'interno di una colonna, ha concluso che lo spostamento dei batteri è maggiore in colonne contenenti macropori e che il trasporto dipende principalmente dalla velocità e tipo del flusso, e dalla capacità di ritenzione batterica del suolo.

Molti modelli sono stati ideati per la rappresentazione del trasporto batterico e, sebbene la complessità dei processi inclusi in essi, nessuno è in grado di rappresentare in maniera ottimale, tutti i fenomeni geologici ed idrogeologici che influenzano il trasporto [24].

Per tal motivo si è optato per una rappresentazione semplificativa dell'evoluzione e del trasporto batterico, dipendente da un numero ridotto di fattori.

Il nuovo modello semplificativo è basato sul già esistente modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [25] e nei successivi paragrafi sono illustrate le principali componenti e differenze tra i due.

### 4.2.1 Crescita batterica

In SWAT la crescita/morte batterica è rappresentata dalla legge di Chick modificata tramite l'aggiunta di una perdita batterica giornaliera definita dall'utente.

La dinamica è rappresentata tramite la seguente formulazione:

$$N = N_0 \cdot \exp(-k \cdot t) - N_{\text{day}}$$

4.1

con:

N: numero finale di microrganismi [ufc/m<sup>2</sup>];

$N_0$ : numero iniziale di microrganismi [ufc/m<sup>2</sup>];

$k$ : parametro cinetico effettivo [1/d];

$t$ : intervallo di tempo [d];

$N_{\text{day}}$ : perdita batterica giornaliera [ufc/m<sup>2</sup>].

Il parametro cinetico effettivo è dato dalla differenza del parametro cinetico di morte e di crescita, di conseguenza se il parametro di crescita è maggiore di quello di morte, la loro differenza è negativa portando l'equazione 4.1 ad essere un'esponenziale crescente, mentre se la differenza è positiva, l'esponenziale è decrescente. Tramite questa differenza, è possibile modellare sia la morte che la crescita batterica.

$$\begin{cases} k = k_{\text{morte}} - k_{\text{crescita}} \\ \text{se } k > 0 \rightarrow \text{morte batterica} \\ \text{se } k < 0 \rightarrow \text{crescita batterica} \end{cases}$$

Questa formulazione presenta una forte limitazione dal punto di vista della crescita poiché, essendo un'esponenziale, tenderà ad una crescita infinita in maniera molto rapida.

Per superare questo problema, la legge modificata di Chick è stata sostituita da una funzione già ampiamente utilizzato in passato, la curva di Gompertz [26].

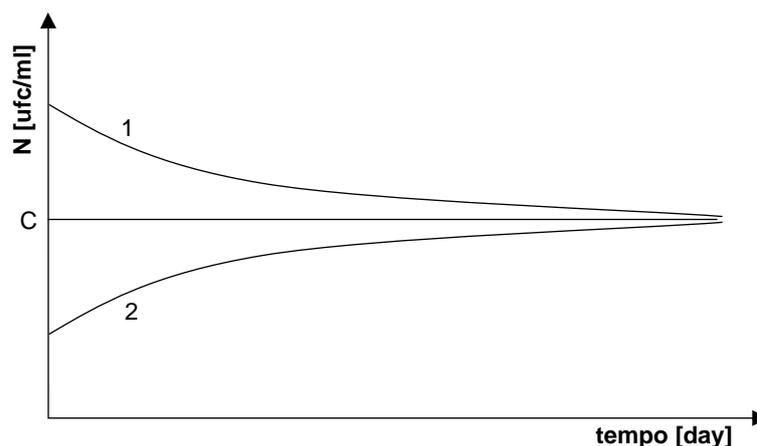


Figura 4.2: Rappresentazione dell'andamento della funzione di Gompertz; curva 1: concentrazione batterica  $N$  superiore alla capacità portante  $C$ ; caso 2: concentrazione batterica  $N$  inferiore alla capacità portante  $C$

$$N = C \cdot \left( \frac{N_{\text{iniz}}}{C} \right)^{\exp(-k \cdot t)}$$

con:

C: capacità portante [ufc/ml];

$N_{iniz}$ : numero iniziale di microrganismi [ufc/ml];

N: numero finale di microrganismi [ufc/ml];

k: parametro cinetico di crescita batterica effettiva [1/d];

t: intervallo di tempo [d].

Il parametro principale della funzione di Gompertz è la capacità portante in quanto regola il numero massimo di microrganismi che il suolo è in grado di sostenere.

Se il numero di microrganismi è superiore alla capacità portante, la curva sarà decrescente (*Figura 4.2*, curva 1: decadimento batterico) in quanto il suolo non è in grado di sostenere tutti i batteri presenti, portando alla morte della parte in eccesso; se invece il numero di microrganismi è inferiore, la curva sarà di tipo crescente con conseguente aumento del numero di batteri (*Figura 4.2*, curva 2: crescita batterica).

In questo modo è possibile superare il problema della formulazione usata in SWAT. Come valore di concentrazione iniziale è stato scelto un dato congruo all'analisi ed inoltre, per semplicità, si ipotizza che i batteri siano uniformemente distribuiti e non raggruppati in sacche in dipendenza dalla maggior presenza di sostanze nutritive e di vie di passaggio preferenziali (porosità uniforme).

La capacità portante del suolo, cioè il numero massimo di microrganismi che il suolo è in grado di mantenere in vita, non è costante durante l'intero anno ma varia in funzione di diversi fattori.

Si ipotizza che nel compartimento suolo ci sia un continuo afflusso di sostanze nutritive necessarie per la riproduzione e mantenimento delle colonie batteriche, mentre l'unico parametro che varia è la temperatura.

Partendo da dati di letteratura [27], riguardanti una specie appartenente alla famiglia delle enterobacteriaceae (*Escherichia Coli*), è stata generata una curva rappresentante la variazione della Capacità portante in funzione della temperatura (*Figura 4.3*).

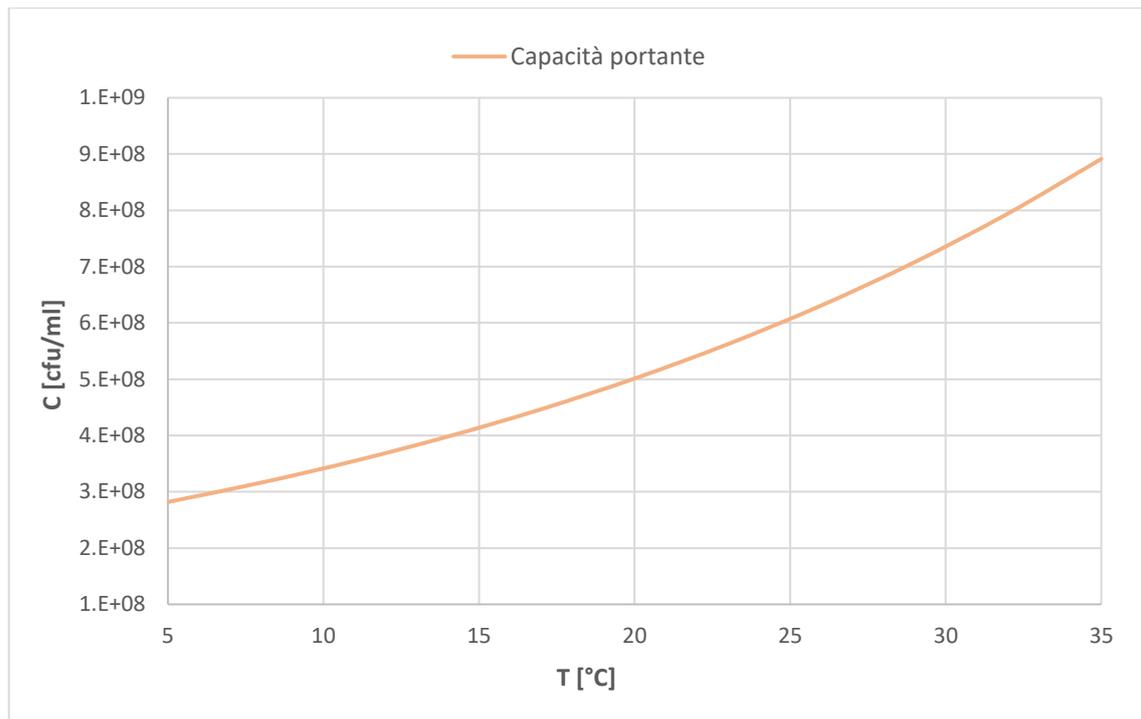


Figura 4.3: Andamento capacità portante al variare della temperatura

La capacità portante varia sulla base della seguente formulazione:

$$C_{ideale} = (2 \cdot 10^8) \cdot e^{0.0384 \cdot T}$$

4.3

con:

C: capacità portante [ufc/ml];

T: temperatura media [°C].

La precedente formulazione è stata ricavata da risultati di prove in laboratorio effettuate in condizioni ideali, è quindi opportuno inserire un fattore moltiplicativo di riduzione ( $k_{riduttivo}$ ) per poter considerare le condizioni reali.

$$C_{reale} = k_{riduttivo} \cdot C_{ideale}$$

4.4

Come in SWAT, anche le cinetiche di crescita e decadimento batterico sono funzione della temperatura e descritte tramite la seguente formulazione:

$$k = k_{20} \cdot \vartheta^{(T-20)}$$

4.5

con:

$k_{20}$ : parametro cinetico di crescita standard a 20°C [1/d];

$k$ : parametro cinetico di crescita effettiva [1/d];

$\vartheta$ : parametro correttivo della temperatura [-];

$T$ : temperatura [°C].

È quindi possibile rappresentare l'andamento della concentrazione batterica in ciascuna cella del bacino, al variare della temperatura.

#### 4.2.2 Comparto suolo

Il comparto suolo è diviso in due strati proprio come in SWAT. Lo strato superficiale racchiude i primi 10 mm di suolo (primo strato) ed è usato per rappresentare i batteri che interagiscono con il deflusso superficiale, mentre lo strato sub-superficiale comprende la parte sottostante (secondo strato).

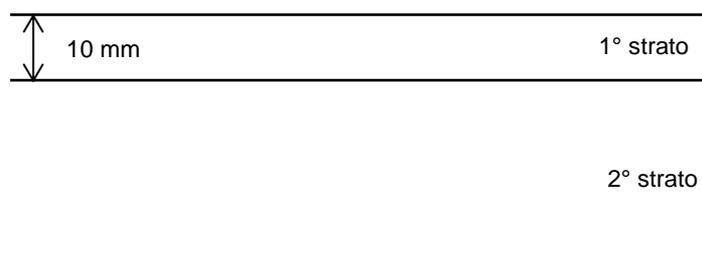


Figura 4.4: Suddivisione degli strati del comparto suolo per il modello batterico

Il comparto suolo è accoppiato con i deflussi generati dal modello idrologico: il primo strato interagisce con la portata  $Q_S$ , mentre il secondo con la  $Q_G$ .

A differenza del modello SWAT, la concentrazione batterica non è espressa come numero di batteri per unità di superficie [ufc/m<sup>2</sup>], ma come numero di batteri su volume di acqua [ufc/ml], dove il volume d'acqua del 2° strato è quello che si calcola tramite il bilancio idrologico a scala giornaliera, mentre nel 1° strato viene considerato un volume di acqua fisso pari a 1 mm.

#### 4.2.3 Temperatura suolo

Nelle banche dati dell'area di studio sono presenti solamente informazioni riguardo la temperatura dell'aria, ma non del suolo; come è noto però, la temperatura dell'aria

varia in maniera più consistente rispetto a quella del suolo, per tal motivo le due non possono essere considerate uguali.

In SWAT per modellare la temperatura del suolo ad una certa profondità  $z$ , si fa riferimento alla seguente formulazione:

$$T_{\text{suolo},i,z} = \text{lag} \cdot T_{\text{suolo},i-1,z} + (1 - \text{lag}) \cdot \left[ \text{df} \cdot (\overline{T_{\text{aria,annua}}} - T_{\text{suolo},i,\text{sup}}) + T_{\text{suolo},i,\text{sup}} \right]$$

4.6

con:

- lag: coefficiente di lag pari a 0.8;
- $T_{\text{suolo},z}$ : temperatura del suolo alla profondità  $z$  [°C];
- df: fattore di profondità;
- $T_{\text{aria,annua}}$ : temperatura media annuale dell'aria [°C];
- $T_{\text{suolo},\text{sup}}$ : temperatura del suolo in superficie [°C];
- $i$ : giorno  $i$ -esimo.

La formulazione usata in SWAT è funzione della temperatura del suolo a livello superficiale ma, non essendo disponibili informazioni a riguardo nell'area in esame, non è possibile utilizzarla nel corrente studio. Perciò, la temperatura dell'aria è stata modellata in modo da ricavare valori rappresentativi per il comparto suolo.

Per il primo strato, in contatto con l'aria ambiente, è stata considerata per semplicità la temperatura media giornaliera dell'aria tal quale a causa dello spessore ridotto e della vicinanza con l'ambiente esterno; entrambi questi fattori rendono lo strato soggetto a variazioni di temperatura giornaliera significative.

Per il secondo strato, sono stati utilizzati due fattori correttivi per ogni mese e validi rispettivamente per la prima e la seconda metà di ciascuno di essi, poiché soggetto a variazioni inferiori, il risultato giornaliero è stato poi mediato con il valore di temperatura del suolo ottenuto nei due giorni antecedenti [28].

$$T_{\text{suolo}_i} = \frac{(T_{\text{aria}_i} + F_{\text{correttivo}}) + T_{\text{suolo}_{i-1}} + T_{\text{suolo}_{i-2}}}{3}$$

4.7

con:

$T_{\text{suolo}}$ : temperatura media giornaliera del suolo;

$T_{\text{aria}}$ : temperatura media giornaliera dell'aria;

38

$F_{\text{correttivo}}$ : fattore correttivo;

i: giorno i-esimo.

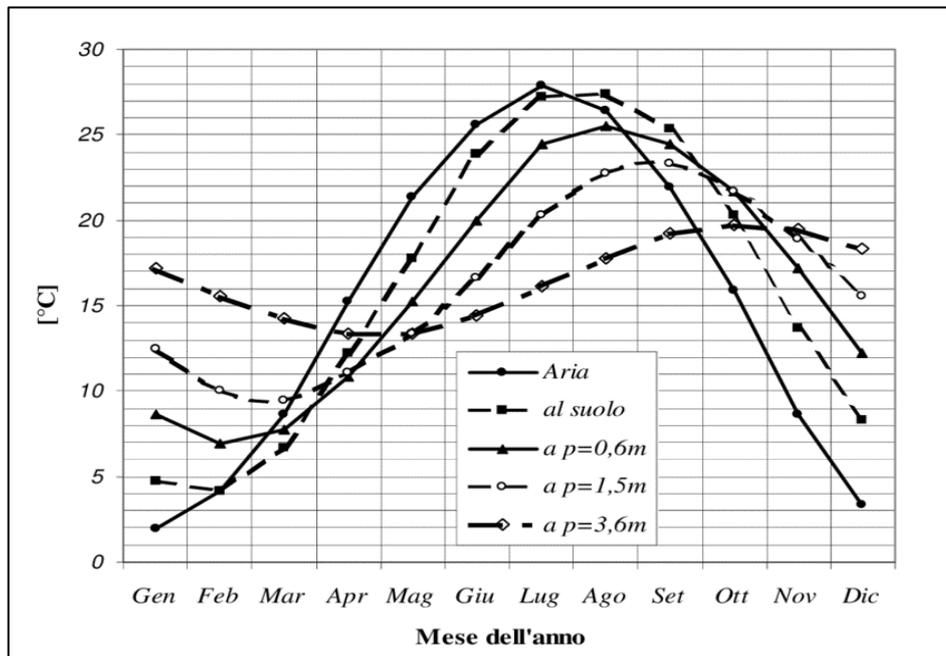


Figura 4.5: Variazione mensile di Temperatura dell'aria e del suolo a diversi livelli di profondità [29]

Tabella 4.1: Fattori mensili correttivi di temperatura

Mese	$F_{\text{correttivo}}$	
	1° metà	2° metà
Gennaio	6.5	5.5
Febbraio	4	1.5
Marzo	0	-1.5
Aprile	-3.5	-5
Maggio	-5.5	-6
Giugno	-5.5	-5.2
Luglio	-4	-2.8
Agosto	-1.5	0
Settembre	1.8	3.5
Ottobre	5.2	6.5
Novembre	7.8	8.5
Dicembre	8.5	8.5

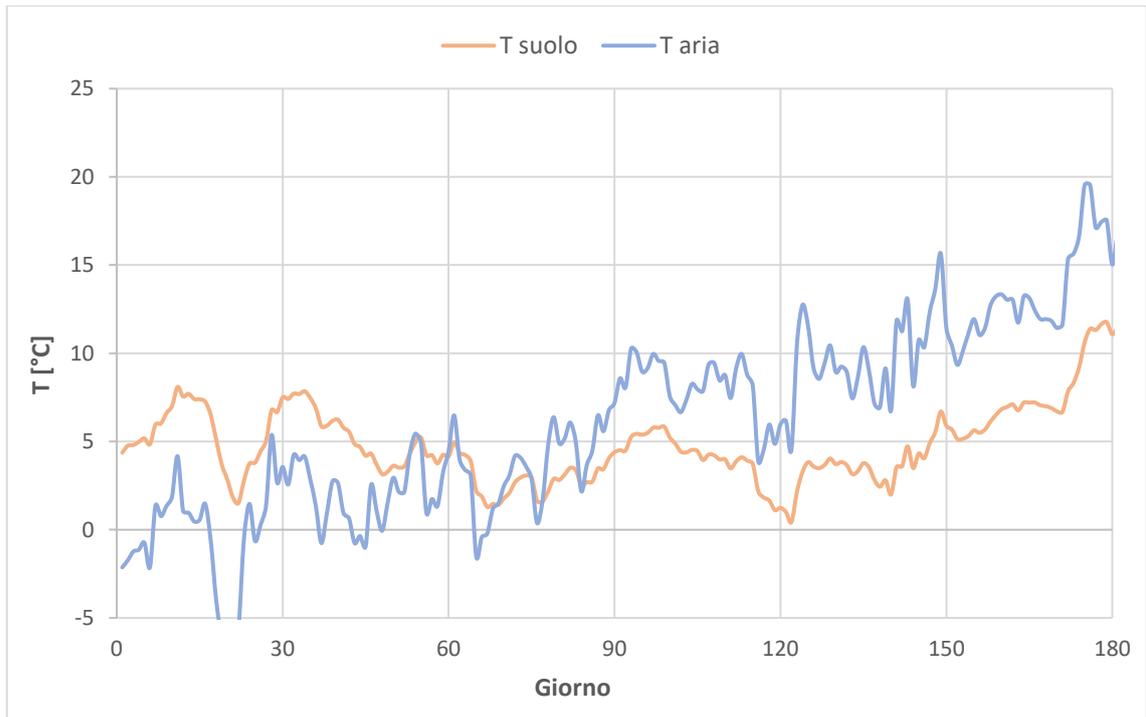


Figura 4.6: Andamento della Temperatura dell'aria e del suolo nell'arco della prima metà di un anno

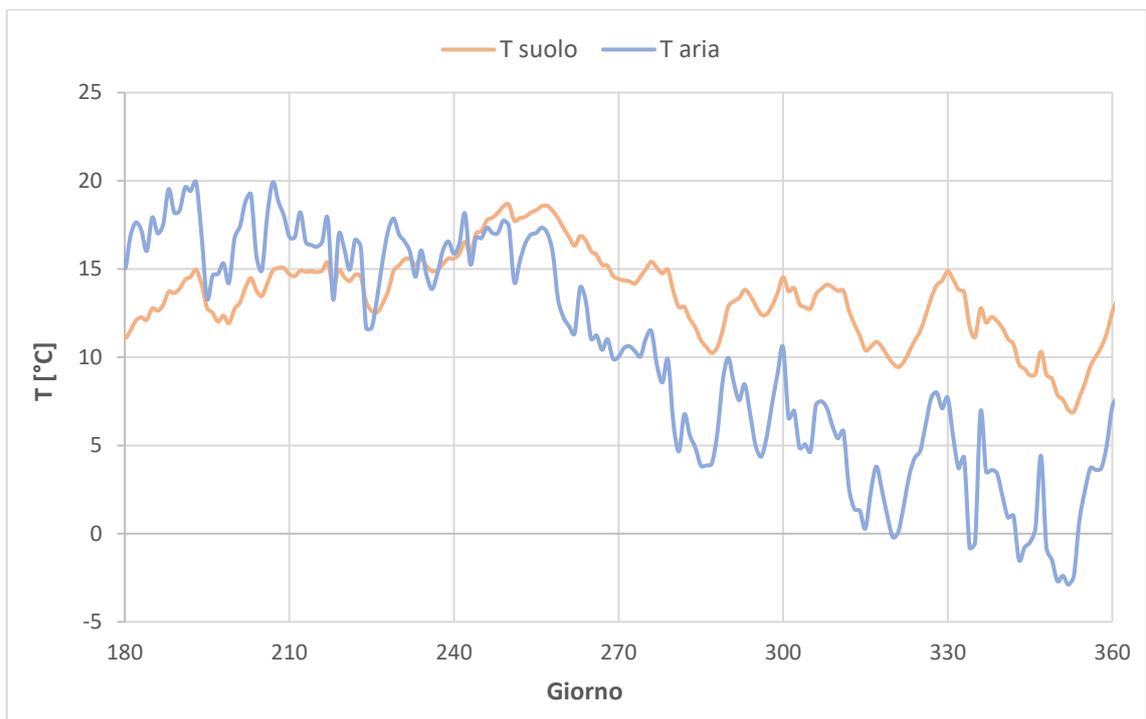


Figura 4.7: Andamento della Temperatura dell'aria e del suolo nell'arco della seconda metà di un anno

#### 4.2.4 Trasporto batterico

In SWAT il trasporto <sup>(1)</sup> per percolazione verso lo strato sottostante e <sup>(2)</sup> tramite il deflusso superficiale, è modellato in maniera analoga per entrambi i casi attraverso la seguente formulazione:

$$Q_{\text{trasporto}} = \frac{N \cdot Q}{\rho_s \cdot z \cdot k}$$

4.8

con:

- N: numero di microrganismi presenti nei primi 10 mm di suolo [ufc/m<sup>2</sup>];
- Q<sub>trasporto</sub>: numero di microrganismi trasportati <sup>(1)</sup> nello strato sottostante, <sup>(2)</sup> con il deflusso superficiale [ufc/m<sup>2</sup>];
- Q: portata d'acqua giornaliera che <sup>(1)</sup> percola nello strato sottostante, <sup>(2)</sup> defluisce con il deflusso superficiale [mm];
- ρ<sub>suolo</sub>: densità dei primi 10 mm di suolo [Mg/m<sup>3</sup>];
- z: profondità del suolo pari a 10 [mm];
- k: rapporto tra la concentrazione nei 10 mm di suolo e la concentrazione di batteri trasportati <sup>(1)</sup> nello strato sottostante, <sup>(2)</sup> con il deflusso superficiale [m<sup>3</sup>/Mg].

La dinamica di trasporto usata nel modello semplificato risulta simile a quella di SWAT ma con qualche differenza. Il nuovo modello non tiene in considerazione alcun tipo di trasporto attraverso i sedimenti in alveo (considerati invece in SWAT) a causa della mancanza di informazioni a riguardo; al contrario, si considera il trasporto dei batteri presenti nel secondo strato di suolo (non previsto in SWAT) in quanto, come noto [19], questo meccanismo avviene ed è dipendente da diversi fattori, tra cui il flusso di acqua nel terreno.

La formulazione (analoga a SWAT) utilizzata per il trasporto è la seguente:

$$Q_b = N \cdot Q \cdot k$$

4.9

con:

- Q<sub>b</sub>: numero di microrganismi trasportati giornalmente [ufc];
- N: numero di microrganismi presenti nell'acqua contenuta nel suolo [ufc/ml];
- Q: portata d'acqua giornaliera [mm];
- k: rapporto tra concentrazione di batteri trasportata e nel suolo [-].

41

Il meccanismo del trasporto batterico è molto semplificato nel suo complesso; non sono considerati parametri come porosità e tipo di suolo, velocità dei deflussi, etc. ma è stato tutto ridotto a parametri di trasporto univoci.

In totale i fattori presi in considerazione sono tre:

- $k_{sup}$ : per la risospensione e trasporto dei microrganismi tramite la portata superficiale  $Q_s$ ;
- $k_{percolazione}$ : per il trasporto dei microrganismi dal primo al secondo strato attraverso la portata di infiltrazione;
- $k_{inf}$ : per il trasporto dei microrganismi tramite la portata sub-superficiale  $Q_g$ .

In mancanza di portata superficiale  $Q_s$ , il trasporto batterico avviene in maniera verticale dal primo al secondo strato attraverso la portata di infiltrazione (solo se  $dS > 0$ ), ed in maniera orizzontale dal secondo strato verso la sezione di chiusura tramite  $Q_g$ .

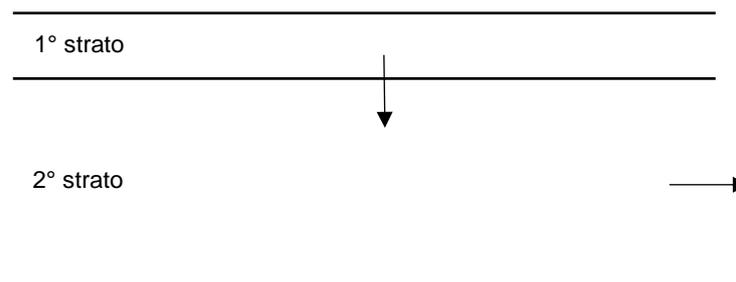


Figura 4.8: Trasporto batterico nel suolo con  $dS > 0$  e  $Q_s = 0$

Il movimento batterico verticale avviene solamente se il contenuto d'acqua nel suolo aumenta ( $S_{fin} > S_{iniz}$ ;  $dS > 0$ ) mentre rimane nullo se  $S$  diminuisce ( $S_{fin} < S_{iniz}$ ;  $dS < 0$ ). Se il contenuto d'acqua nel suolo aumenta significa che una certa quantità di acqua attraversa il primo strato per arrivare al secondo mentre, se diminuisce, significa che non c'è stata infiltrazione e quindi neanche trasporto batterico.

Se il suolo è saturo ( $S = S_{max}$ ;  $dS = 0$ ) non vi è alcuna portata che si infiltra dal primo al secondo strato ma viene generato subito un deflusso superficiale  $Q_s$ , per tal motivo il trasporto avviene in maniera orizzontale per entrambi gli strati tramite i rispettivi deflussi ( $Q_s$  e  $Q_g$ ).

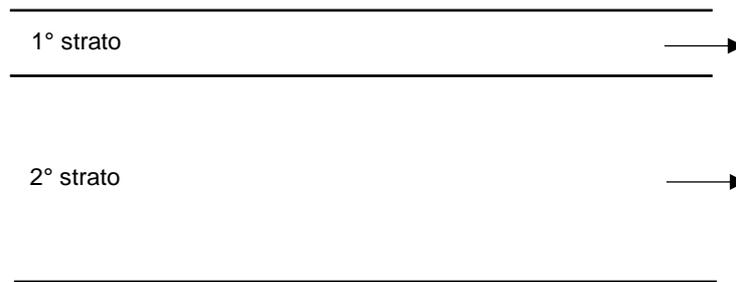


Figura 4.9: Trasporto batterico nel suolo saturo con  $Q_s > 0$

$$Q_g \neq 0 \ \& \ Q_s = 0 \ \& \ dS \leq 0$$

$$\begin{cases} N_{sup} = N_{sup_0} \\ N_{inf} = [N_{inf_0} \cdot (S_{iniz} - Q_g)] / S_{fin} \\ Q_{b\_sup} = 0 \\ Q_{b\_inf} = N_{inf_0} \cdot Q_g \cdot k_{inf} \end{cases}$$

4.10

$$Q_g \neq 0 \ \& \ Q_s = 0 \ \& \ dS > 0$$

$$\begin{cases} N_{sup} = N_{sup_0} \cdot (1 - k_{percolazione} \cdot dS) \\ N_{inf} = [N_{inf_0} \cdot (S_{iniz} - Q_g) + N_{sup_0} \cdot k_{percolazione} \cdot dS] / S_{fin} \\ Q_{b\_sup} = 0 \\ Q_{b\_inf} = N_{inf_0} \cdot Q_g \cdot k_{inf} \end{cases}$$

4.11

$$Q_g \neq 0 \ \& \ Q_s \neq 0 \ \& \ dS = 0$$

$$\begin{cases} N_{sup} = N_{sup_0} \cdot (1 - k_{sup} \cdot Q_s) \\ N_{inf} = [N_{inf_0} \cdot (S_{iniz} - Q_g)] / S_{fin} \\ Q_{b\_sup} = N_{sup_0} \cdot Q_s \cdot k_{sup} \\ Q_{b\_inf} = N_{inf_0} \cdot Q_g \cdot k_{inf} \end{cases}$$

4.12

con:

- $N_{sup}$ : concentrazione batterica nel primo strato [ufc/ml];
- $N_{inf}$ : concentrazione batterica nel secondo strato [ufc/ml];
- $k_{sup}$ : coefficiente di trasporto superficiale [-];
- $k_{inf}$ : coefficiente di trasporto sub-superficiale [-];
- $k_{percolazione}$ : coefficiente di trasporto per infiltrazione [-];
- $Q_s$ : deflusso superficiale [mm];
- $Q_g$ : deflusso sub-superficiale [mm];
- $S_{iniz}$ : contenuto d'acqua iniziale nel suolo [mm];

- $S_{fin}$ : contenuto d'acqua finale nel suolo [mm];
- $Q_{b\_sup}$ : portata batterica superficiale [ufc];
- $Q_{b\_inf}$ : portata batterica sub-superficiale [ufc].

Poiché i fenomeni di trasporto sono difficili da rappresentare anche con modelli molto complessi, i parametri di trasporto univoci sono stati selezionati sulla base di bilanci di massa a scala di bacino, su prove di lisciviazione e su prove di colonne di suolo in laboratorio [30] [31] [32].

Le portate batteriche calcolate, si muovono verso la chiusura attraverso i deflussi  $Q_s$  e  $Q_g$ .

#### 4.2.5 Decadimento batterico

I deflussi superficiali sono esposti all'ambiente esterno ed a tutti i fattori che ne derivano (predazione, raggi UV, etc.), per tal motivo i batteri che si muovano attraverso il deflusso  $Q_s$ , subiscono un fenomeno di decadimento descritto da una cinetica di primo ordine (analogo a SWAT).

L'unica differenza tra i due modelli si nota nella temperatura; in SWAT si utilizza quella dell'acqua, mentre nel corrente modello per semplicità ed omogeneità alla temperatura usata nel caso di crescita batterica del primo strato, è utilizzata quella dell'aria ambiente.

$$N = N_0 \cdot \exp(-k_d \cdot t)$$

$$k_d = k_{d,20} \cdot \theta^{T-20}$$

4.13

con:

- $N$ : numero di microrganismi dopo il decadimento [ufc];
- $N_0$ : numero di microrganismi prima del decadimento [ufc];
- $k_d$ : parametro cinetico di decadimento effettivo [1/d];
- $t$ : tempo di lag [d];
- $k_{d,20}$ : parametro cinetico di decadimento standard a 20°C [1/d];
- $\theta$ : parametro correttivo della temperatura [-];
- $T$ : temperatura aria ambiente [°C].

Per semplicità si considera un valore di tempo unitario per cella e non una curva di probabilità (come nel caso delle portate di acqua).

Ogni cella dispone di un fattore di ritardo grazie al quale è possibile valutare il tempo necessario alla portata batterica, per raggiungere la chiusura sulla base del tempo di lag. Interpolando il massimo tempo di ritardo con il massimo tempo di lag, tramite una regressione lineare, è possibile ricavare un valore di  $t$  necessario alla portata di ogni cella per raggiungere la chiusura. Il numero di batteri in uscita da ciascuna cella è quindi ridotto della quantità che decade.

Poiché i batteri si muovono attraverso l'acqua, anche le portate batteriche sono modellate con lo stesso algoritmo di flow routing del modello idrologico.

Noto il quantitativo in massa di batteri in arrivo alla chiusura è possibile risalire al valore di concentrazione tramite la portata d'acqua.

Tabella 4.2: Parametri del modello batterico

<b>N<sub>iniziale</sub></b>	2000000	ufc/ml
<b>k<sub>eff 20</sub></b>	0.16	1/d
<b>k<sub>d 20</sub></b>	0.32	1/d
<b><math>\theta</math></b>	1.11	-
<b>k<sub>sup</sub></b>	0.0001	%
<b>k<sub>inf</sub></b>	0.000013	%
<b>k<sub>percolazione</sub></b>	0.0015	%
<b>k<sub>riduttivo</sub></b>	0.018	-

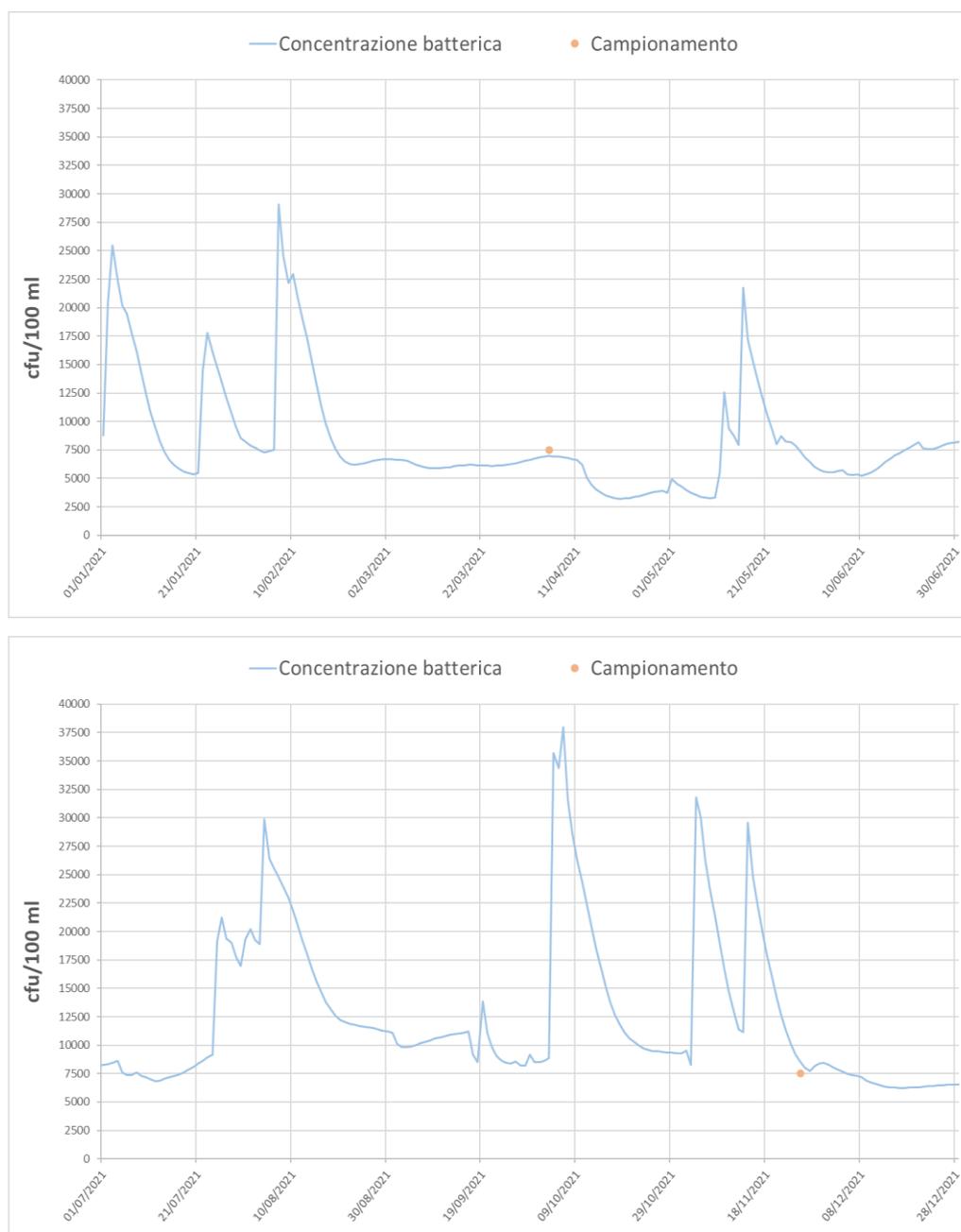
### 4.3 Calibrazione modello della dinamica batterica

Come già specificato in precedenza (2.6), si hanno a disposizione i risultati di solo due delle tre campagne di campionamento.

Ogni campagna è composta da 8 misure batteriologiche, 2 per ogni punto e relative alle due diverse profondità dal pelo libero (5 cm – 50 cm).

A causa della scarsità di misurazioni e delle differenze riscontrate nei risultati alle due profondità degli stessi punti, si è deciso di mediare tra di loro i risultati di ciascuna campagna così da ottenere un unico risultato rappresentativo della concentrazione batterica media nel corso d'acqua a scala giornaliera.

I due dati giornalieri sono stati quindi interpolati con i risultati delle simulazioni ed il modello di crescita e trasporto è stato quindi calibrato variando il fattore riduttivo ( $k_{riduttivo}$ ) applicato alla capacità portante. I risultati sono mostrati in *Figura 4.10*.



*Figura 4.10: Confronto tra l'andamento della concentrazione batterica modellata alla sezione di chiusura del bacino e dei risultati dei campionamenti*

La concentrazione batterica in alveo mostra un andamento simile a quello della portata modellata infatti, i picchi di concentrazione, si collocano in corrispondenza dei picchi di portata. Ciò significa che ad un forte incremento della portata corrisponde un aumento del trasporto batterico con conseguente aumento della concentrazione in alveo.

## 5 CAMBIAMENTI CLIMATICI

Il cambiamento climatico porterà a variazioni sia delle temperature che del regime idrologico con effetti sempre più negativi sia per l'uomo che per l'ambiente, andando a modificare anche la crescita ed il trasporto di microrganismi nel suolo [1].

Di seguito sono valutati i possibili impatti futuri causati da diversi scenari climatici dell'ultimo AR6 (Assessment Report 6) dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Il modello, calibrato e validato sulle serie storiche di temperatura, precipitazione e radiazione, è usato per simulare le future dinamiche idrologiche e batteriche, utilizzando in ingresso i dati di temperatura e precipitazione ricavati dai suddetti scenari climatici.

### 5.1 Modelli di circolazione globale (GCM)

Sono stati sviluppati numerosi modelli climatici di previsione, ognuno dei quali tenta di riprodurre le interazioni tra i diversi comparti del sistema terrestre cioè l'atmosfera, le terre emerse, gli oceani e la criosfera.

I modelli climatici più diffusi a scala globale sono i General Circulation Models (GCM), modelli numerici che valutano l'impatto delle emissioni di gas serra sui sistemi climatici [33].

Questi modelli non forniscono una previsione, bensì possibili scenari dipendenti da possibili sviluppi futuri.

Generalmente questi modelli hanno una risoluzione spaziale molto elevata, di centinaia di km, non sono quindi adatti per l'applicazione diretta a scala locale.

Per questo motivo è necessario effettuare una procedura di downscaling, in modo tale da adattare i risultati dei modelli alla scala richiesta.

### 5.2 Scenari climatici dell'IPCC

La proiezione di futuri cambiamenti climatici gioca un ruolo fondamentale per migliorare la conoscenza del sistema clima così da poterne quantificare i rischi e trovare possibili soluzioni.

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è un organo che, tramite la pubblicazione di rapporti AS (Assesment Report), riassume le cause conosciute sul

fenomeno del cambiamento climatico, sugli impatti futuri e sulle varie politiche di mitigazione e controllo.

Gli scenari prodotti dall'IPCC hanno formato le basi per i modelli climatici di proiezione. Ad oggi si è raggiunta la fase 6 del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) che fornisce un modello multiplo di proiezione climatica basato su scenari alternativi di emissioni future, cambiamenti di uso del suolo con modelli di valutazioni integrati [34]. Queste proiezioni rappresentano un'innovazione non solo perché utilizzano un nuovo set di emissioni e di usi del suolo, ma perché si basano sugli SSP (Shared Socioeconomic Pathways).

Gli scenari descrivono quindi possibili sviluppi futuri di driver antropogenici responsabili del cambiamento climatico (gas serra, gas chimicamente reattivi, aerosol e uso del suolo) in concomitanza con sviluppi socioeconomici che, al giorno d'oggi, giocano un ruolo importante sulle ricerche riguardanti il clima.

Nella fase 6, gli scenari climatici RCP (Representative Concentration Pathways) e SSP sono integrati ed uniti in un unico modello.

Gli RCP rappresentano la forzante radiativa e cioè un flusso di energia [ $W/m^2$ ] in risposta ad un fattore perturbante, misurano quindi l'influenza di un fattore nell'alterare il bilancio energetico in entrata ed in uscita nel sistema Terra-atmosfera; è indicato tramite un indice medio costante in tutta l'atmosfera, rappresentante un potenziale meccanismo di cambiamento climatico.

Le forzanti possono essere positive se tendono a riscaldare il suolo o negative se lo raffreddano; in generale esistono diversi fattori che possono perturbare il bilancio energetico ma, nel loro complesso, tendono al riscaldamento del sistema.

Il fenomeno principale che causa l'incremento di energia è dovuto all'aumento di concentrazione di  $CO_2$  nell'atmosfera.

Gli RCP utilizzati proiettano le forzanti all'anno 2100 e sono suddivisi in 4 gruppi:

- RCP 2.6 corrispondente ad una forzante radiativa di  $+2.6 W/m^2$ ;
- RCP 4.5 corrispondente ad una forzante radiativa di  $+4.5 W/m^2$ ;
- RCP 7.0 corrispondente ad una forzante radiativa di  $+7 W/m^2$ ;
- RCP 8.5 corrispondente ad una forzante radiativa di  $+8.5 W/m^2$ .

Questi scenari sono disponibili dal 5° rapporto dell'IPCC a seconda di diversi scenari di sviluppo economico e tecnologico.

Gli SSP invece, descrivono le evoluzioni della società futura in assenza di cambiamenti climatici o di politiche climatiche. Sono suddivisi in 5 gruppi:

- SSP1: tendenze ottimistiche nello sviluppo della società con sostanziosi investimenti per l'educazione e la sanità, una rapida crescita economica, istituzioni funzionanti ed una transizione verso politiche ambientali sostenibili;
- SSP2: non ci sono grandi cambiamenti generali e la società si muove verso i suoi trend storici;
- SSP3: tendenze pessimistiche con bassi investimenti in educazione e salute, un forte aumento di popolazione, un incremento delle ineguaglianze nella società ma con una elevata sicurezza a livello locale;
- SSP4: tendenze pessimistiche con bassi investimenti in educazione e salute, un forte aumento di popolazione, un incremento delle ineguaglianze nella società sia all'interno che all'esterno delle nazioni;
- SSP5: tendenze ottimistiche nello sviluppo della società con sostanziosi investimenti per l'educazione e la sanità, una rapida crescita economica, istituzioni funzionanti ma un'economia fortemente basata sui combustibili fossili.

Gli SSP rappresentano possibili scenari futuri senza l'applicazione di nuove politiche climatiche rispetto a quelle tutt'ora vigenti.

Per tenere in considerazione future politiche sul clima, nel rispetto delle ipotesi di crescita demografica, economica e tecnologica, sono state fatte diverse assunzioni in ogni scenario.

Di seguito sono elencati gli accoppiamenti di scenari radiativi e socioeconomici considerati nella corrente analisi:

- SSP1-2.6: questo scenario è il più ottimista fra tutti, utilizza la forzante radiativa RCP 2.6 e garantisce un incremento di temperatura, in uscita dai modelli climatici, inferiore ai 2°C. Lo scenario SSP 1 è stato scelto nell'idea che ci sarà un sostanziale cambiamento di uso del suolo con un particolare aumento nella copertura forestale a scala globale. Risulta molto importante come accoppiamento perché unisce bassi sforzi di mitigazione con basse forzanti;
- SSP2-4.5: questo scenario rappresenta un punto intermedio utilizzando la forzante radiativa RCP 4.5 e lo scenario SSP 2 con proiezioni di cambiamenti di usi del suolo e aerosol non estremi. Risulta importante perché accoppia una vulnerabilità sociale e radiativa intermedia;

- SSP3-7.0: questo scenario rappresenta cambiamenti di tipo medio/alti. Si accoppiano scenari socioeconomici che portano a sostanziali cambiamenti di uso del suolo (elevata diminuzione della copertura forestale globale) con elevati incrementi nelle emissioni (in particolare per il diossido di zolfo SO<sub>2</sub>);
- SSP5-8.5: questo è lo scenario peggiore tra quelli analizzati. Lo scenario SSP 5 è stato scelto perché l'unico in grado di produrre un incremento della forzante radiativa pari a +8.5 W/m<sup>2</sup>.

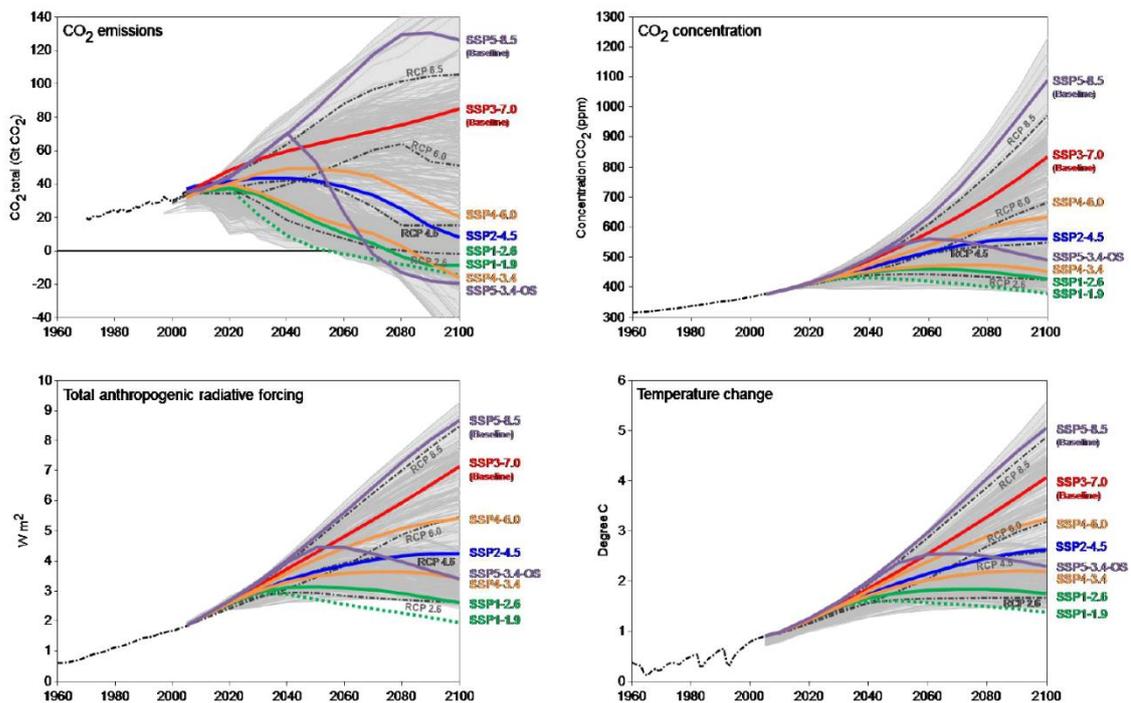


Figura 5.1: Andamenti futuri in funzione di diversi scenari climatici di a) emissione di CO<sub>2</sub>, b) concentrazione di CO<sub>2</sub>, c) forzante radiativa antropogenico, d) temperatura media globale

### 5.3 GCM utilizzati

I GCM selezionati sono 6: EC-EARTH3 [35], CESM2 [36], MPI\_ESM [37], CMCC-CM2 [38], MIRCO6 [39], HADGEM3 [40]; poiché questi modelli lavorano a scala globale, le loro celle hanno dimensioni di centinaia di km; per tal motivo è necessario effettuare un processo di downscaling per poterli applicare ai vari casi specifici.

### 5.4 Downscaling

I modelli climatici a scala globale devono subire un processo di downscaling per poter essere applicati a scala locale, a causa della diversa risoluzione spaziale.

Nel corrente studio è stato utilizzato un downscaling di tipo statistico, applicato alle serie osservate di precipitazione e temperatura.

### 5.4.1 Precipitazione

Il processo di downscaling dei dati di precipitazione avviene in due step principali:

- correzione dei bias giornalieri ( $B_{GAO}$ ) per rendere la precipitazione media giornaliera del bacino consistente con i dati osservati;
- disaggregazione spaziale delle precipitazioni.

Prima si calcola la precipitazione cumulata media nell'area a scala mensile durante il periodo di controllo ( $R_{GAO}$ ), correggendola poi rispetto ai modelli climatici  $R_{GCM}$  tramite una moltiplicazione con parametri stocastici, che tengono in considerazione l'intermittenza della precipitazione [41].

$$Bias_{GAO} = \frac{R_{GAO}}{R_{GCM}} = B_{GAO} \cdot B_0 \cdot W_0$$

5.1

$$\begin{cases} P(B_0 = 0) = 1 - p_0 \\ P(B_0 = p_0^{-1}) = p_0 \\ E[B_0] = p_0^{-1} \cdot p_0 + 0 \cdot (1 - p_0) = 1 \\ W_0 = e^{(w_0 - \sigma_{w_0}^2/2)} \\ E[W_0] = 1 \end{cases}$$

5.2

con:

- $p_0$  e  $\sigma_{w_0}^2$ : parametri del modello da stimare dai dati;
- $B_{GAO}$ : parametro costante che impone l'uguaglianza con la media mensile dei valori osservati con  $R_{GCM}$ ;
- $B_0$ : generatore di tipo  $\beta$ , rappresentante della probabilità che il tasso di pioggia  $R_{GAO}$  per un certo giorno, sia positivo, condizionato al valore di  $R_{GCM}$  positivo, modellato tramite una distribuzione binomiale;
- $W_0$ : generatore di numeri casuali positivi, conferisce un carattere di aleatorietà alla precipitazione.

La procedura è ripetuta per ciascun GCM.

## 5.4.2 Temperatura

Per la correzione della temperatura, si utilizzano i dati giornalieri di temperatura forniti dai modelli GCM ( $T_{GCM}$ ).

Si valuta la differenza media mensile tra i dati osservati e quelli simulati dai GCM e si correggono i dati [41] tramite la seguente formulazione:

$$T_{cor,d} = T_{GCM,d} - \Delta T_i$$

5.3

con:

- $T_{cor,d}$ : temperatura corretta al giorno d-esimo;
- $T_{GCM,d}$ : temperatura data dal modello GCM al giorno d-esimo;
- $\Delta T_i$ : differenza di temperatura tra i dati osservati e simulati per il mese i-esimo.

La procedura è ripetuta per ciascun GCM.

## 5.5 Limitazione dei modelli GCM

La limitazione principale dei modelli GCM risulta essere il processo di downscaling. A scala locale possono essere presenti molte variabili che però non sono considerate a scala globale, generando quindi delle imprecisioni nelle proiezioni. Altre limitazioni dei GCM risultano essere l'incapacità di riprodurre fenomeni come le nuvole, la forzante solare e la forzante vulcanica.

Poiché i GCM hanno una valenza statistica, la scelta del modello può diventare la principale fonte di incertezza nel risultato finale [42]. Per ridurre l'incertezza, i risultati dei modelli sono stati mediati tra loro, così da avere un range di possibili scenari, validi dal punto di vista statistico.

## 5.6 Risultati

Effettuato il processo di downscaling, i dati ottenuti di temperatura e precipitazione a scala mensile per ogni modello GCM, sono utilizzati come nuovi dati di input al modello idrologico. Utilizzando i dati in uscita dal modello idrologico sono state svolte le simulazioni riguardo la dinamica batterica.

Di seguito sono mostrati i risultati relativi al processo di downscaling per i dati di precipitazione e temperatura, ed i risultati delle simulazioni idrologiche e batteriche per il bacino di riferimento.

Il confronto è stato effettuato tra il decennio 2011-2020 ed il decennio 2041-2050. Questa scelta è derivata dal fatto che il modello batterico utilizzato è molto semplificato rispetto ai fenomeni che avvengono nella realtà, di conseguenza, risultati per periodi temporali più distanti (gli scenari climatici stimano i dati di temperatura e precipitazione fino all'anno 2100) potrebbero risultare inconsistenti. Per avere omogeneità nei risultati, anche il modello idrologico è stato proiettato allo stesso decennio futuro (2041-2050).

Sono stati utilizzati 6 GCM, ciascuno dei quali ha simulato dati in uscita per i 4 scenari sopra citati, per un totale di 24 simulazioni. I risultati sono stati analizzati singolarmente ed anche mediati tra i vari modelli in modo tale da ottenere un unico risultato rappresentativo per scenario. Ciò è stato fatto perché un modello preso singolarmente potrebbe generare risultati non rappresentativi delle future realtà climatiche.

### 5.6.1 Temperatura

In generale tutti i modelli prevedono un aumento della temperatura media annuale a metà secolo, con un minimo di +0,34°C ed un massimo di +2,20°C.

Si raggiungono incrementi a scala mensile di +2°C in quasi tutti i modelli nello scenario 8.5, con picchi di oltre +3°C principalmente nei mesi estivi. In generale gli incrementi maggiori sono compresi tra i mesi di giugno e settembre con picchi anche durante il periodo primaverile, principalmente nel mese di aprile.

Tabella 5.1: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per gli scenari 2.6 e 4.5, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Temperatura	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
ec_earth3_126	0.38	0.61	1.71	2.09	1.43	2.27	1.55	2.61	2.24	0.79	0.94	-0.02	1.38
cesm2_126	0.00	2.84	2.31	1.82	0.56	0.83	1.61	0.88	2.05	1.04	1.53	0.42	1.31
mpi_esm_126	0.69	0.37	0.63	-0.04	1.52	1.86	1.70	0.82	1.11	0.25	0.47	-0.52	0.74
cmcc_cm2_126	2.30	-0.45	0.11	2.26	1.67	2.00	1.86	0.98	2.21	1.53	0.38	0.09	1.25
miroc6_126	-0.02	-1.32	0.29	0.64	0.75	0.47	1.59	1.23	0.90	0.20	0.40	-0.99	0.35
hadgem3_126	0.88	-0.56	-1.02	0.44	0.41	0.89	2.53	2.38	1.71	1.35	1.83	1.06	1.00
ec_earth3_245	1.43	-0.37	0.63	1.20	0.72	1.70	1.03	1.48	1.63	1.95	-0.11	0.82	1.02
cesm2_245	1.01	3.21	1.98	1.91	1.22	1.23	1.87	1.15	1.24	1.04	0.78	0.37	1.40
mpi_esm_245	-0.35	-0.31	1.19	0.29	0.32	1.98	2.08	0.47	0.84	-0.14	1.36	0.43	0.68
cmc_cm2c_245	2.15	-0.08	-0.05	1.95	1.69	1.15	1.49	1.47	2.69	1.16	0.78	0.75	1.27
miroc6_245	1.07	-0.61	0.49	0.90	1.17	1.01	1.91	1.40	0.67	0.17	0.14	-0.63	0.65
hadgem3_245	0.34	0.92	-0.01	0.90	0.26	1.24	2.23	1.81	1.29	1.03	2.38	-0.30	1.00

Tabella 5.2: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per gli scenari 7.0 e 8.5, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Temperatura	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
ec_earth_370	0.53	-0.33	0.67	0.58	0.98	1.20	1.34	2.61	1.51	1.23	0.82	0.29	0.96
cesm2_370	1.08	2.07	1.22	1.88	0.58	1.08	1.78	1.32	2.18	0.14	1.34	1.12	1.31
mpi_esm_370	0.26	0.44	1.47	-0.04	0.13	1.76	2.08	1.26	1.43	-0.02	0.24	-0.74	0.69
cmcc_cm2_370	2.82	1.78	0.07	2.12	1.45	1.31	1.87	2.17	2.73	0.97	0.76	1.09	1.59
miroc6_370	-0.60	-0.74	-0.72	0.60	0.65	1.57	0.98	1.28	0.08	0.95	1.55	0.35	0.50
hadgem3_370	0.75	0.99	0.31	0.70	0.40	1.33	2.41	1.90	1.60	1.21	2.45	1.03	1.26
ec_earth_585	1.34	0.00	1.80	2.20	2.52	3.22	2.95	3.21	3.07	2.65	2.17	1.12	2.20
cesm2_585	1.21	1.01	2.27	2.51	1.32	0.91	2.44	2.23	2.87	1.31	1.76	1.38	1.77
mpi_esm_585	0.24	-0.22	1.54	-0.44	-0.97	0.60	1.65	1.28	0.49	0.15	0.08	-0.35	0.34
cmcc_cm2_585	2.65	-0.28	-0.20	2.23	1.82	1.63	2.35	2.75	2.60	1.56	0.36	0.84	1.54
miroc6_585	-0.09	-1.17	0.41	1.03	2.51	1.51	1.70	2.28	0.14	0.73	0.57	0.12	0.83
hadgem3_585	2.59	1.43	0.70	1.42	0.27	1.99	2.70	3.00	2.70	2.08	3.17	1.61	1.97

Mediando i 6 modelli sui 4 scenari adottati, la situazione risulta molto simile nel complesso. Gli aumenti della temperatura media annuale risultano pari a circa +1°C negli scenari 2.6-4.5-7.0 con un picco di +1,44°C nel caso di scenario 8.5. Anche in questo caso, risulta evidente come i maggiori incrementi a scala mensile si posizionino nel periodo estivo tra giugno e settembre, con picchi di +2,46°C sempre nel caso di scenario 8.5.

Tabella 5.3: Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Temperatura	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
2.6	0.70	0.25	0.67	1.20	1.06	1.39	1.81	1.48	1.70	0.86	0.92	0.01	1.01
4.5	0.94	0.46	0.70	1.19	0.90	1.39	1.77	1.30	1.39	0.87	0.89	0.24	1.00
7.0	0.80	0.70	0.50	0.97	0.70	1.37	1.75	1.76	1.59	0.74	1.19	0.52	1.05
8.5	1.32	0.13	1.09	1.49	1.24	1.64	2.30	2.46	1.98	1.41	1.35	0.79	1.44

## 5.6.2 Precipitazioni

Se considerati singolarmente, i modelli mostrano un andamento discontinuo tra i vari scenari. Il modello che prevede la maggiore modificazione del regime di pioggia è il MPSI\_ESM con picchi sia positivi che negativi in tutti e 4 gli scenari analizzati. In generale si denota una variazione consistente del regime a scala mensile. A scala media annuale, fatta eccezione per MPSI\_ESM \_126, MPSI\_ESM \_245 e HADGEM3\_585, la variazione totale è sempre inferiore al 10% con buona parte degli scenari sotto al 5%.

Tabella 5.4: Variazione della precipitazione cumulata a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Precipitazioni	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
ec_earth3_126	-3%	-41%	-17%	-2%	-2%	-21%	-12%	-24%	-4%	-6%	34%	-10%	-7%
cesm2_126	-19%	18%	28%	25%	11%	-33%	27%	-1%	-50%	-11%	41%	-4%	5%
mpi_esm_126	-45%	4%	6%	-3%	-31%	-33%	-41%	-34%	62%	-1%	-15%	-20%	-14%
cmcc_cm2_126	-3%	47%	-37%	-24%	12%	12%	15%	10%	-17%	-13%	-1%	17%	2%
miroc6_126	19%	-14%	-5%	8%	-2%	-6%	2%	0%	13%	-12%	4%	-16%	-1%
hadgem3_126	-41%	27%	0%	-16%	5%	-15%	-34%	-20%	-17%	-40%	11%	92%	-6%
ec_earth3_245	52%	28%	-10%	-23%	4%	-9%	4%	-16%	-4%	8%	12%	-4%	2%
cesm2_245	4%	-29%	-22%	10%	3%	-29%	63%	-17%	8%	-9%	23%	-12%	2%
mpi_esm_245	-33%	-1%	-20%	5%	-7%	-41%	-52%	-45%	-19%	4%	-37%	-20%	-23%
cmc_cm2c_245	10%	-1%	-21%	-15%	10%	-4%	10%	-19%	-14%	-10%	19%	-7%	-2%
miroc6_245	6%	-15%	-2%	-11%	13%	-14%	-6%	0%	19%	-7%	-8%	-18%	-4%
hadgem3_245	22%	62%	18%	-1%	29%	-23%	-19%	-14%	18%	-17%	10%	16%	5%
ec_earth3_370	25%	-14%	-18%	-2%	-7%	0%	-9%	-18%	8%	16%	1%	-9%	-2%
cesm2_370	-9%	35%	28%	0%	0%	-33%	-13%	-7%	-16%	0%	23%	-21%	-1%
mpi_esm_370	-60%	-24%	11%	43%	-15%	-41%	-57%	-3%	68%	25%	-24%	-33%	-9%
cmcc_cm2_370	57%	60%	-39%	-38%	-5%	6%	-8%	-28%	-9%	2%	35%	11%	2%
miroc6_370	15%	8%	14%	11%	-6%	-38%	-18%	22%	43%	-20%	-13%	-36%	-4%
hadgem3_370	23%	61%	17%	-2%	30%	-23%	-20%	-13%	18%	-19%	12%	15%	6%
ec_earth3_585	37%	-6%	-6%	-9%	-12%	-33%	0%	-50%	27%	-5%	-10%	28%	-7%
cesm2_585	0%	10%	-20%	5%	13%	-18%	-3%	6%	-8%	-27%	41%	-1%	2%
mpi_esm_585	-16%	-51%	3%	44%	36%	-31%	-23%	-16%	29%	81%	-27%	-65%	0%
cmcc_cm2_585	26%	15%	2%	-30%	16%	-11%	19%	-30%	-12%	-10%	9%	3%	-1%
miroc6_585	-3%	15%	10%	-11%	-31%	-10%	-25%	-9%	40%	-18%	16%	7%	-4%
hadgem3_585	-25%	-6%	-14%	-2%	9%	-24%	-7%	-27%	6%	-42%	-23%	23%	-12%

Mediando tra di loro i modelli in funzione degli scenari, si nota una tendenza fortemente negativa durante il periodo estivo tra giugno ed agosto per tutti gli scenari mentre non c'è un trend generale di crescita. Si nota un aumento rispettivamente a gennaio e febbraio negli scenari 2.6, 4.5 e 7.0, fatta eccezione di un elevato decremento a gennaio nel 2.6, a maggio nel 4.5 e 8.5, a settembre nel 7.0 e 8.5 ed a novembre in tutti gli scenari con particolare attenzione al 2.6 che prevede incrementi anche nel mese di dicembre.

Tabella 5.5: Variazione della precipitazione cumulata a scala media mensile e media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Precipitazioni	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
2.6	-15%	7%	-4%	-2%	-1%	-16%	-7%	-11%	-2%	-14%	12%	10%	-3%
4.5	10%	7%	-10%	-6%	9%	-20%	0%	-18%	1%	-5%	3%	-7%	-3%
7.0	8%	21%	2%	2%	0%	-21%	-21%	-8%	19%	1%	6%	-12%	-1%
8.5	3%	-4%	-4%	0%	5%	-21%	-6%	-21%	14%	-4%	1%	-1%	-4%

### 5.6.3 Portata

Dopo il procedimento di downscaling, le serie giornaliere di P e T sono state utilizzate per simulare con *Poli-Hydro* la portata alla sezione di chiusura di Milano via Feltre, fino a metà secolo (2041-2050). I risultati sono stati confrontati con il periodo di controllo (2011-2020).

La portata ha un andamento molto differente in funzione del modello e dello scenario analizzato (*Figura 5.2*). A scala media annuale il modello CESM2 mostra un incremento della portata per ogni scenario analizzato, mentre MIROC6 al contrario, mostra sempre una diminuzione. Il modello MPSI\_ESM, tranne che nello scenario 8.5, mostra una diminuzione della portata media annuale mentre gli altri modelli non mostrano alcun tipo di trend.

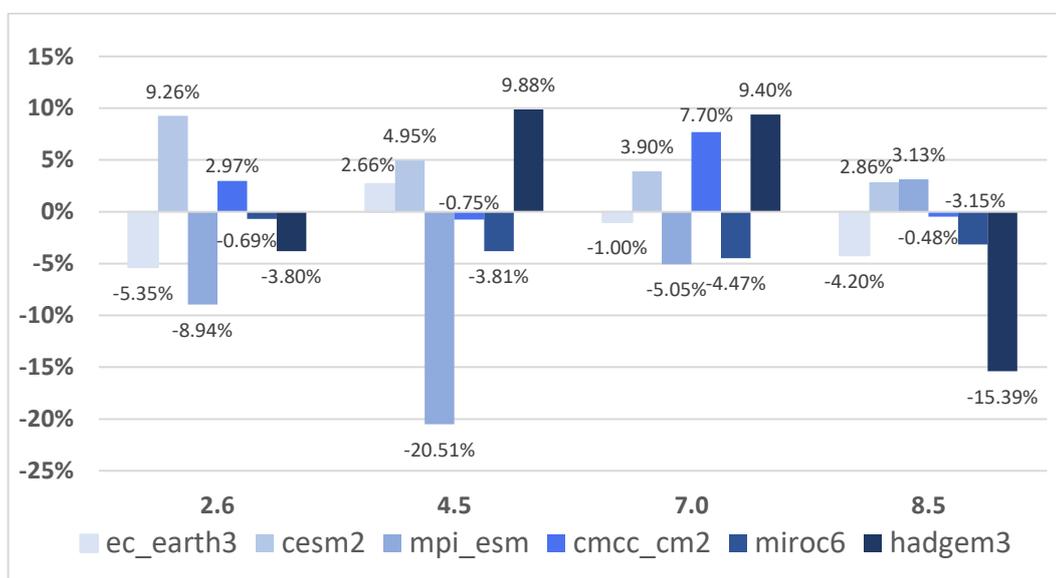


Figura 5.2: Variazione percentuale di portata alla sezione di chiusura a scala media annuale di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

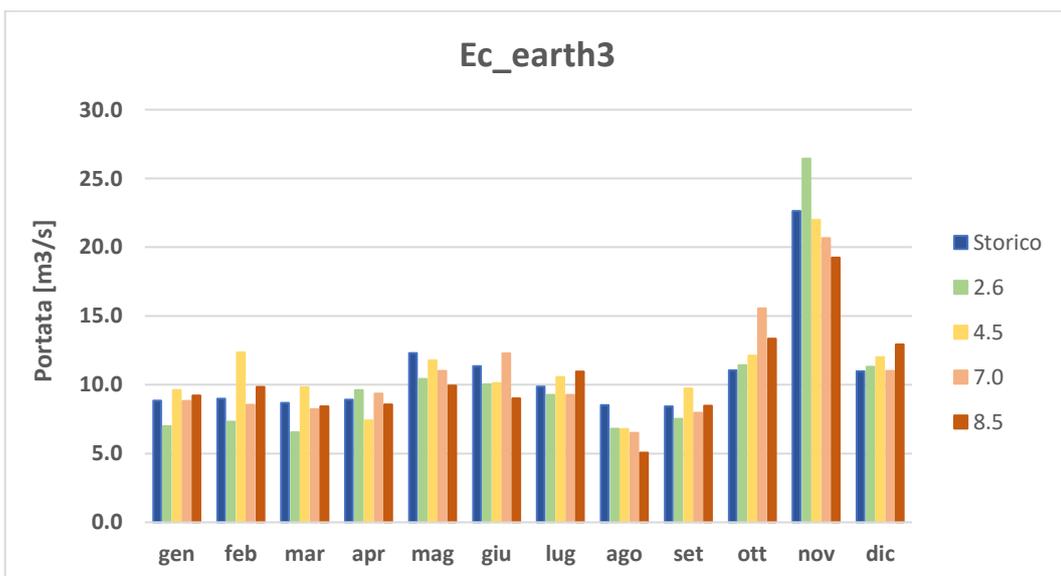
Mediando tra di loro i 6 GCM risulta evidente che, tolto lo scenario 7.0 dove si registra un aumento della portata media annuale pari a +1.75%, tutti gli altri casi mostrano una diminuzione della portata. Gli scenari 2.6 e 4.5 hanno un andamento simile con una diminuzione poco superiore a -1% mentre lo scenario peggiore è l'8.5 dove si arriva ad un picco negativo pari a -2.87%.

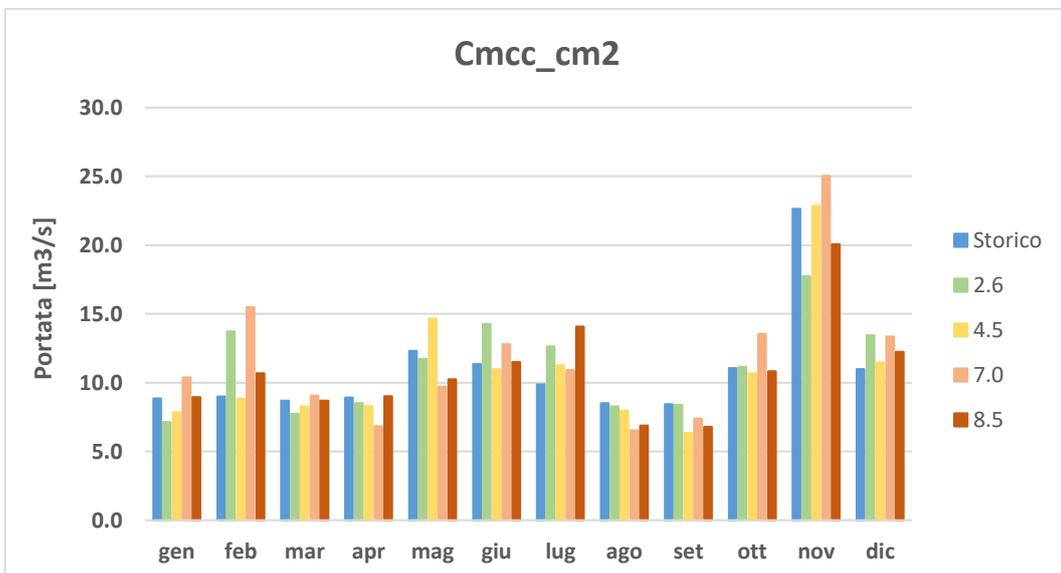
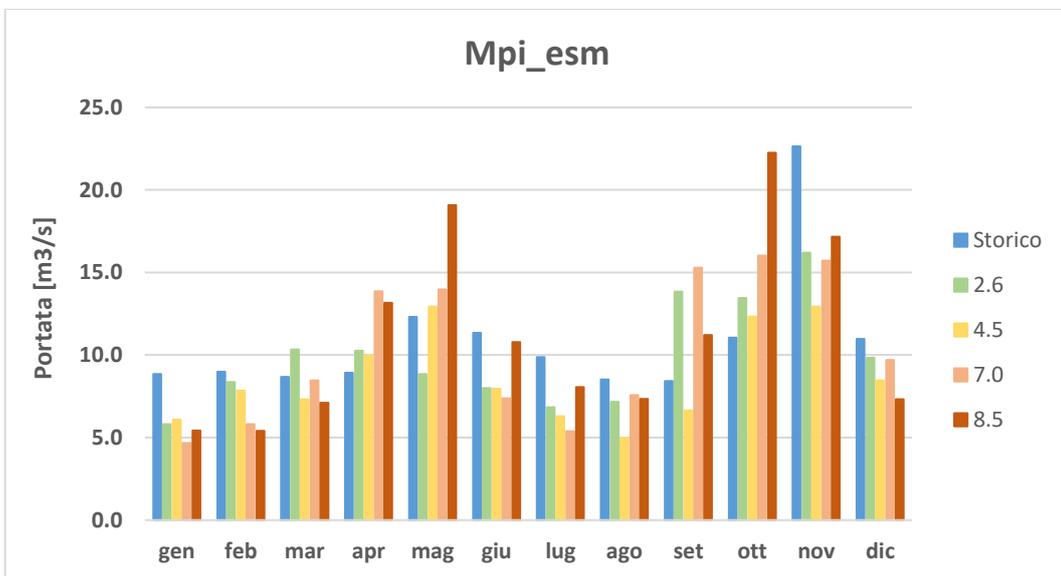
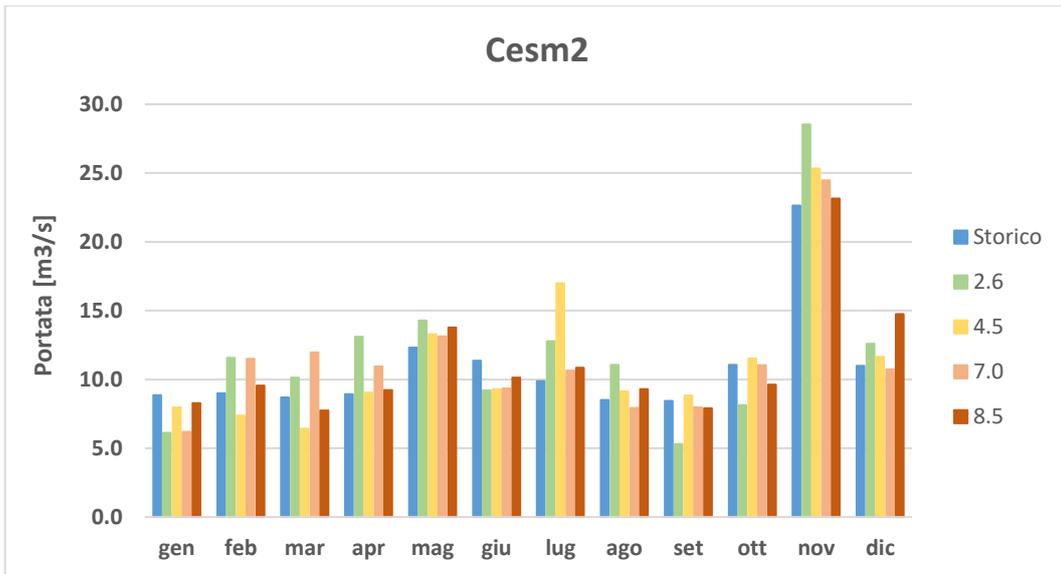


Figura 5.3: Variazione percentuale di portata alla sezione di chiusura a scala media annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Nella Figura 5.4 sono mostrati gli andamenti medi mensili delle portate simulate con i 6 GCM, rispetto allo storico.

Il regime idrologico risulta modificato in maniera molto diversa a seconda del modello e del mese in esame. In alcuni mesi la portata aumenta ed in altri diminuisce; inoltre, il risultato può variare anche tra i vari scenari di uno stesso modello nello stesso mese.





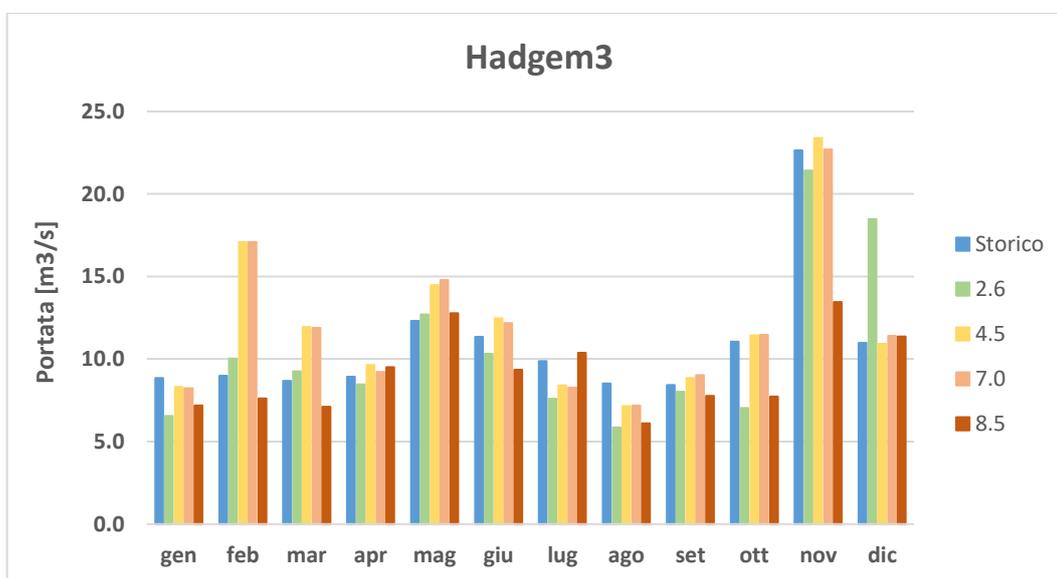
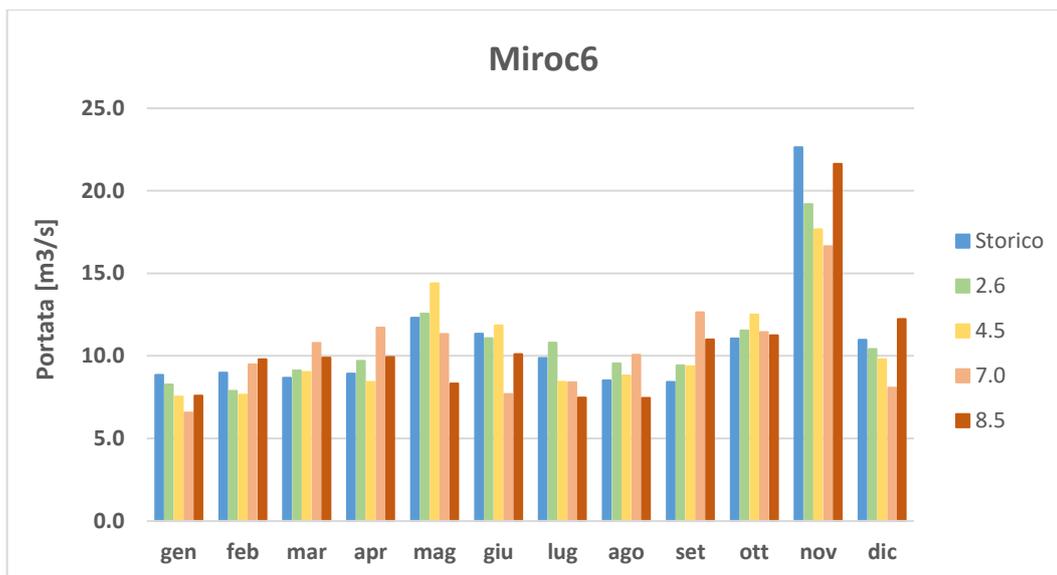


Figura 5.4: Confronto portata alla sezione di chiusura a scala media mensile di ogni modello e scenario analizzato, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

La variazione di portata a scala media annuale risulta coerente con la variazione di precipitazione cumulata ottenuta per lo stesso intervallo temporale (Tabella 5.6, Tabella 5.7).

Tabella 5.6: Confronto tra variazione percentuale di portata e di precipitazione cumulata a scala media annuale, di ogni scenario analizzato per i modelli ec\_earth3, cesm2, mpi\_esm; nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

	ec_earth3				cesm2				mpi_esm			
	2.6	4.5	7.0	8.5	2.6	4.5	7.0	8.5	2.6	4.5	7.0	8.5
<b>Precipitazione</b>	-6.6%	1.7%	-2.5%	-7.0%	4.6%	1.7%	-1.2%	1.6%	-13.6%	-22.9%	-8.9%	0.0%
<b>Portata</b>	-5.3%	2.7%	-1.0%	-4.2%	9.3%	4.9%	3.9%	2.9%	-8.9%	-20.5%	-5.0%	3.1%

Tabella 5.7: Confronto tra variazione percentuale di portata e di precipitazione cumulata a scala media annuale, di ogni scenario analizzato per i modelli cmcc\_cm2, miroc6, hadgem3; nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

	cmcc_cm2				miroc6				hadgem3			
	2.6	4.5	7.0	8.5	2.6	4.5	7.0	8.5	2.6	4.5	7.0	8.5
Precipitazione	1.7%	-2.1%	2.3%	-0.8%	-0.9%	-3.8%	-4.2%	-3.6%	-5.9%	5.5%	5.5%	-12.1%
Portata	3.0%	-0.7%	7.7%	-0.5%	-0.7%	-3.8%	-4.5%	-3.1%	-3.8%	9.9%	9.4%	-15.4%

#### 5.6.4 Concentrazione batterica

Nel corrente studio, i principali responsabili del trasporto batterico sono i deflussi superficiali e sub-superficiali (direttamente influenzati dalle precipitazioni), mentre la variabile che influenza la crescita è la temperatura (sia le costanti cinetiche che la capacità portante sono funzioni della temperatura). La variazione di suddette variabili porterà quindi ad una variazione della dinamica batteriche.

I risultati sono illustrati in *Tabella 5.8*, *Tabella 5.9* e *Tabella 5.10*.

L'andamento risulta discontinuo se si considerano i modelli singolarmente come nel caso del MIROC6 con scenario 2.6, dove la concentrazione batterica diminuisce in tutti i mesi dell'anno o come nel modello MPSI\_ESM con scenario 4.5, che mostra un comportamento analogo eccetto che nei mesi di maggio ed ottobre, dove si nota un aumento della concentrazione. In generale sia nel caso degli scenari mediati che nel caso dei modelli presi singolarmente, la concentrazione batterica media annuale tende ad aumentare.

Tabella 5.8: Andamento della concentrazione batterica a scala media mensile ed annuale per tutti i modelli negli scenari 2.6 e 4.5, nel periodo 2041-2050 per ogni modello e scenario

Conc. batterica	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
ec_earth3_126	-15%	-13%	1%	18%	5%	-2%	1%	8%	12%	24%	27%	20%	9%
cesm2_126	-23%	43%	47%	43%	22%	-10%	8%	19%	-2%	3%	30%	39%	17%
mpi_esm_126	-25%	14%	39%	19%	-5%	-5%	-4%	9%	44%	33%	5%	10%	11%
cmcc_cm2_126	-12%	67%	12%	-1%	8%	21%	15%	3%	10%	18%	2%	43%	14%
miroc6_126	-22%	-17%	-15%	-22%	-19%	-21%	-20%	-11%	-11%	-6%	0%	-10%	-13%
hadgem3_126	-10%	37%	11%	1%	14%	4%	-9%	4%	8%	-2%	22%	90%	14%
ec_earth3_245	11%	37%	27%	-12%	14%	1%	7%	6%	15%	27%	24%	30%	16%
cesm2_245	-4%	0%	-4%	3%	6%	-14%	0%	0%	1%	8%	9%	12%	2%
mpi_esm_245	-32%	-11%	-8%	-1%	15%	-26%	-18%	-9%	-9%	6%	-20%	-11%	-10%
cmcc_cm2_245	0%	13%	3%	-8%	26%	7%	7%	5%	0%	13%	4%	23%	8%
miroc6_245	-9%	-2%	20%	5%	32%	17%	-7%	15%	16%	24%	11%	5%	11%
hadgem3_245	1%	91%	57%	21%	30%	5%	-2%	5%	7%	18%	22%	30%	20%

Tabella 5.9: Andamento della concentrazione batterica a scala media mensile ed annuale per tutti i modelli negli scenari 7.0 e 8.5, nel periodo 2041-2050 per ogni modello e scenario

Conc. batterica	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
ec_earth_370	11%	6%	4%	10%	9%	7%	-3%	7%	18%	50%	21%	19%	15%
cesm2_370	-16%	48%	55%	27%	14%	-10%	-5%	5%	11%	23%	17%	16%	13%
mpi_esm_370	-31%	-23%	8%	42%	12%	-19%	-19%	-5%	24%	34%	-6%	-2%	2%
cmcc_cm2_370	18%	87%	13%	-13%	-2%	10%	4%	3%	10%	19%	26%	40%	16%
miroc6_370	-14%	14%	39%	37%	8%	-13%	0%	15%	32%	21%	6%	-4%	11%
hadgem3_370	5%	93%	54%	18%	30%	3%	-4%	6%	8%	17%	20%	40%	21%
ec_earth_585	7%	16%	9%	-3%	8%	-2%	4%	3%	14%	34%	2%	44%	11%
cesm2_585	3%	27%	1%	11%	24%	2%	-4%	12%	14%	14%	17%	49%	14%
mpi_esm_585	-17%	-33%	-4%	41%	43%	-8%	-15%	2%	23%	46%	-1%	-20%	6%
cmcc_cm2_585	9%	27%	12%	-5%	-10%	-1%	3%	-4%	-7%	1%	5%	22%	3%
miroc6_585	-6%	24%	33%	17%	-13%	6%	-6%	13%	28%	19%	31%	29%	15%
hadgem3_585	-2%	16%	0%	13%	24%	-4%	3%	6%	10%	-1%	-10%	39%	7%

Nel caso degli scenari mediati tra i modelli, l'andamento della concentrazione batterica mostra un andamento molto simile in tutti gli scenari. La concentrazione aumenta in tutti i mesi tranne che a gennaio, giugno e luglio dove si notano leggere diminuzioni tranne che per gennaio dello scenario 2.6, dove la diminuzione arriva ad un picco negativo pari a -18%.

I restanti mesi mostrano un incremento della concentrazione batterica con particolare intensità a febbraio, marzo, ottobre e dicembre con un picco massimo pari a +38%.

Tabella 5.10: Variazione percentuale della concentrazione batterica alla sezione di chiusura a scala media mensile ed annuale, di ogni scenario mediato tra tutti i modelli analizzati, nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 2011-2020

Conc. batterica	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
2.6	-18%	22%	16%	10%	4%	-2%	-1%	5%	10%	12%	14%	32%	9%
4.5	-6%	21%	16%	1%	20%	-2%	-2%	3%	5%	16%	8%	15%	8%
7.0	-5%	38%	29%	20%	12%	-4%	-4%	5%	17%	27%	14%	18%	13%
8.5	-1%	13%	9%	12%	13%	-1%	-2%	5%	14%	19%	7%	27%	9%

## 6 CONCLUSIONI

Il presente studio si pone l'obiettivo di modellare i principali processi idrologici e batteriologici di una porzione del bacino del fiume Lambro, in modo tale da ricreare la dinamica batterica all'interno del bacino e valutare gli effetti causati dai cambiamenti climatici, sulle dinamiche idrologiche e batteriche.

Partendo da dati di precipitazione, temperatura, radiazione e livello idrometrico presenti nelle banche dati, è stato calibrato il modello idrologico *Poli-Hydro*, per ricreare l'andamento delle portate nel bacino.

A causa della complessità dei fenomeni riguardanti le reali dinamiche batteriche, è stato ideato un modello semplificato basato sul già esistente SWAT (Soil and Water Assessment Tool), in grado di riprodurre i principali processi batterici (crescita e trasporto) per descriverne l'andamento nel bacino. I due modelli sono stati confrontati tra di loro, mettendo in risalto le principali analogie e differenze, specificando le scelte adottate. Il nuovo modello è stato quindi calibrato sulla base di analisi biologiche effettuate sul campo.

In seguito, sono state utilizzate proiezioni di temperature e precipitazione di 6 GCM e 4 SSP dell'AR6, per stimare le future portate e dinamiche batteriche del bacino nel decennio 2041-2050. La scelta del decennio a metà e non a fine secolo, è stata effettuata a causa della semplicità del modello batterico e delle poche analisi biologiche utilizzate per la calibrazione.

I risultati dei vari scenari sono stati analizzati per singolo modello e poi mediati tra di loro poiché i risultati di ciascun modello hanno valenza statistica e le maggiori differenze nei risultati ottenuti possono dipendere dalla scelta del modello stesso.

Il modello idrologico ha garantito una buona stima delle portate sia a scala mensile che a scala giornaliera. Il modello batterico ha generato una curva di concentrazione rappresentativa dei valori misurati sul campo, sebbene il loro numero molto esiguo. Le principali mancanze dei modelli riguardano i batteri, in particolare il ridotto numero di dati utilizzati per la calibrazione.

Gli scenari climatici hanno confermato il futuro aumento delle temperature a metà secolo e una variazione significativa del regime delle precipitazioni, in particolare le variazioni maggiori si hanno sempre durante il periodo estivo con i maggiori aumenti di temperatura e diminuzioni delle precipitazioni.

I batteri mostrano un andamento molto simile tra gli scenari analizzati, con in media un aumento della concentrazione in tutti i mesi tranne che in estate, a giugno e luglio, e nel periodo invernale, a gennaio.

In conclusione, risulta evidente come, sulla base delle scelte modellistiche e degli scenari analizzati, i cambiamenti climatici influenzeranno profondamente il regime idrologico, portando effetti negativi sull'ambiente e soprattutto sulle acque, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo. Approfondire queste tematiche può risultare molto utile per preservare questa risorsa facendo fronte ad eventuali crisi idriche future.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Fuso, F. Casale, D. Bocchiola e F. Giudici, «Future Hydrology of the Cryospheric Driven Lake Como Catchment in Italy under Climate Change Scenarios».
- [2] M. Beniston e M. Stoffel, «Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources».
- [3] D. Bocchiola, G. Diolaiuti, C. D'agata e C. Smiraglia, «Evidence of climate change impact upon glaciers' recession within the Italian Alps».
- [4] T. Barnett, J. Adam e D. Lettenmaier, «Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions».
- [5] Y. Hirabayashi e S. Kanae, «First estimate of the future global population at risk of flooding».
- [6] T. G. Huntington, «Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis».
- [7] W. Dragoni e B. Sukhija, «Climate change and groundwater: a short review».
- [8] M. Arias-Estevez, E. Lopez-Periago, E. Simal-Gandara, J.-C. Mejuto e L. Garcia-Rio, «The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources».
- [9] R. M. Page, S. Scheidler, E. Polat, P. Svoboda e P. Huggenberger, «Faecal Indicator Bacteria: Groundwater Dynamics and Transport Following Precipitation and River Water Infiltration».
- [10] P. Yang e J. Dirk van Elan, «Mechanisms and ecological implications of the movement of bacteria in soil».
- [11] «Caratteristiche geomorfologiche e della rete idrografica del bacino del Lambro,» [Online].
- [12] A. R. p. I. P. dell'Ambiente, «ARPA LOMBARDIA,» [Online].
- [13] «<https://idro.arpalombardia.it/manual/cn.pdf>,» [Online].
- [14] A. Soncini, D. Bocchiola, R. Azzoni e G. Diolaiuti, «A methodology for monitoring and modeling of high altitude Alpine catchments,» 2017.

- [15] S. K. Mishra e V. P. Singh, Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology.
- [16] L. Bonadonna, «Ruolo e significato dei parametri microbiologici nelle acque destinate al consumo umano».
- [17] «<https://www.aduedi.it/coliformi-ed-escherichia-coli/>,» [Online].
- [18] M. Delgado-Baquerizo, A. M. Oliviero, T. E. Brewer, A. Benevante-Gonzalez, D. J. Eldridge, R. D. Bardgett, F. T. Maestre, B. K. Singh e N. Fierer, «A global atlas of the dominant bacteria found in soil». *Science*.
- [19] F. A. Aulicino e L. Volterra, «Microbiologia delle acque di diversa derivazione,» 2004.
- [20] J. Zyman e C. Sorber, «Influence of Simulated Rainfall on the Transport and Survival of Selected Indicator Organisms in Sludge-Amended Soils,» 1988.
- [21] D. L. Balkwill e W. C. Ghiorse, «Characterization of Subsurface Bacteria Associated with Two Shallow Aquifers in Oklahoma,» 1985.
- [22] J. E. Kyle, H. S. Eydal, F. G. Ferris e K. Pedersen, «Viruses in granitic groundwater from 69 to 450 m depth of the Äspö hard rock laboratory, Sweden,» *The ISME journal*, 2008.
- [23] R. Jamieson, A. Madami, R. Gordon, K. Sharples e G. Stratton, «Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: A review».
- [24] R. Coffey, E. Cummins, M. Cormican, V. O. Flaherty e S. Kelly, «Microbial Exposure Assessment of Waterborne Pathogens».
- [25] J. A. J. K. J. W. S.L. Neitsch, «Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version,» 2009.
- [26] V. Vandepitte, P. Quataert, H. De Rore e W. Verstraete, «EVALUATION OF THE GOMPERTZ FUNCTION TO MODEL SURVIVAL OF BACTERIA INTRODUCED INTO SOILS,» 1994.
- [27] K. A. M. S. Fujikawa Hiroshi, «A new logistic model for Escherichia coli growth at constant and dynamic temperatures,» 2004.
- [28] J. Gehrig-Fasel, A. Guisan e N. E. Zimmermann, «Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model».

- [29] P. Fantoni, «Le favorevoli condizioni di lavoro delle pompe di calore geotermiche,» [Online].
- [30] L. Hung, D. M. Joy, J. Abu-Ashour, H. R. Whiteley e S. Zelin, «TRANSPORT OF MICROORGANISMS THROUGH SOIL,» 1992.
- [31] P. K. Weiskel, B. L. Howes e G. L. Heufelder, «Coliform Contamination of a Coastal Embayment: Sources and Transport Pathways,» 1996.
- [32] A. K. Guber, Y. Pachepsky, A. Yakirevich, D. Shelton, A. Sadeghi, D. Goodrich e C. Unkrich, «Uncertainty in modelling of faecal coliform overland transport associated with manure application in Maryland,» 2011.
- [33] D. A. Randall, General circulation model development Past, present and future.
- [34] B. C. O'Neil, C. Tebaldi, D. P. van Vuuren, V. Eyring, P. Friendlingstein, G. Hurtt, R. Knutti, E. Kriegler, J.-F. Lamarque, J. Lowe, G. A. Meehl, R. Moss, K. Riahi e B. M. Sanderson, The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, 2016.
- [35] «The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6,» 2022.
- [36] «The Community Earth System Model Version 2 (CESM2),» 2020.
- [37] «Developments in the MPI-M Earth System Model version1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO<sub>2</sub>,» 2019.
- [38] «Global Mean Climate and Main Patterns of Variability in the CMCC-CM2 Coupled Model,» 2018.
- [39] «Seasonal to Decadal Predictions With MIROC6:Description and Basic Evaluation,» 2020.
- [40] «The American monsoon system in HadGEM3 and UKESM1,» 2020.
- [41] A. S. D. B. a. R. R. B. Groppelli, «Evaluation of future hydrological cycle under climate change scenarios in a mesoscale Alpine watershed of Italy,» 2010.
- [42] F. F. ., M. G. A. C. D. B. Francesca Casale, «Exploring future vulnerabilities of subalpine Italian regulated lakes under different climate scenarios: bottom-up vs top-down and CMIP5 vs CMIP6,» 2021.
- [43] A. R. p. I. P. dell'Ambiente. [Online].

[44] F. I. Vigna, «Italian journal of groundwater». *Virus e batteri nelle acque sotterranee.*

## 8 APPENDICE

Tabella 8.1: Risultati restanti delle analisi relative alla prima campagna di campionamento (PBM=Peschiera Borromeo monte; PBV=Peschiera Borromeo valle; SSGM=Sesto San Giovanni monte; SSGV=Sesto San Giovanni vale; 5-50cm=profondità di campionamento; \*\*\*=crescita aspecifica sulla piastra)

1° CAMPAGNA	PBM 5cm	PBM 50cm	PBV 5cm	PBV 50cm	SSGM 5cm	SSGM 50cm	SSGV 5cm	SSGV 50cm
pH	7.82	8.05	8.03	7.96	8.02	8.05	8.05	7.99
Conductivity [ $\mu$ S/cm]	352	352	412	415	340	341	331	331
Torbidità [NTU]	0.397	0.580	0.583	0.453	0.524	0.443	0.441	0.510
Fluoruri [mg/l]	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Cloriti [mg/l]	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Bromati [ $\mu$ g/l]	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cloruri [mg/l]	25	25	33	33	23	23	22	22
Nitriti [mg/l]	0.41	0.43	0.50	0.48	0.33	0.31	0.27	0.31
Clorati [mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nitrati [mg/l]	10.5	10.4	14.4	14.6	8.7	8.7	8.8	9.0
Solfati [mg/l]	26	26	32	32	25	25	25	25
Ammonio NH <sub>4</sub> [mg/l]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
B [ppm]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Na [ppm]	17	17	22	21	17	17	17	17
Mg [ppm]	9	9	10	10	8	8	9	9
Al [ppb]	73	76	72	315	60	49	61	66
Si [ppm SiO <sub>2</sub> ]	5	5	7	7	4	4	5	4
P [ppm]	0.1	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1
K [ppm]	3	3	4	4	3	3	3	3
Ca [ppm]	51	55	61	68	49	47	49	50
V [ppb]	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Cr [ppb]	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Mn [ppb]	11	14	18	39	8	7	7	9
Fe [ppb]	68	85	90	330	55	47	50	62
Ni [ppb]	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5
Cu [ppb]	<5	<5	6	13	<5	<5	<5	<5
Zn [ppb]	<20	<20	21	119	<20	<20	<20	<20
As [ppb]	1	1	1	2	1	1	1	1
Se [ppb]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cd [ppb]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Sb [ppb]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba [ppm]	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Hg [ppb]	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Pb [ppb]	<2	<2	<2	6	<2	<2	<2	<2
U [ppb]	0.85	0.83	1.00	1.38	0.78	0.76	0.81	0.76
E. coli [UFC/100ml]	3000	0	7000	2000	0	1000	2000	0
Enterococchi [UFC/100ml]	1000	1000	4000	3000	0	0	1000	0
Pseudomonas aeruginosa [UFC/100ml]	0***	0***	0***	0***	0***	0***	0***	0***
conte totali a 36° [UFC/1ml]	9000	11000	8000	9000	14000	13000	15000	11000
conte totali a 22° [UFC/1ml]	9000	20000	9000	10000	9000	7000	5000	6000

Tabella 8.2: Risultati restanti delle analisi relative alla seconda campagna di campionamento (PBM=Peschiera Borromeo monte; PBV=Peschiera Borromeo valle; SSGM=Sesto San Giovanni monte; SSGV=Sesto San Giovanni vale; 5-50cm=profondità di campionamento)

2° CAMPAGNA	PBM 5cm	PBM 50cm	PBV 5cm	PBV 50cm	SSGM 5cm	SSGM 50cm	SSGV 5cm	SSGV 50cm
pH	7.46	7.88	7.87	7.86	7.88	7.89	7.96	7.92
Conductivity [µS/cm]	341	676	646	645	699	701	653	657
Torbidità [NTU]	0.704	0.735	0.518	0.592	0.497	0.511	0.714	0.551
Fluoruri [mg/l]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cloriti [mg/l]	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bromati [ug/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cloruri [mg/l]	78	79	66	67	80	80	74	74
Nitriti [mg/l]	3.91	4.18	3.08	2.72	2.47	3.29	3.21	3.59
Clorati [mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nitrati [mg/l]	22.0	22.0	19.7	19.8	25.6	25.5	23.7	23.6
Solfati [mg/l]	37	37	45	45	35	35	38	38
B [ppm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na [ppm]	55	54	45	46	61	59	52	51
Mg [ppm]	15	15	14	14	16	16	14	15
Al [ppb]	33	35	21	26	54	37	35	44
Si [ppm SiO2]	8.5	8.7	10.2	9.9	7.4	7.2	7.9	7.9
P [ppm]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
K [ppm]	7.4	7.4	6.2	6.2	7.7	7.6	7.2	7.2
Ca [ppm]	70	70	74	74	71	68	66	65
V [ppb]	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Cr [ppb]	1.7	1.6	1.7	2.0	1.4	1.7	1.4	1.8
Mn [ppb]	13	14	15	16	9	9	12	14
Fe [ppb]	55	57	45	49	40	36	50	36
Ni [ppb]	6.4	6.3	8.3	8.7	7.7	7.6	7.6	8.2
Cu [ppb]	4.0	2.0	2.6	1.7	6.6	3.3	7.6	3.5
Zn [ppb]	22	16	14	13	22	18	37	30
As [ppb]	1.15	1.15	1.51	1.51	1.08	1.04	1.43	1.46
Se [ppb]	0.16	0.16	0.17	0.20	0.13	0.13	0.11	0.12
Cd [ppb]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
Sb [ppb]	0.85	0.83	0.80	0.81	1.02	1.01	0.76	0.77
Ba [ppm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Pb [ppb]	1.04	1.04	0.75	0.77	0.92	0.79	0.85	0.87
U [ppb]	1.46	1.49	1.69	1.65	1.42	1.46	1.53	1.47
E. coli [UFC/100ml]	0	1000	2000	0	3000	0	7000	2000
Enterococchi [UFC/100ml]	0	0	1000	0	1000	1000	4000	3000
Pseudomonas aeruginosa [UFC/100ml]	0	0	0	0	0	0	0	0
conte totali a 36° [UFC/1ml]	620000	640.000	740.000	820.000	480.000	>3.000.000	730.000	650.000
conte totali a 22° [UFC/1ml]	2180000	2228000	2320000	2720000	1550000	>3.000.000	2350000	2160000