



## Gli effetti del cambiamento climatico sul regime idrologico nelle Alpi

Un caso di studio in Italia

**Gabriele Confortola, Andrea Soncini et Daniele Bocchiola**

---



**Éditeur**

Association pour la diffusion de la  
recherche alpine

**Édition électronique**

URL : <http://rga.revues.org/2183>

DOI : 10.4000/rga.2183

ISSN : 1760-7426

**Référence électronique**

Gabriele Confortola, Andrea Soncini et Daniele Bocchiola, « Gli effetti del cambiamento climatico sul regime idrologico nelle Alpi », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 101-3 | 2013, mis en ligne le 07 avril 2014, consulté le 01 octobre 2016. URL : <http://rga.revues.org/2183> ; DOI : 10.4000/rga.2183

---

Ce document a été généré automatiquement le 1 octobre 2016.



*La Revue de Géographie Alpine* est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

---

# *Gli effetti del cambiamento climatico sul regime idrologico nelle Alpi*

Un caso di studio in Italia

Gabriele Confortola, Andrea Soncini et Daniele Bocchiola

---

## NOTE DE L'AUTEUR

### Ringraziamenti

Il presente studio è stato condotto nell'ambito del progetto I-CARE (Bando 5xMille, Politecnico di Milano, 2009). Si ringrazia l'Ing. Soncini per aver collaborato con il progetto SHARE-Paprika di Ev-K2 CNR. Si ringraziano la Dott.ssa Valeria Mezzanotte e il Dott. Sergio Canobbio dell'Università degli Studi di Milano Bicocca per l'aiuto nel reperire i dati riguardanti il fiume Serio. Si ringrazia inoltre l'Ing. Ester Nana del Politecnico di Milano per aver collaborato nell'effettuare il *downscaling* degli input forniti dai GCM. Si ringraziano infine l'Istituto di Meteorologia Max Planck di Amburgo per gli output del modello ECHAM5 e il Centro Nazionale per la ricerca Atmosferica di Boulder per gli output del CCSM3.

## Introduzione

- 1 Il riscaldamento globale sta alterando la distribuzione delle risorse idriche nelle regioni temperate, minando la sicurezza dell'approvvigionamento di acqua e di cibo (Barnett *et al.* 2005, Beniston *et al.* 2007, Solomon *et al.* 2007, Bates *et al.* 2008). Le variazioni delle precipitazioni e delle temperature previste in fase di cambiamento climatico, avranno una notevole ricaduta sui regimi di portata dei fiumi in tutto il Mondo (Bavay *et al.* 2009, Bocchiola *et al.* 2011). Rilevante sarà anche l'impatto dovuto al cambiamento della stagione di copertura nivale sull'idrologia degli ambienti alpini (Barnett *et al.* 2005, Groppelli *et al.* 2011b). La valutazione dell'influenza che la durata e lo spessore della

copertura nivale avranno sulla disponibilità di acqua dolce durante la primavera e l'estate e sul ciclo idrologico dei bacini alpini è una materia di grande interesse. Gli output dei modelli climatici GCM vengono utilizzati come input nei modelli idrologici (Drogue *et al.* 2004), al fine di ottenere l'analisi degli impatti sulle risorse idriche nel medio e lungo termine (Bultot *et al.* 1992, Boroneant *et al.* 2006). I modelli di circolazione generale (GCM) e i modelli ad area limitata (LAM) sono strumenti fisicamente basati attualmente utilizzati per prevedere gli effetti dei cambiamenti climatici (Bardossy 1997, Bates *et al.* 1998). I GCM e i LAM riproducono ragionevolmente bene i fenomeni atmosferici a scala sinottica, ma spesso simulano male i dati storici nella scala spaziale di interesse per l'analisi degli impatti. E' quindi necessario un adattamento su misura per l'utilizzo locale (Lammering e Dwyer 2000). La disaggregazione (*downscaling*) dei dati da GCM è un aspetto chiave nelle simulazioni idrologiche basate sulla climatologia (Lammering e Dwyer 2000, Ranzi *et al.*, 1999). In questo studio si sono analizzati i potenziali sviluppi futuri (fino al 2050) del ciclo idrologico in un fiume alpino del nord Italia (il Serio, chiuso a Grabiasca, 92 km<sup>2</sup> di area drenata, altitudine media di 1900 m s.l.m., lunghezza dell'asta principale 12 km circa). Nello specifico, si è voluto investigare i) il diverso regime climatico del bacino in scenari di potenziale cambiamento climatico, ii) il diverso regime idrologico del fiume a differenti altitudini e iii) la dinamica della copertura nivale a scala di bacino e la sua ricaduta sul ciclo idrologico. E' stato quindi utilizzato un modello idrologico per simulare le portate del bacino. Sono stati poi utilizzati scenari (fino al 2050) di due GCM (CCSM3 e ECHAM5, *storylines* A1B, A2, B1), con *downscaling* specifico sull'area, per forzare il modello idrologico al fine di ottenere le proiezioni future delle portate. Usando descrittori standard di portata sono state valutate le variazioni stagionali e annuali delle portate (es. Groppelli *et al.* 2011b), per diverse sezioni e a differenti altitudini. I risultati proposti potrebbero essere utili per la gestione fluviale e potrebbero fornire un approccio per investigare l'evoluzione delle risorse idriche nei bacini alpini alle alte altitudini conseguentemente al cambiamento climatico.

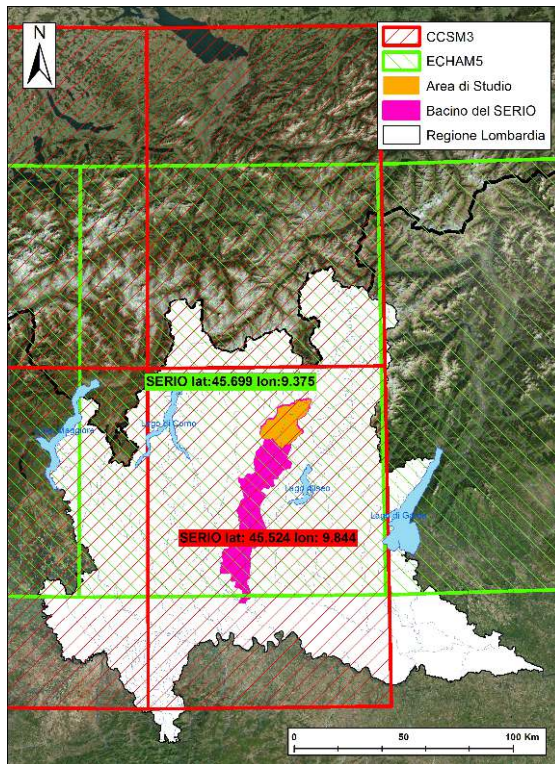
## Caso di studio

### Il fiume Serio

- 2 Il fiume Serio (figura 1) è lungo 124 km e drena un'area di 1256 km<sup>2</sup> in Lombardia prima di immettersi nel fiume Adda, un tributario del Po. Nasce a 2129 m s.l.m., vicino al lago del Barbellino, tra il Pizzo Coca e il Torena, e scorre in direzione N-S. Il Serio è molto sfruttato per la produzione di energia idroelettrica e l'irrigazione e il suo bacino presenta ampie aree urbane e industriali, che generano elevati carichi inquinanti. Nel tratto alpino (nei pressi di Valbondione, figura 2, Canobbio *et al.* 2010), il letto dell'alveo è caratterizzato principalmente da ciottoli e massi, mentre nella tratto montano e pedemontano (circa fino alla sezione 5, figura 2) il fiume è più largo e meno pendente, con ciottoli, ghiaia e occasionalmente massi e rocce.
- 3 Lo studio della potenziale evoluzione futura del ciclo idrologico del fiume Serio è importante perché i) vi è una forte richiesta di acqua per svariati utilizzi e ii) i flussi idrologici influenzano la qualità dell'acqua (Canobbio *et al.* 2010) e un diverso regime idrologico potrebbe far diminuire la qualità dell'ecosistema fluviale. Le portate sono influenzate dalla regolazione della diga del Barbellino (figura 2). Sono stati utilizzati i valori idrometrici osservati a Grabiasca (738 m s.l.m., 92 km<sup>2</sup>, figura 2), disponibili per sei

anni nel periodo 2005-2010. Il fiume è stato studiato fino alla sezione 5 in figura 2, dove termina la parte pedemontana. Inoltre, a valle di quest'area, in particolare prima della stazione idrometrica successiva di Cene (figura 2), ha inizio un considerevole prelievo di acqua (senza o con poco rilascio) e non è quindi più possibile assumere il principio di conservazione della massa liquida.

Figura 1. Fiume Serio: area geografica



## Regime climatico e idrologico

- 4 Il regime pluviometrico (circa 1300 mm annui) secondo la classificazione Köppen-Geiger appartiene alla classe temperata/fredda continentale, con una copertura stagionale della neve all'incirca sopra i 1000 m s.l.m. (Bocchiola e Rosso 2007, Bocchiola e Groppelli 2010) e un massimo di precipitazione durante la fine dell'estate e l'autunno ed un minimo in inverno. Le temperature medie mensili variano da 23.8 °C in giugno a -1.5 °C in gennaio e la media annua è 9.4 °C. La portata media a Grabiasca è stimata intorno a 2.7 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e mostra due picchi, uno in primavera (maggio), dovuto allo scioglimento della neve, e uno in autunno (novembre), conseguente alle piogge. I periodi più secchi sono in estate (agosto) e in inverno (febbraio). Lo scioglimento nivale contribuisce a circa il 20-40% della portata nelle cinque sezioni oggetto di studio (1614-2180 m s.l.m. di altitudine media dei sottobacini). Il regime idrologico del Serio è largamente influenzato dalla periodicità della copertura nivale e quindi dallo scioglimento stagionale, che alimenta la portate in alveo durante la primavera e l'estate. Diversi recenti studi mostrano un riscaldamento delle Alpi del nord Italia, che condiziona la copertura nivale e il contenuto equivalente di acqua della neve (di seguito *SWE*, dalla dizione anglosassone *snow water equivalent*) al disgelo, modificando potenzialmente il regime idrologico (Barontini *et al.* 2009, Bocchiola e Diolaiuti, 2010; Soncini e Bocchiola 2011, Groppelli *et al.* 2011b, 2011c). Gli impatti che si

prospettano in bacini alpini come conseguenza dei cambiamenti climatici (es. Bavay *et al.*, 2009) potrebbero comportare, in breve i) un incremento delle portate in autunno e in inverno, in seguito alla trasformazione della neve in pioggia, e ii) una diminuzione delle portate durante la primavera e l'estate, dovuta allo scarso manto nevoso al disgelo.

## Database storico

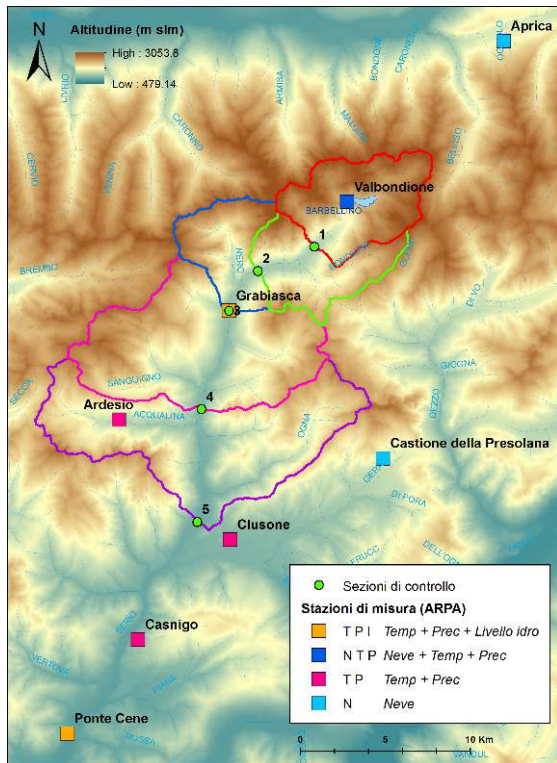
- 5 In questo studio si è utilizzato un database di variabili metereologiche (temperature e precipitazioni giornaliere) fornito dall'ARPA Lombardia. Sono stati utilizzati i dati più completi di otto stazioni AWS ricadenti nel bacino del Serio (figura 2), con sensori di temperatura e precipitazione (6 stazioni), altezza della neve (3) e livello idrometrico (1 stazione). Le caratteristiche principali delle stazioni sono riportate in tabella 1. I dati di portata sono stati stimati per il periodo 2005-2011 dai livelli idrometrici alla stazione di Grabiasca (figura 2), utilizzando una scala delle portate calcolata dall'ARPA. Altri dati utilizzati sono il DTM (celle di 20 m) del bacino e la mappa CORINE di uso del suolo, utilizzata per la stima del massimo contenuto di acqua potenziale  $S_{Max}$  secondo il metodo SCS-CN.

Tabella 1. Stazioni meteo e variabili misurate durante il periodo di calibrazione 2000-2011 (la portata  $Q$  a Grabiasca, 2005-2011)

Stazioni di misura	A [m slm]	T	P	Hs	Q
Valbondione	1802	x	x	x	-
Grabiasca	738	x	x	-	X
Ardesio	1002	x	x	-	-
Clusone	599	x	x	-	-
Casnigo	501	x	x	-	-
Ponte Cene	361	x	x	-	X
Castione della Presolana	1180	-	-	x	-
Aprica	1950	-	-	x	-

A è l'altitudine, T la temperatura, P è la precipitazione, Hs è l'altezza della neve e Q la portata.

Figura 2. Stazioni di misura disponibili e sezioni fluviali studiate



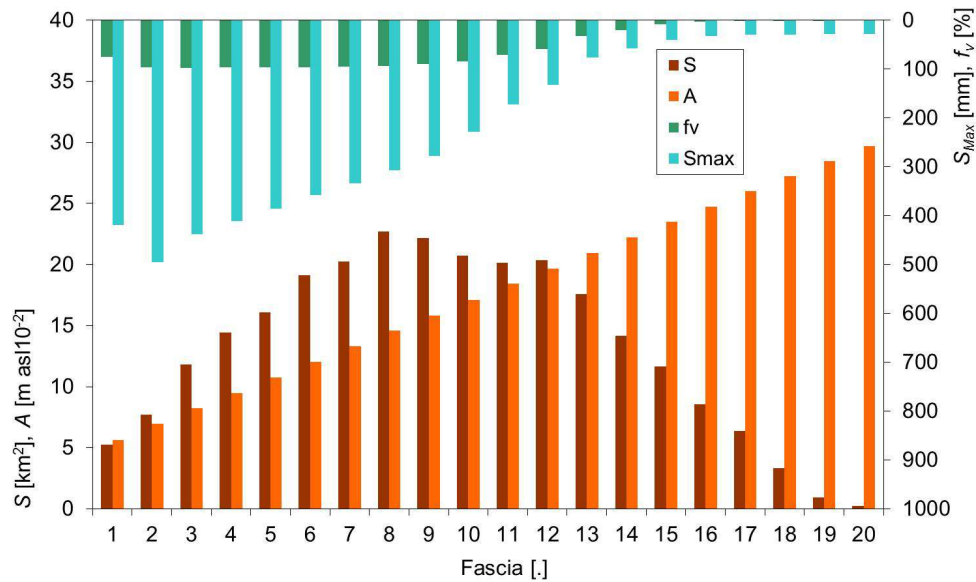
I pallini verdi indicano le sezioni fluviali scelte per le simulazioni. I quadratini gialli indicano i siti con misure di temperatura, precipitazione e livelli idrometrici. I quadratini blu indicano i siti con misure di altezza di neve, temperatura e precipitazione. I quadratini rosa indicano i siti con misure di temperatura e precipitazione. I quadratini azzurri indicano i siti con misure di altezza di neve.

## Metodologia

### Modello idrologico

- 6 E' stato utilizzato un modello idrologico adatto a bacini montani con alimentazione nivoglaciale (Groppelli *et al.* 2011b, Bocchiola *et al.* 2011). Questo modello semi-distribuito basato su fasce altitudinali è in grado di simulare la copertura nivale e la dinamica del ghiaccio, l'evapotraspirazione, la ricarica della falda sotterranea e infine la formazione delle portate in alveo. Il bacino del Serio ha una copertura glaciale trascurabile e quindi il modulo relativo allo scioglimento del ghiaccio è stato omesso.

Figura 3. Caratteristiche principali di alcune fasce altitudinali



S è la superficie della fascia, A l'altitudine media,  $S_{Max}$  è il massimo contenuto di acqua del suolo,  $f_v$  è la frazione vegetata.  $S_{Max}$  e  $f_v$  sono riportati a destra sull'asse delle ordinate con scala inversa.

## Proiezioni climatiche e *downscaling*

- 7 Il report speciale sugli scenari di emissione - SRES redatto dall'IPCC (Nakicenovic *et al.* 2000) delinea 4 possibili future traiettorie, o *storylines* (A1, A2, B1, B2) per descrivere gli effetti potenziali delle future emissioni di gas serra (GHG). Sono stati utilizzati i dati di temperatura e precipitazione generati negli SRES dell'IPCC A1B (poco ottimistico, picco di popolazione verso la metà del secolo, introduzione rapida di tecnologie più efficienti), A2 (pessimistico, spesso riportato come *business as usual*), B1 (poco ottimistico, crescita della popolazione più lenta rispetto all'A2, introduzione di tecnologie efficienti più lenta che nello scenario A1B). Si è considerata la finestra temporale 2045-2054, centrata intorno al 2050. Sono stati utilizzati due modelli GCM, ECHAM5 (Istituto di Meteorologia Max Planck di Amburgo, Germania) e CCSM3 (Centro Nazionale per la ricerca Atmosferica di Boulder, Colorado). Sono stati condotti diversi studi per valutare l'idoneità di queste (e altri) modelli GCM per rappresentare il clima del nord Italia, riscontrando come il CCSM3 e l'ECHAM5 riproducano ragionevolmente bene il clima dell'area alpina, specialmente quello della stagione piovosa (Garavaglia e Marzorati 2010, Groppelli *et al.* 2010, 2011a, Soncini and Bocchiola, 2011). I modelli GCM discretizzano il sistema terra-atmosfera usando una struttura di celle tridimensionali di differente misura, in direzione orizzontale e verticale. La dimensione (risoluzione) di questi volumi d'integrazione (*box*) varia da modello a modello, ma i processi che avvengono a una risoluzione minore (*processi sotto-griglia*) non possono essere contemplati esplicitamente. Per tale ragione i GCM forniscono solitamente una cattiva rappresentazione della precipitazione. Si rende così necessaria una procedura di disaggregazione spaziale e/o temporale, o *downscaling*. È stato effettuato quindi il *downscaling* degli valori di precipitazione da GCM usando un modello del tipo cascata casuale stocastica (descritto in Groppelli *et al.* 2010, 2011a), calibrato usando dieci anni di precipitazione giornaliera (2000-2009) del bacino del Serio.

Nella tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche dei due modelli scelti. In figura 1 sono mostrate le griglie dei due modelli sull'area di studio.

Tabella 2. Descrizione dei modelli GCM

Modello	Centro di Ricerca	Nazione	Dimensione della griglia [°]	n° di celle [.]	n° strati [.]
ECHAM5	Istituto di meteorologia Max Planck	Germania	1.5° x 2.1°	192 x 96	31
CCSM3	Centro Nazionale per la ricerca Atmosferica	U.S.A.	1.4° x 1.4°	256 x 128	26

## Proiezioni idrologiche

- 8 Al fine di ottenere gli scenari idrologici per l'area in esame, sono stati utilizzati gli scenari climatici (2045-2054) come *input* al modello calibrato. Come periodo di controllo (riportato in seguito come CO) sono state utilizzate le serie di portata simulate dal modello idrologico dal 2000 al 2009, periodo per cui sono reperibili dati climatici. E' stata scelta questa metodologia al fine di ottenere una decade di dati di portata di riferimento, poiché le portate osservate erano disponibili solamente dal 2005 al 2011 e perché si voleva filtrare l'effetto della regolazione fluviale, per evidenziare l'impatto della variabilità climatica. Per testare gli effetti del cambiamento climatico a diverse altitudini sono state considerate cinque sezioni del fiume, inclusa quella di Grabiasca (figura 2, tabella 3). La sezione più alta è stata scelta sia da considerazioni topografiche, sia per includere l'intera portata rilasciata dalla diga del Barbellino. La sezione di altitudine più bassa è stata invece posta a monte di una zona con presenza di diversi punti di prelievo senza restituzione. Tutte le sezioni sono state scelte in modo che i prelievi di acqua (derivazioni ad acqua fluente) a monte siano stati restituiti (può essere quindi applicata la conservazione della massa liquida).

Tabella 3. Le cinque sezioni considerate

Sezione fluviale	A [m slm]	S [km <sup>2</sup> ]	A <sub>av</sub> [m slm]	L <sub>m</sub> [km]
S1	900	38	2180	4,6
S2	800	67	1963	8,8
Grabiasca S3	738	92	1903	12,2
S4	600	176	1751	19,2
S5	500	264	1614	26,8

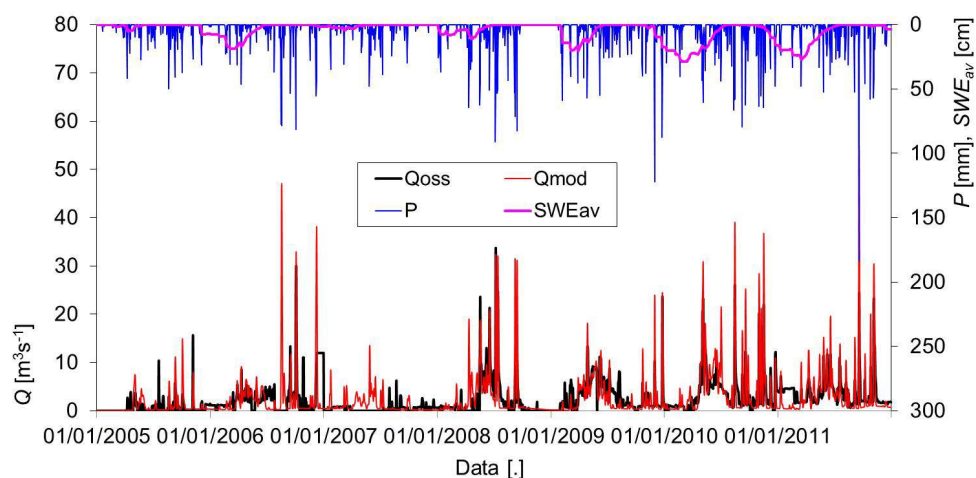


## Risultati

### Calibrazione del modello

- 9 Nella figura 4 si riportano le portate osservate e simulate alla stazione idrometrica di Grabiasca (S3) da 2005 al 2011. Essendo il Serio soggetto a regolazione (con restituzione) e non conoscendo le strategie di gestione, è necessario validare con molta cura le portate giornaliere del modello. Questo è stato, infatti, sviluppato per predire le portate del fiume “naturali”, o indisturbate, cioè come risposta alle condizioni climatiche presenti, che costituiscono il termine di paragone per le condizioni idrologiche future. Pertanto, la calibrazione del modello è stata condotta in modo da simulare ragionevolmente bene i volumi fluviali, tenendo presente che non è possibile una corrispondenza perfetta. Si riportano in tabella 4 i parametri effettivamente utilizzati nella calibrazione e quelli stimati a priori. Il *degree day*,  $D_D = 3.6 \text{ mm}^\circ\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}$  è stato calibrato da misure di altezza di neve da tre nivometri. E' stata condotta un'analisi della litologia e dell'uso del suolo per costruire la mappa del valore di  $CN_{II}$ , e quindi di  $S_{Max}$ . Il punto di appassimento  $\theta_w = 0.20$  è stato scelto in base a valori da letteratura e la capacità di campo è stata impostata pari a  $\theta_l = 0.5$ , usando un valore medio per terreni misti. Il numero di serbatoi sia superficiali che sotterranei utilizzato è stato 3 (Rosso 1984).
- 10 In seguito alla grande incertezza nel definire i tempi di ritardo dei bacini, i valori di  $k_s$  e  $k_g$  sono stati stimati secondo due criteri, rispettivamente i) l'adattamento delle portate simulate contro quelle “osservate”, in termini di portata media e usando il coefficiente  $R^2$  di Nash Sutcliffe, e ii) la capacità del modello nel descrivere le portate di piena. Sono state condotte diverse simulazioni provando a massimizzare  $R^2$  contro  $k_s$  e  $k_g$  (tabella 4). All'interno dell'intervallo di valori accettabili è stato scelto  $k_s$  in modo da ottenere il miglior adattamento del picco di piena medio annuale, o piena indice  $Q_{ind}$  (Groppelli *et al.* 2011b). Il valore massimo di  $R^2 = 0.42$  è stato ottenuto mettendo  $k_s = 1$  giorno e  $k_g = 5$  giorni. Infine il valore risultante della permeabilità satura  $K = 0.4 \text{ mmd}^{-1}$  è stato scelto sulla base della letteratura disponibile. La piena indice simulata sarebbe  $Q_{ind,m} = 29.70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , contro un valore osservato di  $Q_{ind,o} = 22.75 \pm 6.83/\text{m}^3\text{s}^{-1}$  ( $\alpha = 5\%$ ), accettabilmente vicino. Nella figura 4 è riportata la calibrazione del modello. La regolazione del flusso è evidente in quei periodi in cui, nonostante l'assenza di piogge e di scioglimento nivale, la portata risulta costante e relativamente elevata, conseguenza evidente dei rilasci. La serie di portate osservate a Grabiasca ha un certo numero di dati mancanti (circa il 32%). Omettendo quindi i giorni in cui non è disponibile, la portata media giornaliera osservata risulta  $Q_{av,o} = 3.37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , mentre il valore simulato è  $Q_{av,m} = 3.35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . La portata media simulata durante il periodo 2005-2011, includendo i giorni senza osservazioni, risulta  $Q_{av,m} = 2.70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Nella figura 4 sono riportati i valori mediati sulle fasce altimetriche di precipitazione  $P$  e di acqua accumulata nel manto nivale  $SWE_{av}$ , che mostra chiaramente la dipendenza del regime idrologico dallo scioglimento nivale, che alimenta le portate del fiume durante la primavera e l'estate.

Figura 4. Stazione di Grabiasca, S3. Calibrazione del modello



$Q_{oss}$  è la portata giornaliera osservata,  $Q_{mod}$  è la portata giornaliera simulata,  $P$  è la precipitazione giornaliera totale,  $SWE_{av}$  è l'equivalente giornaliero di acqua della neve mediato sulla superficie del bacino.  $P$  e  $SWE_{av}$  sono riportati sull'asse y di destra, con scala invertita.

Tabella 4. Serio a Grabiasca, 2005-2011

Parametro	Descrizione	Valore	Metodologia
$k_g, k_s$ [d]	Tempo di invaso, superficiale/ sotterraneo	5/1	Max $R^2 - Q_{ind}$
$n_g, n_s$ [.]	Numero di serbatoi, superficiale/ sotterraneo	3/3	Letteratura
$K$ [mmd <sup>-1</sup> ]	Conducibilità satura	0.4	Volume
$k$ [.]	Esponente del flusso sotterraneo	3.5	Letteratura
$f_v$ [.]	Frazione vegetata, valor medio	0.70	Copertura del suolo
$\theta_w, \theta_t$ [.]	Contenuto di acqua, punto di appassimento/capacità di campo	0.2/0.5	Letteratura
$S_{Max}$ [mm]	Contenuto massimo di acqua del suolo, in media	243	Copertura del suolo/uso del suolo
$D_D$ [mm°C <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	Fattore Degree day dello scioglimento nivale	3.6	Dato di altezza di neve
Statistica	Descrizione	Valore	Metodologia
$R^2$ [.]	Coefficiente di Nash-Sutcliffe	0.42	Massimizzazione ( $k_s, k_g$ )
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Portata media osservata/simulata/ simulata su tutto il periodo	3.37/3.35/2.70	Calibrazione K

$Q_{ind}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Portata indice osservata ( $\pm 5\%$ ) / simulata	$22.75 \pm 6.83/29.70$	Calibrazione $k_s$
---------------------------	--	------------------------	--------------------

Parametri idrologici del modello. I valori in *italic* sono quelli calibrati mediante il confronto con le portate osservate.

## Scenari idrologici

- 11 Si riportano in tabella 5 le portate medie annue per le cinque sezioni e per i due modelli GCM (tutte le storylines). Si riporta anche l'evapotraspirazione annua mediata su tutta il bacino,  $ET_{av}$  e l'equivalente giornaliero di acqua medio della neve al suolo (manto nivale),  $SWE_{av}$  a scala di bacino. L'evapotraspirazione diminuisce in tutti gli scenari e specialmente per il modello CCSM3. Lo SWE decresce notevolmente in tutti gli scenari, meno che per il CCSB1, dove risulta essere leggermente inferiore al valore CO. La portata media cresce in tutte le sezioni e in tutti gli scenari eccetto l'ECHB1. In tabella 6 sono riportati alcuni descrittori oggettivi del flusso per la stazione di Grabiasca. Sono stati innanzitutto stimati i valori di portata che eccedono un certo numero di giorni,  $d$ , ossia  $Q_d$ . Sono stati considerati  $Q_{37}$ , ossia la portata eccedente il 10% delle volte,  $Q_{91}$ , il 25% delle volte, anche nota come piena ordinaria,  $Q_{182}$ , ossia la mediana, e  $Q_{274}$ , anche nota come portata di magra. Sono inoltre state stimate le portate medie dei minimi e massimi annui per una certa durata, cioè  $Q_{Maxd}$  and  $Q_{Mind}$ . In tabella 6 si riportano i valori medi annui di  $Q_{Maxd}$  e  $Q_{Mind}$  per  $d = 37, 91, 182, e 274$  giorni. È stata inoltre stimata la portata indice  $Q_{ind}$ . Nelle figure 5 e 6 si riportano le portate medie mensili presso le sezioni 1 e 5, ma sono stati trovati risultati equivalenti per tutte e cinque le sezioni scelte (non mostrate per abbreviare). Il modello CCSM3 (tutte e tre le storylines) evidenzia un incremento delle portate durante l'autunno e l'inverno e nella prima parte della primavera, come conseguenza dello scioglimento nivale. Il modello ECHAM5 (tutte e tre le storylines) fornisce un incremento delle portate durante l'autunno e l'inverno, con una decrescita in primavera e, in modo più consistente, in estate.
- 12 I risultati del modello CCSM3 mostrano chiaramente una transizione da un andamento unimodale di tipo alpino, governato dallo scioglimento nivale da aprile e giugno, più evidente in alta quota (massimo in S1), verso un andamento bimodale con due massimi (aprile e novembre) a tutte le altitudini (S1 e S5, e in modo simile in S3-S4, non riportato). Il modello ECHAM5 mostra un comportamento simile al CCSM3, nonostante sia meno pronunciato. Un incremento delle portate invernali si verifica ovunque e le piene primaverili potrebbe essere anticipate di un mese (da maggio ad aprile). Le temperature mensili a Grabiasca (non mostrate per brevità) aumentano negli scenari del CCSM3 e, in modo differente, per ciascuna storylines, ma diminuiscono durante agosto e ottobre. L'ECHAM5 fornisce sempre un incremento delle temperature annue, ma in media meno del CCSM3. Gli andamenti delle precipitazioni sono simili ed entrambi i modelli prevedono (rispetto al CO) periodi più secchi durante maggio e settembre e più piovosi altrove (non mostrato). In figura 7 si riporta il contenuto equivalente medio di acqua della neve  $SWE$  della fascia 12, rappresentativo della dinamica della neve a 2000 m s.l.m. Tutti gli scenari prospettano meno neve del CO, tranne il CCSB1, che restituisce una copertura leggermente più abbondante durante l'inverno (JFM, caratterizzato da una

maggior precipitazione e da temperature più basse), la quale si scioglie però velocemente durante il mese di aprile, generando in anticipo rilevanti deflussi in alveo.

Tabella 5. Fiume Serio, proiezioni secondo il CCSM3 e l'ECHAM5

Variabile	Descrizione	Valori			
		CO	CCSA1B	CCSA2	CCSB1
<b>CCSM3</b>		<b>CO</b>	<b>CCSA1B</b>	<b>CCSA2</b>	<b>CCSB1</b>
$P_{CUM}$ [mm]	Precipitazione totale annua	1344	1255	1103	1192
$T_{av}$ [°C]	Temperatura	9.4	11.3	11.6	10.0
$ET_{av}$ [mm]	Evapotraspirazione media annua	430	364	360	350
$SWE_{av}$ [mm]	Contenuto medio equivalente di acqua della neve in un anno	45.8	29.5	23	44.6
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S1	Portata media	1.01	1.24	1.05	1.18
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S2	Portata media	1.61	1.98	1.66	1.87
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S3	Portata media	2.16	2.65	2.22	2.50
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S4	Portata media	3.85	4.75	3.95	4.45
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S5	Portata media	5.46	6.76	5.57	6.29
<b>ECHAM5</b>		<b>CO</b>	<b>ECHA1B</b>	<b>ECHA2</b>	<b>ECHB1</b>
$P_{CUM}$ [mm]	Precipitazione totale annua	1344	1200	1188	1068
$T_{av}$ [°C]	Temperatura	9.4	10.8	11.2	10.5
$ET_{av}$ [mm]	Evapotraspirazione media annua	430	415	397	395
$SWE_{av}$ [mm]	Contenuto medio equivalente di acqua della neve in un anno	45.8	25.9	37.9	25.6
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S1	Portata media	1.01	1.13	1.12	0.98
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S2	Portata media	1.61	1.79	1.78	1.54
$Q_{av}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] S3	Portata media	2.16	2.39	2.38	2.05

$Q_{av}$ [ $m^3s^{-1}$ ] S4	Portata media	3.85	4.23	4.23	3.61
$Q_{av}$ [ $m^3s^{-1}$ ] S5	Portata media	5.46	5.97	5.98	5.06

Precipitazioni e temperature medie annue a Grabiasca (738 m s.l.m.) e portata media nelle cinque sezioni di controllo. Periodo di controllo 2000-2009, e scenari, 2045-2054. I valori in *italic* sono quelli ottenuti dai GCM e dalle osservazioni, gli output del modello idrologico sono invece in carattere normale.

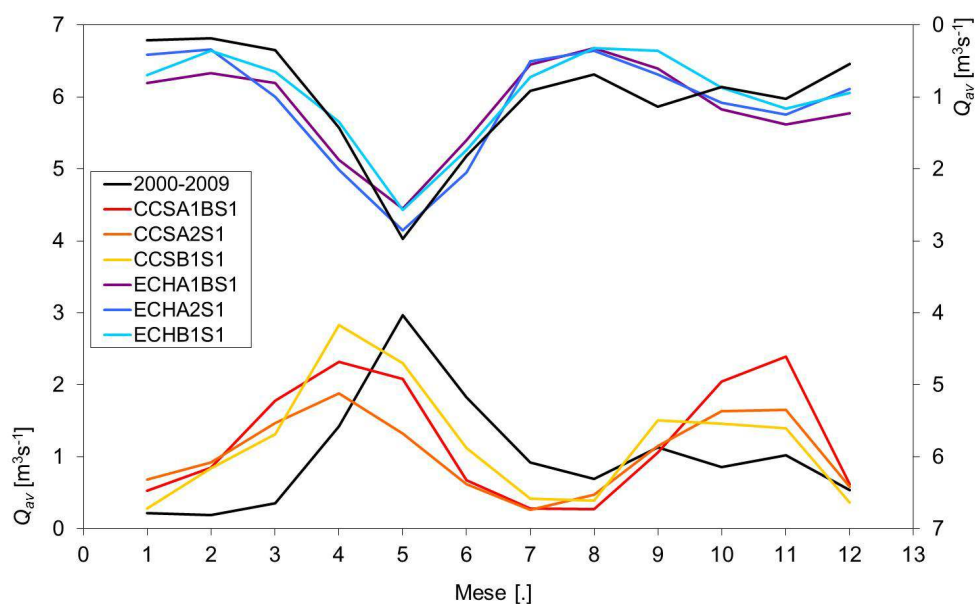
Tabella 6. Serio a Grabiasca

Variabile	Descrizione	Valore			
		CO	CCSA1B	CCSA2	CCSB1
<b>CCSM3</b>		<b>CO</b>	<b>CCSA1B</b>	<b>CCSA2</b>	<b>CCSB1</b>
$Q_{37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 10%	5.81	7.21	5.59	6.57
$Q_{91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 25% (piena ordinaria)	2.36	2.93	2.55	2.95
$Q_{182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 50% (mediana)	0.59	0.83	0.81	0.82
$Q_{274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 66% (portata di magra)	0.31	0.36	0.35	0,39
$Q_{ind}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Portata indice di piena	23.95	32.59	27.06	27.80
$Q_{Min37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 37 giorni	0.22	0.19	0.20	0.32
$Q_{Max37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 37 giorni	6.66	8.98	6.46	7.52
$Q_{Min91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 91 giorni	0.55	0.40	0.46	0.65
$Q_{Max91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 91 giorni	4.57	5.63	4.13	5.09
$Q_{Min182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 182 giorni	1.55	1.20	1.26	1.55
$Q_{Max182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 182 giorni	3.22	3.43	2.64	3.35
$Q_{Min274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 274 giorni	2.18	2.19	1.75	2.38
$Q_{Max274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 274 giorni	2.68	2.95	2.44	2.96
<b>ECHAM5</b>		<b>CO</b>	<b>ECHA1B</b>	<b>ECHA2</b>	<b>ECHB1</b>
$Q_{37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 10%	5.81	6.32	6.80	5.61
$Q_{91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 25% (piena ordinaria)	2.36	3.15	2.96	2.06
$Q_{182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 50% (mediana)	0.59	0.86	0.69	0.58
$Q_{274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Eccede il 66% (portata di magra)	0.31	0.35	0.35	0.35

$Q_{ind}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Portata indice di piena	23.95	22.20	23.82	25.75
$Q_{Min37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 37 giorni	0.22	0.30	0.28	0.24
$Q_{Max37}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 37 giorni	6.66	6.43	7.25	6.57
$Q_{Min91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 91 giorni	0.55	0.56	0.64	0.38
$Q_{Max91}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 91 giorni	4.57	4.75	4.98	4.29
$Q_{Min182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 182 giorni	1.55	1.29	1.41	1.12
$Q_{Max182}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 182 giorni	3.22	3.23	3.16	2.78
$Q_{Min274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Min portata media su 274 giorni	2.18	1.98	2.19	1.79
$Q_{Max274}$ [ $m^3s^{-1}$ ]	Max portata media su 274 giorni	2.68	2.64	2.76	2.36

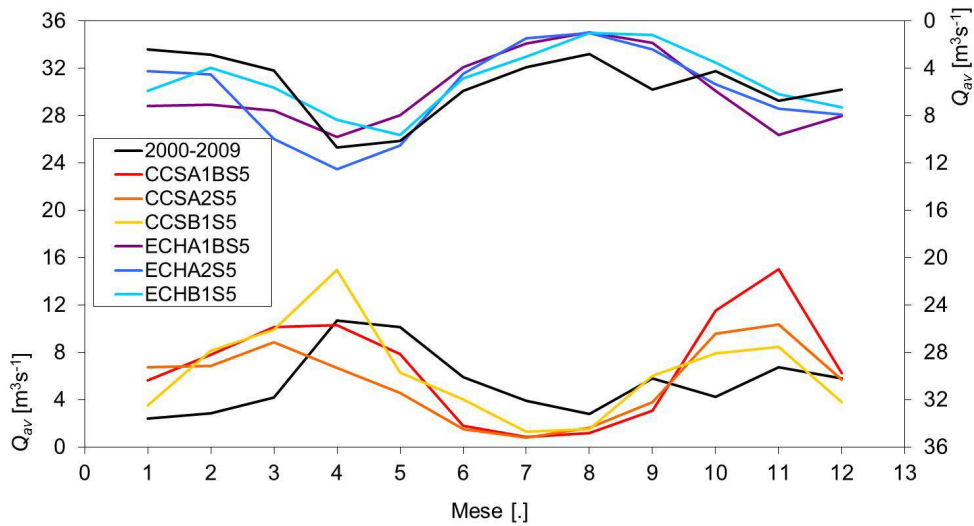
Variabili di flusso rilevanti. Periodo di controllo, 2000-2009, e scenari, 2045-2054.

Figura 5. Proiezioni idrologiche, 2045-2054



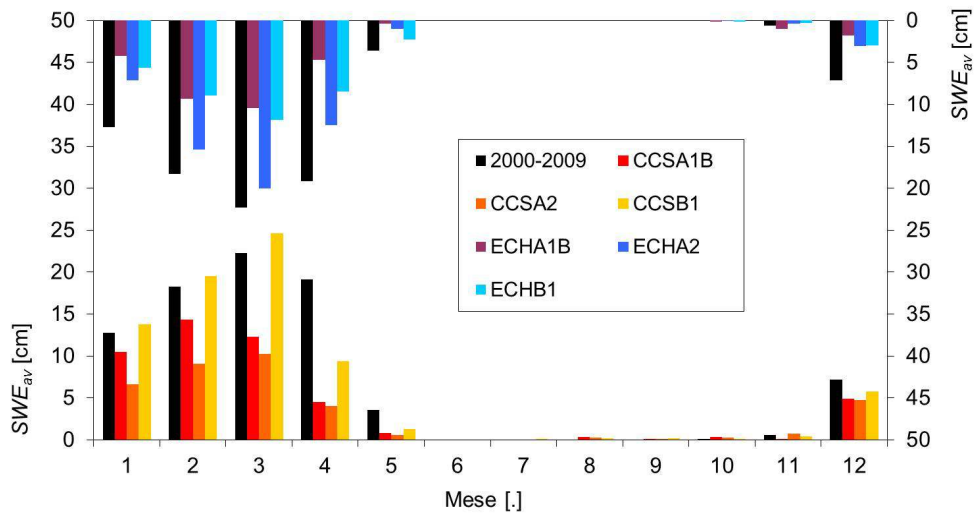
Portate mensili  $Q_{av}$  alla sezione S1. I risultati dell'ECHAM5 sono riportati sull'asse destro delle y, con scala invertita.

Figura 6. Proiezioni idrologiche, 2045-2054



Portate mensili  $Q_{av}$  alla sezione S5. I risultati dell'ECHAM5 sono riportati sull'asse destro delle y, con scala invertita.

Figura 7. Proiezioni idrologiche, 2045-2054



$SWE_{av}$  è il contenuto medio mensile equivalente di acqua della neve sul terreno per la fascia altitudinale 12 (circa 2000 m s.l.m.). I risultati dell'ECHAM5 sono riportati sull'asse delle y di destra, con scala invertita.

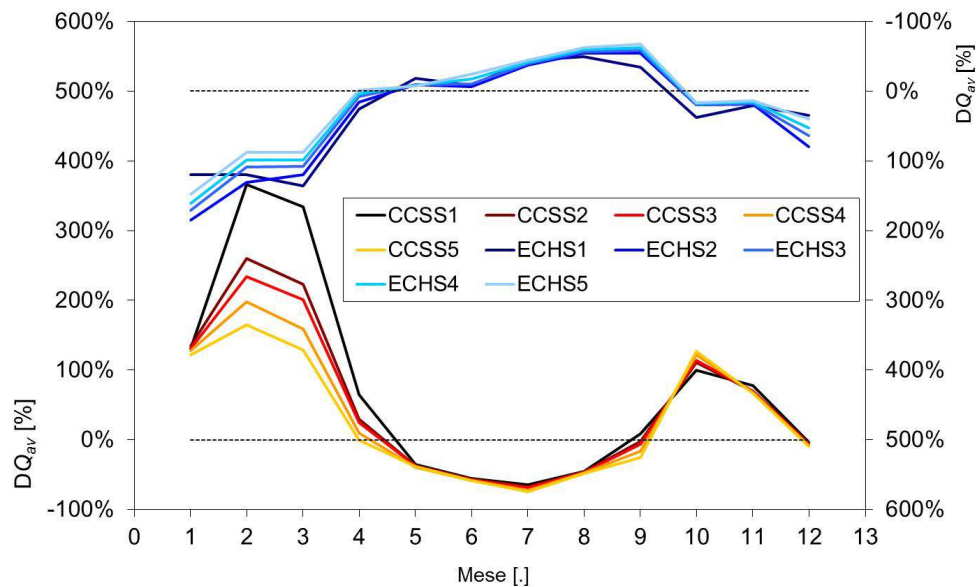
## Discussione

- 13 Le nostre simulazioni mostrano una potenziale variazione futura (2045-2054) della distribuzione della risorsa idrica nel fiume Serio. Le temperature attese mostrano un aumento consistente. La variazione media annua delle temperature varia da +0.6 °C per il CCSB1 e +1.1 °C per l'ECHB1 a +2.2°C per il CCSA2 e + 1.8 °C per l'ECHA2, con distribuzione non uniforme nell'anno. La precipitazione annua  $P_{CUM}$  varia da 1068 mm (- 21% rispetto al CO) per l'ECHA2 e 1103 mm (-18%) per il CCSA2 a 1255 mm (-7%) per il CCSA1B e 1200 m

(-11%) per l'ECHA1B, annualmente sempre decrescente, ma non distribuita uniformemente, con autunni e inverni più piovosi e primavere ed estati più torride. Tutti gli scenari mostrano un manto nivale più breve e sottile (tabella 5, figura 7). Le portate tardo primaverili, normalmente connesse all'ablazione nivale, potrebbero quindi diminuire (figure 5 e 6). La portata media annua potrebbe rimanere approssimativamente costante o anche aumentare (tabella 5), ma la distribuzione stagionale dell'acqua potrebbe cambiare in maniera rilevante. Le portate, a tutte le quote, potrebbero crescere in autunno (OND) e in inverno (JFM), conseguentemente alla trasformazione della neve in pioggia ed all'incremento delle precipitazioni che non contribuirebbero più all'accumulo nivale (figura 7). A sua volta la mancanza di SWE cumulato, combinata alle minori precipitazioni durante la primavera e l'estate, genererebbe portate inferiori, specialmente nei periodi secchi (figure 5 e 6). E' da notare come per i bacini in quota la stagione di fusione potrebbe spostarsi, mediamente, da maggio ad aprile (figure 5 e 6, sezioni S1, e S2-S4, non mostrate, CCSA1B, CCSB1, sezione S4, non mostrata, e S5 ECHA2), o anche a marzo, secondo lo scenario A2 (sezioni S3-S4, non mostrate, e S5 CCSA2, figura 6). L'evapotraspirazione diminuirà a scala annuale in tutti gli scenari (tabella 5). Nonostante l'evapotraspirazione potenziale *ETP* cresca linearmente con l'aumento della temperatura (qui modellata con l'equazione di Hargreaves, dipendente solo dalla temperatura, ad es. Groppelli *et al.*, 2011b), la consistente decrescita della precipitazione tutto l'anno (tabella 5) limiterà l'umidità del suolo e quindi l'evapotraspirazione effettiva *ET*. Questo accadrebbe specialmente durante l'estate quando, in tutti gli scenari, è previsto un clima più caldo e secco, facendo così aumentare *ETP* e diminuire *ET*. La diminuzione della copertura nivale comporterà durante il disgelo anche una diminuzione dell'umidità del suolo, alimentando ulteriormente la diminuzione dell'evapotraspirazione. E' da notare come la mancanza di acqua e la diminuzione dell'evapotraspirazione potrebbero ostacolare la resa agricola e, in generale, la crescita della vegetazione, delle coltivazioni e dei frutteti (a es. Bocchiola *et al.*, 2013) e gli effetti dovuti al cambiamento del clima presentati potrebbero quindi avere forti ricadute sulla produzione di cibo. In figura 8 vengono mostrate le variazioni relative (rispetto al CO) delle portate medie mensili nelle cinque sezioni selezionate, mediate sulle tre storylines. Durante la primavera e l'estate tutti i bacini mostrerebbero una decrescita delle portate in alveo, fino al -75% circa mentre, durante l'inverno, i bacini a quote più elevate potrebbero mostrare un aumento fino a +350% circa, secondo il CCSM3 (tre storylines), e fino al +150% circa, secondo l'ECHAM5 (tre storylines).



Figura 8. Proiezioni idrologiche, 2045-2054



$DQ_{Av}$  è la variazione relativa (rispetto al periodo di controllo CO) delle portate mensili in alveo per ognuno dei bacini di controllo. Valori medi mensili per tutti gli scenari del CCSM3 (A1B-A2-B1) e dell'ECHAM5 (A1B-A2-B1). I risultati dell'ECHAM5 sono riportati sull'asse y sulla destra, con scala invertita.

- 14 L'uso di periodi decennali di riferimento (2000-2009 contro 2045-2054) potrebbe non fornire una serie sufficientemente lunga per valutare una statistica robusta. Una notevole fonte d'incertezza potrebbe essere insita nelle tendenze delle precipitazioni future, che sono oggetto di un acceso dibattito (si veda per es. Brunetti *et al.* 2006, Gropelli *et al.* 2011b per una discussione sulle precipitazioni future nelle Alpi). Un'ulteriore fonte d'incertezza potrebbe risultare dalla metodologia di *downscaling*, che si basa sull'ipotesi che la differenza tra le precipitazioni dei GCM e quelle osservate al suolo rimarrà in futuro la stessa. Il modello idrologico utilizzato considera solo la temperatura e la precipitazione, mentre altre variabili potrebbero giocare un ruolo altrettanto importante, come ad esempio la radiazione solare, il vento, ecc. A causa ai prelievi idrici, è stato possibile esplorare un intervallo altitudinale limitato, compreso dai 500 ai 900 m s.l.m. per le sezioni fluviali e circa dai 1600 ai 2200 per la quota media dei bacini.
- 15 Secondo gli scenari idrologici qui delineati, sarebbe necessario intraprendere delle azioni di mitigazione degli effetti ecologici ed economici causati dalla mancanza di copertura nivale. L'area montana dell'alto bacino del Serio è meta di turismo invernale e sono presenti diverse località dotate di piste e impianti di risalita per la pratica dello sci (a es. Monte Pora, Passo della Presolana, Colere, Lizzola, Spiazzi di Gromo) che è largamente diffusa nelle Alpi e nelle pre-Alpi italiane; la diminuzione della copertura nivale prospettata potrebbe quindi influenzare l'economia turistica locale (es. Diolaiuti *et al.*, 2006). I fiumi delle Alpi lombarde, incluso il Serio, sono largamente sfruttati per l'agricoltura della valle del Po, una delle aree agricole più produttive d'Europa (per il riso, frumento, mais, ecc.), che viene irrigata durante l'estate con l'acqua di superficie proveniente dalla Alpi. Come mostrato sopra, l'aumento della temperatura in estate determinerebbe un aumento dell'evapotraspirazione potenziale se non fosse per l'assenza di precipitazioni che porterebbe alla mancanza di acqua e quindi a una maggiore

necessità d'irrigazione. Questo a sua volta condurrà a una diminuzione delle rese delle colture di cereali a meno che l'approvvigionamento idrico non venga incrementato attraverso strategie di irrigazione (Bocchiola *et al.*, 2013). La diminuzione delle portate durante l'estate potrebbe influenzare inoltre l'idoneità degli habitat fluviali per le colonie ittiche, che dipende dalla disponibilità di acqua e dalla morfologia dell'alveo (Groppelli *et al.*, 2011c) e un aumento delle piene durante l'autunno e l'inverno potrebbe disturbare lo sviluppo delle comunità bentoniche, riducendo potenzialmente la qualità del fiume, e condizionare la pratica della pesca. La diminuzione delle portate in estate e l'aumento della temperatura dell'aria potrebbe portare a un incremento della temperatura dell'acqua, con la diffusione di malattie acquatiche (Peeler and Feist, 2011).

## Conclusioni

- 16 I risultati ottenuti, anche se con alcune incertezze, evidenziano un potenziale impatto del cambiamento climatico sulle risorse idriche nella regione delle Alpi italiane. Verso la metà del secolo si prospettano piene più intense in inverno e periodi più siccitosi in estate e un assottigliamento della copertura nivale alle alte altitudini da moderata a forte, interessando specialmente l'idrologia dei bacini di alta quota. La gestione delle risorse idriche nelle Alpi è un argomento di crescente dibattito, considerati gli evidenti cambiamenti climatici in atto, e pone l'attenzione sui temi della produzione di energia e la sicurezza alimentare delle popolazioni interessate; i decisori politici devono quindi intervenire rapidamente. Il presente studio potrebbe fornire un punto di riferimento per studi volti alla valutazione e alla futura gestione delle risorse idriche e potrebbe contribuire a sviluppare delle possibili strategie di adattamento, delineando le basi metodologiche per lo sviluppo futuro di quest'area.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- ANGHILERI D., PIANOSI F., SONCINI-SESSA R., 2011.- « A framework for the quantitative assessment of climate change impacts on water-related activities at the basin scale », *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 8, p. 585-617.
- BARDOSSY, A., 1997.- « Downscaling from GCMs to Local Climate through Stochastic Linkages », *Journal of Environmental Management*, 49, p. 7-17.
- BAERNETT T.P., ADAM J.C., LETTENMAIER D.P., 2005.- « Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions », *Nature*, 438(17), p. 303-309.
- BARONTINI S., GROSSI G., KOUWEN N., MARAN S., SCARONI P., RANZI R., 2009.- « Impacts of climate change scenarios on runoff regimes in the southern Alps », *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, p. 3089-3141.
- BATES B.C., CHARLES S.P., HUGUES J.P., 1998.- « Stochastic downscaling of numerical climate model simulations », *Environmental Modelling & Software*. 13, p. 325-331.

- BATES B.C., KUNDZEWICZ Z.W., WU S., PALUTIKOF J.P., 2008.- « Climate Change and Water », *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC Secretariat*, Geneva.
- BAVAY M., LEHNING M., JONAS T., LÖWE H., 2009.- « Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments », *Hydrol. Process.*, 23, p. 95-108.
- BENISTON M., STEPHENSON D.B., CHRISTENSEN O.B., FERRO C.A.T., FREI C., GOYETTE S., HALSNAES K., HOLT T., JYLHÄ K., KOFFI B., PALUTIKOF J., SCHÖLL R., SEMMLER T., WOTH K., 2007.- « Future extreme events in European climate : an exploration of regional climate model projections », *Climatic Change*, 81 (Suppl. 1), p. 71-95.
- BOCCHIOLA D., ROSSO R., 2007.- « The distribution of daily Snow Water Equivalent in the Central Italian Alps », *Adv. Wat. Res.*, 30, p. 135-147.
- BOCCHIOLA D., MIHALCEA C., DIOLAIUTI G., MOSCONI B., SMIRAGLIA C., ROSSO R., 2010.- « Flow prediction in high altitude ungauged catchments : a case study in the Italian Alps (Pantano Basin, Adamello Group) », *Adv. Wat. Res.* 33, p. 1224-1234.
- BOCCHIOLA D., DIOLAIUTI G.- « Evidence of climate change within the Adamello Glacier of Italy », *Theor. App. Climat.*, 100(3-4), p. 351-369.
- BOCCHIOLA D., GROPELLI B., 2010.- « Spatial estimation of Snow Water Equivalent at different dates within the Adamello Park of Italy », *Cold Reg. Sci and Techn.*, 63(3), p. 97-109.
- BOCCHIOLA D., DIOLAIUTI G., SONCINI A., MIHALCEA C., D'AGATA C., MAYER C., LAMBRECHT A., ROSSO R., SMIRAGLIA C., 2011.- « Prediction of future hydrological regimes in poorly gauged high altitude basins : the case study of the upper Indus, Pakistan », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2059-2075.
- BOCCHIOLA D., NANA E., SONCINI A., 2013.- « Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy », *Agricultural Water Management*, 116, p. 50-61.
- BORONEANT C., PLAUT G., GIORGI F., BI, X., 2006.- « Extreme precipitation over the Maritime Alps and associated weather regimes simulated by a regional climate model : Present-day and future climate scenarios », *Theor. App. Climat.*, 86 (1-4), p. 81-99, doi: 10.1007/s00704-005-0211-7.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., AUER I., BÖHM R., SCHÖNER W., 2006.- « Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800-2003 period », *J. Geophys. Res.*, 111, D11107, doi:10.1029/2005JD006674.
- BULTOT F., GELLENS F., SPREAFICO M., SCHADLER B., 1992.- « Ripercussions of a CO<sub>2</sub> doubling on the water balance : a case study in Switzerland », *J. Hydrol.*, 137, p. 199-208.
- CANOBBIO S., MEZZANOTTE V., BENVENUTO F., SIOTTO M., 2010.- « Determination of Serio River (Lombardy, Italy) ecosystem dynamics using macroinvertebrate functional traits », *Italian Journal of Zoology*, 77(2), p. 227-2240.
- DIOLAIUTI G., SMIRAGLIA C., PELFINI M., BELÒ M., PAVAN M., VASSENA G., 2006.- « The recent evolution of an Alpine glacier used for summer skiing (Vedretta Piana, Stelvio Pass, Italy) », *Cold Regions Science and Technology*, 44(3), p. 206-216.
- DROGUE G., PFISTER L., LEVIANDIER T., EL IDRISSE A., IFFLYA J.F., MATGEN P., HUMBERT J., HOFFMANN L., 2004.- « Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin », *J. Hydrol.*, 293, p. 255-269.
- GARAVAGLIA R., MARZORATI A., 2010.- *Scenari futuri di precipitazione in Svizzera : uno studio preliminare. [Future precipitation scenarios in Switzerland : a preliminary a study]*. MS Thesis, Politecnico di Milano, year 2010, Mat: 714462, 713523. In Italian. Available upon request.

- GROPPELLI B., BOCCHIOLA D., ROSSO R., 2010.- « Precipitation downscaling using random cascades : a case study in Italy », *Advances in Geosciences*, 8, p. 1-6.
- GROPPELLI B., BOCCHIOLA D., ROSSO R., 2011a.- « Spatial downscaling of precipitation from GCMs for climate change projections using random cascades : A case study in Italy », *Water Resour. Res.*, 47, W03519, doi:10.1029/2010WR009437.
- GROPPELLI B., SONCINI A., BOCCHIOLA D., ROSSO R., 2011b.- « Evaluation of future hydrological cycle under climate change scenarios in a mesoscale Alpine watershed of Italy », *NHESS*, 11, p. 1769-1785.
- GROPPELLI B., CONFORTOLA G., SONCINI A., BOCCHIOLA D., ROSSO R., 2011c.- « Assessment of future river habitat suitability under climate change scenarios in a mesoscale Alpine watershed of Italy (Serio River, Italian Alps) », H43B-1194, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 7-11, 2011.
- LAMMERING B., DWYER I., 2000.- « Improvement of water balance in land surface schemes by random cascade disaggregation of rainfall », *Int. J. Climatol.*, 20, p. 681-695.
- NAKICENOVIC N., DAVIDSON O., DAVIS G., GRÜBLER A., KRAM T., LEBRE LA ROVERE E., METZ B., MORITA T., PEPPER W., PITCHER H., SANKOVSKI A., SHUKLA P., SWART R., WATSON R., DADI A., 2000.- « Special Report on Emission Scenarios : A Special Report of Working Group III of the IPCC », Ed.: Nakicenovic, N., and Swart, R., Cambridge University Press, UK. P. 599.
- PEELER E.J., FEIST S.W., 2011.- « Human intervention in freshwater ecosystems drives disease emergence », *Fresh. Biol.*, 56, p. 705-716.
- RANZI R., GROSSI G., BACCHI B., 1999.- « Ten years of monitoring areal snow pack in the Southern Alps using NOAA-AVHRR imagery, ground measurements and hydrological data », *Hydrol. Process.*, 13, p. 2079-2095.
- ROSSO R., 1984.- « Nash model relation to Horton order ratios », *Wat. Res.*, 20(7), p. 914-920.
- SONCINI A., BOCCHIOLA D., 2011.- « Assessment of future snowfall regimes within the Italian Alps using general circulation models », *Cold Reg. Sci and Techn.*, 68, p. 113-123.
- SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER H.L., 2007.- *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC Fourth Assessment Report (AR4).
- WIGMOSTA M.S., VAIL L.W., LETTENMAIER D.P., 1994.- « A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain », *Wat. Resour. Res.*, 30, p. 1665-1679.

## RÉSUMÉS

Il cambiamento climatico influenzerà il ciclo idrologico e la disponibilità di risorsa idrica nelle Alpi.

Qui si studia la potenziale evoluzione futura del ciclo idrologico (2045-2054) per un fiume alpino italiano, in funzione di scenari di cambiamento climatico: il Serio (circa 300 km<sup>2</sup>). Essendo infatti l'idrologia di questo bacino fortemente dipendente dal ciclo della copertura nivale, vi saranno molto probabilmente rilevanti variazioni in risposta ai cambiamenti climatici. Si è qui stato calibrato e validato un modello idrologico, in grado di simulare il regime della risorsa idrica fluviale. E' stata eseguita una procedura di disaggregazione temporale dei dati di temperatura e precipitazione future, ottenuti da due modelli di circolazione generale GCM, che sono stati quindi utilizzati come input per il modello idrologico, al fine di ottenere i regimi idrologici proiettati per

diverse sezioni a differenti altitudini del bacino. Gli scenari e le *storylines* dei diversi GCM adottati differiscono l'uno dall'altro per quanto riguarda le proiezioni dell'ammontare di precipitazione e temperatura, ma concordano su una diminuzione delle prime e su un aumento delle seconde. Tutti gli scenari idrologici concordano nel prospettare un ritiro della copertura stagionale di neve, dovuta a un aumento delle temperature, oltre che un incremento delle portate autunnali e invernali, come conseguenza dell'aumento delle precipitazioni liquide. Portate più basse sono invece previste durante la primavera e l'estate, in vista di una diminuzione delle piogge e dello scioglimento nivale. Il modello CCSM3 prevede infatti l'anticipazione della stagione di scioglimento nivale di un mese. Nei bacini in quota il fenomeno è più evidente poiché l'incremento delle portate invernali cresce più che proporzionalmente.

## INDEX

**Keywords :** cambiamento climatico, bacini alpini, modelli GCM, proiezioni idrologiche

## AUTEURS

### GABRIELE CONFORTOLA

Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano,  
Gabriele.confortola@polimi.it

### ANDREA SONCINI

Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano

### DANIELE BOCCHIOLA

Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano