

ropea del 2000, e di alcune Misure di Tutela che però non si applicano ai progetti già presentati.

Solo molto anni dopo aver introdotto l'incentivazione, Stato e Regioni hanno iniziato a mettersi -almeno formalmente- in regola con le normative europee. Un processo lento e non ancora concluso.

Si sottolinea che tutte le nuove regole introdotte sono rese inefficaci dalla impossibilità di applicarle alle domande in istruttoria.

Nel 2014 si contavano in Italia 2000 domande in istruttoria, corrispondenti ad altri 3.000 km di corsi d'acqua intubati, per le quali nessuna regola introdotta nel frattempo è stata finora applicata né potrà valere.

Sempre nel 2014 alcune centinaia di associazioni nazionali regionali e locali, nella consapevolezza che il sacrificio ambientale, paesaggistico ed economico imposto ai territori non è giustificato dalla produzione energetica di questi impianti, hanno sottoscritto l'Appello Nazionale per la salvaguardia dei corsi d'acqua dall'eccesso di sfruttamento idroelettrico che chiedeva, tra l'altro, la sospensione delle autorizzazioni in corso, la revisione del sistema incentivante e l'apertura di un tavolo nazionale di confronto. L'Appello Nazionale è rimasto però del tutto inascoltato e oggi la situazione è, se possibile, ulteriormente peggiorata.

A causa della complessa normativa esistente, gli enti coinvolti nelle procedure autorizzative (Stato, Regioni, Province, Comuni) sono paralizzati dal timore dei ricorsi e sono di fatto succubi dei proponenti e dei concessionari a cui la normativa statale ha dato in mano il coltello dalla parte del manico. Anche i nuovi decreti del Ministero dell'Ambiente del febbraio 2017 n 30 sul deflusso ecologico e n 29 sulle valutazioni ex ante dei progetti, potranno essere utili solo in futuro quando saranno definitivamente in vigore. Inoltre saranno di difficile applicazione in quanto molto tecnici, poco chiari e con ampio spazio lasciato alla discrezionalità. Soprattutto, non essendo applicabili alle domande in istruttoria, non potranno porre rimedio alla situazione che è venuta a crearsi.

La situazione descritta riguarda, con poche varianti sul tema, tutte le Regioni italiane, a dimostrazione che il problema non è superabile a livello regionale. Siamo in emergenza e l'unica arma efficace per tutelare i corsi d'acqua è togliere gli incentivi mettendo fine alla speculazione.

Cambiamenti climatici e possibili impatti idrologici in bacini alpini

*Bombelli G.M., Soncini A., Bianchi A., Bocchiola D.
Politecnico di Milano, DICA, I. da Vinci 32, 20133, Milano.
daniele.bocchiola@polimi.it*

Sommario

Questa memoria presenta alcuni risultati relativi alla valutazione degli impatti del cambiamento climatico in bacini alpini in presenza di ghiacciai, con particolare riguardo agli impianti idroelettrici dotati di serbatoi di regolazione. Si è considerato come caso studio il sistema idroelettrico dell'Alta Valtellina, in Lombardia.

A tal scopo i processi idrologici per la formazione del deflusso del bacino dell'Alta Valtellina sono stati descritti attraverso un modello idrologico in grado di modellare le principali dinamiche idro-glaciologiche e quindi le componenti glaciali e nivali del deflusso.

Per poter essere successivamente applicato per le proiezioni future, il modello idrologico è stato calibrato e validato tramite serie storiche di portata e informazioni di ablazione dei ghiacciai per il periodo 2006-2015, preso come riferimento per il confronto con potenziale variazioni future. I dati di scenario meteorologico fino al 2100, indispensabili per le simulazioni future, sono stati ricavati mediante l'applicazione di tre scenari RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 ad altrettanti modelli climatici di circolazione generale EC-EARTH, MPI-ESM (ECHAM6) e CCSM4, contenuti nei rapporti di IPCC.

Mediante il modello idrologico e con i dati ottenuti dai GCM per ognuno degli scenari RCP, si è proiettato l'andamento del sistema glaciale e delle portate defluenti del bacino dell'Alta Valtellina per il periodo 2012-2100. Si trova che la portata media annua defluente dal bacino decrescerebbe in tutte le combinazioni di scenario, essendo solo leggermente influenzata dalla riduzione del volume di ghiaccio. Lo è maggiormente, invece, dalla riduzione delle precipitazioni di carattere nevoso e dal corrispettivo aumento delle piogge.

Dopo aver ottenuto proiezioni idrologiche, si sono eseguite simulazioni di produzione futura di energia idroelettrica, mediante un modello di ottimizzazione della gestione degli impianti, con l'obiettivo di massimizzare il ricavo del gestore. Si è formulato inoltre un modello per la stima dei prezzi futuri. Analizzando le produzioni di energia medie per ogni scenario per due decenni di riferimento, risulterebbe, nella decade 2040-2049 un aumento in tutti gli

scenari, mentre nella decade 2090-2099 risulterebbe una perdita nello scenario gravoso definito dal RCP 8.5.

Introduzione

Lo studio dell'evoluzione nel tempo della risorsa idrica in ambiente montano ha assunto negli ultimi anni importanza sempre crescente all'interno della comunità scientifica. Nelle aree montane, la coltre nivale stagionale, e la copertura glaciale permanente assumono enorme importanza dal punto di vista ambientale, paesaggistico, geologico ed idrologico (Viganò et al., 2015). L'evidenza recente dell'intensificarsi dei cambiamenti climatici, largamente riconosciuta e riassunta nei report dell'IPCC (AR5 IPCC, 2013), porta a ritenere probabile un impatto rilevante sulle dinamiche idrologiche delle aree di alta quota, dove la copertura nivale stagionale e le aree glaciali permanenti si contrarranno a scala mondiale (Barnett et al., 2005; Minora et al., 2016). Se da un lato l'evidente fase di ritiro dei ghiacciai e la forte relazione con lo sviluppo dell'attività turistica nelle zone interessate rendono la tematica di enorme interesse per il pubblico, dall'altro la necessità di comprendere e modellare la risorsa idrica derivante dalla fusione nivo-glaciale ad alta quota rende necessario lo studio quantitativo della dinamica della criosfera e dei relativi contributi idrologici (Bocchiola et al., 2010; Minora et al., 2015).

In Italia, secondo alcune stime i ghiacciai alpini conterrebbero ca. $1.3 \text{ E}^9 \text{ m}^3$ di acqua (Smiraglia et al., 2003) e sono soggetti a rapida contrazione (Smiraglia e Diolaiuti, 2015; Smiraglia et al., 2015). L'importanza di tali risorse glaciali si è osservata di recente durante le estati secche, p.es. nell'anno 2003, quando il contributo della fusione glaciale ha mantenuto i deflussi del Po a livelli sostenibili. In letteratura è noto come i ghiacciai montani siano dei buoni indicatori della variabilità climatica, poiché cambiamenti nel clima causano variazioni nella geometria e nella dinamica di tali apparati (D'Agata et al., 2014). Lo studio degli impatti causati da variazioni climatiche sui corpi glaciali è possibile tramite lo sviluppo di modelli matematici, in grado di riprodurre i complessi fenomeni fisici che regolano le dinamiche glaciali (Soncini et al., 2016). Di particolare interesse è poi lo studio della potenziale evoluzione futura delle coltri glaciali, in risposta a scenari di cambiamento climatico (p.es. Garavaglia et al., 2014). Tuttavia, data l'enorme complessità delle dinamiche nivo-glaciali ed idrologiche nelle aree di alta quota, studi di campo sono necessari per la comprensione dei fenomeni più importanti ivi coinvolti e per la seguente parametrizzazione dei modelli glacio-idrologici. Tali fenomeni, o componenti, si possono in breve riassumere come i) il regime di precipitazione ad alta

quota, ii) le dinamiche di accumulo e fusione nivale, iii) le dinamiche di accumulo e fusione glaciale, iv) gli spessori e le dinamiche di flusso glaciali e v) la risposta idrologica dei bacini fluviali. In tal senso, la carenza di dati accurati e continui, giustificata dalla complessa situazione ambientale e climatica, rende spesso la modellazione glacio-idrologica in queste aree estremamente semplificativa e non realistica, rendendo così poco realistiche, anche le proiezioni future, già intrinsecamente affette da larga incertezza.

Inoltre, l'acqua delle montagne produce energia, alimenta gli ecosistemi, provvede rifornimento costante ai laghi ed all'irrigazione di pianura ed è necessario conoscerne la genesi, la quantità e le dinamiche se si vogliono gestire tutti questi aspetti con contezza della realtà. La contingente necessità di gestire e preservare la risorsa idrica, come accennato di fondamentale importanza per i suoi usi civili, irrigui, energetici eco-sistemici, è ancor più evidente nell'attuale fase di cambiamenti climatici in atto ed attesi e si scontra con la forte evidenza della mancanza di dati empirici sulle disponibilità della stessa risorsa.

Tale mancanza, determinata in sostanza dalla gestione complessa delle reti di misura pubbliche, in particolare dopo lo smantellamento delle reti di misura afferenti al SIMN (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale) a cavallo tra gli anni 60 e 70, fa sì che, nel momento in cui la necessità di conoscere in dettaglio lo stato della risorsa idrica è massima, vi sia in realtà ben poca informazione diretta su tale risorsa. Basti osservare, a tal proposito, come diversi studi preliminari per la valutazione del potenziale idro-elettrico ed irriguo per le montagne lombarde si basino su valutazioni della disponibilità di acqua derivanti dai dati SIMN, ossia relative agli anni '70. Si osserva altresì come le agenzie regionali lombarde (p.es. ARPA), si affidino per la valutazione della disponibilità di risorsa idrica a stime indirette tramite variabili sicuramente correlate, quali i volumi lacuali e/o la stima degli equivalenti nivali cumulati, con metodologie mutuata da studi condotti dai ricercatori dei principali atenei, ivi inclusi la Statale ed il Politecnico di Milano, ma raramente all'evidenza empirica della misura.

La presente memoria vuole introdurre, partendo dalle precedenti considerazioni idrologiche, una analisi sul tema idroelettrico, poiché tale tecnologia ha il grande vantaggio di flessibilità e di capacità di immagazzinare indirettamente l'elettricità prodotta a bassi costi. Caratteristiche che in un futuro saranno ancora più necessarie con l'aumento delle risorse energetiche intermittenti, come quelle rinnovabili di tipo eolico e solare. La produzione idroelettrica rappresenta quindi un importante risorsa monetaria per i gestori e per le istituzioni nelle regioni montane attraverso tasse e servitù.

Si è voluto focalizzare l'analisi sull'effetto sulla produzione generata dai sistemi

idroelettrici legati a grandi serbatoi, in particolare in Lombardia, considerando quindi il sistema idroelettrico dell'Alta Valtellina chiuso a Premadio di competenza di A2A S.p.A. La scelta è motivata dall'interesse per l'influenza dei cambiamenti climatici sui ghiacciai nei bacini a monte dello stesso e quindi sulla gestione dei serbatoi artificiali presenti nel sistema, al fine di verificare gli effetti sulla futura possibilità di produzione di energia, avendo sempre come obiettivo la massimizzazione della resa economica per il gestore degli impianti. I bacini presi in esame sono quelli afferenti al fiume Adda chiuso in località Le Prese a Sondalo, a cui si aggiunge il bacino del Torrente Spoel, o Aquagranda, anch'esso interessato dal sistema idroelettrico dell'Alta Valtellina (Figura 1). Partendo quindi dalla proiezione futura delle portate entranti nel sistema idroelettrico ed applicando un modello di ottimizzazione, si vuole stimare, per ognuno dei diversi scenari considerati, la produzione di energia elettrica futura che massimizza il profitto del gestore.

Gli effetti dei cambiamenti climatici fino a fine secolo, nei bacini in cui sono presenti i grandi serbatoi di interesse, sono stati analizzati considerando gli aspetti riguardanti l'evoluzione dei corpi glaciali e la loro influenza nella variazione dei deflussi nei bacini e sulla produzione idroelettrica futura. In particolare si sono considerate le variazioni dei volumi invasati nei serbatoi di interesse.

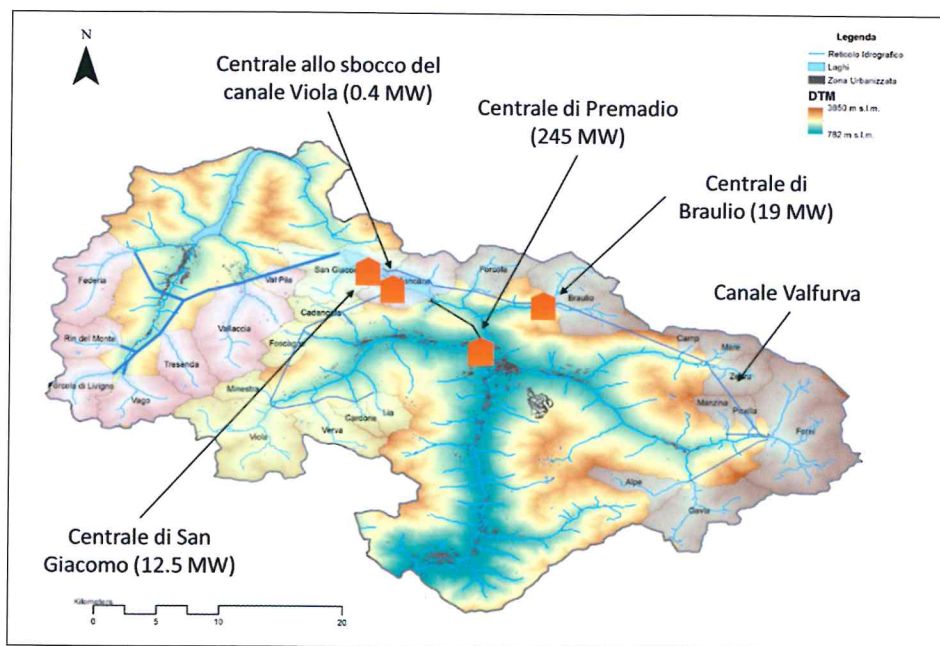


Figura 1. Schema del Sistema Idroelettrico dell'Alta Valtellina.

Metodologia

Per l'analisi si sono applicati diversi modelli che permettessero la descrizione delle varie componenti, idrologica e gestionale, che interessano un impianto idroelettrico in bacini alpini. Per la componente idrologica si è applicato il modello *Poly-Hydro* (Soncini et al., 2016; 2017), per la cui descrizione si rinvia alla letteratura relativa. Il modello descrive l'evoluzione dei deflussi in alveo e dei ghiacci.

Per le proiezioni climatiche future si sono considerati i dati forniti da modelli di tipo *General Circulation Model* GCM. Essi sono riferiti a una griglia spaziale con celle di dimensioni rilevanti (da 100 km a 200 km di lato) e non possono essere utilizzati direttamente per sviluppare proiezioni a carattere locale. Per utilizzare gli output a livello globale come input per modelli idrologici a scala locale conviene utilizzare dei processi di disaggregazione, che permettono il passaggio dalla scala grossolana dei GCM alla scala fine del bacino, il cosiddetto *downscaling*.

La procedura di *downscaling* statistico presentata in seguito è stata calibrata e applicata alle serie osservate di precipitazione e temperatura delle stazioni meteorologiche considerate collocate all'interno del bacino di interesse. La procedura corregge gli errori nelle serie prodotte dai GCM riguardo ai valori cumulati mensili di pioggia (P), temperatura media (T) e numero di giorni piovosi mensili (RD) nel periodo di controllo sulle serie osservate nelle stazioni considerate, ottenendo così serie di pioggia e temperature giornaliere statisticamente corrette nel periodo di controllo.

L'analisi di produttività dell'impianto parte dalla valutazione della potenza prodotta, dipendente dall'andamento delle portate turbinare e dal salto idraulico. Dalla potenza si ricava quindi l'energia prodotta in un intervallo di tempo.

Il gestore di un impianto idroelettrico ha come obiettivo quello di immettere l'energia prodotta nella rete elettrica e quindi venderla, nel caso italiano, all'Acquirente Unico, l'ente pubblico preposto allo scopo, e tale energia viene pagata secondo un determinato prezzo $P[\text{€/MWh}]$, che in si può assumere pari al prezzo unico nazionale PUN. La valutazione del ricavo viene considerata su scala temporale oraria, poiché il PUN è definito con questa risoluzione temporale.

Si deve poi impostare un problema di ottimizzazione. Qui si è definito il modello di ottimizzazione del tipo *Mixed Integer Quadratic Programming* (MIQP), definito basandosi sullo schema di flusso dell'impianto, in Figura 2. Tale problema di ottimizzazione consente di simulare la gestione dell'impianto (livelli, portate turbinare) che massimizzano la produzione (profitto)

su un periodo di riferimento, p.es. l'anno)

Per gli scenari futuri si è applicato un modello della stima del prezzo dell'energia, necessario poiché non vi è per il futuro una conoscenza della domanda di energia elettrica.

Risultati

La metodologia descritta precedentemente è stata applicata agli impianti idroelettrici a serbatoio dell'Alta Valtellina, gestiti da A2A S.p.A. La scelta di tale bacino

è stata motivata dall'interesse per l'influenza che il cambiamento climatico può avere sui ghiacciai a monte degli impianti idroelettrici e quindi sulla gestione dei grandi serbatoi artificiali presenti.

Il modello idrologico riceve in ingresso le serie di precipitazioni e temperature registrate dalle stazioni presenti nel bacino e simula il deflusso nella sezione di chiusura con risoluzione giornaliera.

Tale deflusso è somma di quattro componenti distinte e indipendenti, rappresentate dalla fusione glaciale, dalla fusione nivale, dalla precipitazione liquida e dal deflusso di base. Inoltre a descrivere l'andamento dei deflussi il modello idrologico tratta:

- la dinamica glaciale, considerando il movimento dei ghiacciai e le deformazioni interne e descrivendo per ogni cella le variazioni giornaliere in termini di spessore, volume e area del ghiaccio;
- la compattazione del manto nevoso e la variazione della densità della neve al passare del tempo e in presenza di nuove nevicate.

I valori delle variabili meteorologiche fino al 2100, indispensabili per le simulazioni future del regime idrologico del bacino, sono stati generati mediante l'applicazione di tre scenari RCP (2.6, 4.5, 8.5) di concentrazione di gas serra ad altrettanti modelli climatici di circolazione generale (GCM), l'EC-EARTH, il MPI-ESM (ECHAM6) e il CCSM4, i quali sono rappresentazioni matematiche delle leggi fisiche che governano il sistema climatico terrestre e pongono

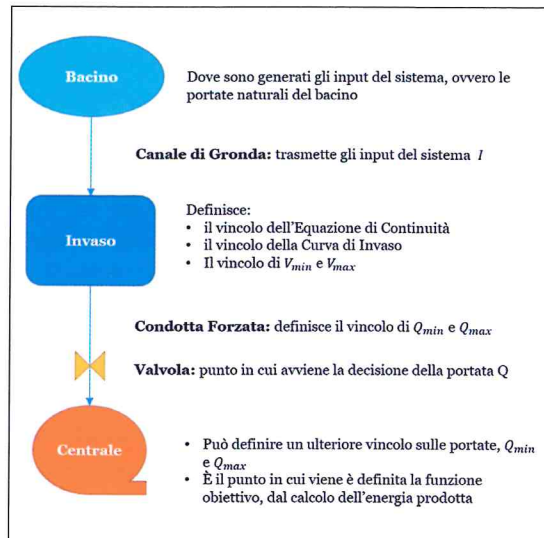


Figura 2. Schema di Flusso considerato per un generale Impianto Idroelettrico.

particolare attenzione ai processi alla base delle interazioni tra atmosfera, oceani e superficie terrestre. Gli scenari RCP sono disposti in ordine di crescita della concentrazione di gas serra, da cui dipende l'aumento della temperatura media, la quale per i tre scenari RCP a fine secolo cresce rispettivamente di $+0.4^{\circ}C$, $+1.4^{\circ}C$ e $+3.8^{\circ}C$.

Prima di essere applicato per le simulazioni future, il modello idrologico è stato calibrato e successivamente validato in modo tale che riproducesse in modo accettabile i valori di SWE misurati nei nivometri considerati, la variazione di spessore dei corpi glaciali ed i valori di portata giornalieri osservati nelle stazioni del Parco dello Stelvio (Bocchiola et al., 2018).

Terminata la messa a punto del modello, si è passati alle simulazioni future per ognuna delle nove combinazioni tra modelli climatici e scenari RCP, per il periodo 2012-2100. Si è scelto di iniziare le simulazioni dal 2012 e non dal 2015, quando si è terminata la procedura di validazione e calibrazione, data l'esigenza di continuità nella simulazione della variazione del ghiaccio, le cui informazioni erano tutte riferite all'anno 2012 per la mancanza di informazioni più recenti.

I risultati delle simulazioni vengono confrontati con quelli ottenuti dalla simulazione 2006-2015, focalizzando l'attenzione su due decadi di confronto, 2040-2049 e 2090-2099; per i ghiacciai si prendono invece in considerazione solo gli anni 2050 e 2100.

Da tali simulazioni emerge che:

- i volumi glaciali, rispetto alla misurazione del 2012, diminuiscono in media di oltre il -60% già a metà secolo, raggiungendo la massima riduzione per il CCMS4-RCP8.5, pari al -87%.
- al 2050 i valori di riduzione per tutte le simulazioni si discostano tra loro del 25%, mentre per il 2100 la situazione appare molto differente. Si passa, infatti, da una riduzione minima del -53% per lo scenario ECHAM6 RCP2.6, in cui vi è un aumento del volume rispetto a metà secolo, al picco di riduzione pari al -99.88% per l'Echam6-RCP8.5;
- le aree glaciali seguono un andamento simile a quello dei volumi, con una continua diminuzione che rallenta passando dallo scenario RCP 8.5 al 2.6. L'analisi delle aree per fasce di quota mette in evidenza come la riduzione interessi soprattutto le quote più basse dei corpi glaciali, con un fronte che passa dalla fascia 2200-2400 m s.l.m. misurato nel 2012 alla fascia 2800-3000 m s.l.m. per gli RCP 2.6 e alla fascia 3000-3200 m s.l.m. per gli RCP 8.5 a fine secolo;
- le portate medie annuali defluenti dall'intero bacino tendono a diminuire

per tutte le simulazioni nel decennio 2040-2049 con variazioni inferiori al $\pm 5\%$ ed una riduzione massima del -20.6% per l'CCSM4-RCP4.5. Eccezioni a ciò sono date dalla combinazione MPI-ESM - RCP 4.5, MPI-ESM - RCP 8.5 e EC-EARTH - RCP 8.5 che prevedono rispettivamente un aumento del $+7.3\%$, $+1.7\%$ e $+3.3\%$. Situazione del tutto analoga si verifica per il decennio 2090-2099, con una riduzione di tutte le combinazioni per un massimo del -16.9% .

- le portate medie mensili defluenti nei bacini dell'Alta Valtellina hanno, per tutti gli scenari, un aumento da ottobre ad aprile, in entrambe le decadi, mentre in estate risultano inferiori a quelle del periodo di riferimento. Nei mesi invernali le portate aumentano per il maggiore contributo degli eventi di precipitazione liquida rispetto a quella solida a causa dall'aumento delle temperature.
- Luglio e agosto, invece, sono i mesi con la maggiore decrescita dei valori di portata, a causa della riduzione dei contributi di fusione nivale e glaciale.

Il regime idrologico risulta influenzato marginalmente dalla forte riduzione dei corpi glaciali. Ciò che ne determina un cambiamento significativo è la riduzione delle precipitazioni di carattere nevoso, con il corrispondente aumento delle piogge. Ciò si riflette nell'aumento delle portate invernali e primaverili, oltre a quelle tardo autunnali, mentre nei mesi estivi se ne ha una decrescita. Si può quindi affermare che il regime idrologico non è più a carattere nivoglaciale, ma si allinea con quello pluviometrico. La dinamica del bacino diventa di tipo impulsivo, con risposta rapida agli eventi di precipitazione.

Conclusa l'analisi delle proiezioni climatiche, si è passati alle simulazioni per la stima della futura produzione di energia idroelettrica che è stata simulata mediante il modello elaborato. Fornendo in ingresso i valori di portata giornalieri elaborati dal modello idrologico per le varie sezioni di presa dei sistemi idroelettrici, il modello restituisce in uscita i dati di produzione delle singole centrali, i volumi immagazzinati nei serbatoi considerando l'influenza del DMV con una gestione volta alla massimizzazione del ricavo.

Prima di essere utilizzato direttamente sui periodi futuri, il programma è stato impiegato per la creazione di uno scenario di riferimento, che per l'Alta Valtellina corrisponde al periodo 2006-2015, in modo tale da poter effettuare un confronto oggettivo con le simulazioni future a parità di ipotesi di funzionamento e di obiettivo di gestione.

Se si considerano i risultati ne consegue che

- se si prende in considerazione la decade 2040-2049, rispetto al periodo di riferimento (2006-2015), si riscontra un aumento della produzione media di energia annua. In particolare con lo scenario RCP 2.6 vi è un aumento

del $+1.5\%$ nel sistema dell'Alta Valtellina. Nel caso RCP 4.5 l'aumento è del $+2.4\%$, per RCP 8.5 l'aumento è del $+6.4\%$.

- A fine secolo gli scenari RCP2.6 e RCP 4.5 fanno registrare un aumento della produzione media annua del $+3.7\%$ e $+4.0\%$, mentre lo scenario RCP8.5 porta ad una riduzione del -4.4% .

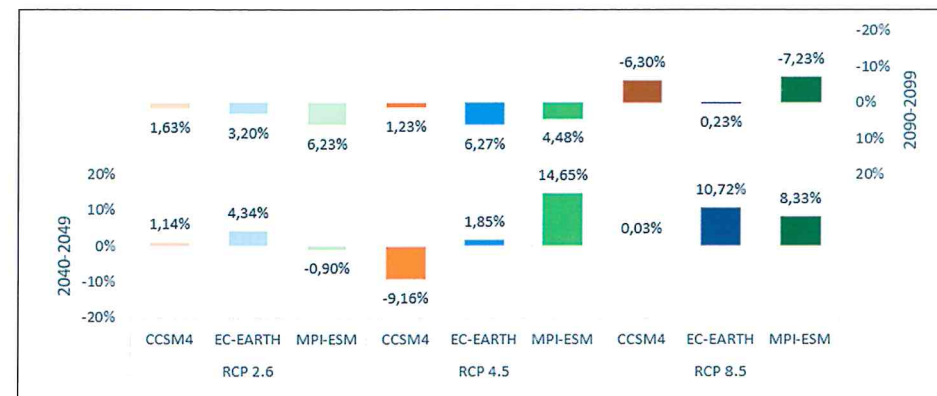


Figura 3. Variazione Produzione energia a metà ed a fine secolo.

Si sono presi inoltre in considerazione gli andamenti dei volumi invasati nei serbatoi. Da tale analisi si evince che in generale è possibile affermare che la gestione ottimale dei serbatoi, prevista dal modello, tende a "conservare" l'acqua in arrivo in primavera, anticipando il picco del volume invasato, per compensare la riduzione dei volumi in arrivo in estate.

Tale comportamento è più evidente nel caso del serbatoio di Cancano, con volume maggiore rispetto all'invaso di San Giacomo.

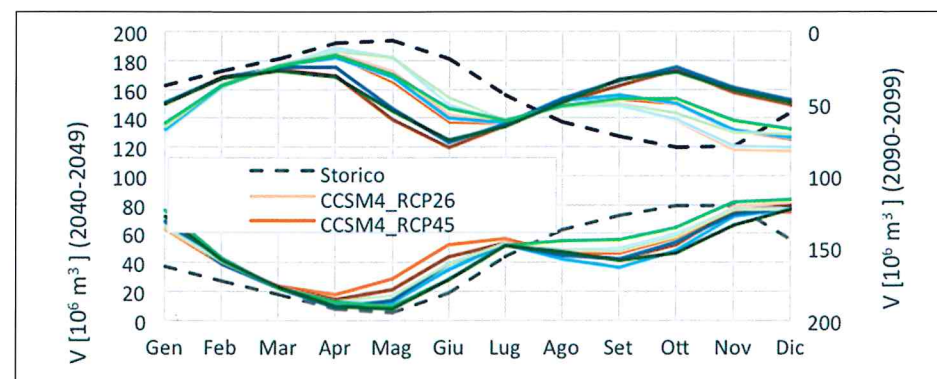


Figura 4. Andamento Volume Invasato medio mensile nel Serbatoio di Cancano a metà ed a fine secolo.

Conclusioni

Da questo studio risulta che il ciclo idrologico in bacini alpini si è modificato di recente e probabilmente si modificherà in futuro, con un effetto sulla gestione dell'idroelettrico. In particolare, i corpi glaciali, daranno sempre minor contributo e volano, poiché secondo gli scenari IPCC, essi tendono a ridursi notevolmente.

Se si analizzano le portate nelle proiezioni future ricavate, il trend porta ad una decrescita della media annuale, ma guardando a livello stagionale la diminuzione avviene nel periodo estivo. In inverno e primavera i deflussi aumenterebbero.

La variazione della produzione futura segue il cambiamento della distribuzione delle portate nell'anno, che sono a loro volta guidate dalla precipitazione. Risulta quindi che serbatoi di grandi dimensioni possono agire da volano per tali variazioni, rendendo disponibili volumi che possono essere utilizzati la laminazione delle piene, la riserva per il contrasto delle siccità, per fini turistico-ricreativi e l'accumulo per il pompaggio.

Emerge quindi che la riduzione dei corpi glaciali nei bacini considerati, non influisce sulla produzione di energia, mentre sono le coppie GCM-RCP, che simulano variazioni delle precipitazioni nell'arco di tutto l'anno, in particolare di quelle solide, che influenzano maggiormente la produzione idroelettrica.

Il problema così affrontato presenta notevoli difficoltà, data la molteplicità e la complessità intrinseca dei vari processi che intervengono e gli strumenti di previsione che si richiedono, per cui le ipotesi adottate introducono delle approssimazioni nei risultati.

Fra gli sviluppi futuri vi è il miglioramento nella descrizione della distribuzione spaziale delle variabili idrologiche, specialmente le precipitazioni, oltre l'analisi dell'incertezza della domanda e del prezzo dell'energia. A ciò si aggiunge la possibile estensione ad altri casi studio, a cui aggiungere anche gli impianti ad acqua fluente, per una possibile regionalizzazione dei risultati.

Bibliografia

- Barnett, 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), 303-309.
- Bocchiola, D., Mihalcea, C., Diolaiuti, G., Mosconi, B., Smiraglia, C., Rosso, R. (2010). "Flow prediction in high altitude ungauged basins: a case study in the Italian Alps (Pantano Basin, Adamello Group)". *Adv. Wat. Resour.*, 33, 1224-1234.
- Bocchiola, D., Soncini, A., Diolaiuti, G., Smiraglia, C., Mauro, V., Franzini, C., Meinardi, A. (2018). "IdroStelvio: un network idrometrico per il Parco dello Stelvio Lombardo 2011-2015. I risultati della sperimentazione e della modellistica". *L'ACQUA*, 4, 45-58.
- D'Agata, C., Bocchiola, D., Maragno, D., Smiraglia, C., Diolaiuti, G.A. (2014). "Glacier shrinkage driven by climate change in The Ortles-Cevedale group (Stelvio National Park, Lombardy, Italian Alps) during half a century (1954-2007)". *Theoretical Applied Climatology*, 116, 1-2, 169-190.
- Garavaglia, R., Marzorati, A., Confortola, G., Cola, G., Bocchiola, D., Manzata, E., Senese, A., Smiraglia, C., Diolaiuti, G.A. (2014). "Evoluzione del ghiacciaio dei Forni" [Evolution of Forni Glacier]. *Neve e Valanghe*, 81, 60-67.
- Minora, U., D. Bocchiola, C. D'Agata, D. Maragno, C. Mayer, A. Lambrecht, E. Vuillermoz, A. Senese, C. Compostella, C. Smiraglia, G. Diolaiuti (2016). "Glacier area stability in the Central Karakoram National Park (Pakistan) in 2001-2010: The "Karakoram Anomaly" in the spotlight". *Progress in Physical Geography*, doi: 10.1177/0309133316643926.
- Smiraglia, C., D'Agata C., Diolaiuti G.A. (2003). "I ghiacciai del bacino del Po e la loro risorsa idrica". [Po basin glaciers and water resources therein] In: *Un Po di acque. DIABASIS: Reggio Emilia*; 53-68. In Italian.
- Smiraglia, C., Diolaiuti, G.A. (2015). "Il nuovo catasto dei ghiacciai italiani". Ed. by EVK2C-NR, Bergamo, Italia, 400 pp. ISBN: 9788894090802.
- Smiraglia, C., Azzoni, R.S., D'Agata, C., Maragno, D., Fugazza, D., Diolaiuti, G.A. (2015). "The evolution of the Italian glaciers from the previous data base to the new Italian inventory. Preliminary considerations and results". *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38(1), 79-87.
- Soncini, A., Bocchiola, D., Confortola, G., Minora, U., Vuillermoz, E., Salerno, F., Viviano, G., Shrestha, D., Senese, A., Smiraglia, C., Diolaiuti, G.A. (2016). "Future hydrological regimes and glacier cover in the Everest region: the case study of the Dudh Koshi basin". *Sci. Tot. Environ. STOTEN*, 565, 1084-1101.
- Soncini, A., Bocchiola, D., Azzoni, R.S., Diolaiuti, G. (2017). "A methodology for monitoring and modeling of high altitude Alpine catchments". *Progress in Physical Geography*, 41, 4, 393-420, 2017.
- Viganò, G., Confortola, G., Fornaroli, R., Canobbio, S., Mezzanotte, V., Bocchiola, D. (2015). "Future climate change may affect habitat in Alpine streams: a case study in Italy". *ASCE J. Hydrol. Eng.* 21(2), 04015063/1-1