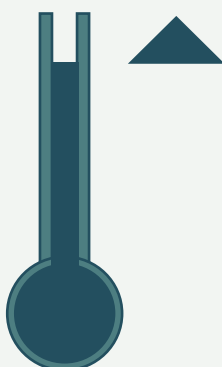


IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL REGIME IDROLOGICO DELLA VALLE D'AOSTA

Aprile 2021



IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI
sul regime idrologico della Valle d'Aosta

Documento a cura di

ARPA Valle d'Aosta (1)
Località La Maladière, 48 - Saint-Christophe AO
* e.cremonese@arpa.vda.it

Fondazione CIMA (2)
Campus Universitario Savona
Via Armando Magliotto, 2 - 17100 Savona SV

Regione Autonoma Valle d'Aosta (3)
Presidenza della Regione
Dipartimento protezione civile e vigili del fuoco
Centro funzionale regionale
Via C. Promis, 2/A - Aosta AO

Fondazione Montagna Sicura (4)
Villa Cameron
Località Villard de la Palud, 1 - Courmayeur AO

Autori

Edoardo Cremonese 1*, Francesco Avanzi 2, Sara Maria Ratto 3,
Paolo Pogliotti 1, Gianluca Filippa 1, Hervé Stevenin 3,
Andrea Mammoliti Mochet 1, Giulia Ercolani 2,
Simone Gabellani 2, Jean-Pierre Fosson 4

Impaginazione

Ketty Carere 3

Per citare il documento

Cremonese E., Avanzi, F., Ratto S.M., Pogliotti P., Filippa G., Stevenin H.,
Mammoliti Mochet A., Ercolani G., Gabellani S., J.P. Fosson, 2021,
Impatti dei cambiamenti climatici sul regime idrologico della Valle d'Aosta.
42 p.

Si ringrazia C.V.A. S.p.A. per la fornitura di alcuni dati e per aver
contribuito alla buona riuscita della ricerca.

Aprile 2021

Copyright©:



INDICE

IN SINTESI: QUALI SCENARI FUTURI?.....	6
1. INTRODUZIONE.....	8
Contesto, obiettivi e struttura del documento.....	8
Cambiamento climatico.....	9
Guida alla lettura dei capitoli seguenti.....	11
2. SCENARI CLIMATICI DI TEMPERATURA E PRECIPITAZIONE.....	12
Temperature.....	12
Precipitazioni.....	15
3. NEVE.....	19
4. GHIACCIAI.....	22
5. PORTATE.....	26
Peak water.....	26
Regimi idrologici.....	28
Approfondimento: relazioni con il settore idroelettrico.....	31
6. RISCHIO IDRAULICO.....	33
7. RISCHIO SICCAITÀ.....	35
8. CONCLUSIONI.....	37
Allegato 1: Descrizione scenari climatici e modelli utilizzati.....	38
CH2018.....	38
Simulazioni climatiche CORDEX e modello idrologico Continuum.....	38
Bibliografia.....	40



IN SINTESI: QUALI SCENARI FUTURI?

Quanto sono affidabili le previsioni del clima futuro?

Il sistema climatico terrestre è estremamente complesso e c'è grande incertezza sulle politiche future di mitigazione delle emissioni di gas a effetto serra. Tutto questo rende molto difficile la previsione del clima futuro. Nonostante questo, **i modelli climatici e gli scenari di emissione attuali consentono di stimare le più probabili condizioni climatiche future e di caratterizzarne l'incertezza.** Con questi modelli è possibile descrivere le condizioni medie di un periodo futuro di riferimento, generalmente un trentennio.

Come cambierà il clima in Valle d'Aosta?

La tendenza al riscaldamento osservata negli ultimi decenni continuerà e nel 2035 le **temperature medie annue aumenteranno** di +1°C/+1.2°C rispetto al periodo 1980-2010. A metà secolo si attende un incremento compreso tra +1.1°C e +2°C, fino ad arrivare, a fine secolo, a +1.0°C secondo lo scenario basato su una forte mitigazione delle emissioni di gas a effetto serra (RCP2.6) e a +4.1°C secondo lo scenario che prevede un continuo aumento delle emissioni (RCP8.5). Le stagioni con il riscaldamento maggiore saranno l'estate e l'autunno. **Nei mesi invernali è atteso un riscaldamento piuttosto omogeneo a tutte le quote, mentre in estate è atteso un riscaldamento maggiore in media e alta montagna.**

Per quanto riguarda le **precipitazioni, i modelli sono più incerti e variabili.** Si prevede che la precipitazione annuale non cambierà in modo importante (+2%/+5%) rispetto al periodo 1980-2010, mentre si attende una variazione della distribuzione stagionale delle piogge. A metà secolo (2050) è previsto un aumento del +16%/+21% delle precipitazioni invernali e del +6%/+9% di quelle autunnali e primaverili, mentre le precipitazioni estive non dovrebbero cambiare. A fine secolo (2085) è previsto un **aumento delle precipitazioni invernali, autunnali e primaverili** compreso tra +5% e +29% e, secondo lo scenario RCP8.5, una **riduzione delle precipitazioni estive** del -24% con un'incertezza compresa tra -59%/+10%. L'incremento di precipitazione invernale avverrà in un contesto di temperature più elevate e quindi si prevede che **le precipitazioni nevose si ridurranno a favore delle precipitazioni liquide** soprattutto al di sotto dei 2000/2300 m slm.

Il cambiamento climatico causerà la variazione della curva di distribuzione delle temperature e delle precipitazioni medie giornaliere, con una possibile modifica anche della probabilità degli **eventi estremi**: è attesa, ad esempio, una riduzione del numero di giornate con temperatura massima minore di 0°C, un aumento delle ondate di calore ed un'intensificazione dei temporali.

Avremo meno neve?

Sì, soprattutto sotto i 2000/2500 m di quota. Nei prossimi decenni è prevista una **riduzione della durata della neve al suolo**, in particolare in fondo valle ed in media montagna, così come sui versanti soleggiati. In fondo valle, a fine secolo, si avranno tra 25 e 45 giorni in meno di neve rispetto al periodo 1973-2013. Al 2050, è prevista una riduzione di 15-20 giorni a 2000 m slm e di 10-15 giorni a 2500 m slm. Le **precipitazioni nevose invernali potrebbero ridursi** del 25-45% a fine secolo. Tali riduzioni saranno dell'80% nel fondo valle e trascurabili ad alta quota (> 2700 m slm). In media montagna (1500 m) è attesa una riduzione dell'altezza media del manto nevoso del 25-32%.

E' attesa anche **una riduzione della riserva idrica contenuta nella neve** (SWE). Secondo lo scenario intermedio si prevede, a partire dal 2050 e fino a fine secolo, una riduzione del 20-30% ed un anticipo della fase di fusione di circa un mese. Utilizzando lo scenario più pessimistico (RCP8.5), si prevedono riduzioni maggiori a fine secolo (pari a circa 30-50%) e un anticipo di due mesi del periodo di fusione.

Cosa accadrà ai ghiacciai?

Continueranno a fondere e quindi a ritirarsi. Molti ghiacciai sotto i 3000/3500 m di quota scompariranno, causando una profonda modificazione dei paesaggi e impatti sugli ecosistemi. Nei prossimi decenni (2020-2040) scompariranno le ultime porzioni dei ghiacciai alle quote minori e si perderà circa il 25/30% della riserva idrica residua contenuta nei ghiacciai. A partire dal 2040, quando saranno rimaste solo le porzioni dei ghiacciai alle quote più alte (sopra i 3000/3500 m), lo scenario di mitigazione (RCP2.6) prospetta una riduzione del tasso di perdita fino a raggiungere un valore di plateau intorno al 2060, mentre lo scenario basato su un continuo aumento delle emissioni (RCP8.5) prevede un tasso di perdita di ghiaccio pressoché costante fino a fine secolo.

Cambierà la portata d'acqua nei torrenti?

Sì, soprattutto cambierà la distribuzione stagionale delle disponibilità idriche nelle acque superficiali e sotterranee: **più acqua in autunno e inverno e meno acqua in estate**. Le magre saranno più frequenti ed intense e aumenterà la temperatura dell'acqua, con conseguenze importanti sugli usi, sulla protezione contro le piene e sull'ecologia delle acque. I cambiamenti attesi sono variabili tra un torrente e l'altro e dipenderanno dalle caratteristiche dei singoli bacini: estensione, quota, pendenza, esposizione e superficie glacializzata. Insieme a questi fattori principali, giocheranno un ruolo non trascurabile anche le caratteristiche geologiche, le dinamiche della vegetazione ed ovviamente gli usi umani. Nei tratti iniziali dei torrenti delle vallate laterali (soprattutto in media ed alta Valle), nei torrenti minori caratterizzati da quote elevate e nel tratto della Dora Baltea compreso tra Courmayeur e Aosta sono attesi: i) aumento delle portate autunnali ed invernali, ii) anticipo della fase di morbida e del periodo di portata massima (15/45 giorni) e iii) riduzione delle portate estive (-30/60%). Nei torrenti delle vallate minori a bassa quota e privi di apparati glaciali importanti, nelle porzioni terminali dei torrenti delle valli laterali (soprattutto in bassa Valle) e nel tratto della Dora Baltea a valle di Aosta, sono invece attesi impatti minori e variabili in funzione degli scenari considerati: una limitata riduzione delle portate estive (\pm 10-30%), trascurabili variazioni della fase di morbida ed un aumento delle portate invernali (+20/40%).

Quindi diminuirà il rischio alluvioni?

No. Sia nei torrenti di montagna (regimi nivo-glaciali) che in quelli di fondovalle e bassa quota (regimi nivo-pluviali) si attende un **aumento dei superamenti delle soglie di allerta per il rischio piene**: il numero di giorni in allerta gialla e arancione aumenterà di 3/4 volte; il numero di giorni in allerta rossa aumenterà di 2/3 volte. L'aumento si verificherà già nel prossimo futuro (2035) e si intensificherà a metà e fine secolo.

Aumenterà il fabbisogno irriguo?

Si attende un **aumento della frequenza e dell'intensità del rischio di siccità**, specialmente durante l'estate e l'autunno. Un indicatore utile a stimare il rischio di siccità è il bilancio idrico estivo, cioè il bilancio tra precipitazioni (P) ed evapotraspirazione potenziale (ETP, ovvero l'insieme della traspirazione dell'acqua dalle piante verso l'atmosfera e dell'evaporazione dell'acqua dai suoli verso l'atmosfera). Il bilancio idrico estivo può essere inteso come un'approssimazione del fabbisogno irriguo di una coltura. **Una riduzione del bilancio idrico estivo si traduce in un aumento della necessità di acqua per l'irrigazione**. Nei prossimi decenni è prevista una significativa riduzione del bilancio idrico estivo (tra -14% e -40%) a tutte le fasce di quota e secondo tutti gli scenari. **La fascia di quota che sarà maggiormente impattata è quella della media montagna** dove sono attese riduzioni del bilancio idrico estivo comprese tra il 40% e il 60%.

Non sono un po' catastrofiste queste previsioni?

No. Le analisi si basano sui risultati di un insieme dei più recenti modelli climatici sviluppati dalla comunità scientifica a partire dai quali è possibile stimare gli impatti previsti e la loro incertezza. L'entità di tali impatti dipenderà soprattutto dall'evoluzione della concentrazione atmosferica di CO₂ e degli altri gas a effetto serra, che a sua volta sarà determinata dalle azioni di mitigazione, di riduzione delle emissioni e di decarbonizzazione dell'economia condotte a livello globale, nazionale e locale. In assenza di azioni di mitigazione, gli impatti sul territorio regionale saranno enormemente maggiori di quelli che si verificherebbero se si raggiungessero emissioni nette-zero entro il 2050.

1. INTRODUZIONE

Contesto, obiettivi e struttura del documento

Il tema cambiamenti climatici deve essere una colonna portante per l'impostazione di tutte le politiche del futuro a medio e lungo termine. Si è quindi resa necessaria un'analisi contestualizzata che mettesse in luce l'andamento delle principali variabili meteo-idrologiche riferite alla realtà valdostana, con la finalità di avere un punto di partenza solido per l'analisi degli impatti e la conseguente definizione delle strategie di adattamento.

A tal fine, la Regione si è rivolta ad istituti e centri di competenza riconosciuti a livello europeo per utilizzare i più aggiornati scenari climatologici disponibili nella comunità scientifica, sfruttando i maggiori centri di calcolo europei al fine di calare tali scenari nel contesto geografico e climatico della Valle d'Aosta.

Per la fornitura dei dati e l'interpretazione dei risultati ci si è avvalsi della ventennale esperienza nella comprensione dei processi idrologici e climatici tipici della Valle d'Aosta maturata nell'ambito di diversi uffici regionali nonché Agenzie, Enti e Fondazioni che si occupano di tali temi e che per tale progetto hanno lavorato in sinergia.

Questo documento illustra in modo sintetico alcuni scenari di impatto dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico in Valle d'Aosta. Le analisi presentate sono state realizzate nell'ambito di due iniziative condotte dall'amministrazione regionale negli ultimi anni (2016-2020):

1) la “Convenzione tra Regione Autonoma Valle d'Aosta e Fondazione Cima per l'analisi di alcuni scenari di cambiamento climatico”, che sotto il coordinamento del Centro Funzionale Regionale e con l'apporto tecnico di Fondazione CIMA e ARPA Valle d'Aosta ha adattato la catena modellistica idrologica attualmente operativa a livello regionale a fini di protezione civile per simulare il ciclo idrologico dei prossimi decenni utilizzando scenari di cambiamento climatico (Rapporto “Analisi dell'impatto sul ciclo idrologico degli scenari di cambiamento climatico”, Gabellani et al. 2018);

2) il progetto “Interreg ALCOTRA AdaPT Mont-Blanc”, che sotto il coordinamento del Dipartimento Ambiente, con l'apporto tecnico di ARPA Valle d'Aosta e Fondazione Montagna Sicura, ha analizzato gli impatti dei cambiamenti climatici sui principali settori socio-economici del territorio dell'Espace Mont-Blanc (Cremonese et al. 2019).

Il documento è strutturato in diverse [sezioni](#) che trattano i) gli scenari di [temperatura](#), [precipitazione](#) ed eventi climatici estremi, ii) gli impatti su [neve](#) e [ghiacciai](#), iii) le possibili variazioni delle [portate](#) e iv) il [rischio idraulico](#) e [siccità](#). Per [approfondimenti metodologici si rimanda all'allegato](#) in cui sono dettagliati le fonti dei dati e i modelli climatici ed idrologici utilizzati.

Si tratta dei primi studi svolti a livello regionale sul tema degli impatti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico. Il documento contiene quindi alcuni primi contributi funzionali alla redazione delle strategie e dei piani programmatici (sviluppo sostenibile, adattamento ai cambiamenti climatici, decarbonizzazione, tra le altre) sui quali l'amministrazione regionale sta lavorando al momento della scrittura di questo documento. E' tuttavia importante sottolineare che numerosi approfondimenti ed ulteriori studi sono necessari al fine di fornire un quadro più completo degli impatti previsti: le principali necessità di approfondimento sono evidenziate nelle conclusioni.



Cambiamento climatico

La comunità scientifica è concorde nell'affermare che i) è attualmente in corso un cambiamento climatico senza precedenti in quanto a intensità e velocità (IPCC SR1.5 2018, Neukom et al. 2019), ii) la causa del cambiamento climatico sono le emissioni di gas a effetto serra (principalmente CO₂, CH₄ e N₂O) causate dalla produzione di energia, dai trasporti, dalle attività industriali e dall'agricoltura (IPCC AR5 2013, IPCC SR1.5 2018, IPCC SRCCL 2019) e iii) l'evoluzione del clima nei prossimi decenni ed i conseguenti impatti sui sistemi naturali e sulla società dipenderanno dall'efficacia delle politiche di decarbonizzazione dell'economia e di adattamento messe in atto a livello globale, nazionale e locale (UNEP 2019, IPCC 2019 SRCCL).

L'attuale concentrazione atmosferica di anidride carbonica (CO₂), il principale gas a effetto serra, ha superato nel 2020 le 415 parti per milione, raggiungendo valori mai osservati negli ultimi 3-5 milioni di anni. Tale aumento, osservato soprattutto a partire dalla seconda metà del secolo scorso e dovuto all'utilizzo di combustibili fossili, è la causa del cambiamento climatico (IPCC AR5 2013, IPCC SR1.5 2018). Il clima dei prossimi decenni dipenderà dall'evoluzione della concentrazione atmosferica di CO₂ e degli altri gas a effetto serra, che a sua volta sarà determinata dalle azioni di mitigazione, di riduzione delle emissioni e di decarbonizzazione dell'economia condotte a livello globale, nazionale e locale. Per limitare il riscaldamento e ridurre gli impatti negativi sulla società umana e sugli ecosistemi, è di fondamentale importanza l'adempimento delle azioni necessarie a raggiungere emissioni nette-zero (net zero emission) entro il 2050 (figura 1.1). Come recentemente dimostrato da molteplici analisi (si veda ad esempio Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector dell'International Energy Agency, iea.li/nzeroroadmap), gli impegni volontari attualmente presi dai singoli paesi (NDCs) a seguito dell'accordo di Parigi non sono sufficienti e dovranno essere triplicati per contenere il riscaldamento entro 2°C e quintuplicati per contenere il riscaldamento entro 1.5°C. L'attuazione degli attuali NDCs porterebbe ad un aumento della temperatura media globale compreso tra 2.9°C e 3.4°C entro 2100 rispetto ai livelli preindustriali.

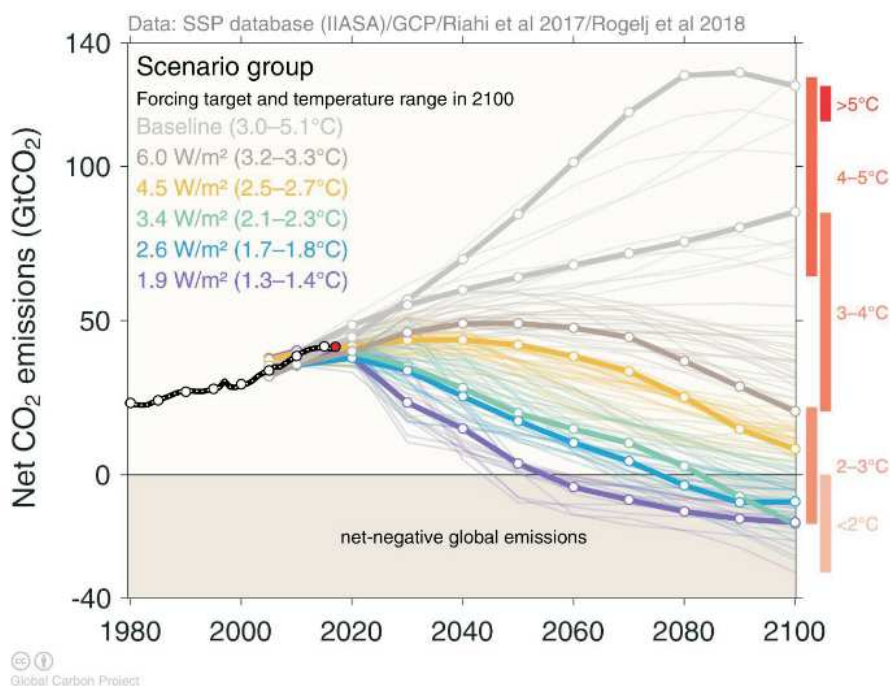


Fig. 1.1. *Scenari di emissioni di CO₂ e impatto sulla temperatura globale: la linea nera rappresenta l'aumento delle emissioni di CO₂ a livello globale nel periodo 1980-2018 (il 2018 è il pallino rosso). Le linee colorate rappresentano i diversi scenari di emissione di CO₂ (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs), mentre le barre verticali a destra rappresentano il corrispondente livello di riscaldamento a livello globale a fine secolo. La linea viola indica come, al fine di mantenere il riscaldamento entro i 2°C, sia necessario raggiungere le net negative global emission entro il 2050 (fonte: Global Carbon Project 2018).*



A livello globale, il riscaldamento osservato a partire dalla seconda metà dello scorso secolo è stato estremamente rapido (IPCC SR1.5 2018). La figura 1.2 mostra una rappresentazione del fenomeno di riscaldamento nel periodo 1850-2019 e l'intensificazione avvenuta negli ultimi 3 decenni (1990-2018). Nelle aree di montagna (Pepin et al. 2015), nelle Alpi (Gobiet et al. 2014, Beniston et al. 2018, IPCC SROCC 2019) e quindi anche in Valle d'Aosta, il riscaldamento è maggiore rispetto ad altre parti del pianeta. Dal periodo preindustriale, **nelle Alpi, le temperature medie annue sono aumentate di circa 2°C (CH2018), più del doppio di quanto misurato a livello globale.**

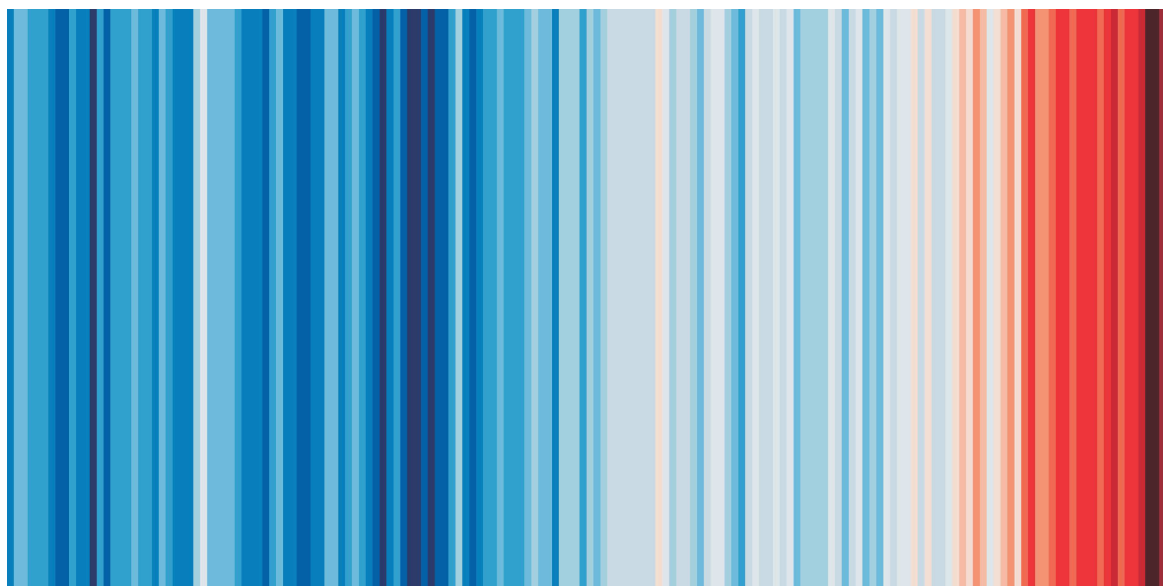


Fig. 1.2. *Climate stripes*: rappresentazione grafica del riscaldamento globale nel periodo 1850-2019. Ogni linea verticale rappresenta un anno nel periodo 1850-2019. Le diverse tonalità di blu indicano anni con temperatura al di sotto della media del periodo 1971-2000, le diverse tonalità di rosso indicano anni con temperatura al di sopra della media 1971-2000 (fonte: showyourstripes.info: annual average temperatures for GLOBE from 1850-2019 using data from UK Met Office.).

In Valle d'Aosta, si è verificato un riscaldamento di circa 1.7°C rispetto al ventennio 1974-1995. Il riscaldamento è maggiore in primavera e in estate: 0.81°C e 0.72°C per decennio contro 0.58°C per decennio a livello annuale (rispettivamente in primavera ed in estate, dati del Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta e ARPA VdA). Non si è invece osservato un trend di variazione delle precipitazioni totali annuali, ma piuttosto un aumento delle differenze a livello stagionale e regionale (CH2018, Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta).

L'aumento delle temperature, invernali e soprattutto primaverili, ha ridotto la proporzione di precipitazioni nevose rispetto alle precipitazioni totali e la durata del manto nevoso al suolo (Matiu et al. 2021). In Valle d'Aosta, la stazione di Cignana (Valtournenche, 2150 m), per la quale si dispone di osservazioni dal 1927, mostra a partire dal 1960 una diminuzione dell'altezza massima della neve del 12% ogni 10 anni rispetto al periodo di riferimento 1961-1990 (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta e ARPA VdA, sezione 3).

Il cambiamento climatico a livello globale come nelle Alpi, sta causando numerosi impatti sui sistemi fisici e biologici e sulla società umana: la fusione del ghiaccio marino e dei ghiacciai terrestri, la riduzione della copertura nevosa, la degradazione del permafrost, il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani, l'innalzamento del livello dei mari, l'aumento di frequenza degli eventi climatici estremi, l'intensificazione del ciclo idrologico, la variazione nei regimi di portate dei fiumi e l'alterazione del funzionamento degli ecosistemi. La maggior parte di tali impatti è stata riscontrata nei ultimi 2 decenni anche in Valle d'Aosta. Per una più approfondita trattazione di tali temi si rimanda al Rapport Climat del progetto AdaPT Mont-Blanc.



Le analisi presentate in questo rapporto sono basate su due fonti di dati: i) gli scenari climatici realizzati da MétéoSuisse (CH2018) e ii) un modello climatico sviluppato nell'ambito del consorzio EURO-CORDEX, corretto utilizzando dati misurati dalle stazioni della rete meteorologica regionale (per approfondimenti si rimanda al rapporto interno Convenzione RAVA-Fondazione CIMA, 2018). Per ciascun modello climatico, vengono considerati tre scenari di evoluzione temporale delle concentrazioni atmosferiche di gas a effetto serra: uno scenario di mitigazione basato su una riduzione molto forte delle emissioni (RCP2.6), uno scenario intermedio (RCP4.5) e uno scenario più pessimistico che non prevede riduzioni significative delle emissioni (RCP8.5). Come riferimento, si tenga presente che, a livello globale, le emissioni di CO₂ sono cresciute di circa il 3% all'anno nel periodo 2000-2010, di circa il 0.9% all'anno nel periodo 2010-2019 e sono scese del 4-7% nel 2020 (<https://carbonmonitor.org/>, Global Carbon Budget 2020), a seguito della pandemia Covid-19. Nel 2020 le emissioni di CO₂ si sono ridotte di 2.4 bilioni di tonnellate, la riduzione maggiore mai osservata. Le emissioni dovranno ridursi ulteriormente di 1-2 bilioni di tonnellate ogni anno nel periodo 2020-2030 per poter raggiungere gli obiettivi dell'accordo di Parigi (Global Carbon Budget 2020).

Gli effetti dei diversi scenari climatici sugli elementi del ciclo idrologico (discussi a partire dalla Sezione 3) sono stati valutati tramite un modello idrologico distribuito. I dettagli sui modelli climatici e sul modello idrologico utilizzati sono contenuti nell'allegato 1.

GUIDA ALLA LETTURA DEI CAPITOLI SEGUENTI

Le analisi presentate si riferiscono a tre periodi futuri:

- breve termine: indicato con **2035** e riferito al periodo 2020-2050
- metà secolo: indicato con **2050** e riferito al periodo 2035-2065
- fine secolo: indicato con **2085** e riferito al periodo 2070-2100

Gli scenari emissivi considerati sono tre dei Representative Concentration Pathways (RCPs) usati nel quinto rapporto IPCC:

- **RCP2.6**: scenario di mitigazione basato su una riduzione molto forte delle emissioni
- **RCP4.5**: scenario intermedio
- **RCP8.5**: scenario pessimistico che non prevede riduzioni delle emissioni

Alcune analisi sono presentate per fasce altitudinali:

- **fondo valle** indica quote comprese tra 400 m e 1000 m
- **media montagna** indica quote comprese tra 1000 m e 2000 m
- **alta montagna** indica quote maggiori di 2400 m



2. SCENARI CLIMATICI DI TEMPERATURA E PRECIPITAZIONE

In termini di temperatura e precipitazione, gli scenari climatici indicano un'accentuazione di quanto osservato negli ultimi 20 anni. Il clima della Valle d'Aosta nei prossimi decenni sarà infatti caratterizzato da un ulteriore aumento delle temperature ed una variazione della redistribuzione stagionale delle precipitazioni.

Temperature

Tutti i modelli e tutti gli scenari sono concordi nel prevedere che le **temperature medie annue aumenteranno** rispetto al periodo 1980-2010: entro i prossimi 10/15 anni di $+1.0^{\circ}\text{C}$ ($+0.8^{\circ}\text{C}/+1.2^{\circ}\text{C}$) secondo RCP2.6 e $+1.2^{\circ}\text{C}$ ($+1.1^{\circ}\text{C}/+1.6^{\circ}\text{C}$) secondo RCP8.5. A metà secolo (2050), iniziano a manifestarsi le differenze tra i due scenari: $+1.1^{\circ}\text{C}$ ($+0.9^{\circ}\text{C}/+1.4^{\circ}\text{C}$) secondo RCP2.6 e $+2.0^{\circ}\text{C}$ ($+1.8^{\circ}\text{C}/+2.8^{\circ}\text{C}$) secondo RCP8.5; a fine secolo RCP2.6 prevede una stabilizzazione dell'aumento di temperatura intorno a valori simili a quelli di metà secolo: $+1.0^{\circ}\text{C}$ ($+0.9^{\circ}\text{C}/+1.3^{\circ}\text{C}$). L'aumento di temperature medie annue previsto da RCP8.5 è invece drammatico: $+4.1^{\circ}\text{C}$ ($+3.6^{\circ}\text{C}/+5.5^{\circ}\text{C}$).

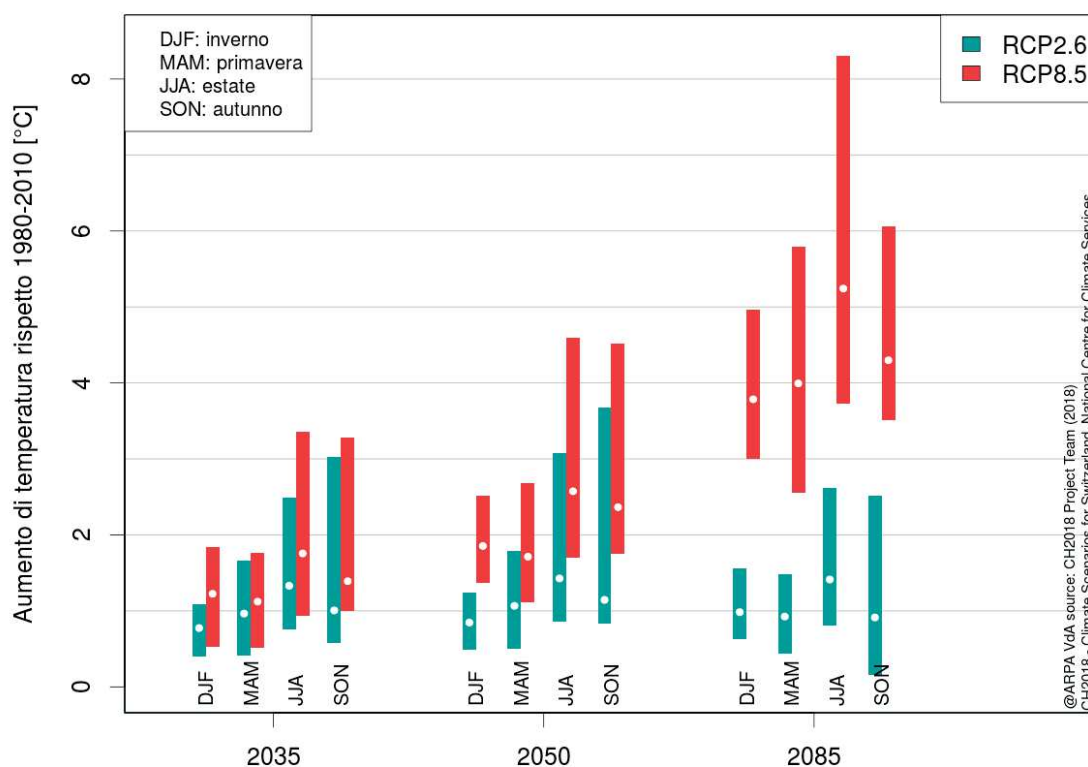
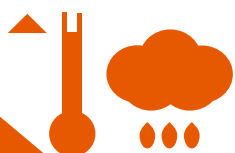


Fig. 2.1. *Aumento stagionale di temperatura rispetto al periodo 1980-2010.* I punti bianchi e le barre colorate rappresentano rispettivamente la mediana e la variabilità (quantile 10 e quantile 90) dell'aumento di temperatura stimato dall'insieme dei modelli climatici considerati (allegato 1) e dagli scenari di emissione RCP2.6 (blu) e RCP8.5 (rosso). Gli acronimi sull'asse del tempo (asse x) indicano le diverse stagioni: DJF inverno (dicembre, gennaio e febbraio), MAM primavera (marzo, aprile, maggio), JJA estate (giugno, luglio e agosto) e SON autunno (settembre, ottobre e novembre). Fonte: CH2018 Project Team (2018).



Considerando la distribuzione stagionale della temperatura, l'aumento medio di temperatura previsto al 2035 varia tra $+0.7^{\circ}\text{C}/+1.2^{\circ}\text{C}$ nei mesi invernali e $+1.3^{\circ}\text{C}/+1.7^{\circ}\text{C}$ nei mesi estivi, rispetto al periodo 1980-2010. E' a partire da metà secolo (2050) che si evidenziano le differenze tra scenari. Secondo RCP2.6, si stima un aumento delle temperature invernali di $+0.8^{\circ}\text{C}$ ($+0.5^{\circ}\text{C}/+1.2^{\circ}\text{C}$) e di $+1.4^{\circ}\text{C}$ ($+0.9^{\circ}\text{C}/+3.0^{\circ}\text{C}$) di quelle estive. RCP8.5 invece prevede aumenti molto più forti: $+1.8^{\circ}\text{C}$ ($+1.4^{\circ}\text{C}/+2.5^{\circ}\text{C}$) in inverno e $+2.6^{\circ}\text{C}$ ($+1.7^{\circ}\text{C}/+4.5^{\circ}\text{C}$) in estate. Aumenti intermedi sono attesi in primavera e autunno da entrambi gli scenari. A fine secolo secondo RCP2.6 prevede una stabilizzazione delle temperature in conseguenza ad una riduzione dei gas a effetto serra in atmosfera. RCP8.5 invece prevede aumenti elevatissimi: $+3.7^{\circ}\text{C}$ ($+3.0^{\circ}\text{C}/+4.9^{\circ}\text{C}$) in inverno e $+5.2^{\circ}\text{C}$ ($+3.7^{\circ}\text{C}/+8.3^{\circ}\text{C}$) in estate.

La figura 2.2 mostra la variazione di temperatura prevista a diverse fasce altitudinali per gli scenari di emissione RCP2.6 ed RCP8.5 nei fondo valle (al di sotto di 1000 m slm), in media montagna (1000-2000 m slm) ed in alta montagna (sopra i 2000 m slm). Per entrambi gli scenari di emissione, non sono previste forti differenze di riscaldamento lungo il gradiente altitudinale nei mesi invernali: ogni fascia di quota si scalderà in modo simile. In estate invece è atteso un riscaldamento maggiore in media ed alta montagna. Secondo lo scenario RCP2.6 l'aumento di temperatura si realizzerà entro il 2035, a tutte le quote, e non aumenterà ulteriormente nel corso del secolo. Al contrario, secondo RCP8.5, l'aumento delle temperature proseguirà con il tempo e sarà più intenso a media e alta quota. In estate in particolare, è previsto un innalzamento della quota dell'isoterma zero di 300/400 m, che passerà dai circa 3800 m slm attuali a circa 4100/4200 m slm nel 2050 (l'isoterma zero è la quota limite del gelo e può essere mappata come una linea al di sotto della quale le temperature sono superiori a 0°C e al di sopra della quale le temperature sono inferiori a 0°C).

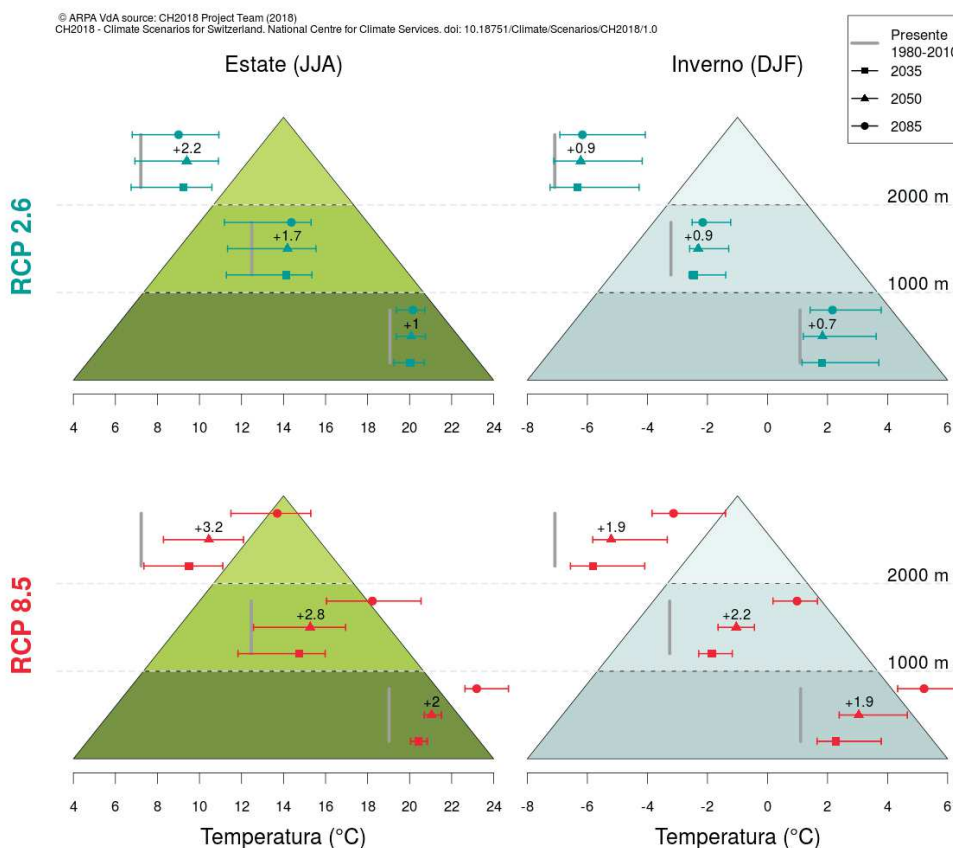
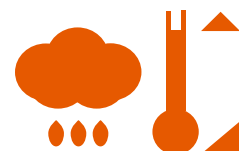


Fig. 2.2. Variazione delle temperature medie estive (montagne verdi) ed invernali (montagne azzurre) per (i) tre periodi futuri (2035, 2050 e 2085), (ii) su tre fasce di quota (fondovalle, media montagna ed alta montagna) e (iii) per gli scenari di emissione RCP2.6 (in alto) ed RCP8.5 (in basso). I punti ed i segmenti orizzontali rappresentano la media e la variabilità del riscaldamento previsto dai diversi modelli climatici utilizzati. Le linee grigie verticali rappresentano i valori medi per quella fascia di quota nel periodo 1980-2010. Le cifre in nero si riferiscono al valore medio in $^{\circ}\text{C}$ nel 2050. Fonte: CH2018 Project Team (2018).



L'incremento delle temperature medie annue causa la variazione della curva di distribuzione delle temperature giornaliere modificando quindi la probabilità degli eventi estremi di temperatura: diminuzione della frequenza delle giornate fredde e aumento della frequenza delle giornate calde o molto calde. Questo fenomeno causa, per esempio, una riduzione del numero di giornate con temperatura massima minore di 0°C (giornate di gelo) e un aumento delle ondate di calore, quantificate come le giornate in cui la temperatura massima giornaliera è maggiore di valori soglia (es. 32°C).

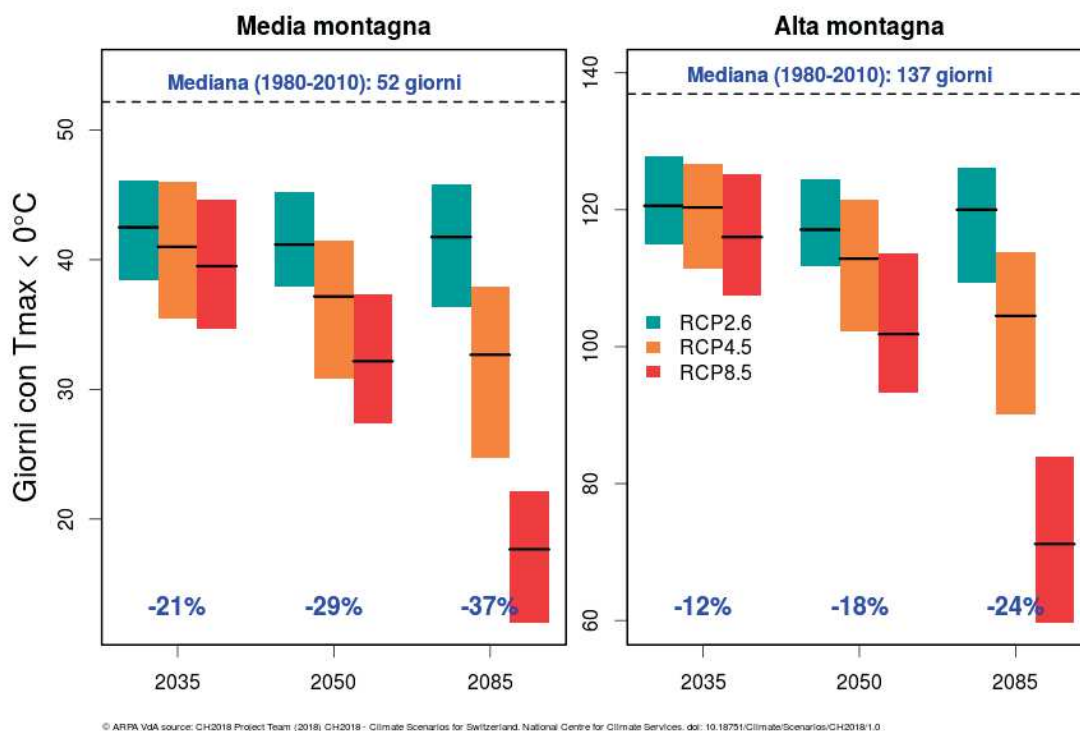
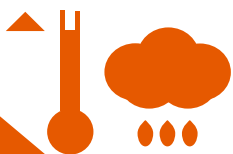


Fig. 2.3. Riduzione del numero di giorni di gelo (temperatura massima giornaliera < 0°C) in media e alta montagna. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5). L'altezza delle barre rappresenta la variabilità dei diversi modelli climatici (10° e 90° percentile). La linea orizzontale nera al centro di ogni barra indica la mediana dei modelli. La linea nera tratteggiata indica il valore di riferimento medio nel periodo 1980-2010. Fonte: Rapport Climat 2019, CH2018 Project Team (2018).

La figura 2.3 mostra gli scenari di riduzione del numero delle giornate di gelo a media (1000-2000 m slm) e alta quota (> 2000 m slm). Si tratta di un parametro molto importante per la montagna specialmente perché è legato alla fusione di neve e ghiaccio e all'impatto che questa può avere sulla distribuzione stagionale delle portate dei corsi d'acqua. Per questa variabile, gli scenari prevedono una riduzione di oltre un mese nel 2050 e fino a due mesi per lo scenario pessimistico a fine secolo. Nel prossimo futuro (2035) si prevede già una riduzione di circa il 15-20%. Questa riduzione può avere impatti sulla stabilità delle pareti rocciose e dei versanti, sulla dinamica dei rischi naturali e quindi sulla pratica dell'alpinismo.

Se da un lato avremo meno giorni di gelo, dall'altro vivremo un numero maggiore di giornate molto calde. La figura 2.4 mostra gli scenari di aumento delle giornate di caldo estremo (temperatura massima giornaliera maggiore di 32°C). In fondo valle si prevede di passare dai 2 giorni all'anno del periodo 1980-2010 ai 6/10 giorni all'anno nel 2035 e 15/20 nel 2050, con notevoli impatti sulla salute umana, sul benessere, sull'agricoltura e sugli ecosistemi. Si può quindi concludere che le ondate di calore diventeranno più frequenti e più intense nel fondo valle della Regione. Si rimanda al **Rapport Climat** per un più



approfondito trattamento di indici di eventi estremi legati alla temperatura.

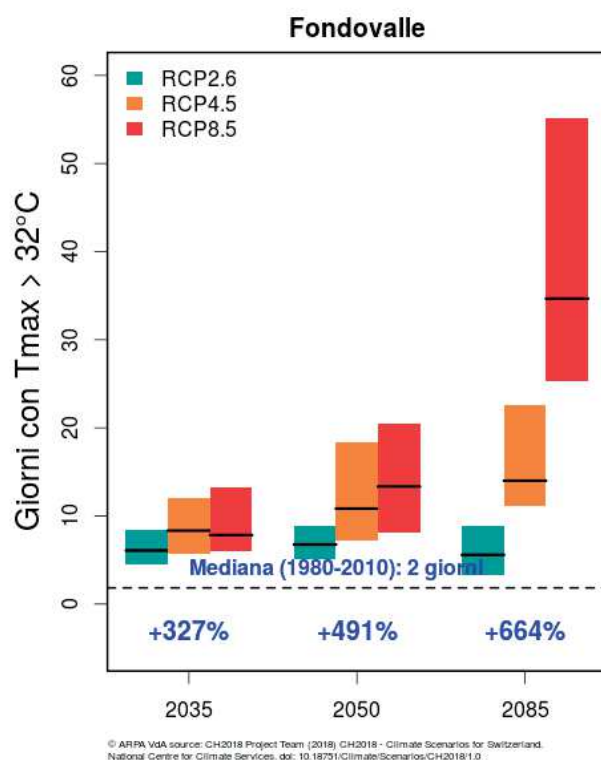


Fig. 2.4. Aumento del numero di giorni di caldo estremo (temperatura massima giornaliera > 32°C) in fondo valle. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5). L'altezza delle barre rappresenta la variabilità dei diversi modelli climatici (10° e 90° percentile). La linea orizzontale nera al centro di ogni barra indica la mediana dei modelli. La linea nera tratteggiata indica il valore di riferimento medio nel periodo 1980-2010. Fonte: Rapport Climat 2019, CH2018 Project Team (2018).

Precipitazioni

Per quanto riguarda le precipitazioni, i modelli sono più incerti e molto variabili. Per tutti i periodi di riferimento considerati (2035, 2050 e 2050) la variabilità introdotta dagli scenari di emissione è simile all'incertezza dei differenti modelli considerati. Le barre riportate in figura 2.5 si trovano sia sopra che sotto lo zero, indicando che, per ogni periodo e stagione considerati, esistono realizzazioni modellistiche che prevedono aumenti o diminuzioni delle precipitazioni.

Considerando la **precipitazione totale annua** si attende, al 2035, una variazione del +4.9% (-1.2%/+7.7%) secondo RCP2.6 e del +2.3% (-0.4%/+6.0%) secondo RCP8.5, rispetto al periodo 1980-2010. A metà secolo si stima una variazione del +4.9% (+0.5%/+6.6%) e del +1.9% (-1.46%/+6.8%) secondo rispettivamente RCP2.6 e RCP8.5. A fine secolo è attesa una variazione del +2.72% (+0.5%/+6.8%, RCP2.6) e del +0.1% (-5%/+10%, RCP8.5). In sintesi la quantità totale di precipitazione annuale **non cambierà in modo importante** (+2%/+5%) rispetto al periodo 1980-2010. E' **però attesa una variazione della distribuzione stagionale**. Già entro il 2035 è previsto i) un aumento delle precipitazioni invernali (+16%/+21%) e ii) un aumento più contenuto delle precipitazioni primaverili ed autunnali (+5%/+12%). Al 2050 si stima un aumento del +17%/+18% delle precipitazioni invernali e del +6%/+9% di quelle autunnali e primaverili. Lo scenario RCP8.5 prevede una riduzione delle precipitazioni estive del -3% ma sempre con una grande incertezza: -50%/+15%.



A fine secolo (2085) è previsto un aumento del +19%/+29% delle precipitazioni invernali e del +5%/+12% di quelle autunnali e primaverili. Lo scenario RCP8.5 prevede una riduzione delle precipitazioni estive del -24% con un'incertezza compresa tra -59%/+10%. Lo scenario RCP2.6 invece non prevede variazioni della precipitazione estiva né al 2050 né al 2085.

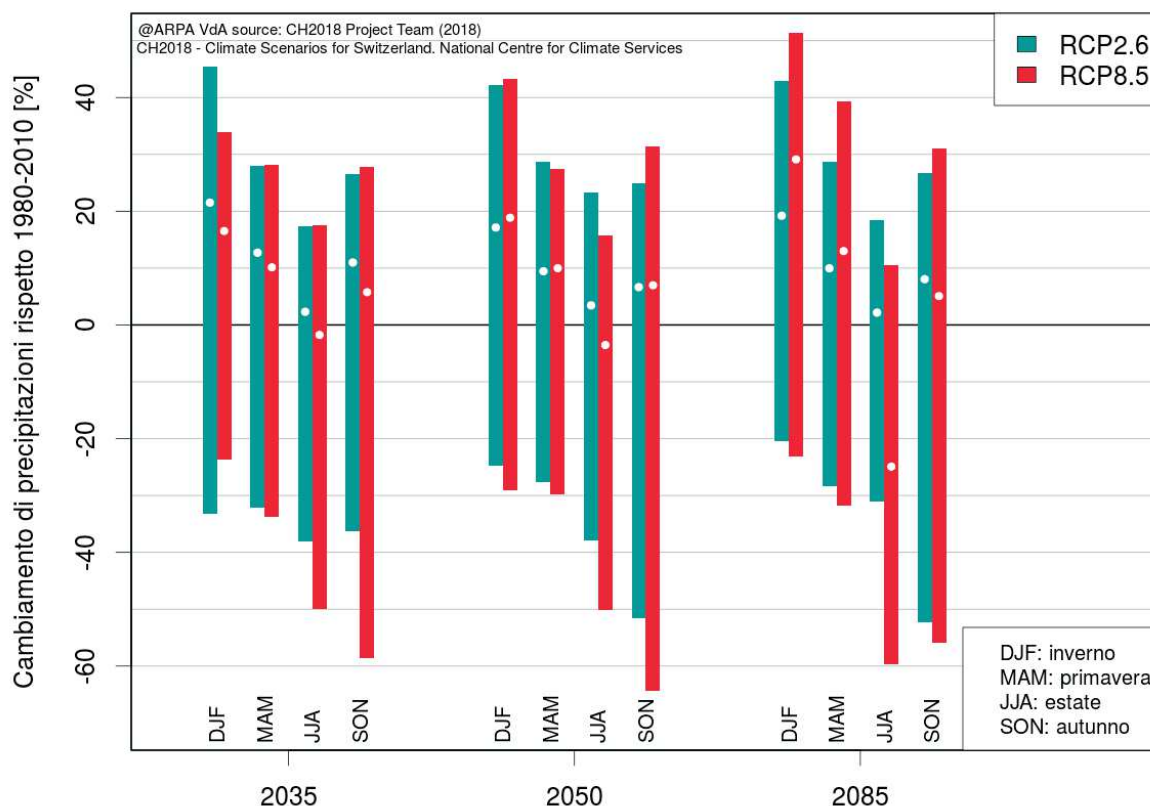
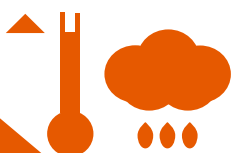


Fig. 2.5. *Variazione della precipitazione stagionale rispetto al periodo 1980-2010.* I punti bianchi e le barre colorate rappresentano rispettivamente la mediana e la variabilità (quantile 10 e quantile 90) della variazione di precipitazione stimate dall'insieme dei modelli climatici considerati (allegato 1) e dagli scenari di emissione RCP2.6 (blu) e RCP8.5 (rosso). Fonte: CH2018 Project Team (2018).

La figura 2.6 illustra la variazione delle precipitazioni in funzione della quota per l'estate e l'inverno. La **riduzione delle precipitazioni estive sarà piuttosto omogenea dal fondovalle fino all'alta montagna** (in media da -5% a -10% per RCP2.6 ed RCP8.5 rispettivamente) diventando progressivamente più forte dal 2035 fino a fine secolo per l'RCP8.5. Una riduzione delle precipitazioni estive, accompagnata da un aumento delle temperature, si tradurrà possibilmente in una riduzione del bilancio idrico estivo che potrebbe causare **fenomeni di siccità** (sezione 7).

Per quanto riguarda il **periodo invernale, si prevede un aumento delle precipitazioni a tutte le quote con percentuali variabili tra il 10 ed il 15% leggermente più marcate per RCP8.5 soprattutto alle quote più basse.** È importante sottolineare che tale aumento di precipitazione invernale avverrà in un contesto di temperature più elevate e quindi si prevede che le precipitazioni nevose si ridurranno a favore delle precipitazioni liquide soprattutto a bassa quota. A 1600 m slm per esempio, si prevede che il numero totale di **giornate invernali con precipitazioni nevose si ridurrà del 20/25% già nel 2035** (passando da 29 a 23 giorni) e del 30/35% nel 2050. Una riduzione simile avverrà a 2000 m, mentre sarà minore a quote maggiori: 9/14% nel 2035 e 13/22% sopra il 2500 m slm.



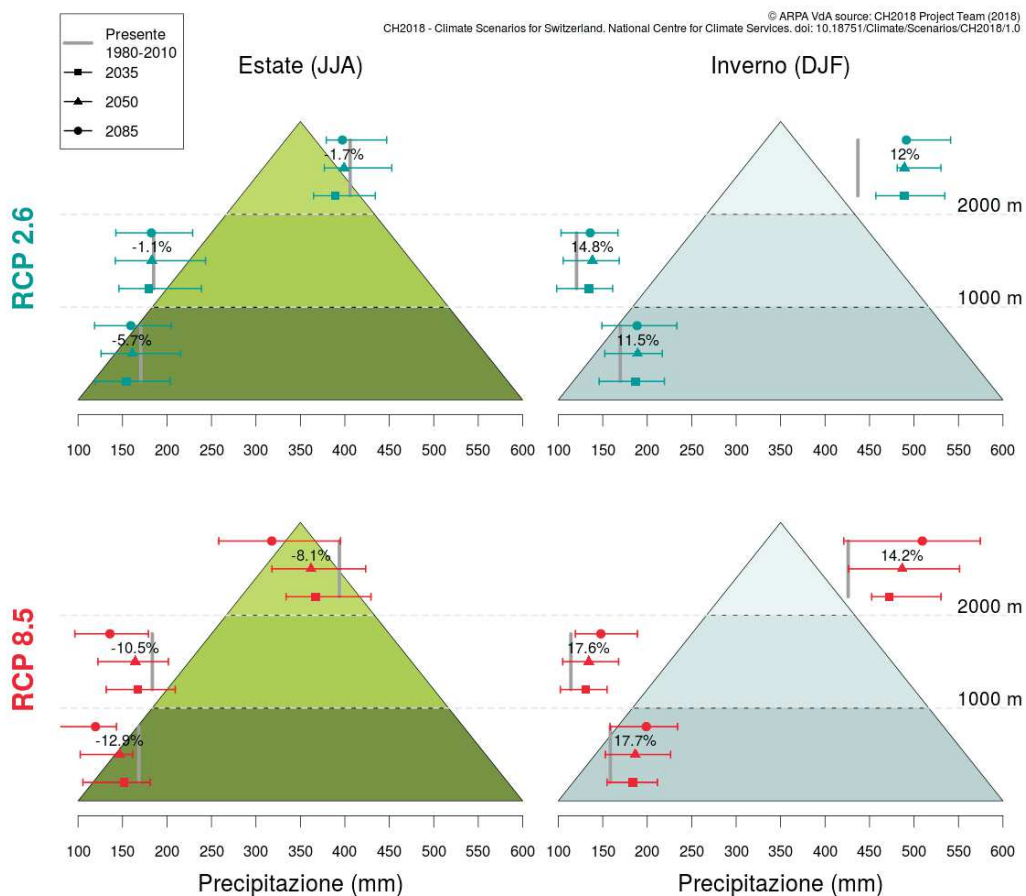
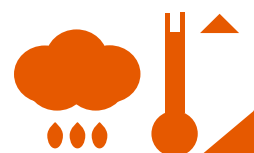
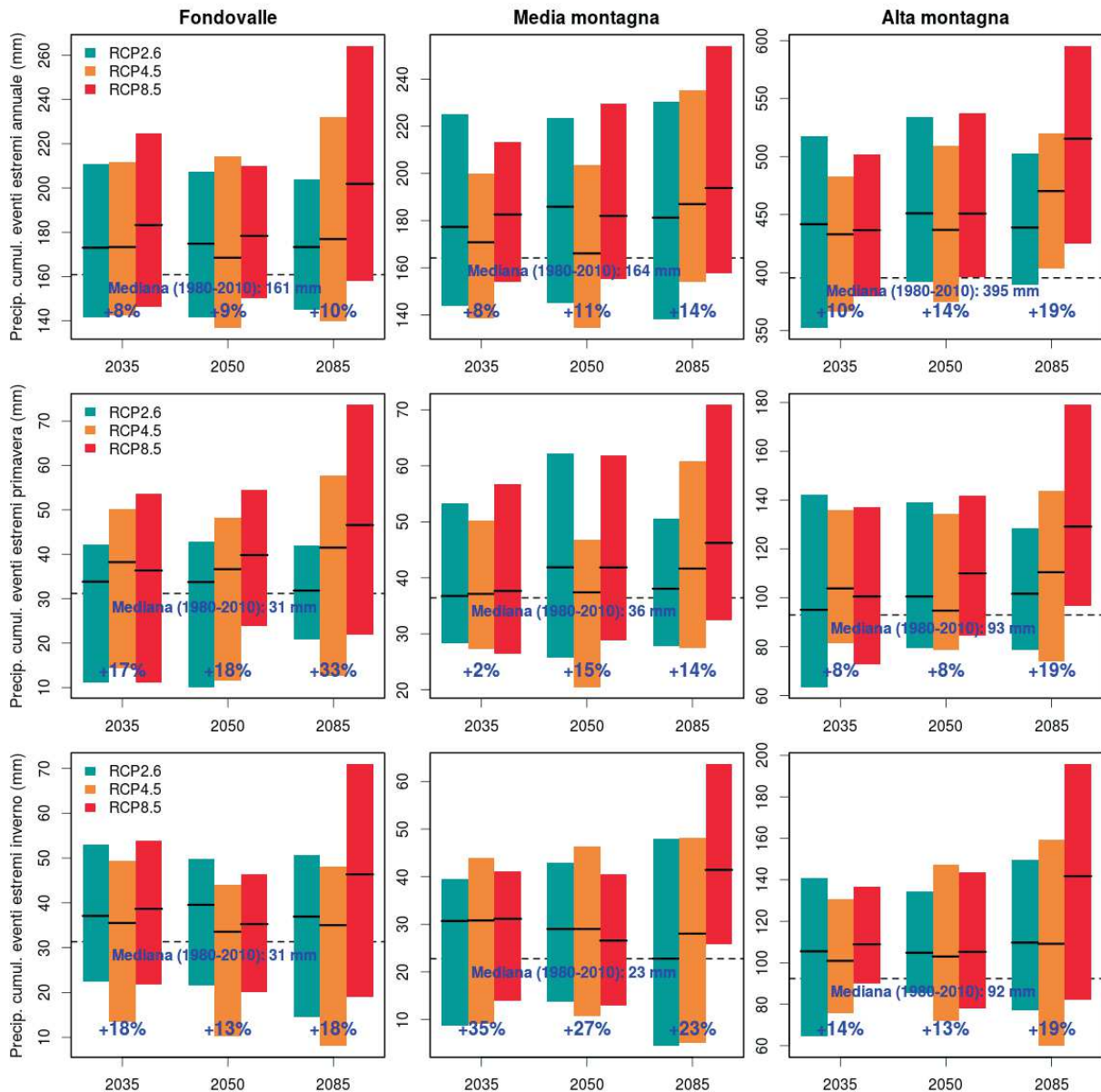


Fig. 2.6. Variazione delle precipitazioni medie estive (montagne verdi) ed invernali (montagne azzurre) per (i) tre periodi futuri (2035, 2060 e 2085), (ii) su tre fasce di quota (fondovalle, media montagna ed alta montagna) e (iii) per gli scenari di emissione RCP2.6 (in alto) ed RCP8.5 (in basso). I punti ed i segmenti orizzontali rappresentano la media e la variabilità del riscaldamento previsto dai diversi modelli climatici utilizzati. Le linee grigie verticali rappresentano i valori medi per quella fascia di quota nel periodo 1980-2010. Le cifre in nero si riferiscono alla variazione media percentuale nel 2050. Fonti: Rapport Climat 2019, CH2018 Project Team (2018).

Si prevede anche un **aumento dell'intensità e della frequenza delle precipitazioni** in area alpina come nel resto d'Europa (Gobiet et al. 2014, CH2018). A livello regionale, gli scenari climatici prevedono, a tutte le quote, un aumento del 2-8% dell'intensità media delle precipitazioni, intesa come quantità totale di pioggia caduta nei giorni piovosi. Molto più significativo sarà invece **l'aumento della quantità di precipitazione che cadrà durante i temporali** (precipitazioni annuali cumulative in giorni di precipitazione superiore a 20 mm/giorno, definiti come giorni di precipitazioni intense): come mostrato in figura 2.7, è atteso un aumento del 8/10% dei valori totali annui già nel 2035.

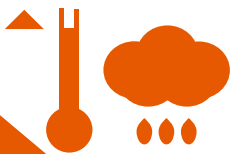
A metà e fine secolo sono previsti aumenti tra il 10 e il 20% con effetti più forti in alta montagna. Considerando le differenze stagionali, emerge che in primavera gli aumenti saranno più forti nel fondo valle: +17% nel 2035 e +33% a fine secolo. Incrementi tra il 2 e il 20% sono invece attesi in media e alta montagna. In inverno, l'incertezza dei modelli aumenta ma si prevede un aumento significativo già nel 2035, tra il 13 e il 35% a tutte le fasce di quota.





© ARPA VdA source: CH2018 Project Team (2018) CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services. doi: 10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0

Fig. 2.7. *Variazione della quantità di pioggia caduta durante le giornate di precipitazioni intense. La soglia utilizzata per definire una giornata di precipitazione intensa (20 mm) è il 95esimo percentile della distribuzione delle precipitazioni osservate a livello regionale nel periodo 1980-2010. Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5). L'altezza delle barre rappresenta la variabilità dei diversi modelli climatici (10° e 90° percentile). La linea orizzontale nera al centro di ogni barra indica la mediana dei modelli. La linea nera tratteggiata indica il valore di riferimento medio nel periodo 1980-2010. Fonte: Rapport Climat 2019, CH2018 Project Team (2018).*



3. NEVE

L'impatto che l'aumento della temperatura e il cambiamento delle precipitazioni possono avere sulla neve e sulla criosfera in generale, rappresenta uno dei processi principali attraverso i quali si manifesta la maggior vulnerabilità delle aree alpine al cambiamento climatico. La presenza della neve è infatti una delle caratteristiche distintive della montagna. Inoltre, la neve influenza in modo profondo il funzionamento degli ecosistemi, rappresenta un'importante riserva d'acqua ed esemplifica in modo efficace l'insieme di complesse relazioni tra ambiente naturale ed attività umane che tanto profondamente caratterizza le comunità di montagna.

Il cambiamento del clima, osservato negli ultimi decenni, ha già modificato gli accumuli nevosi e la durata della neve al suolo; tali impatti aumenteranno in futuro. Dagli anni '70 nelle Alpi settentrionali, la durata della copertura nevosa tra 1100 m e 2500 m è diminuita di 5 settimane (Marty et al. 2017, Matiu et al. 2021). In Valle d'Aosta, una delle più lunghe serie di misura della neve (1927-2018) è stata realizzata presso la diga del lago di Cignana (2150 m slm, figura 3.1): nel periodo 2000-2015 l'altezza massima della neve è diminuita del 37% rispetto al periodo 1961-1990 seguendo, dal 1961, un trend di decrescita del 12% ogni 10 anni.

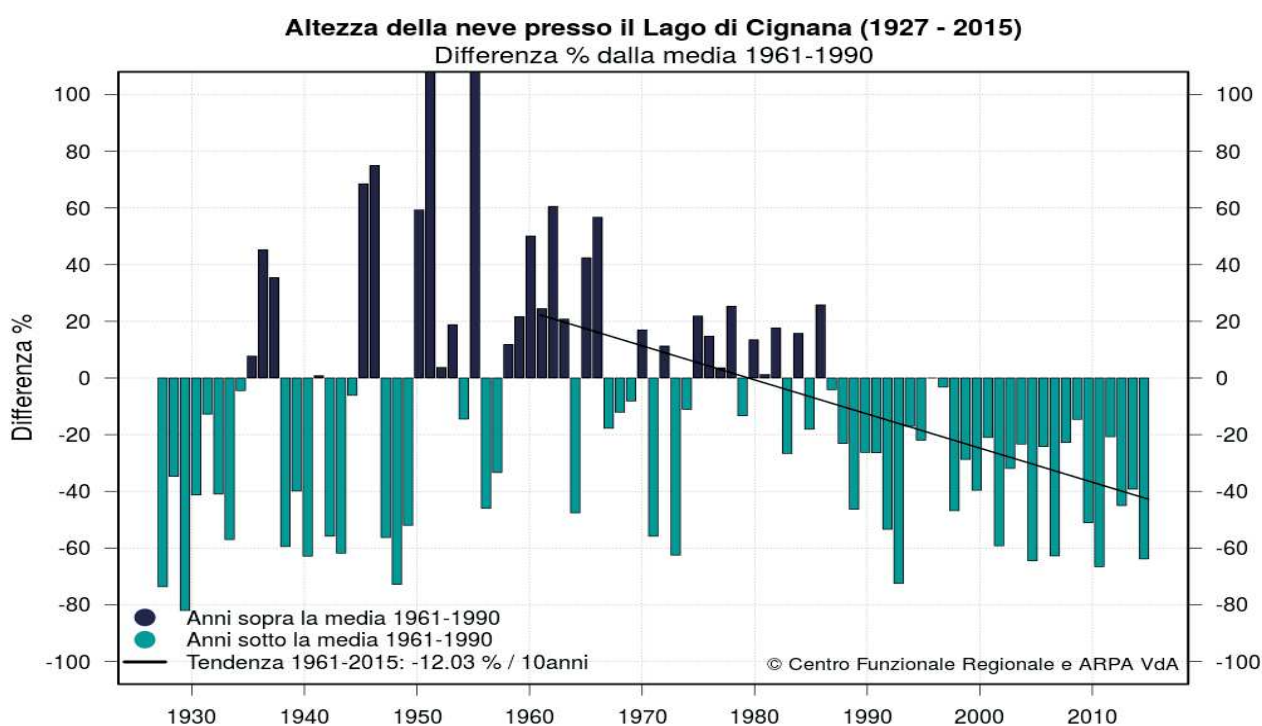


Fig. 3.1. *Variazione percentuale dell'altezza massima della neve nel periodo 1927-2015 rispetto alla media 1961-1990 al Lago di Cignana (2150 m slm). La linea nera inclinata indica il trend di riduzione osservato nel periodo 1961-2015, pari al 12.03% ogni 10 anni. (Dati forniti da C.V.A. S.p.A.).*

L'aumento delle temperature agisce sulla neve attraverso tre processi principali: i) aumento della quota delle nevicate che si traduce in una riduzione delle giornate con precipitazione nevose (cfr. sezione 2) e quindi degli accumuli di neve al suolo ii) aumento della frequenza delle giornate in cui piove sulla neve (rain on snow events), che causano episodi di fusione anticipata durante i mesi invernali a causa sia dell'apporto di precipitazione liquida che dell'effetto delle condizioni atmosferiche più calde e iii) accelerazione della fusione durante la primavera e l'estate in alta montagna.



Nei prossimi decenni è prevista un'ulteriore riduzione della neve, soprattutto in fondovalle e in media montagna e sui versanti soleggiati. In fondovalle, si avranno tra 25 e 45 giorni in meno di neve rispetto al periodo 1973-2013, a seconda dello scenario climatico. Al 2050 a 2000 m slm, è prevista una riduzione di 15-20 giorni nella durata della neve naturale e di 10-15 giorni a 2500 m slm. **Le precipitazioni nevose invernali potrebbero ridursi del 25-45%** a fine secolo secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. Tali riduzioni saranno dell'80% nel fondovalle e trascurabili ad alta quota (> 2700 m slm, Frei et al. 2018). **Le neviccate intense si ridurranno meno rispetto alle neviccate "normali"** (cm al giorno vicini alla media storica): la quantità di neve che cadrà durante le giornate di neviccate intense diminuirà meno della quantità di neve che cadrà durante le neviccate "normali" e **in alcune aree o alle quote più elevate potrebbe addirittura aumentare** (Frei et al. 2018).

In media montagna (1500 m slm, Verfaillie et al. 2018) è attesa **una riduzione dell'altezza media del manto nevoso del 25-32%**. La riduzione della neve prevista utilizzando i tre diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5) non mostra significative differenze fino al 2050, mentre nella seconda parte del secolo si prevedono impatti molto più forti per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 rispetto allo scenario RCP2.6. Ogni scenario mostra un **incremento pronunciato della variabilità interannuale** (alternarsi di anni nevosi e anni con poca neve) e un trend a lungo termine di riduzione dell'innevamento (Verfaillie et al. 2018).

In conseguenza di quanto esposto, è prevista anche **una riduzione della riserva idrica contenuta nella neve (SWE)**, soprattutto alle quote minori di 2000 m, ed **un anticipo del periodo di inizio della morbida idrografica** (aumento stagionale della portata di un fiume generato dal picco di fusione della neve). In Valle d'Aosta, nel periodo 2000-2019, la quantità massima di acqua disponibile stoccata sotto forma di neve (SWEmax) alla fine della fase di accumulo invernale (aprile-maggio) è risultata essere mediamente pari a **1120±370 Mm3 di acqua** (figura 3.2). Secondo lo scenario intermedio (RCP4.5) si prevede a partire dal 2050 e fino a fine secolo una riduzione del 20-30% di questi valori ed un anticipo della fase di fusione di circa un mese. Una riduzione di questo tipo risulterebbe in valori di SWEmax pari a 750-950 Mm3 di acqua, avvicinandosi ai valori osservati nel ventennio 2000-2019 in anni particolarmente poveri di neve come il 2006, 2007 o il 2011.

Utilizzando lo scenario RCP8.5, si ottengono riduzioni maggiori a fine secolo (pari a circa 30-50%) e un anticipo di due mesi del periodo di fusione. Una tale riduzione implicherebbe valori di SWEmax pari a circa 550-750 Mm3 di acqua, volumi mai osservati nel periodo 2000-2019.

L'aumento di SWE nei mesi invernali, previsto dallo scenario RCP2.6, potrebbe essere il risultato congiunto del limitato aumento delle temperature e dell'incremento delle precipitazioni invernali (cfr. sezione 2).



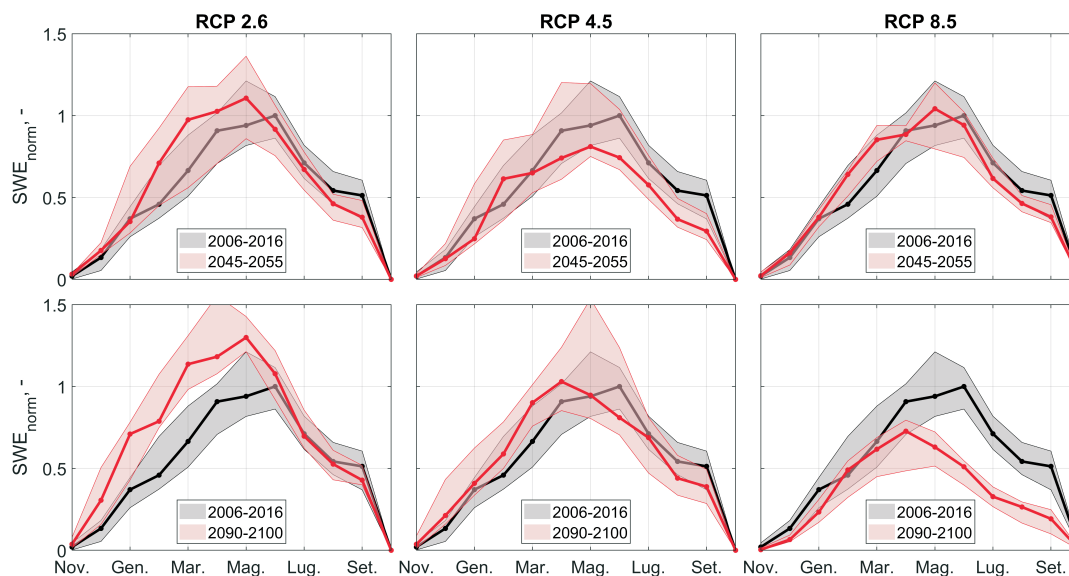


Fig. 3.2. *Variazione percentuale della quantità totale di acqua stoccata sotto forma di neve (SWE) a livello regionale. La linea nera indica l'andamento medio stimato da modello per il periodo 2006-2016. Il valore massimo raggiunto nel periodo maggio-giugno (indicato in figura con un valore di 1 per facilitare la lettura) rappresenta un valore medio di circa 1120 ± 370 Mm³ di acqua. L'area grigia indica la variabilità media nel periodo 2006-2016. La linea rossa indica lo scenario previsto a metà secolo e a fine secolo, rispettivamente nelle righe in alto e in basso. L'area rossa indica la variabilità delle simulazioni. Le colonne indicano i diversi scenari di emissione.*



4. GHIACCIAI

La riduzione dei ghiacciai è certamente una tra le più eloquenti ed impressionanti testimonianze naturali dell'effetto dei cambiamenti climatici sull'ambiente alpino. L'analisi delle serie storiche e più recentemente l'utilizzo dei dati satellitari, mostrano che nel corso degli ultimi 150 anni, le Alpi hanno perso una porzione importante della loro superficie glaciale con una accelerazione significativa a partire dalla metà degli anni '80 del secolo scorso. In particolare, dal culmine della cosiddetta Piccola Età Glaciale (1450-1850 circa), la perdita areale complessiva dei ghiacciai alpini è stata del 35% dal 1850 fino al 1975 e quasi del 50% fino all'anno 2000 (Zemp et al. 2006). In termini volumetrici (km³ di ghiaccio) tra il 1980 ed il 2018 i ghiacciai alpini hanno perso 45±5 km³ di ghiaccio con una media sull'intero periodo di circa 1 km³/anno. Tuttavia i dati mostrano che circa 30 dei 45 km³ totali sono stati persi dopo l'anno 2000, quindi ad una velocità doppia rispetto al ventennio precedente (2 km³/anno) (Haeberli et al. 2019). [In Valle d'Aosta, nel corso degli ultimi 20 anni, la superficie glaciale è passata dai 154 km² del 1999 ai 120 km² del 2019](#) (fonte: Fondazione Montagna Sicura, Catasto dei Ghiacciai Valdostani).

Molte attività di monitoraggio e studio dei ghiacciai sono state condotte negli ultimi anni in Regione, soprattutto nell'ambito della Cabina di Regia dei Ghiacciai Valdostani. Tra queste, le misure del bilancio di massa hanno consentito di monitorare, analizzare e comprendere le dinamiche di fusione di alcuni ghiacciai regionali. Il bilancio di massa annuale è un indicatore dello stato di salute di un ghiacciaio. Un bilancio negativo indica un ghiacciaio che perde massa: la quantità di ghiaccio che si genera durante l'inverno è minore della quantità di ghiaccio persa durante la fusione estiva. In figura 4.1 è riportata una delle serie di misura più lunghe a livello regionale relativa al Ghiacciaio del Timorion in Valsavarenche: la maggior parte delle barre relative al bilancio annuale del periodo 2001-2019 sono rosse ad indicare che il ghiacciaio ha perso massa tutti gli anni a partire dal 2003. I bilanci negativi sono causati da anni con elevate temperature estive che hanno favorito la fusione, da anni con ridotte precipitazioni invernali che hanno limitato l'accumulo o dalla concomitante occorrenza di entrambi i fenomeni.

La catena alpina è considerata la “water tower” d'Europa, ovvero una riserva di acqua strategica, che alimenta i principali corsi d'acqua europei e sostiene milioni di persone. Anche se la neve costituisce il principale serbatoio di questa riserva, i ghiacciai giocano un ruolo molto importante perché rilasciano acqua nella seconda metà della stagione estiva (normalmente nei mesi di agosto e settembre) quando il contributo della fusione nivale diminuisce drasticamente ed il fabbisogno di acqua è massimo a causa della calura estiva.

[In Valle d'Aosta si stima che il volume totale di acqua stoccato nei ghiacciai della regione sia pari a circa 3700/4200 Mm³ \(periodo 2010-2015\)](#). La differenza tra i due valori deriva dai diversi modelli utilizzati per la stima e dai diversi periodi di riferimento. Tale valore di assume particolare significato se confrontato allo stock idrico medio immagazzinato nella neve a massimo accumulo pari a 1120±370 Mm³ come riportato nella sezione 3. La quantità d'acqua rimasta nei ghiacciai regionali è pari a circa 3/3.5 volte la quantità d'acqua stoccata nelle neve ogni anno a fine inverno.



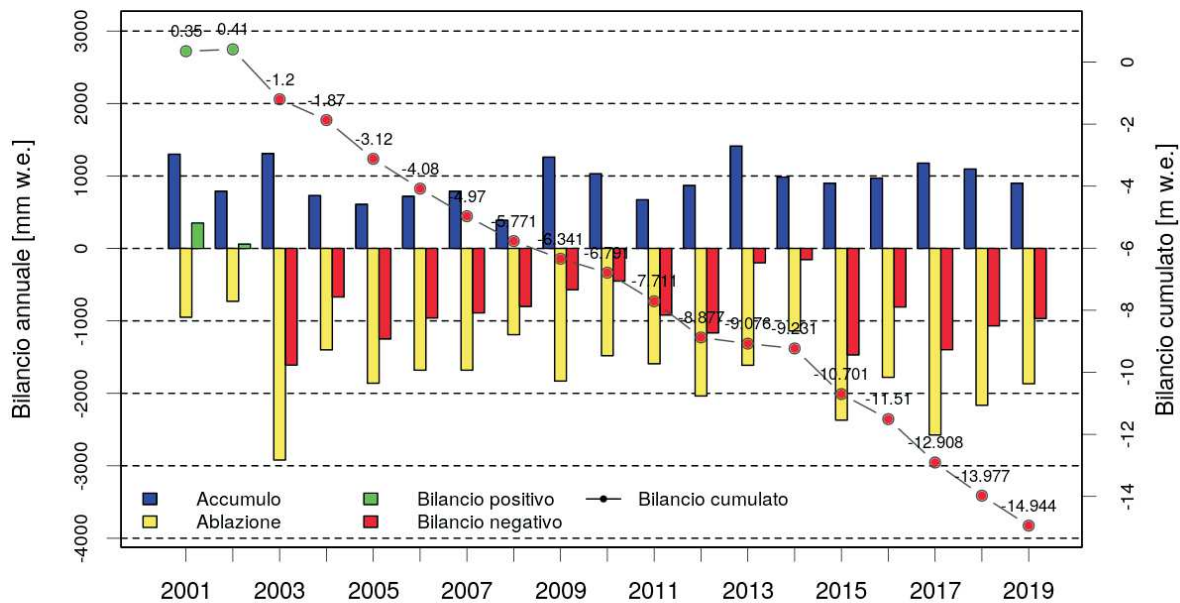


Fig. 4.1. Bilancio di massa del ghiacciaio del Timorion (Valsavarenche). Le barre blu indicano l'accumulo invernale e quelle gialle la fusione estiva. Il valore di bilancio annuale è rappresentato da barre verdi se positivo (accumulo > fusione) o da barre rosse se negativo (accumulo < fusione). Tutti i valori rappresentano una media per l'intero ghiacciaio riferita all'unità di superficie e sono espressi in millimetri di equivalente in acqua (mm w. e.). La linea nera indica il bilancio cumulato su tutto il periodo.

Oltre ad essere un'importante riserva idrica, i ghiacciai sono anche fondamentali regolatori dei deflussi stagionali. Il contributo dell'acqua di fusione glaciale sulla portata dei torrenti varia negli anni in funzione soprattutto della quantità di neve caduta durante l'inverno. Esso varia anche tra bacini in funzione delle condizioni topografiche (quota, esposizione, ...) e dell'estensione della superficie glaciale.

La figura 4.2 mostra un esempio dei contributi della fusione glaciale, della fusione nivale e delle precipitazioni estive al deflusso totale annuale nel periodo 2012-2018 per il bacino di Place Moulin (140 km²), caratterizzato da quote elevate (2000-4500 m s.l.m.) e da una superficie glaciale del 10%: il contributo della fusione glaciale è molto variabile negli anni e compreso tra circa il 5 e il 20% del totale. In anni molto nevosi come il 2018 il contributo totale annuale dei ghiacciai è molto basso, in anni più secchi il contributo glaciale aumenta. Particolarmente importante è il contributo glaciale durante i mesi tardo estivi (agosto-settembre): in questo periodo il contributo glaciale al deflusso è molto variabile ma può essere anche maggiore del 50%. Nel bacino di Place Moulin, per esempio, rappresenta mediamente in questi mesi il 25-30% del deflusso e può assumere valori variabili tra il 2-3% in anni con molte precipitazioni estive o molta neve residua in quota e il 70% in anni secchi. E' proprio in queste situazioni e in questo periodo dell'anno che i ghiacciai possono svolgere un cruciale ruolo tampone, andando a compensare il deficit idrico causato dalla mancanza di neve residua o dalla riduzione della precipitazione estiva. **E' dunque in questa prospettiva di riduzione dello stock idrico immagazzinato sotto forma di neve (cfr. sezione 3) e di riduzione delle precipitazioni estive (cfr. sezione 2) che deve essere analizzata la vulnerabilità della disponibilità idrica nei bacini di montagna alla progressiva scomparsa dei ghiacciai.**



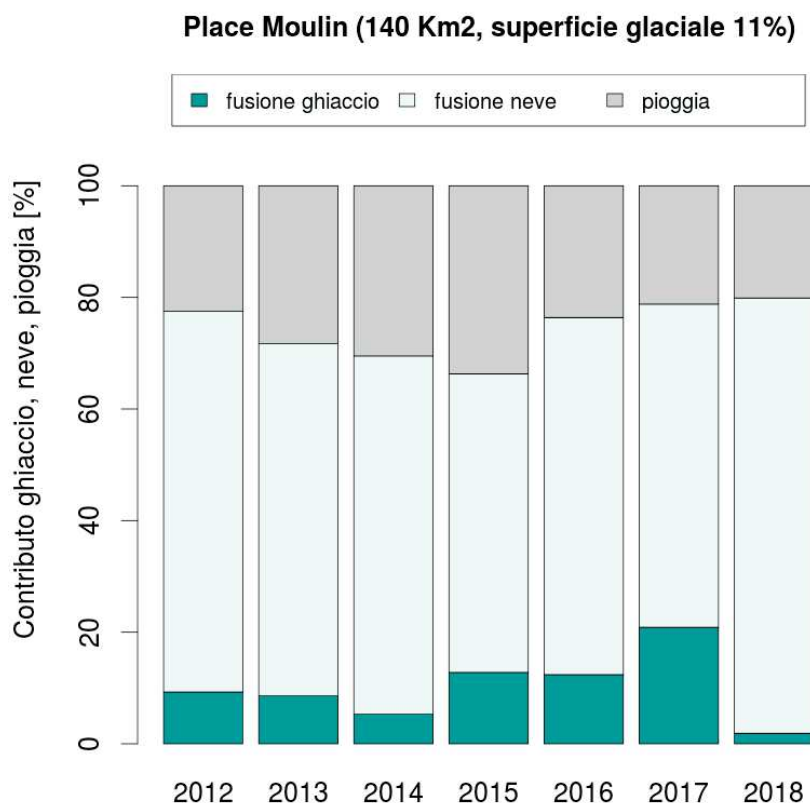


Fig. 4.2. Contributo percentuale della fusione glaciale, della fusione nivale e delle precipitazioni estive al deflusso annuale del bacino di Place Moulin (Convenzione RAVA - Fondazione CIMA - ARPA VdA - C.V.A. S.p.A.).

Molto lavoro è stato fatto negli ultimi anni per simulare l'evoluzione futura dei ghiacciai. Studi svolti sia a livello globale che sulla regione alpina concordano nel prevedere che la copertura glaciale e la riserva idrica immagazzinata nei ghiacciai continueranno a ridursi nei prossimi decenni. **Molti ghiacciai sotto i 3000/3500 m di altitudine scompariranno**, causando una profonda modificazione dei paesaggi di alta quota e impatti sugli ecosistemi. **Questi cambiamenti interagiranno, in modo spesso imprevedibile, con le dinamiche di rischio** (IPCC, 2019b).

La figura 4.3 mostra l'evoluzione della risorsa idrica immagazzinata nei ghiacciai della regione per il periodo 2017-2100 secondo i diversi scenari emissivi (Zekollari et al. 2019). I valori rappresentati indicano la somma di tutta l'acqua contenuta nei ghiacciai regionali e come si prevede che questa risorsa si ridurrà nel futuro. Nei prossimi decenni (2020-2040), non ci saranno significative differenze tra gli RCP, ma complessivamente scompariranno le ultime porzioni dei ghiacciai alle quote minori e si perderà circa il 25/30% dell'acqua residua (pari a circa 1000/1500 Mm3 di acqua). A partire dal 2040, quando saranno rimasti solo le porzioni dei ghiacciai alle quote più alte (sopra i 3000/3500 m) si inizia ad osservare una differenza tra gli scenari: lo scenario di forte mitigazione (RCP2.6) prospetta una riduzione del tasso di perdita fino a raggiungere un valore di plateau intorno al 2060 che rimane costante fino a fine secolo. Lo scenario basato su un continuo aumento delle emissioni (RCP8.5) prevede invece un tasso di perdita d'acqua pressoché costante. **La riduzione dello stock idrico glaciale e le differenze tra gli RCP hanno un impatto molto importante sui regimi idrologici dei torrenti regionali che sarà descritto nella sezione seguente.**



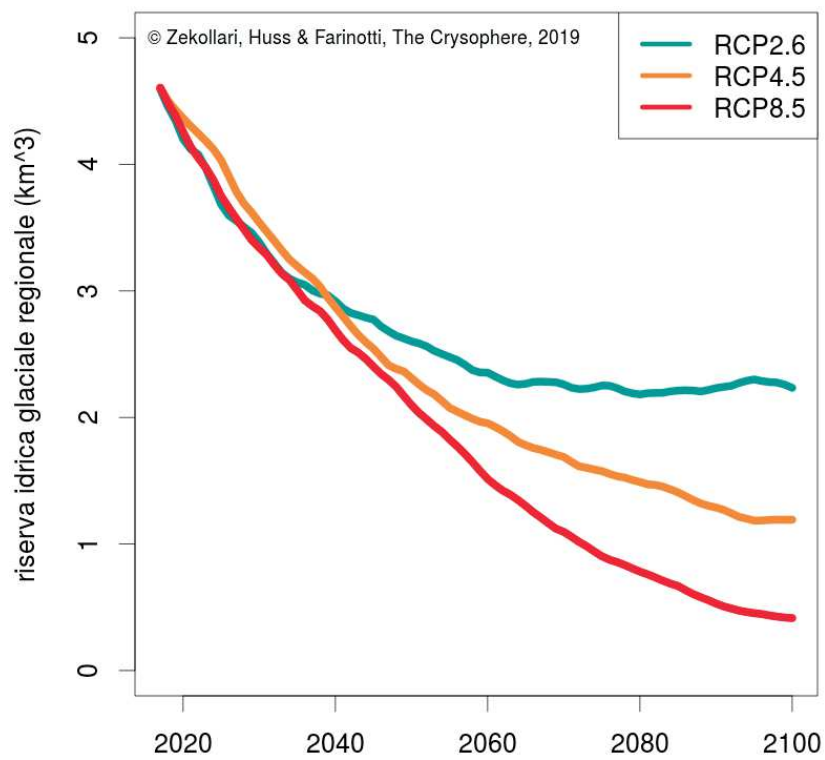


Fig. 4.3. Scenari di evoluzione della riserva idrica glaciale regionale secondo i diversi scenari emissivi.



5. PORTATE

Gli impatti dei cambiamenti climatici sul regime idrologico e sulle portate dei torrenti delle aree di montagna sono principalmente determinati dai fattori trattati nelle sezioni precedenti: i) aumento della temperatura ii) variazione della distribuzione stagionale delle precipitazioni, iii) riduzione delle precipitazioni nevose e iv) riduzione dei ghiacciai. **Altri fattori naturali**, a loro volta influenzati dai cambiamenti climatici, come la relazione tra flussi di evapotraspirazione e le dinamiche spaziali e temporali della vegetazione (estensione della copertura forestale, durata della stagione vegetativa, tra gli altri) possono avere impatti sui regimi idrologici in montagna. Insieme a questi processi naturali, la portata dei torrenti di montagna è ovviamente determinata dai **diversi utilizzi umani** (potabile, agricolo, idroelettrico, ricreativo, industriale). Come i processi naturali, anche le attività umane che interagiscono con l'uso dell'acqua possono e saranno in futuro sempre maggiormente influenzate dai cambiamenti climatici (es. produzione di energia da fonti rinnovabili, frequentazione turistica, dinamiche urbanistiche, sviluppo delle attività agricole, tra gli altri).

E' fondamentale partire da questo complesso quadro di interazioni per comprendere e prevedere come i cambiamenti climatici influenzeranno il regime idrologico regionale e per valutare la vulnerabilità dei sistemi socio-ecologici a tali variazioni. Inoltre è necessario tenere a mente che tali processi sono caratterizzati da un'elevata variabilità spaziale e dalla forte influenza determinata dalle caratteristiche specifiche dei singoli bacini idrografici. Considerando sia la natura preliminare degli studi da cui prende origine questo documento (cfr. sezione 1), sia alcune limitazioni oggettive degli scenari climatici disponibili e dell'applicabilità di tecniche di downscaling sul territorio regionale, è per il momento impossibile riuscire ad arrivare ad una descrizione delle variazioni dei regimi idrologici di ogni bacino regionale. Tutti i risultati presentati in questa sezione si riferiscono quindi a situazioni considerate rappresentative di contesti più diffusi a livello regionale.

Le analisi sono state condotte per due tipologie di regimi di deflusso: i) nivo-glaciale (caratterizzato da valori massimi di portata nei mesi estivi, maggio-settembre, a causa della forte influenza delle dinamiche di fusione di neve e ghiaccio) e ii) pluviale o nivo-pluviale (caratterizzato da valori massimi di portata in tardo inverno inizio primavera e in tardo autunno a causa della forte influenza delle dinamiche di precipitazione). Il regime nivo-glaciale è tipico dei bacini a quota maggiore e del tratto "montano" della Dora Baltea, mentre quello pluviale o nivo-pluviale è tipico del fondo valle e dei bacini a quota minore.

Due sono le prospettive principali e più importanti da cui inquadrare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche alpine: il concetto di "peak water" e la variazione dei regimi idrologici, ed in particolare la **transizione da regimi nivo-glaciali a regimi nivo-pluviali**.

Peak water

Con peak water si intende il fenomeno di aumento transitorio e temporaneo (10/15 anni) della portata dei torrenti alpini (specialmente in primavera ed estate) causata dall'incremento della fusione dei ghiacciai. Durante il ritiro dei ghiacciai, il deflusso aumenta in un primo momento per poi diminuire quando il ghiacciaio si estingue o si ritira a quote talmente elevate da non subire fusione. Il periodo del peak water è variabile tra le diverse catene montuose mondiali ed è stato analizzato in studi recenti (Huss et al. 2018): **si stima che nelle Alpi europee sia già stato raggiunto per il 40/60% dei bacini glaciali**.

La figura 5.1 mostra il confronto tra il deflusso glaciale attuale e quello previsto per i prossimi decenni del ghiacciaio del Timorion (come esempio, cfr. figura 4.1) e del totale dei ghiacciai valdostani. Per quanto riguarda il ghiacciaio del Timorion, i deflussi glaciali attuali sono dati misurati (bilancio di massa) che si



riferiscono al periodo 2001-2019. Al 2035, il deflusso del Timorion si ridurrà di circa il 30%, al 2050 di più del 50% e al 2085 diventerà quasi pari a zero con la probabile scomparsa del ghiacciaio o il suo ritiro a quote così elevate da non andare incontro a fusione. Per questo ghiacciaio, data la sua quota elevata, le differenze tra i due scenari sono trascurabili.

Considerando complessivamente il totale dei ghiacciai valdostani (panel inferiore della figura 5.1), il risultato non cambia. Il deflusso glaciale annuale totale del periodo 2015-2019 è compreso tra 100 e 120 Mm³ di acqua. Al 2035 è attesa una riduzione del 30-40% di questo valore. Al 2050 secondo lo scenario RCP8.5 il deflusso si ridurrà di circa il 50%, arrivando a 60 Mm³. Secondo lo scenario RCP2.6 la riduzione sarà ancora più forte e si prevede un deflusso glaciale residuo di circa 30 Mm³. Questa forte differenza tra i due scenari è spiegabile considerando che secondo lo scenario RCP2.6 le temperature previste non saranno sufficientemente calde da provocare l'ulteriore fusione dei ghiacciai che nel frattempo si saranno ritirati a quote più elevate: i ghiacciai saranno così in alto da non fondere più. Al 2085 lo scenario RCP8.5 prevede un deflusso residuo di circa 20 Mm³ mentre lo scenario RCP2.6 prevede un deflusso praticamente azzerato.

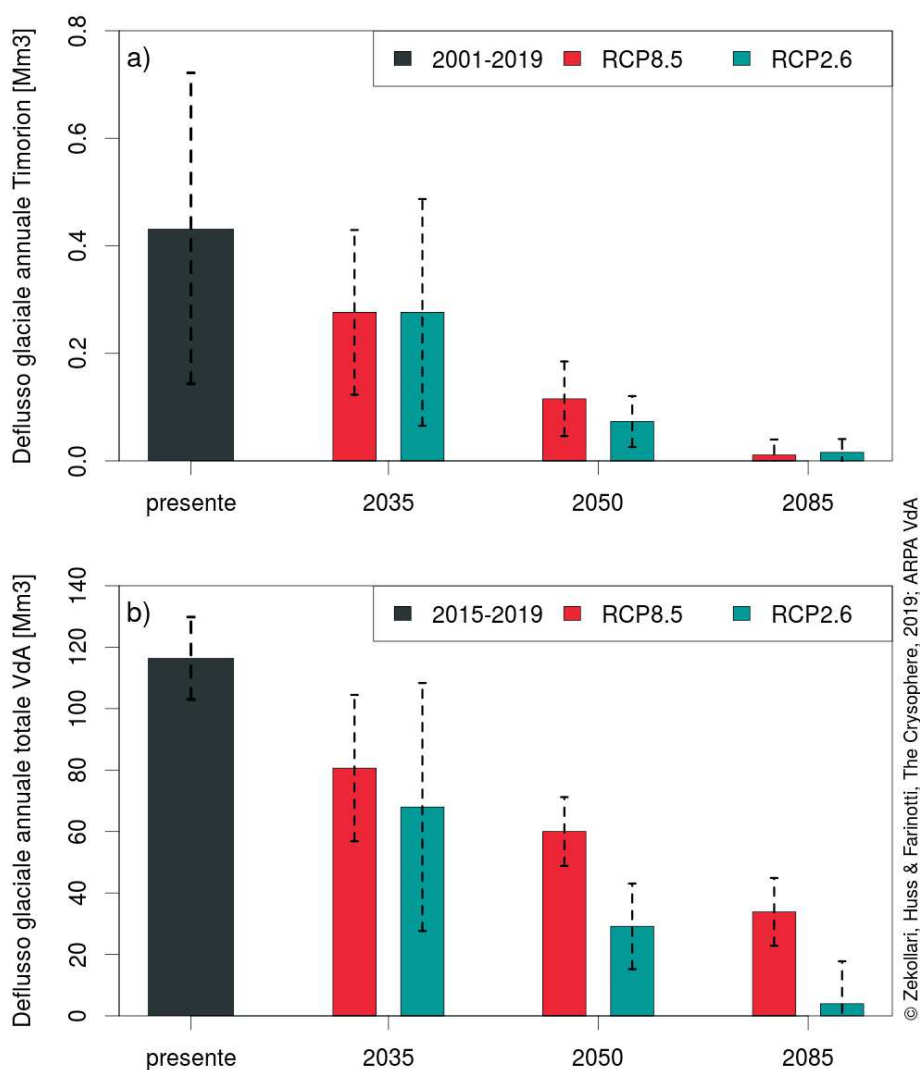


Fig. 5.1. Deflusso glaciale annuale del ghiacciaio del Timorion (panel superiore) e del totale dei ghiacciai valdostani (panel inferiore) nel periodo attuale e nei prossimi decenni secondo gli scenari RCP2.6 e RCP8.5. Le linee nere verticali tratteggiate indicano la variabilità interannuale osservata o modellata.



Dai risultati mostrati in figura 5.1 si può quindi concludere che il “peak water” sia già avvenuto nella Regione, presumibilmente negli ultimi decenni, cioè nel periodo in cui si è osservata la massima riduzione della superficie glaciale. Questo risultato conferma quanto ipotizzato da studi indipendenti sul tema (Huss et al. 2018).

Regimi idrologici

Per quanto riguarda la variazione dei regimi idrologici si attendono risposte diverse dai corpi idrici caratterizzati da un regime nivo-glaciale rispetto a quelli con regime nivo-pluviale.

Per i regimi nivo-glaciali sono attesi: i) aumento delle portate autunnali ed invernali, ii) anticipo della fase di morbida e del periodo di portata massima e iii) riduzione delle portate estive. L'intensità di tali variazioni dipende in primis da caratteristiche dei singoli bacini come estensione, quota, pendenza, esposizione ed estensione della superficie glacializzata. Insieme a questi fattori principali, possono giocare un ruolo non trascurabile anche le caratteristiche geologiche, le dinamiche della vegetazione ed ovviamente gli usi umani. I corsi d'acqua regionali che appartengono a questa categoria sono le porzioni sommitali dei torrenti delle vallate laterali (soprattutto in media ed alta Valle), i torrenti minori caratterizzati da quote elevate e il tratto della Dora Baltea compreso tra Courmayeur e Aosta.

Come esempio di un bacino di alta montagna e con un'importante estensione della superficie glacializzata, la figura 5.2 mostra gli scenari di evoluzione futura del regime idrologico del torrente Rutor all'altezza di La Thuile. Al 2035, le differenze tra scenari sono contenute e si prevede un moderato aumento delle portate invernali ed autunnali, un anticipo della fase di morbida compreso tra 15 e 30 giorni ed una riduzione del 15-20% delle portate da giugno a settembre. Al 2050 le differenze tra scenari aumentano e la riduzione delle portate tardo estive (luglio-settembre) passa da 15-20% secondo RCP2.6 a 40-50% secondo RCP8.5. Al 2085 si verificano gli impatti più forti e si osservano le maggiori differenze tra RCP: secondo RCP2.6 e 4.5 si verificheranno aumenti limitati delle portate invernali, un anticipo della fase di morbida di 30 giorni (da maggio-giugno ad aprile-maggio) ed una riduzione delle portate estive (giugno-settembre) del 20-30%. Secondo lo scenario RCP8.5 invece, gli aumenti delle portate invernali sarebbero maggiori (10-30%), l'anticipo della fase di morbida sarebbe di quasi 2 mesi (da metà maggio ad inizio aprile) e si ridurrebbe fortemente la portata estiva: -40-60% tra giugno e luglio e -60-70% tra agosto e settembre, mesi in cui si avrebbero le portate attualmente presenti in alveo nel mese di febbraio.

Per i corpi idrici con regime nivo-pluviale sono invece attesi impatti minori: una limitata riduzione delle portate estive, trascurabili variazioni della fase di morbida ed un aumento delle portate invernali. I corsi d'acqua regionali che appartengono a questa categoria sono i torrenti delle vallate minori a quota inferiore e privi di apparati glaciali importanti, le porzioni terminali dei torrenti delle valli laterali (soprattutto in bassa Valle) e il tratto della Dora Baltea a valle di Aosta. Come esempio delle variazioni di regime attese per questa tipologia di corpi idrici, la figura 5.3 mostra gli scenari di evoluzione della Dora Baltea all'altezza di Pont-Saint-Martin.

Al 2035, le differenze tra scenari sono contenute e si prevede un aumento di circa 20-30% delle portate tardo autunnali (ottobre-dicembre). Anche in questo caso, le differenze tra scenari si enfatizzano a partire dal 2050, periodo in cui è atteso un aumento del 20-40% delle portate autunnali ed invernali (ottobre-marzo), un anticipo (da aprile a marzo) ed una maggior durata della fase di morbida.



Non sono previste variazioni importanti nel periodo estivo ($\pm 10/15\%$). Al 2085, le tendenze osservate al 2050 diventano più evidenti. Gli RCP4.5 e 8.5 sono gli scenari per i quali si attendono gli effetti maggiori: aumenti delle portate autunnali ed invernali (ottobre-marzo) del $+60/+80\%$, anticipo dell'inizio della morbida, aumento delle portate massime di maggio (20/30%) e riduzione delle portate estive (15/20%, 30% nel mese di agosto secondo RCP8.5). Secondo lo scenario RCP2.6 invece, le variazioni saranno meno intense: minori aumenti delle portate invernali (10/20%), limitato anticipo della fase di morbida e trascurabili effetti sulle portate estive.

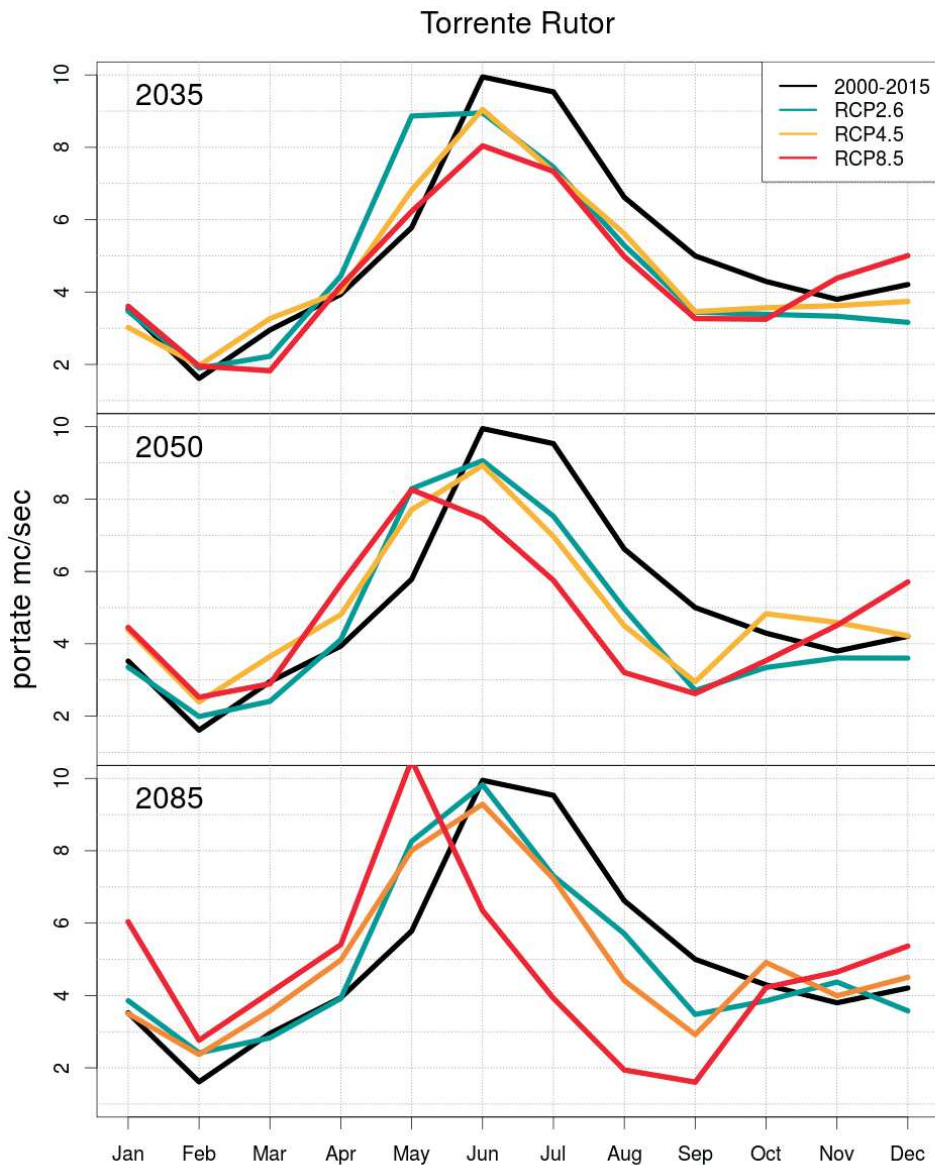


Fig. 5.2. *Scenari di evoluzione del regime idrologico nivo-glaciale del torrente Rutor all'altezza di La Thuile. La curva nera indica il regime attuale (2000-2015) e le curve colorate indicano i regimi previsti in funzione dei differenti scenari di emissioni (RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5). I tre grafici sono relativi ai diversi periodi: 2035 in alto, 2050 in mezzo, 2085 in basso.*



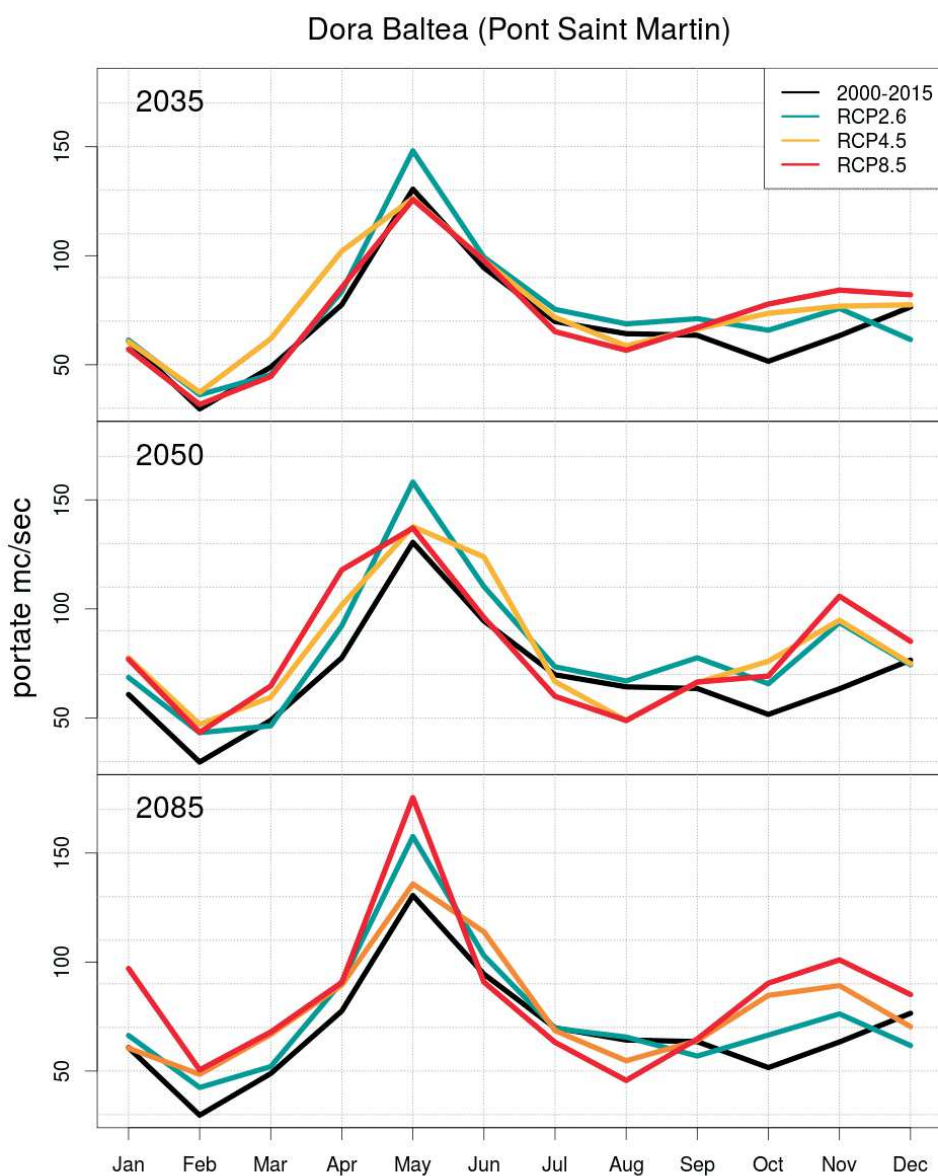


Fig. 5.3. Scenari di evoluzione del regime idrologico nivo-pluviale della Dora Baltea all'altezza di Pont-Saint-Martin. La curva nera indica il regime attuale (2000-2015) e le curve colorate indicano i regimi previsti in funzione dei differenti scenari di emissioni. I tre grafici sono relativi ai diversi periodi: 2035 in alto, 2050 in mezzo, 2085 in basso.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda al rapporto “Analisi dell’impatto sul ciclo idrologico degli scenari di cambiamento climatico” (Gabellani et al. 2018) prodotto nell’ambito della convenzione richiamata nella sezione 1. Quanto presentato in questa sezione mostra le tendenze medie generali del contributo glaciale alla disponibilità idrica e della variazione dei regimi idrologici regionali. Tali variazioni sono da intendere come tendenze rappresentative delle condizioni medie future. **I cambiamenti climatici però non si limitano ad agire sulle condizioni medie ma anche e soprattutto ad aumentare la probabilità del verificarsi di eventi estremi.** Nel caso del ciclo idrologico l’aumento di frequenza degli eventi estremi è legato al concetto dell’intensificazione del ciclo dell’acqua (Huntington, 2006). A livello regionale tale fenomeno si manifesterà principalmente con un **aumento della frequenza e dell’intensità dei temporali** (figura 2.7), **un aumento del rischio di eventi di piena e del rischio di siccità estive.** Questi ultimi due fenomeni sono discussi nelle sezioni seguenti.



APPROFONDIMENTO: RELAZIONI CON IL SETTORE IDROELETTRICO

L'energia idroelettrica è una fonte di energia fondamentale per il territorio della Valle d'Aosta ed è una componente strategica nel panorama della produzione di energia elettrica rinnovabile.

Questo approfondimento ha l'obiettivo di sintetizzare le principali interazioni tra gli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico e la produzione idroelettrica in una regione di montagna come la Valle d'Aosta. Quanto presentato deriva dalle analisi sintetizzate in questo rapporto e da una review di letteratura dei più recenti studi scientifici pubblicati sul tema.

Per qualsiasi discussione sulla vulnerabilità dei sistemi di produzione idroelettrica ai cambiamenti climatici, è importante sottolineare che i potenziali effetti del cambiamento climatico si sovrappongono sempre ad altre pressioni che ruotano attorno al tema della risorsa idrica in generale (governance e policy a livello locale, nazionale ed internazionale, tutela naturale dei corpi idrici e mantenimento degli utilizzi specifici, demografia, evoluzione dei paesaggi, variazioni nei prezzi dell'energia e loro stagionalità, ecc.). Queste pressioni potrebbero superare ampiamente gli effetti del cambiamento climatico (Schaepli et al. 2015, Gaudard et al. 2018).

Ruolo del cambiamento climatico

Il cambiamento climatico è uno dei driver fondamentali dei mercati energetici: consumo, produzione e trasmissione dell'elettricità dipendono infatti dalle variabili climatiche. Domanda, offerta e prezzi sono influenzati di conseguenza.

Il cambiamento climatico influenza i regimi idrologici e di conseguenza il potenziale idroelettrico. Gli scenari a livello europeo prevedono complessivamente una riduzione della produzione idroelettrica ma sono molto variabili tra regioni e caratterizzati da notevole incertezza: -15% in Europa occidentale (Golombek et al. 2012), -20/50% nell'area del Mediterraneo e +15/30% nei paesi del nord Europa (Lehner et al. 2005), -3/10% nell'area alpina (Bongio et al. 2015, Patro et al. 2018). Tale variabilità evidenzia sia la necessità di studi specifici per i singoli bacini ed impianti, sia l'importanza di non intendere la riduzione della produzione idroelettrica esclusivamente come risultante della variazione del volume d'acqua disponibile.

Cambiamento climatico e produzione idroelettrica in Valle d'Aosta

L'evoluzione attesa del regime idrologico dei torrenti regionali, presentata nella sezione 5, impatterà sulla produzione idroelettrica in modo differenziato in funzione della tipologia degli impianti.

Sono attesi impatti ridotti per gli **impianti dotati di invaso a modulazione stagionale** che rappresentano il 35-40% della potenza installata in Regione; considerando che sono previsti i) un lieve aumento delle precipitazioni annue totali (+2%/+5%) e ii) una riduzione del deflusso glaciale che attualmente contribuisce per circa il 10%/15%, si attende che il volume totale di acqua disponibile in media ogni anno rimarrà simile (-10%/+10%). La vulnerabilità al cambiamento climatico del potenziale idroelettrico medio di tali tipologie di impianti è bassa.

Gli **impianti ad acqua fluente** o dotati di invasi molto piccoli a modulazione giornaliera sono invece più vulnerabili. Il loro potenziale idroelettrico aumenterà in inverno e diminuirà in estate, ma resta difficile valutare se l'aumento della portata invernale potrà compensare la riduzione estiva in quanto la produzione degli impianti ad acqua fluente avviene con un meccanismo a soglia che rende irrilevante variazioni di portata oltre la soglia prelevabile dal singolo impianto (si veda Bongio et al. 2016 per un approfondimento).



Più in generale, gli impatti saranno molto variabili in funzione delle caratteristiche tecniche dell'impianto e delle caratteristiche dei bacini: estensione, quota, morfologia, superficie glacializzata, condizione climatica, E' importante sottolineare che circa il 15% della produzione idroelettrica regionale, derivante da questa categoria di impianti, potrà beneficiare dell'effetto indiretto di modulazione stagionale delle portate garantito dai grandi invasi a monte e quindi essere meno vulnerabile.

Gestione e adattamento

In un contesto di cambiamento climatico caratterizzato da un'intensificazione della frequenza degli eventi estremi e da un aumento della variabilità interannuale, diventerà sempre più importante lo sviluppo e l'applicazione di pratiche di gestione ed adattamento innovative.

Tutte le tipologie di impianto dovranno fronteggiare un aumento della variabilità interannuale dell'acqua disponibile ed una significativa riduzione dell'effetto di tamponamento dei ghiacciai che in anni particolarmente poveri di precipitazioni invernali ed estive possono, nel periodo attuale, contribuire al 20/60% delle portate durante i mesi di agosto e settembre.

Molti studi indicano quindi: i) un aumento del rischio di **sfioro delle opere di presa** (Schaepli et al. 2019) che potrebbero non essere sufficienti in caso di picchi di portata concentrati in brevi periodi durante la fusione nivale e ii) un aumento del **trasporto di sedimenti** che causa l'ostruzione delle captazioni, il deterioramento del turbine ed il riempimento dei bacini di accumulo (0.7/1 % anno secondo Schleiss et al. 2016).

Inoltre non devono essere dimenticati i potenziali impatti indiretti dell'aumento del rischio idrogeologico in alta montagna: precipitazioni intense, debris flow, esondazioni di laghi glaciali, degradazione del permafrost, tra gli altri, sono fenomeni la cui frequenza potrebbe aumentare nel futuro (IPCC 2019b) ed i cui effetti sulle infrastrutture e sulle regole di gestione degli impianti non possono essere trascurati.

Contemporaneamente, è utile ricordare il ruolo di mitigazione del rischio idrologico svolto dagli invasi in alta montagna data la loro capacità di laminazione delle piene e di assorbimento e regolazione del deflusso a valle.

Politiche climatiche ed energetiche

Per poter limitare gli impatti negativi dei cambiamenti climatici sarà necessaria la decarbonizzazione dell'economia e il raggiungimento della carbon neutrality entro il 2050. Le politiche climatiche ed energetiche sviluppate a livello comunitario e nazionale prevedono e prevederanno sempre di più l'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili.

In questo contesto, la produzione idroelettrica è prioritariamente a carico degli impianti storici e rappresenta un asset strategico fondamentale per la sua flessibilità e per la sua capacità di stoccaggio tramite le dighe, in un sistema energetico che punta ad aumentare lo share di fonti rinnovabili intermittenti (fotovoltaico ed eolico) insieme allo sviluppo di smart/super/micro-grids. Nel prossimo futuro aumenterà infatti la necessità di energia di backup e di capacità di storage che gli impianti idroelettrici possono fornire grazie agli invasi.

Contemporaneamente la gestione flessibile degli invasi si dovrà adattare sia alle più elevate fluttuazioni di prezzo dell'energia elettrica, legate alla produzione intermittente da fonti rinnovabili, sia all'aumento di richieste di energia soprattutto nei mesi estivi.

Infine occorre aggiungere che molteplici condizioni al contorno potranno esercitare sul settore idroelettrico pressioni altrettanto forti rispetto a quelle determinate dagli impatti diretti o indiretti dei cambiamenti climatici. Tra queste, le dinamiche economiche derivanti dal mercato dell'energia, i vincoli legislativi e le norme per la tutela ambientale e paesaggistica dei corpi idrici, i quadri nazionali e comunitari di incentivi alla produzione idroelettrica e le procedure di rinnovo delle concessioni storiche sono probabilmente le più importanti (FOEN 2021).



6. RISCHIO IDRAULICO

Le premesse e gli obiettivi di questo documento non consentono una trattazione esaustiva delle interazioni tra cambiamenti climatici e rischio idrologico ed idrogeologico a livello regionale. Una breve sintesi e le raccomandazioni emerse nel corso di numerosi confronti tra ricercatori, stakeholders e professionisti della montagna nell'area dell'Espace Mont-Blanc possono essere trovate nel [Rapport Climat del progetto AdaPT Mont-Blanc](#). Per poter approfondire tale argomento nel prossimo futuro sarà necessario sviluppare una strategia che integri analisi modellistiche, misure in campo, osservazioni a lungo termine e casi di studio oltre a review specifiche. In questa sezione saranno presentati, esclusivamente, alcuni scenari di evoluzione del rischio di piene usando come casi-studio le stesse tipologie di corpi idrici usate per l'analisi dell'evoluzione dei regimi idrologici (rif. Gabellani et al. 2018).

La definizione del rischio piene è basata sull'utilizzo di modelli specifici e dati rilevati dagli idrometri (strumenti che misurano l'altezza di acqua transitante e la relativa portata) che permettono di simulare il comportamento del flusso dell'acqua e stabilire diverse soglie di allerta di tipo semaforico: i) **allerta rossa**: i fenomeni previsti sono molto pericolosi; si tratta di fenomeni di straordinaria entità che colpiscono aree estese del territorio, ii) **allerta arancione**: i fenomeni previsti sono pericolosi; si tratta di fenomeni di grande entità che colpiscono aree estese del territorio e iii) **allerta gialla**: i fenomeni previsti sono potenzialmente pericolosi; si tratta di fenomeni che possono colpire piccole aree, anche con intensità significative, oppure, se diffusi sul territorio, non di grande entità.

Benché le modalità di stima di un'allerta per piene prendano in considerazione più parametri e più stazioni, in proiezione come trend futuro è possibile considerare come indicatore il superamento di soglie idrometriche. L'analisi condotta al fine di presentare l'evoluzione futura del rischio di piene quindi è basata sulla stima della variazione attesa nel numero di giorni all'anno in cui avvengono superamenti delle soglie di allerta degli idrometri. **In alta valle, per la Dora Baltea all'altezza di Pré-Saint-Didier, regime nivo-glaciale** (figura 6.1), è previsto a breve termine (2035) un aumento del 65-105% (da 1.5 a 2.5-3.1 giorni all'anno) per le allerte gialle, del 47-110% (da 0.7 a 1-1.4 giorni all'anno) per le allerte arancioni ed una variazione da 1.3 a 1-2 giorni ogni 10 anni delle allerte rosse. Al 2050 invece, le differenze tra gli scenari diventano maggiori. Secondo RCP2.6, le giornate all'anno in allerta gialla passeranno da 1.5 a 2.4 (+54%), quelle in allerta arancione da 0.7 a 1.6 (+47%) mentre quelle in allerta rossa non cambieranno. Secondo RCP8.5 invece sono attesi aumenti molto più significativi: da 1.5 a 3.8 giorni all'anno (+148%) per le allerte gialle, da 0.7 a 1.8 (+157%) per le allerte arancioni e da 1.3 a 3 giorni ogni 10 anni (+157%) per le allerte rosse. Per fine secolo (2085) le variazioni più importanti si vedono considerando RCP8.5 che prevede ulteriori aumenti per ogni livello di allerta (320%, 270% e 76% rispettivamente per gialla, arancione e rossa), mentre per gli altri RCP non sono previsti aumenti ulteriori rispetto al 2050. **In sintesi si stima, per l'alta valle, che le allerte gialle e arancione possano triplicare o quadruplicare mentre quelle rosse raddoppiare entro la fine del secolo.**

Considerando la **Dora Baltea a Pont-Saint-Martin, regime nivo-pluviale** (figura 6.2), il quadro di evoluzione peggiora ulteriormente. Si attende, a breve termine (2035), un aumento del 73-76% (da 3.6 a 6.2-6.3 giorni all'anno) per le allerte gialle, del 87-113% (da 1.4 a 2.6-2.9 giorni all'anno) per le allerte arancioni ed una variazione da 4 a 7-8 giorni ogni 10 anni in allerta rossa. Al 2050, secondo lo scenario di forte mitigazione delle emissioni (RCP2.6), le giornate all'anno in allerta gialla passeranno da 3.6 a 7.1 (+100%), quelle in allerta arancione da 1.4 a 3.1 (+120%) mentre quelle in allerta rossa passeranno da 4 a 11 ogni 10 anni (+155%). Secondo lo scenario basato su un continuo aumento delle emissioni (RCP8.5) si attendono incrementi ancora maggiori: da 3.6 a 8.4 giorni all'anno (+136%) per le allerte gialle, da 1.4 a 3.6 (+160%) allerte arancioni e da 4 a 13 giorni ogni 10 anni (+202%) per le allerte rosse. Per fine secolo (2085) RCP8.5 prevede ulteriori aumenti per ogni livello di allerta (205%, 264% e 186% rispettivamente per gialla, arancione e rossa), mentre per RCP2.6 non



sono previsti aumenti ulteriori. In sintesi si stima, per la bassa valle, che le allerte gialle potranno raddoppiare nei prossimi decenni mentre quelle arancione e rosse potranno triplicare o addirittura quadruplicare entro fine secolo.

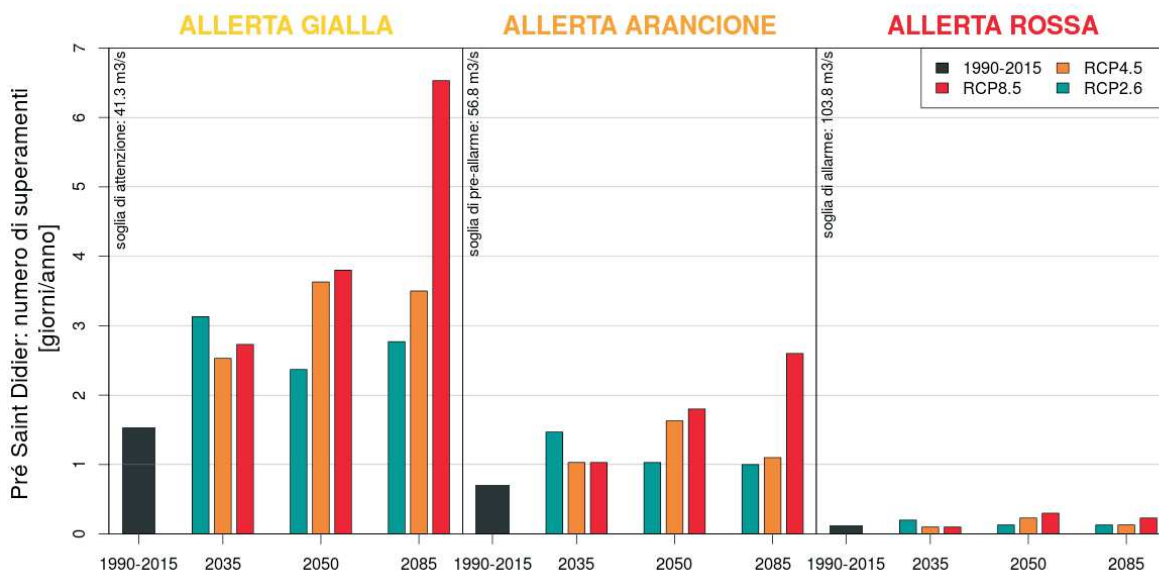


Fig. 6.1. Variazione del numero di giornate all'anno di superamento delle soglie di allerta idraulica per il rischio di piene a Pré-Saint-Didier (Dora Baltea).

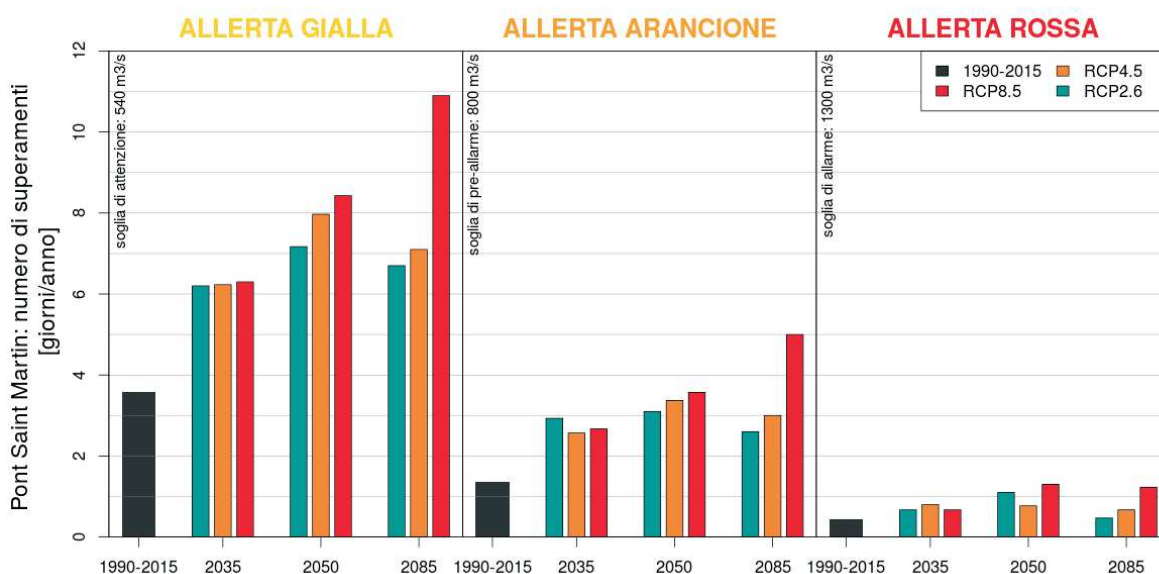


Fig. 6.2. Variazione del numero di giornate all'anno di superamento delle soglie di allerta idraulica per il rischio di piene a Pont-Saint-Martin (Dora Baltea).

Da quanto mostrato si può quindi concludere che sia nei bacini nivo-glaciali che in quelli nivo-pluviali si deve attendere un aumento del numero di giorni all'anno in cui avviene il superamento delle soglie di allerta per il rischio piene. L'aumento si verificherà già nel prossimo futuro (2035) e si intensificherà a metà e fine secolo.



7. RISCHIO SICCAITA'

In ragione degli scenari di temperatura e precipitazione presentati nella sezione 2, **si attende un aumento della frequenza e dell'intensità del rischio di siccità**, specialmente durante l'estate e l'autunno. Uno dei più efficaci indicatori del rischio di siccità è il **bilancio idrico estivo**, cioè il bilancio tra precipitazioni (P) ed evapotraspirazione potenziale (ETP); un bilancio negativo ($P-ETP < 0$) indica una mancanza di acqua mentre un bilancio positivo ($P-ETP > 0$) indica un surplus di acqua. Il bilancio idrico estivo può in particolare essere utilizzato per analizzare gli impatti sul settore agricolo in quanto può essere inteso, in buona approssimazione, pari al **fabbisogno irriguo** di una data coltura. Un bilancio idrico estivo negativo è tipico di colture nelle quali si rende necessario un apporto d'acqua aggiuntivo (irrigazione) per mantenere la vegetazione in condizioni di crescita ottimale. **Una riduzione del bilancio idrico estivo si traduce in un aumento della necessità di acqua per l'irrigazione.**

Nel periodo 1980-2010 il bilancio idrico estivo è risultato sempre negativo in fondo valle e in media montagna (-254 mm e -124mm rispettivamente), come peraltro atteso dato il carattere intra-alpino secco del clima dell'asse centrale della regione (figura 7.1). Nei prossimi decenni (2035 e 2050) è prevista una significativa riduzione del bilancio idrico estivo (tra -14% e -40%) a tutte le fasce di quota e secondo tutti gli scenari. A fine secolo (2085) la riduzione prevista è ancora più forte (tra -22% e -60%). La differenza tra scenari si enfatizza solo a partire dal 2050, periodo a partire del quale le riduzioni previste dagli RCP4.5 e RCP8.5 sono due volte o anche tre volte maggiori di quelle previste dallo scenario RCP2.6. Secondo lo scenario RCP8.5 a fine secolo il bilancio idrico estivo in media montagna potrebbe raggiungere i valori attualmente osservati in fondo valle e quello in alta montagna potrebbe diventare negativo.

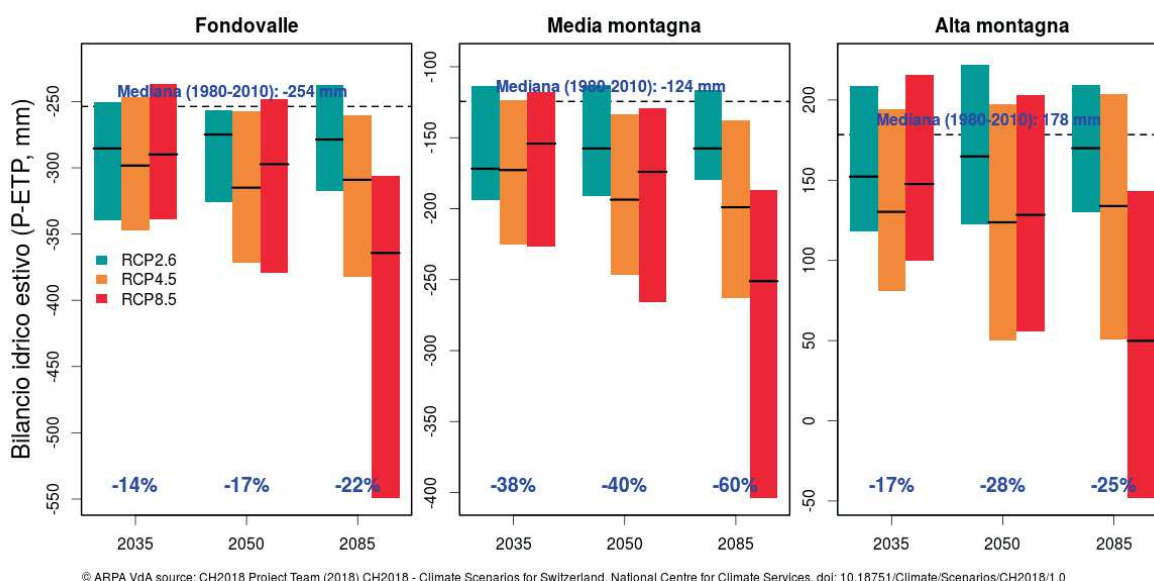


Fig. 7.1. *Variatione del bilancio idrico estivo (P-ETP). Il colore delle barre rappresenta i diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5 e 8.5). L'altezza delle barre rappresenta la variabilità dei diversi modelli climatici (10° e 90° percentile). La linea orizzontale nera al centro di ogni barra indica la mediana dei modelli. La linea nera tratteggiata indica il valore di riferimento medio nel periodo 1980-2010. Fonte: Rapport Climat 2019, CH2018 Project Team (2018).*

Per una combinazione di differenze altitudinali negli scenari di temperatura e precipitazione, **la fascia di quota che sarà maggiormente impattata è quella della media montagna** dove sono attese riduzioni del bilancio idrico estivo comprese tra il 40% e il 60%. Questo risultato è particolarmente importante perché evidenzia la potenziale vulnerabilità delle attività agricole legate all'allevamento e alla produzione lattiero-casearia, che sono basate sull'utilizzo di pascoli in media montagna durante la stagione estiva: la produttività dei pascoli subalpini ed alpini rischia di essere decisamente esposta agli impatti negativi della siccità estiva che potrebbe limitare e/o annullare i potenziali effetti benefici dell'allungamento della stagione vegetativa legato all'aumento delle temperature e alla riduzione della durata del manto nevoso.



8. CONCLUSIONI

Questo report presenta una sintesi degli scenari di cambiamento climatico attesi per la Regione ed una prima analisi degli impatti sul ciclo idrologico (nelle sue varie componenti: temperature, precipitazioni, neve, spessore ghiacciai, portate nei corsi d'acqua, fabbisogni idrici). Trattando in modo complementare il tema della risorsa idrica nivale e glaciale, i regimi idrologici e i rischi di piena e di siccità, rappresenta un primo quadro di conoscenze funzionale alla valutazione della disponibilità idrica futura regionale.

Un condensato delle principali risultanze dello studio è stato riportato nelle premesse.

I risultati forniscono inoltre un'ulteriore prospettiva dalla quale inquadrare l'azione pianificatoria dell'amministrazione regionale (e.g. Piano di sviluppo sostenibile, Piano di adattamento ai cambiamenti climatici, Piano Energetico Ambientale Regionale, Piano di Tutela delle Acque, Piano di Sviluppo Rurale, ...) che richiede un approccio trasversale, multidisciplinare e che tenga conto dei cambiamenti climatici come forzante sistemica dell'evoluzione futura delle risorse naturali e dei settori socio-economici della Regione.

Ancora molti saranno gli aspetti da approfondire nel futuro, tra cui si possono menzionare:

- stima della disponibilità idrica attuale e futura che tenga conto in modo congiunto della disponibilità naturale e degli usi (umano, idroelettrico, irriguo, industriale, ...);
- affinamento della catena modellistica: utilizzo integrato di diverse catene modellistiche per una migliore stima in termini probabilistici dei cambiamenti del clima e del ciclo idrologico (es. CMIP6);
- approfondimenti a livello di singoli bacini o unità territoriali (comuni, insiemi di comuni, comunità montane) dell'evoluzione dei regimi idrologici, della disponibilità idrica e del rischio idrologico;
- analisi conoscitive e studi di fattibilità relativi alla realizzazione di nuovi bacini di stoccaggio;
- analisi distribuita dell'evoluzione del fabbisogno irriguo basato su stime più precise del bilancio idrico estivo;
- quantificazione e stima dell'evoluzione futura delle risorse idriche attualmente non considerate nel report: ambienti periglaciali, acque sotterranee, ...;
- analisi sull'impatto dei cambiamenti climatici sulla temperatura dei corpi idrici e sui relativi impatti sugli ecosistemi;
- valutazione della mobilizzazione di nutrienti e sedimenti e del relativo trasporto a valle a seguito della fusione dei ghiacciai e della degradazione del permafrost;
- interazione con altri settori al fine di considerare anche le costruende strategie di adattamento nella rivisitazione degli scenari di cambiamento per valutare anche quantitativamente la mitigazione degli impatti in relazione alle varie misure ipotizzate.



Allegato 1: Descrizione scenari climatici e modelli utilizzati

Come input per la modellistica idrologica sono state utilizzate le proiezioni climatiche prodotte dal modello RCA4 (Rossby Centre regional atmospheric model) come Regional Climate Model (RCM) innestato in EC-EARTH (<https://www.ec-earth.org/>) come Global Circulation Model (GCM). Questa scelta è stata dettata dal fatto che, tra le decine di configurazioni dei modelli climatici disponibili, la coppia EC-EARTH + RCA4 risponde ai requisiti richiesti in termini di risoluzione e completezza delle configurazioni. La risoluzione spaziale delle simulazioni di RCA4 è infatti di 0.11° (circa 12 km), con una risoluzione temporale di 3 ore (tranne per l'umidità relativa dell'aria che è di 6 ore). L'accoppiamento tra modellistica climatica e idrologica permette di valutare l'impatto dei trend su precipitazione e temperatura sul ciclo idrologico.

Si noti invece che, per le analisi statistiche sulle sole variabili meteorologiche, è stato utilizzato l'intero data base di CORDEX, come riadattato da esperienze di ricerca Svizzere (CH2018). Il data base completo di CORDEX comprende anche l'evoluzione a passo giornaliero di variabili meteo non direttamente utilizzabili nella modellistica idrologica scelta (es. temperatura media giornaliera). Le simulazioni climatiche utilizzate come input per la modellistica idrologica riproducono mediamente i trend osservati dall'ensemble.

CH2018

Gli scenari climatici CH2018 (CH2018) sono basati sugli scenari EURO-CORDEX che combinano modelli climatici globali (GCM) e regionali (RCM). In particolare CH2018 contiene 68 simulazioni EURO-CORDEX: 12 per lo scenario RCP2.6, 25 per RCP4.5 e 31 per RCP8.5. I prodotti CH2018 utilizzati in questo report (DAILY-LOCAL) consistono in serie giornaliere, dal 1981 al 2099, di 5 variabili: temperatura media minima e massima, precipitazione giornaliera e umidità relativa. I dati sono disponibili a livello di 86 stazioni della rete MeteoSuisse. Tra queste ne sono state scelte 11 usando il criterio degli analoghi climatici (Dahinden et al. 2017). E' stato calcolato un indice di similarità per temperatura e precipitazione tra ogni stazione della rete MeteoSuisse e le stazioni della rete regionale nel periodo 2000-2019 e sono state selezionate le stazioni con le caratteristiche più simili a quelle regionali.

Simulazioni climatiche CORDEX e modello idrologico Continuum

Gli ingredienti fondamentali per caratterizzare quantitativamente possibili evoluzioni future del regime idrologico in Valle d'Aosta sono: (i) scenari di evoluzione, per l'area di interesse, delle variabili micro-meteorologiche più rilevanti in termini di risorsa idrica, tra cui, in primis, precipitazione e temperatura dell'aria; (ii) un modello idrologico sviluppato per il territorio regionale, e quindi in grado di valutare la risposta delle grandezze idrologiche di maggior interesse in Valle d'Aosta agli scenari meteorologici di cui sopra. Alcune di queste grandezze di interesse sono l'accumulo nevoso in quota, la variazione dello spessore dei ghiacciai e la portata nei più importanti corsi d'acqua della Regione.

Come detto all'inizio di questo Allegato, gli scenari meteorologici futuri qui utilizzati sono stati ottenuti tramite l'iniziativa internazionale CORDEX, selezionando, tra i vari prodotti disponibili, le simulazioni del modello regionale RCA4 accoppiato con il modello globale EC-EARTH. Si sottolinea che la risoluzione spaziale di tali scenari meteorologici è di 12 km: i risultati delle analisi presentate in questo report sono quindi interpretabili a partire da tale scala, mentre valutazioni su scale spaziali più fini sarebbero molto incerte e non robuste.



In un ambiente complesso come quello Alpino, gli output dei modelli meteorologici tendono anche a presentare un bias locale sistematico rispetto alle corrispondenti osservazioni. Ciò significa che l'andamento di larga scala delle variabili meteo e le loro variazioni nel tempo sono generalmente meglio riprodotti rispetto ai valori assoluti in un preciso punto ed istante. Per mitigare questo problema, gli scenari di precipitazione e temperatura sono stati corretti utilizzando la tecnica del "quantile mapping" su base mensile. Questo approccio mantiene i trend temporali prodotti dal modello climatico, e, in parte, la struttura spaziale e temporale degli eventi, ma al contempo permette di rimuovere i bias sistematici locali. Dettagli sull'approccio utilizzato sono forniti in Silvestro et al. 2018, dove la stessa tecnica di bias correction è stata applicata sulla Regione Liguria.

Gli scenari meteo futuri così rimodulati sono stati usati come input per il sistema modellistico attualmente in uso presso il Centro Funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta a fini di previsione di piena e gestione delle risorse idriche. Il sistema consta dei modelli S3M e Continuum. S3M è un modello nivo-glaciale distribuito che simula l'evoluzione nel tempo del manto nivale e dei corpi glaciali; esso include processi quali l'accumulo di precipitazione solida, la densificazione del manto nevoso e la fusione nivale e glaciale.

Continuum è invece un modello idrologico spazialmente distribuito che simula processi quali l'infiltrazione, la formazione e propagazione dei deflussi superficiale e ipodermico, la percolazione, l'evapotraspirazione, la dinamica di falda e la sua eventuale rialimentazione dei corpi idrici superficiali. Entrambi i modelli sono stati implementati su tutta la Regione con risoluzione spaziale di 240 m e passo temporale orario. Essi hanno prodotto le serie temporali delle variabili idrologiche di maggior interesse discusse in questo report. Maggiori dettagli su S3M e Continuum sono reperibili rispettivamente in Avanzi et al. 2021, Boni et al. 2010 e Silvestro et al. 2013.

Rispetto alla versione del modello in uso presso il Centro Funzionale Regionale per simulazioni con orizzonte temporale da breve a medio, la struttura di S3M è stata modificata per includere il bilancio di massa glaciale. In simulazioni climatiche di lungo termine è infatti necessario poter tenere conto del fatto che, con il passare degli anni, forzanti meteorologiche avverse come quelle osservate negli ultimi decenni potrebbero portare ad una riduzione degli apparati glaciali e, al limite, alla loro scomparsa.

Per inizializzare S3M è stato quindi necessario stimare l'attuale spessore glaciale a scala regionale. Per fare ciò, ARPA Valle d'Aosta ha inizialmente censito tutti gli apparati glaciali presenti entro il territorio regionale e, per ciascuno di essi, ha stimato lo spessore glaciale in maniera distribuita usando l'approccio GlabTop di Paul e Linsbauer 2012. Tale modello assume che lo spessore del ghiacciaio dipenda dalla morfologia superficiale, a sua volta funzione dello sforzo di taglio medio alla base del ghiaccio. Quest'ultimo dipende dal gradiente di bilancio di massa e dall'intervallo di quote altimetriche su cui si sviluppa il corpo glaciale. Impiegando solo tre dataset di input (perimetri glaciali, modello digitale della superficie e linee di flusso centrali) GlabTop calcola i valori di spessore del ghiaccio per alcuni punti e realizza l'interpolazione spaziale del bedrock entro i limiti del ghiacciaio.

A partire dalla condizione iniziale così stimata, S3M ha simulato in ogni cella del dominio la variazione nel tempo dello spessore glaciale in funzione dell'accumulo invernale e della fusione estiva. Secondo l'attuale implementazione di S3M, una volta che in una certa cella la fusione totale raggiunge il valore di spessore glaciale iniziale, il ghiacciaio in quel punto si ritiene scomparso. È importante notare come venga così trascurato totalmente il ruolo della redistribuzione di massa glaciale (vale a dire il fatto che i ghiacciai si muovono); questo approccio sarà superato nell'ambito delle attività relative alla convenzione attualmente in essere tra Centro Funzionale Regionale, Fondazione CIMA, ARPA Valle d'Aosta e CVA S.p.A..



Bibliografia

Avanzi, F., Gabellani, S., Delogu, F., Silvestro, F., Cremonese, E., Morra di Cella, U., Ratto, S.M. & Stevenin, H. (2021). RS3M 5.1: a distributed cryospheric model with dry and wet snow, data assimilation, glacier mass balance, and debris-driven melt. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-50.

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.-I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., and Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759-794.

Bongio, M., Avanzi, F., & De Michele, C. (2016). Hydroelectric power generation in an Alpine basin: future water-energy scenarios in a run-of-the-river plant. *Advances in Water Resources*, 94, 318-331.

Boni G., F. Castelli, S. Gabellani, G. Macchiavello, R. Rudari, Assimilation of MODIS snow cover and real time snow depth point data in a snow dynamic model 1788-1791, 10.1109/IGARSS.2010.5648989, 2010.

Cremonese E., Carlson B., Filippa G., Pogliotti P., Alvarez I., Fosson JP., Ravanel L. & Delestrade A. AdaPT-Mont-Blanc: Rapport Climat: Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rédigé dans le cadre du projet AdaPTMont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020. Novembre, 2019, 101 p.

CH2018 (2018), CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.

Dahinden, F., Fischer, E.M., Knutti R. (2017) Future local climate unlike currently observed anywhere. *Environmental Research Letters*, 12, 084004.

FOEN (ed.) 2021: Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. Environmental Studies No.2101: 125 p.

Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A., & Schär, C. (2018). Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12(1), 1-24.

Gabellani S., Campo L., Dolia D. (2018) Analisi dell'impatto sul ciclo idrologico degli scenari di cambiamento climatico. Rapporto interno alla "convenzione tra Centro funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta e Fondazione CIMA per la definizione dei bilanci idrici di 12 sottobacini, l'analisi di alcuni scenari di cambiamento climatico, nonché per ampliare l'assistenza tecnico-scientifica e la formazione su temi specialistici al Centro funzionale regionale". 179 p.

Global Carbon Budget 2020, by Pierre Friedlingstein, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Are Olsen, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Stephen Sitch, Corinne Le Quéré, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Simone Alin, Luiz E. O. C. Aragão, Almut Arneth, Vivek Arora, Nicholas R. Bates, Meike Becker, Alice Benoit-Cattin, Henry C. Bittig, Laurent Bopp, Selma Bultan, Naveen Chandra, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Wiley Evans, Liesbeth Florentie, Gruber, Ian Harris, Kerstin Hartung, Vanessa Haverd, Richard A. Houghton, Tatiana Ilyina, Atul K. Jain,



Piers M. Forster, Thomas Gasser, Marion Gehlen, Dennis Gilfillan, Thanos Gkritzalis, Luke Gregor, Nicolas Andrew Lenton, Sebastian Lienert, Zhu Liu, Danica Lombardozzi, Gregg Marland, Nicolas Metzger, David R. Munro, Julia E. M. S. Nabel, Shin-Ichiro Nakaoka, Yosuke Niwa, Kevin O'Brien, Tsuneo Ono, Paul I. Palmer, Denis Pierrot, Benjamin Poulter, Laure Resplandy, Eddy Robertson, Christian Rödenbeck, Jörg Schwinger, Roland Séférian, Ingunn Skjelvan, Adam J. P. Smith, Adrienne J. Sutton, Toste Tanhua, Pieter P. Tans, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook, Guido van der Werf, Nicolas Vuichard, Anthony P. Walker, Rik Wanninkhof, Andrew J. Watson, David Willis, Andrew J. Wiltshire, Wenping Yuan, Xu Yue, and Sönke Zaehle (2020), *Earth System Science Data*, 12, 3269–3340, 2020, DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020.

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138-1151.

Golombek, R., Kittelsen, S. A., & Haddeland, I. (2012). Climate change: impacts on electricity markets in Western Europe. *Climatic change*, 113(2), 357-370.

Gaudard, L., Avanzi, F., & De Michele, C. (2018). Seasonal aspects of the energy-water nexus: The case of a run-of-the-river hydropower plant. *Applied Energy*, 210, 604-612.

Haeberli W., Oerlemans J., Zemp, M., 2019, The future of alpine glaciers and beyond. In: *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, doi:10.1093/acrefore/9780190228620.013.769.

Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.

Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC, 2018, SR1.5: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IPCC, 2019a, SRCL. *Special Report on Climate Change and Land* (<https://www.ipcc.ch/report/srcl/>).

IPCC, 2019b, SROCC: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.

Lehner, B., Czisch, G., & Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energy Policy*, 33(7), 839-855.

Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M., & Lehning, M. (2017). How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, 11(1), 517.



- Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chio-gna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., Notarnicola, C., Petitta, M., Scherrer, S. C., Strasser, U., Winkler, M., Zebisch, M., Cicogna, A., Cremonini, R., Debernardi, A., Faletto, M., Gaddo, M., Giovannini, L., Mercalli, L., Soubeyroux, J.-M., Sušnik, A., Trenti, A., Urbani, S., and Weilguni, V.: Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019, *The Cryosphere*, 15, 1343–1382, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>, 2021.
- Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J. J., Wang, J., & Werner, J. P. (2019). No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, 571(7766), 550-554.
- Patro, E. R., De Michele, C., & Avanzi, F. (2018). Future perspectives of run-of-the-river hydropower and the impact of glaciers' shrinkage: The case of Italian Alps. *Applied Energy*, 231, 699-713.
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraër, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H.; Greenwood, G.; Hashmi, M. Z.; Liu, X. D.; Miller, J. R.; Ning, L.; Ohmura, A.; Palazzi, E.; Rangwala, I.; Schöner, W.; Se-verskiy, I.; Shahgedanova, M.; Wang, M. B.; Williamson, S. N.; Yang, D. Q. & Mountain Research Initiative EDW Working Group. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature climate change*, 5(5), 424.
- Paul, F., & Linsbauer, A., (2012) Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines, and a DEM, *International Journal of Geographical Information Science*, 26:7, 1173-1190, DOI: 10.1080/13658816.2011.627859.
- Schaefli, B. (2015). Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and mode-lers to interpret and design climate change impact assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 271-289.
- Schaefli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renewable energy*, 132, 615-627.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614.
- Silvestro, F., Gabellani, S., Delogu, F., Rudari, R., & Boni, G. (2013). Exploiting remote sensing land surface temperature in distributed hydrological modelling: the example of the Continuum model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 39.
- Silvestro, F., Parodi, A., Campo, L., and Ferraris, L. (2018). Analysis of the streamflow extremes and long term water balance in Liguria Region of Italy using a cloud permitting grid spacing reanalysis dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-339>, 2018.
- UNEP, United Nations Environment Programme (2019). Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi.
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., & Morin, S. (2018). Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12(4), 1249-1271.
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Cryosphere*, 13(4), 1125-1146.
- Zemp M., Paul F., Hoelzle M., Haeberli W., 2006, Glacier fluctuations in the European Alps 1850 – 2000: an overview and spatiotemporal analysis of available data. In: *The Darkening Peaks: Glacial Retreat in Scientific and Social Context*, edited by B. Orlove, E. Wiegandt, and B. Luckman, Univ. Calif. Press, Berkeley.





Région Autonome
Vallée d'Aoste
Regione Autonoma
Valle d'Aosta



CENTRO FUNZIONALE
REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA



R E S E A R C H ■
cima FOUNDATION

**OBSERVE TO PREDICT,
PREDICT TO PREVENT.**



FONDAZIONE
MONTAGNA SICURA
MONTAGNE SÛRE