

SIMULAZIONE della FUSIONE NIVO-GLACIALE

Francesca Carletti¹,
Adrien Michel^{1,2},
Francesca Casale³,
Daniele Bocchiola³,
Michael Lehning^{1,2}
e Mathias Bavay¹

¹ WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Davos, Svizzera

² Scuola di Architettura e di Ingegneria Civile e Ambientale, Scuola Politecnica Federale di Losanna (EPFL), Svizzera

³ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Italia.
daniele.bocchiola@polimi.it

Confronto di modelli idrologici con diverso livello di complessità, applicati nelle regioni alpine, in scenario di cambiamento climatico.

A comparison of hydrological models with different level of complexity in Alpine regions in the context of climate change

This study compares the ability of two degree-day models (Poli-Hydro and a degree-day implementation of Alpine3D) and one full energy-balance melt model (Alpine3D) to predict the discharge on two partly glacierized Alpine catchments of different size and intensity of exploitation, under present conditions and climate change as projected at the end of the century. For present climate, the magnitude of snow melt predicted by Poli-Hydro is sensibly lower than the one predicted by the other melt schemes, and the melting season is delayed by one month. This difference can be explained by the combined effect of the reduced complexity of the melting scheme and the reduced computational temporal resolution. The degree-day implementation of Alpine3D reproduces a melt season closer to the one obtained with its full solver; in fact, the onset of the degree-day mode still depends upon the full energy-balance solver, thus not bringing any particular benefit in terms of inputs and computational load, unlike with Poli-Hydro. Under climate change conditions, Alpine3D is more sensitive than Poli-Hydro, reproducing discharge curves and volumes shifted by one month earlier as a consequence of the earlier onset of snow melt. Despite their benefits, the coarser temporal computational resolution and the fixed monthly degree-days of simpler melt models like Poli-Hydro make them controversial to use for climate change applications with respect to energy-balance ones. Nevertheless, under strong river regulation, the influence of calibration might even overshadow the benefits of a full energy-balance scheme.

Questo studio mette a confronto un modello con approccio gradi-giorno (Degree-Day) per la simulazione della fusione nivo-glaciale (Poli-Hydro), con un modello basato su un bilancio energetico completo (Alpine3D). Il confronto viene effettuato sulla capacità dei due modelli di simulare la portata su due bacini alpini, il bacino del Mera e quello del Dischma, parzialmente coperti da ghiacciai, di diverse dimensioni e con diversa intensità dello sfruttamento antropico della risorsa idrica, sia nelle condizioni attuali che in scenari di cambiamento climatico. Per il clima attuale, l'entità della fusione della neve prevista da Poli-Hydro è sensibilmente inferiore a quella prevista da Alpine3D e la stagione di fusione è ritardata di un mese. Questa differenza può essere spiegata dall'effetto combinato della ridotta complessità dello schema di fusione e dalla ridotta risoluzione temporale. In condizioni di cambiamento climatico, Alpine3D è più sensibile di Poli-Hydro, poiché riproduce le curve di portata ed i volumi di deflusso anticipati di circa un mese, in conseguenza dell'inizio anticipato della fusione nivale. Nonostante i loro indubbi vantaggi in termini di onere computazionale, la risoluzione computazionale temporale più grossolana e i gradi-giorno mensili fissi di modelli di fusione più semplici come Poli-Hydro li rendono controversi da utilizzare per applicazioni relative ai cambiamenti climatici rispetto a quelle di bilancio energetico. Tuttavia, in caso di forte regolamentazione fluviale, l'influenza della calibrazione potrebbe persino oscurare i vantaggi di un metodo basato su bilancio energetico completo.



INTRODUZIONE

L'idrologia dei bacini idrografici di alta montagna è dominata dalla fusione nivo-glaciale, ed è quindi particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici. La quantità di deflusso e il suo andamento stagionale cambieranno in futuro, con impatti sull'ecologia, sulla gestione delle risorse idriche e sulla qualità generale della vita nelle aree abitate. Pertanto, lo sviluppo di modelli che riproducano proiezioni affidabili della risposta della portata dei bacini alpini al cambiamento climatico è un passo cruciale per pianificare la gestione delle risorse.

I modelli idrologici spesso utilizzano approcci di tipo grado-giorno, *Degree-Day*, oppure eseguono un bilancio energetico per valutare la fusione nivo-glaciale. I modelli *Degree-Day* potrebbero essere preferibili in quanto riducono il carico computazionale e richiedono meno dati in ingresso, fra i più comunemente disponibili, in sostanza dati di temperature e in alcuni casi di radiazione solare (Zappa et al., 2003). Tuttavia, quando si considerano i cambiamenti climatici, l'uso di tali modelli può non risultare ottimale in quanto il valore dei parametri calibrati può cambiare al variare delle condizioni climatiche. Questo aspetto è particolarmente rilevante per i bacini glaciali, poiché i modelli devono gestire

la fusione nivo-glaciale indotta dal riscaldamento globale e dunque anche la variazione della superficie dei ghiacciai. In questo studio vengono confrontati due modelli diversi: il modello su base *Degree-Day* Poli-Hydro (Bocchiola et al., 2018; Casale et al., 2020) e la catena modellistica Alpine3D+StreamFlow nella sua configurazione completa di bilancio energetico (Gallice et al., 2016; Lehning et al., 2006). L'obiettivo è quello di valutare se e come un tipo di schema di fusione e/o modello idrologico sia migliore dell'altro, al fine di ottenere una migliore comprensione dei limiti e del potenziale dei diversi modelli applicati a diversi tipi di bacini fluviali.

Alpine3D è un modello fisicamente basato, che descrive con precisione molti processi superficiali in contesto alpino. Il modello non richiede in linea di principio alcuna calibrazione e può essere utilizzato in qualsiasi nuovo bacino. Il modello idrologico distribuito StreamFlow (Gallice et al., 2016) basato su Alpine3D è stato specificamente progettato per i bacini idrografici alpini con la capacità di simulare la portata e le temperature del flusso.

Poli-Hydro è stato utilizzato in una vasta gamma di condizioni, da zone di alta quota, fortemente criosferiche, a zone di bassa quota, aride o semi-aride, con o

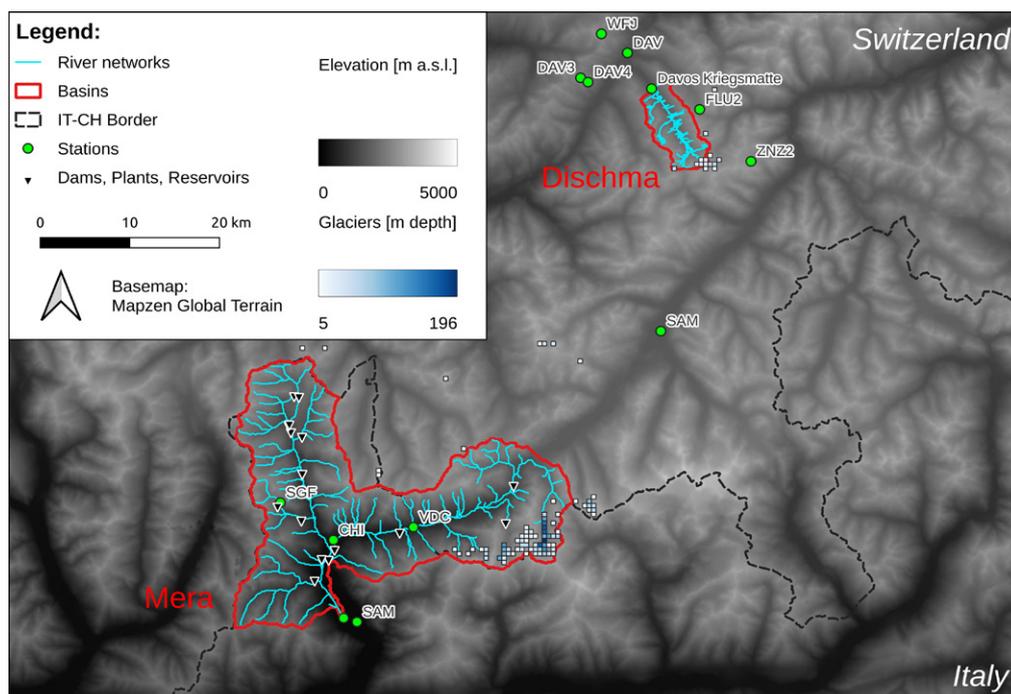
senza contributi di neve o ghiaccio ed in bacini idrografici di dimensioni molto variabili (da ~10 a ~10000 km²), con un'accuratezza soddisfacente nel riprodurre le portate, le dinamiche nivo-glaciali ed i contributi criosferici.

Questo studio presenta i risultati delle simulazioni di portata e delle principali componenti del deflusso, cioè le precipitazioni e la fusione del manto nevoso e dei ghiacciai, con particolare attenzione alla dinamica della fusione. Lo studio viene eseguito in due bacini idrografici alpini che differiscono per dimensioni, intensità di sfruttamento e qualità di copertura dei dati. Il primo è il bacino del Dischma, di dimensioni molto ridotte e dal regime quasi naturale, dove vari studi sono stati condotti in precedenza, grazie anche al monitoraggio per mezzo di vicine stazioni ad alta quota. Il secondo è il bacino imbrifero del Mera, più esteso e transfrontaliero, che nasce e scorre in parte in Svizzera per estendersi sino alla Valchiavenna in Italia. Il bacino del Mera è circa 10 volte più esteso di quello del Dischma e le sue risorse sono altamente sfruttate attraverso operazioni idroelettriche. Qui le osservazioni meteorologiche e le misure sono comparativamente più scarse (1).

BACINI IDROGRAFICI E DATI

Il bacino idrografico del Mera sottende il fiume omonimo, che scorre attraverso la Svizzera e l'Italia (Fig. 1). La sorgente si trova vicino al Piz Mungiroi, nel cantone Svizzero dei Grigioni, scorre poi a est verso il Passo del Maloja, gira a ovest attraverso la Val Bregaglia e attraversa il confine con l'Italia a Castasegna. Il Mera termina il suo corso nel lago di Como. Il bacino si estende su una superficie di 560 km², di cui il 3% è coperto da ghiacciaio. La lunghezza del fiume è di 50 km, 24 dei quali scorrono in territorio Svizzero. L'altitudine del bacino varia da 3217 a 202 m s.l.m. L'area è particolarmente importante per la produzione di energia idroelettrica, e le sue risorse idriche sono ampiamente sfruttate.

Fig. 1 - Bacini caso-studio: Mera (IT-CH) e Dischma (CH).



Il Dischma è un ripido bacino idrografico d'alta montagna situato nella parte orientale delle Alpi Svizzere (Fig. 1). Ha due sorgenti, le cui aree di origine sono lo Scalettapass e la Fuorcla da Griatsch. Entrambe le sorgenti si uniscono a Dürrboden. Il Dischmabach sfocia poi 15 km a nord-ovest nel Landwasser a Davos Dorf. La superficie del bacino è di 43.3 km² compresa una piccola parte di ghiacciaio che occupa il 2.1% dell'estensione del bacino. L'altitudine varia da 1668 a 3146 m s.l.m., con una media di 2378 m s.l.m. Nella parte più bassa, la neve si accumula tra novembre e febbraio, mentre nella parte più alta la stagione di accumulo termina in aprile.

Dati idrologici e meteorologici

Il misuratore di portata di Kriegsmatte è l'unica stazione di misura all'interno del bacino del Dischma. Il misuratore è situato a 1668 m s.l.m. sul lato destro del torrente. Il monitoraggio dei dati ha avuto inizio nel 1963 e sono forniti dall'Ufficio Federale dell'Ambiente (FOEN).

Nonostante le sue dimensioni, i dati di portata per il bacino del Mera sono disponibili solo a Samolaco, vicino al lago di Mezzola, in uno dei tratti finali del fiume. I dati di deflusso sono forniti dal Consorzio dell'Adda, a pagamento. Questa zona è sfruttata abbastanza intensamente da un complesso sistema di bacini e centrali idroelettriche (Fig.1). Di conseguenza, la modellazione del deflusso può essere disturbata a causa della regolazione: in particolare, c'è uno spostamento dei volumi su scala oraria nei giorni lavorativi (dal lunedì al venerdì). Tuttavia, alla scala giornaliera e alle scale temporali più lunghe, i flussi non risultano eccessivamente disturbati nel complesso e la modellazione idrologica fornisce risultati accettabili.

I dati meteorologici sulla Svizzera sono in parte acquisiti dalla rete di monitoraggio automatico di MeteoSvizzera (MCH). Poiché nessuna stazione MCH è installata all'interno del bacino del Dischma, le vicine stazioni di Davos (DAV) e Weissfluhjoch (WFJ) forniscono valori



orari per la temperatura dell'aria (TA), le precipitazioni (PSUM), la velocità del vento (VW), l'umidità relativa (RH) e la radiazione solare a onde corte in entrata (ISWR). Le stesse variabili, ad eccezione di PSUM, sono utilizzate per il lato svizzero del bacino idrografico della Mera alla stazione di Samedan (SAM) in alta Engadina.

La seconda parte dei dati meteorologici utilizzati per la Svizzera proviene dalla rete di stazioni IMIS (Intercantonal Measurement and Information System), gestita dall'Istituto WSL per la Ricerca su Neve e Valanghe (SLF). La rete di stazioni IMIS non fornisce misure ISWR. Inoltre, i pluviometri di IMIS non sono riscaldati, quindi le precipitazioni invernali sono ottenute indirettamente sulla base delle variazioni della profondità della neve e dell'assessamento della stessa calcolato dal modello SNOWPACK (Lehning et al., 2002). Le informazioni utilizzate in questo studio provengono dalle stazioni IMIS situate a Davos (DAV), Flüelapass (FLU) e ZerneZ (ZNZ). In Valchiavenna esistono solo poche serie temporali osservative negli ultimi 30 anni, fornite da ARPA Lombardia, poiché la prima stazione meteorologica automatica è stata installata nella regione italiana della Lombardia solo alla fine degli anni '80. Le stazioni utilizzate in questo lavoro sono sei e forniscono dati di precipitazione, temperatura e radiazione ad onda corta in ingresso, con riferimento a diversi periodi temporali tra il 1995 e il 2018.

Dati di cambiamento climatico

Le proiezioni di cambiamento climatico effettuate in questo lavoro si basano sugli scenari di cambiamento climatico CH2018. Questi scenari sono stati derivati dal nuovo ensemble di simulazioni climatiche EURO-CORDEX con modelli climatici regionali (RCM). Le simulazioni RCM di EURO-CORDEX sono state eseguite utilizzando un dominio comune del modello centrato sull'Europa occidentale. Gli RCM costituiscono una disaggregazione, o *downscaling* dinamico delle proiezioni globali più grossolane (dai modelli climatici globali, GCM) ad una risoluzione che è più adatta a rappresentare la topografia della Svizzera. Tuttavia, le simulazioni RCM da EURO-CORDEX forniscono informazioni ad una risoluzione spaziale di 0.11° o 0.44° circa, comunque troppo grossolana per valutazioni di impatto locale e che potrebbe portare a distorsioni, specialmente per orografie complesse. CH2018 ha applicato il *quantile mapping* (accoppiamento in base alla frequenza di accadimento su base annua) per il *downscaling* spaziale, sia alle osservazioni a scala di stazione sia alle osservazioni a griglia a 2 km per derivare proiezioni specifiche per il sito di interesse. Così, CH2018 può fornire proiezioni a risoluzione giornaliera, per la rete di stazioni meteorologiche automatiche MCH. Le variabili disponibili sono la temperatura media, minima e massima dell'aria vicino alla superficie, l'umidità relativa, la velocità del vento, la

NEVE

precipitazione cumulata e la radiazione ad onda corta in ingresso.

I 68 risultati delle proiezioni modellistiche vengono forniti secondo tre scenari di emissione: RCP8.5, RCP4.5 e RCP2.6. In questo documento, abbiamo selezionato un sottoinsieme di 17 proiezioni. La disponibilità di scenari CH2018 disaggregati è limitata alla rete di stazioni MCH. Adottiamo qui la metodologia presentata da (Rajczak et al., 2016) e la applichiamo alle stazioni IMIS. Questa metodologia *Quantile Mapping* (QM) permette il trasferimento spaziale delle proiezioni climatiche future dal set di stazioni MCH CH2018 a una rete diversa. Estendiamo qui il set di dati anche alla rete ARPA per avere dati coerenti sui cambiamenti climatici per tutte le nostre stazioni.

La procedura si può riassumere come segue: come primo passo, la cosiddetta *Most Representative Station* (MRS) è

selezionata dalla rete MCH CH2018 per ogni stazione ARPA. La MRS è selezionata massimizzando un punteggio di correlazione combinata tra la temperatura media giornaliera osservata e le serie temporali cumulate di precipitazioni giornaliere. Il punteggio di correlazione combinato è calcolato su un arco di tempo che dipende dalle prime osservazioni disponibili all'interno della rete ARPA. Gli scenari climatici vengono corretti per corrispondere alle serie temporali osservate MCH CH2018 e, come secondo passo, vengono trasferiti spazialmente dalla MRS selezionata al sito scarsamente monitorato all'interno della rete ARPA. Questo metodo è stato appositamente studiato per migliorare le proiezioni climatiche per i siti affetti da scarsità di dati, affrontando anche il fatto che la stazione più vicina non è necessariamente la più rappresentativa di quella osservata. Il trasferimento spaziale QM viene quindi applicato all'insieme delle stazioni ARPA, ottenendo così proiezioni climatiche fino alla fine del secolo. Le simulazioni sono eseguite per i decenni 1991-2000 e 2081-2090. Ci riferiremo al primo decennio come "periodo di riferimento", mentre all'ultimo come "periodo di cambiamento climatico".

Dati geomorfologici

I modelli digitali del terreno DEM utilizzati nei modelli sono stati aggregati per ottenere una risoluzione di 500 m su entrambi i bacini.

Per entrambi i bacini idrografici, si sono utilizzate mappe di spessore dei ghiacciai di (Zekollari et al., 2019). Per mezzo di un modello innovativo chiamato GloGEMflow, gli autori hanno sviluppato la prima modellazione regionale dei ghiacciai alpini, utilizzando gli output dei modelli climatici ad alta risoluzione EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014; Kotlarski et al., 2014).

Tali mappe sono qui utilizzate come condizione iniziale per la simulazione passata (serie storica) e futura (i.e. nella condizione di cambiamento climatico). Per i periodi storici, tutte le calibrazioni

sono eseguite con la mappa dei ghiacciai del 2005 come condizione iniziale. L'evoluzione dei ghiacciai è poi simulata secondo i due modelli di fusione.

METODI

Descrizione dei modelli

In questo studio vengono confrontati due diversi approcci/modelli. La catena modellistica fisicamente basata Alpine3D+StreamFlow nella sua versione completa di bilancio energetico (A3D+SF) e il modello *Degree-Day* Poli-Hydro (PH).

Entrambi i modelli si basano su un *routing* di tipo semi-distribuito, con tempi di calcolo considerevolmente inferiori rispetto ai modelli completamente distribuiti.

Il modello Alpine3D è un modello deterministico e spazialmente distribuito progettato per la simulazione ad alta risoluzione dei processi nevosi in aree topograficamente complesse. In A3D, il modello SNOWPACK è applicato ad ogni cella del bacino. SNOWPACK è un modello fisico 1-D multistrato di neve e suolo originariamente sviluppato per l'allerta valanghe. Offre una descrizione dettagliata della microstruttura della neve e risolve i cambiamenti di fase nella neve su base fisica. SNOWPACK contiene anche un modulo a due strati che simula la micro-meteorologia nella foresta, l'evapotraspirazione e l'interazione tra alberi e neve, inclusa l'intercettazione della neve.

All'interno di A3D, il modello SNOWPACK gira per ogni cella del bacino idrografico ad una risoluzione temporale di 15 minuti, mentre le condizioni al contorno forzanti vengono aggiornate su base oraria. A3D ha anche un sotto-modulo radiativo che permette di tenere in considerazione l'ombreggiamento topografico, la riflessione del terreno e la nuvolosità atmosferica, per meglio determinare la distribuzione della radiazione a onda corta. Gli effetti topografici influenzano profondamente il bilancio di radiazione nelle regioni di montagna. Infatti, l'intensità dei flussi radiativi in en-



trata e in uscita dipende da molti fattori come l'angolo di inclinazione, l'ombreggiamento e le proprietà della superficie. L'output di deflusso prodotto da A3D viene raccolto in ogni sottobacino in StreamFlow ed il tempo di residenza nel suolo viene determinato con un approccio che utilizza due serbatoi lineari. L'acqua viene poi propagata al fiume. SF viene eseguito con un *time step* orario e con una risoluzione spaziale di 100 m. Poli-Hydro è un modello idrologico spazialmente semi-distribuito a celle, adatto alla simulazione di bacini idrografici d'alta quota e poco misurati. È in grado di riprodurre la deposizione e la fusione di neve e ghiaccio attraverso il metodo *Degree-Day*.

Il modello è implementato qui a scala temporale giornaliera e si basa sull'equazione di conservazione della massa. Il bilancio di massa coinvolge le precipitazioni liquide e solide, la fusione della neve, la fusione glaciale, l'evapotraspirazione effettiva e il deflusso sub-superficiale.

Il modello prende come dati di input un DEM, una mappa di copertura del suolo ed i valori giornalieri di temperatura dell'aria e precipitazione totale. I dati di input sono griglie di dati meteo estrapolate da A3D. Questo modello calcola la formazione del flusso per mezzo di due meccanismi, superficiale e sub-superficiale. La fusione nivo-glaciale viene stimata per mezzo di un fattore di fusione. Il modello prende in considerazione i contributi della radiazione a onda corta e della temperatura.

La fusione del ghiaccio e della neve avviene solo quando la temperatura media giornaliera è superiore alla temperatura di soglia. La fusione del ghiaccio avviene sulle celle del dominio ricoperte dai ghiacciai, una volta che la fusione della neve è completata.

Il deflusso superficiale si genera solo nella condizione di suolo saturo. Il massimo contenuto d'acqua nel suolo è calcolato con il metodo *Curve Number*, a partire dalla mappa di copertura del suolo per ogni cella del bacino. Per

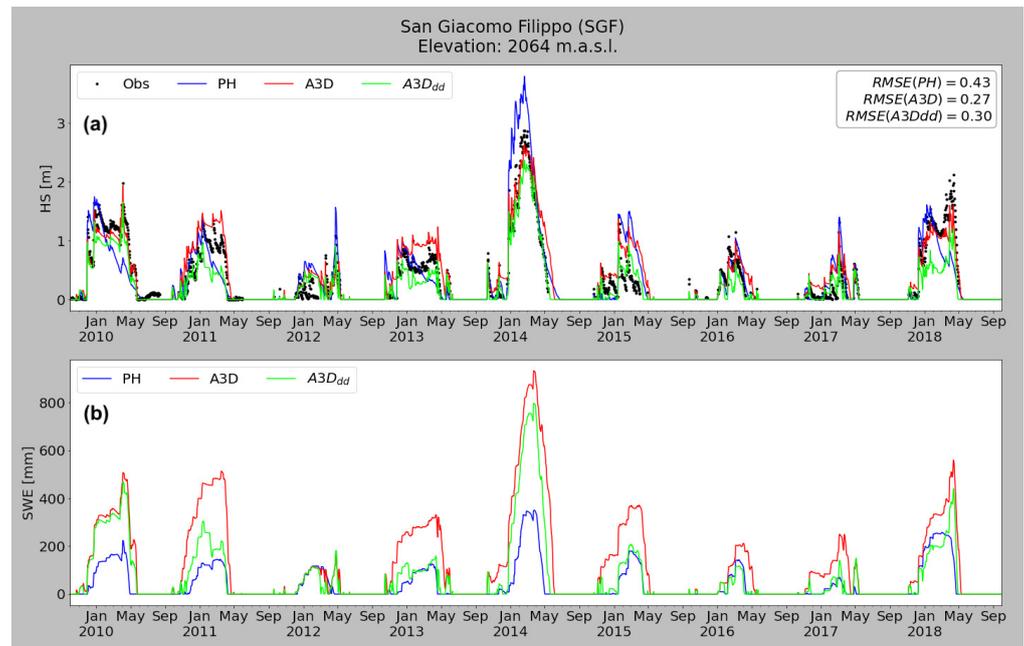


Fig. 2 - Analisi della copertura nevosa per la stazione in quota di San Giacomo Filippo all'interno del bacino del Mera. Il pannello (a) mostra l'altezza di neve (HS) modellata; il pannello (b) mostra l'equivalente in acqua (SWE) modellato.

il calcolo della portata alla sezione di chiusura del bacino sono considerati due sistemi paralleli, uno per il flusso superficiale e uno per il flusso sub-superficiale. Due idrogrammi unitari istantanei (IUH) sono valutati per ogni cella usando l'approccio di Nash per il flusso superficiale e sub-superficiale rispettivamente.

RISULTATI

Confronto tra i modelli

Come accennato nell'Introduzione, l'uso di modelli *Degree-Day* potrebbe essere preferito per il carico computazionale più leggero e la quantità minima di dati di input richiesta, ma d'altra parte, il loro utilizzo per gli studi sull'impatto dei cambiamenti climatici è discutibile. In questo studio l'obiettivo è valutare l'efficienza dei modelli nella riproduzione delle portate e dei volumi complessivi nel tratto fluviale di interesse. Tuttavia, le simulazioni delle portate dipendono fortemente dalla corretta rappresentazione della formazione del deflusso. Nello specifico, il deflusso nei bacini alpini può essere separato in due componenti principali: un flusso rapido, dovuto principalmente alle precipitazioni e al flusso superficiale, e uno "ritardato", generato dalla fusione di neve e ghiaccio e dal deflusso sub-superficiale. In questa sezione confrontiamo i modelli presentati in tre modi diversi: (1) mediante

un'analisi del manto nivale, (2) prima del ruscellamento (volume d'acqua rilasciato da ogni cella del bacino idrografico) considerando i diversi contributi al deflusso totale (precipitazioni, fusione della neve e dei ghiacciai) e (3) dopo il ruscellamento (in riferimento a portate e volumi).

In primo luogo i modelli sono realizzati con diverse soglie di temperatura per la distinzione pioggia-neve, 0°C per PH e 1.5°C per A3D. Di conseguenza, PH considera più precipitazioni liquide di A3D in inverno poiché non si accumulano sotto forma di neve (vedi Fig. 2).

La Fig. 2 mostra l'altezza della neve osservata e modellata e lo SWE all'interno del bacino del Mera nella cella in cui si trova la stazione di alta quota di San Giacomo Filippo.

Un'analisi simile non è stata possibile per Dischma, perché il set di dati utilizzato non conteneva misure di altezza neve o SWE all'interno del bacino stesso. Le prestazioni dei modelli nella riproduzione dell'altezza di neve sono valutate tramite l'RMSE. L'altezza della neve è riprodotta al meglio da A3D, che fornisce l'RMSE più basso (in alto a destra di Fig. 2 pannello (a)). PH mostra l'RMSE più alto. Errori comuni per A3D sembrano essere legati alla compattazione, mentre PH mostra errori di accumulo e fusione. La performance peggiore di PH può essere spiegata dalla relativa semplicità di valu-

NEVE

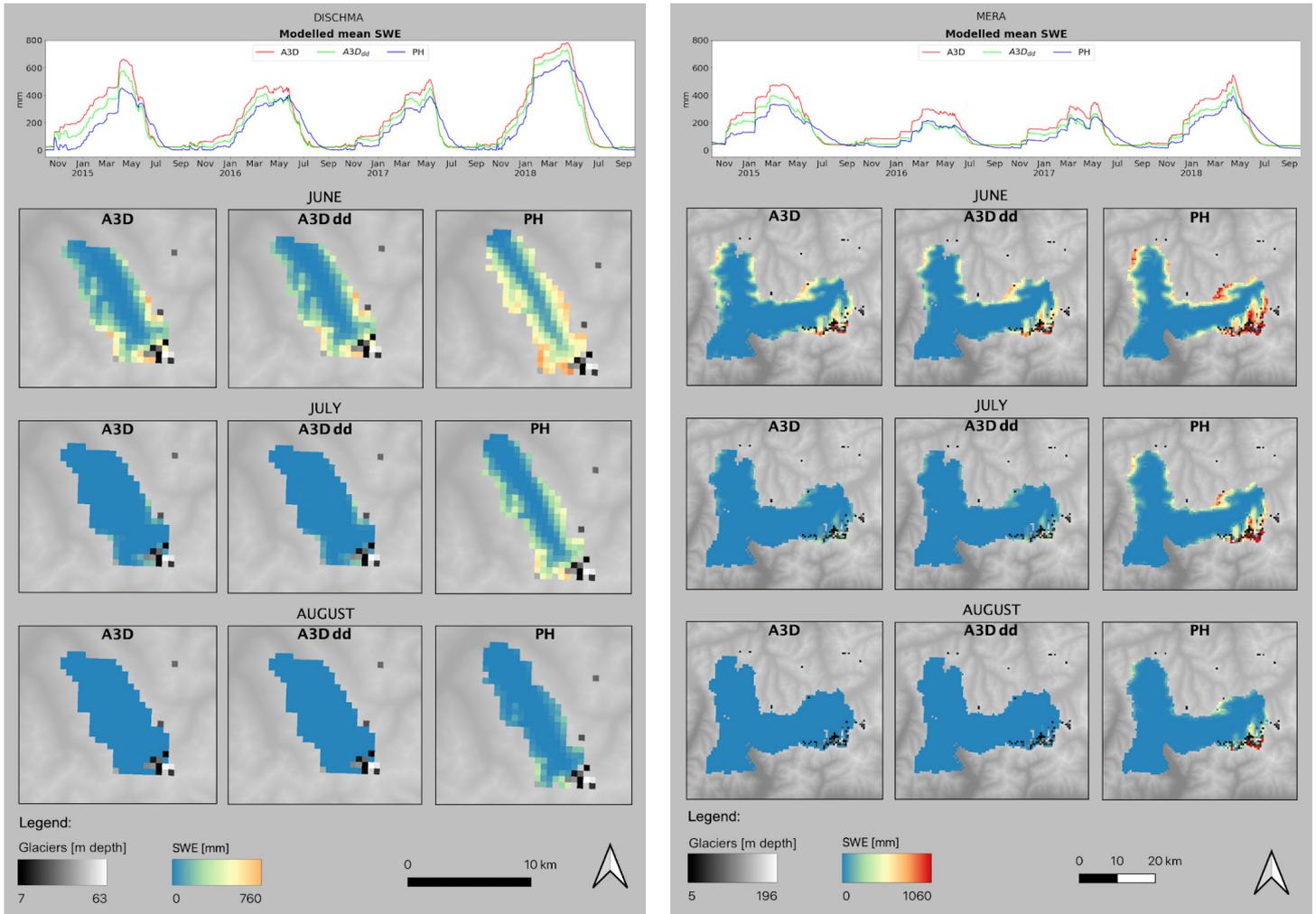


Fig. 3 e 4 - In alto: l'equivalente in acqua (SWE) medio modellato sul bacino per il periodo di validazione; in basso: mappe di SWE nei mesi estivi modellato sui bacini nei periodi di calibrazione e validazione. A sinistra: Dischma; a destra: Mera.

tazione dell'altezza di neve a partire dallo SWE, effettuata mediante l'approccio di Martinec. PH simula sistematicamente uno SWE inferiore a quello di A3D. Lo SWE modellato a scala di bacino è mostrato in Fig. 3 e 4. A3D riproduce lo SWE sistematicamente più alto rispetto a PH. I picchi di SWE sono ugualmente riprodotti da entrambi i modelli in termini di stagionalità. Tuttavia, indipendentemente dal bacino e dall'anno, PH simula una stagione di fusione più lunga. Il motivo potrebbe essere un prolungato processo di fusione della neve dovuto allo schema Degree-Day di PH e alla risoluzione della forzante meteorologica. Lo schema di fusione tiene conto solo di un valore medio giornaliero di temperatura, che deve essere superiore alla soglia di fusione. È probabile che questa condizione venga soddisfatta solo dopo che la fusione sia realmente avvenuta, ritardando il processo di fusione della neve e portando

a una maggiore massa nevosa prevista per i mesi estivi. Le diverse componenti del flusso sono mostrate in Fig. 5 e 6. Le differenze tra i modelli nel modo in cui riproducono il manto nevoso portano a discrepanze nella simulazione della fusione nivale. PH riproduce una stagione di fusione ritardata e ridotta rispetto a A3D. Una riproduzione alterata della stagionalità della fusione della neve influisce sulle prestazioni dei modelli nella riproduzione della portata. In Fig. 5 e 6, sono mostrati la portata osservata e modellata dopo il flow routing ed i volumi medi mensili. Per il bacino del Mera, il comportamento dei due modelli è simile e caratterizzato da una sottostima della portata nel periodo di accumulo nivale e una sovrastima nel periodo di fusione. SF riproduce la portata con maggiore precisione durante la stagione di fusione, mentre PH mostra una costante propensione verso porta-

te più elevate. Inoltre, PH non distingue una stagione dominante della fusione nivale piuttosto che della fusione glaciale. L'effetto è una rappresentazione più scadente della portata, dove i picchi vengono attenuati e la portata è generalmente sovrastimata. Per il regime nivoglaciale del bacino del Dischma la differenza tra i modelli è più evidente. I diversi tempi di fusione della neve hanno un impatto importante sulla portata simulata. PH ritarda la portata dovuta alla fusione nivale di un mese rispetto alle osservazioni e non riesce a rappresentare l'accentuato picco di portata forzato dalla fusione della neve che caratterizza il fiume. La spiegazione è duplice: da una parte la diversa temperatura di soglia pioggia-neve con cui i modelli sono implementati, dall'altra PH utilizza una risoluzione giornaliera, basandosi su uno schema di fusione che considera solo la temperatura media giornaliera. Ciò ha ripercussioni sulla dinamica del-

la fusione. La conseguenza è una scarsa riproduzione del regime delle portate e dei volumi durante l'intera stagione di fusione, con sottostime all'inizio della primavera e, di conseguenza, sovrastime in estate e in autunno.

In generale, si ottengono prestazioni migliori per il bacino del Dischma rispetto a quello del Mera, in accordo con quanto si vede in Fig. 5 e 6. Il fiume Mera è regolato da più dighe (Fig. 1), quindi il risultato non sorprende. Con PH si ottengono punteggi migliori sia in termini di NSE annuale che di KGE sul Mera, sebbene in precedenza abbiamo mostrato che la dinamica della fusione simulata è interpretata in maniera poco accurata e la Fig. 6 mostra una chiara sovrastima del deflusso durante la stagione estiva. Per il Mera, PH mostra una migliore correlazione lineare con i valori osservati, un errore di variabilità leggermente inferiore e un errore medio leggermente superiore rispetto ad A3D. L'errore di variabilità inferiore può essere spiegato dalla portata generata dalla fusione della neve meno accentuata; mentre l'errore medio più alto è probabilmente dovuto al flusso di base leggermente superiore simulato da PH, che potrebbe essere indotto dalla calibrazione. D'altra parte, sul Dischma, la correlazione lineare modellata da PH è più scarsa rispetto ad A3D e l'errore medio è maggiore, con l'errore di variabilità che non cambia significativamente tra i modelli. Gli errori di correlazione e media sono spiegati dalla curva delle portate traslata dovuta alla minore precisione della simulazione della fusione nivale. Entrambi i modelli prevedono una maggiore variabilità del flusso rispetto a quella osservata nel corso del Mera, ma non per il Dischma, suggerendo ancora una volta l'influenza della regolazione nel flusso. Nel bacino del Dischma, sia NSE che KGE mostrano una performance inferiore di PH rispetto a SF, come possiamo aspettarci, poiché il PH tende a ritardare di un mese la stagione della fusione. Come accennato in precedenza, per i bacini con forti variazioni stagionali, l'utilizzo di metriche di

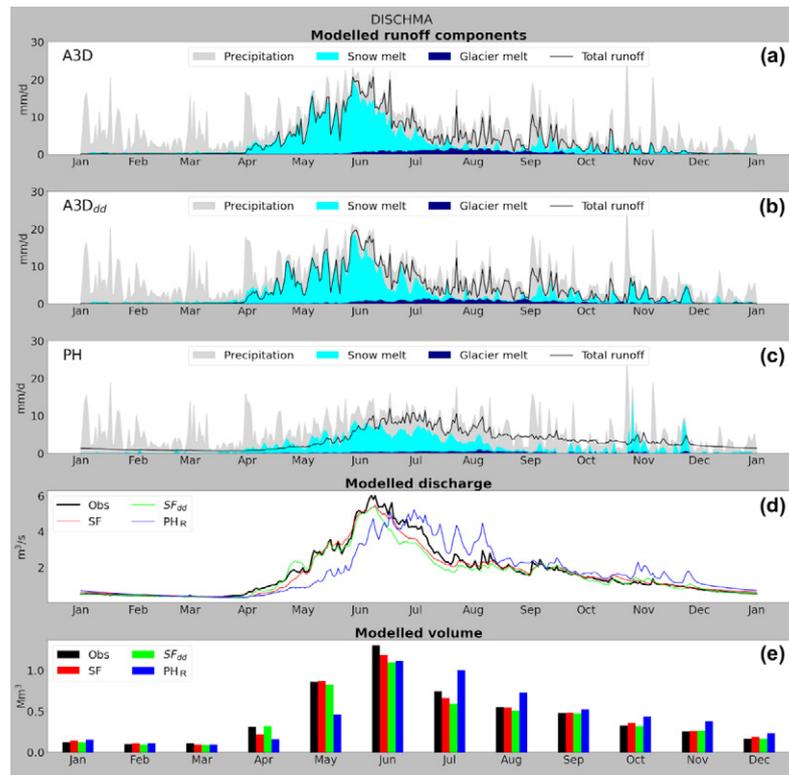


Fig. 5 - Pannelli (a), (b), (c): componenti del ruscellamento superficiale modellate per il bacino del Dischma secondo il risolutore completo di Alpine3D (A3D), lo schema di fusione grado-giorno di Alpine3D (A3DDD) e Poli-Hydro (PH), rispettivamente. Pannelli (d) ed (e): Rispettivamente, la portata ed i volumi medi mensili modellati da StreamFlow usando l'output dal risolutore completo di Alpine3D (SF), dal suo schema grado-giorno (SFDD) e da Poli-Hydro (PHR), confrontato con i valori misurati. I risultati si riferiscono al periodo di validazione (2015-2018), mediati sul giorno e mese dell'anno.

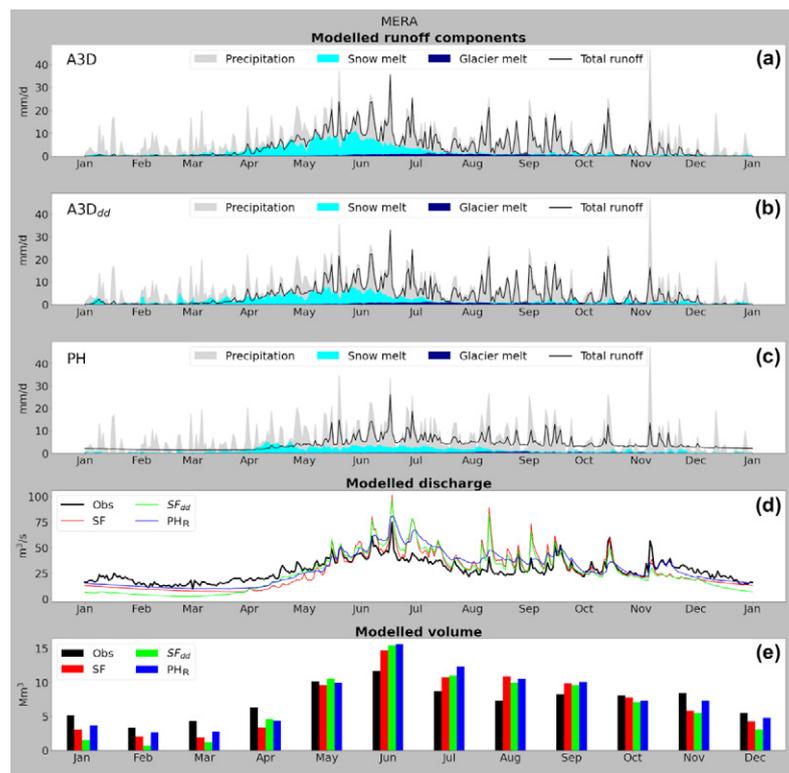


Fig. 6 - Pannelli (a), (b), (c): componenti del ruscellamento superficiale modellate per il bacino del Mera secondo il risolutore completo di Alpine3D (A3D), lo schema di fusione grado-giorno di Alpine3D (A3DDD) e Poli-Hydro (PH), rispettivamente. Pannelli (d) ed (e): Rispettivamente, la portata ed i volumi medi mensili modellati da StreamFlow usando l'output dal risolutore completo di Alpine3D (SF), dal suo schema grado-giorno (SFDD) e da Poli-Hydro (PHR), confrontato con i valori misurati. I risultati si riferiscono al periodo di validazione (2015-2018), mediati sul giorno e mese dell'anno.

qualità su base annuale non è ottimale. Molti autori hanno affrontato questo problema utilizzando queste metriche su una base stagionale. Valutiamo quindi le prestazioni dei modelli dividendo l'intervallo di validazione per stagioni. Con questo approccio, la portata osservata non è più calcolata come media sull'insieme degli anni di

validazione, ma piuttosto sulle stagioni nel periodo di validazione. L'analisi della performance stagionale (Fig. 7) mostra ancora una volta punteggi inferiori per il bacino del Mera.

A3D+SF supera PH in quasi tutte le stagioni e in entrambi i bacini. PH ottiene punteggi bassi in inverno. La ritardata stagione di fusione di PH per il bacino

NEVE

del Dischma è ben visibile anche nei punteggi ottenuti nella stagione primaverile.

Cambiamenti climatici

Le proiezioni di cambiamento climatico sono state eseguite per il periodo 2080-2090 e forzate dall'insieme di RCM descritti precedentemente. Di seguito,

presentiamo l'evoluzione prevista delle precipitazioni, della fusione nivale (come la più significativa forzante stagionale per il deflusso totale e la principale differenza tra i due schemi di fusione), portate e volumi totali, con l'obiettivo di discutere la sensibilità dei modelli al cambiamento climatico. La fusione dei

ghiacciai non sarà presentata perché si prevede che la sua influenza entro il 2050-2060 sarà piccola a causa del ritiro dei ghiacciai. Per le precipitazioni e la fusione nivale, le simulazioni di cambiamento climatico sono confrontate con la media del periodo di riferimento 1990-2000, mentre la portata e i volumi vengono confrontati con le serie temporali osservate. Il periodo di riferimento è qui utilizzato con lo scopo di mostrare i cambiamenti di stagionalità indotti dai cambiamenti climatici.

L'evoluzione prevista delle precipitazioni, della fusione nivale, delle portate e dei volumi è mostrata in Fig. 8 e 9 rispettivamente per il Mera e il Dischma.

Le variazioni della fusione nivale previste da A3D e PH sono coerenti a livello stagionale: rispetto alla media di riferimento 1990-2000, si prevede un netto aumento in primavera (più evidentemente nel bacino nivoglaciale di Dischma), una netta diminuzione in tarda estate (agosto-settembre) e tardo autunno (ottobre-novembre) ed un aumento durante i mesi invernali

Fig. 7 - Punteggi statistici stagionali (KGE a sinistra, NSE a destra) ottenuti sui bacini di Mera (in alto) e Dischma (in basso). I punteggi sono riportati per entrambi gli schemi di A3D e per PH.

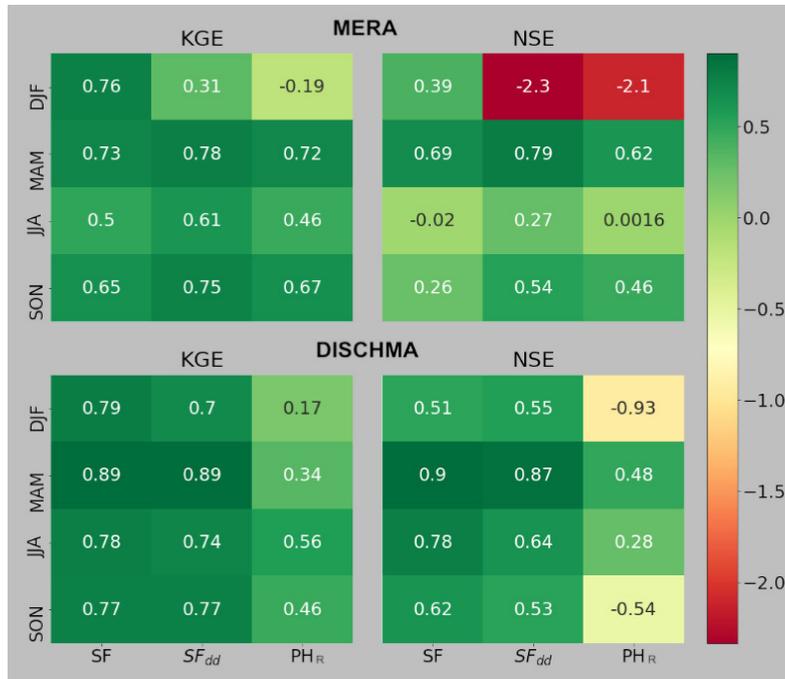
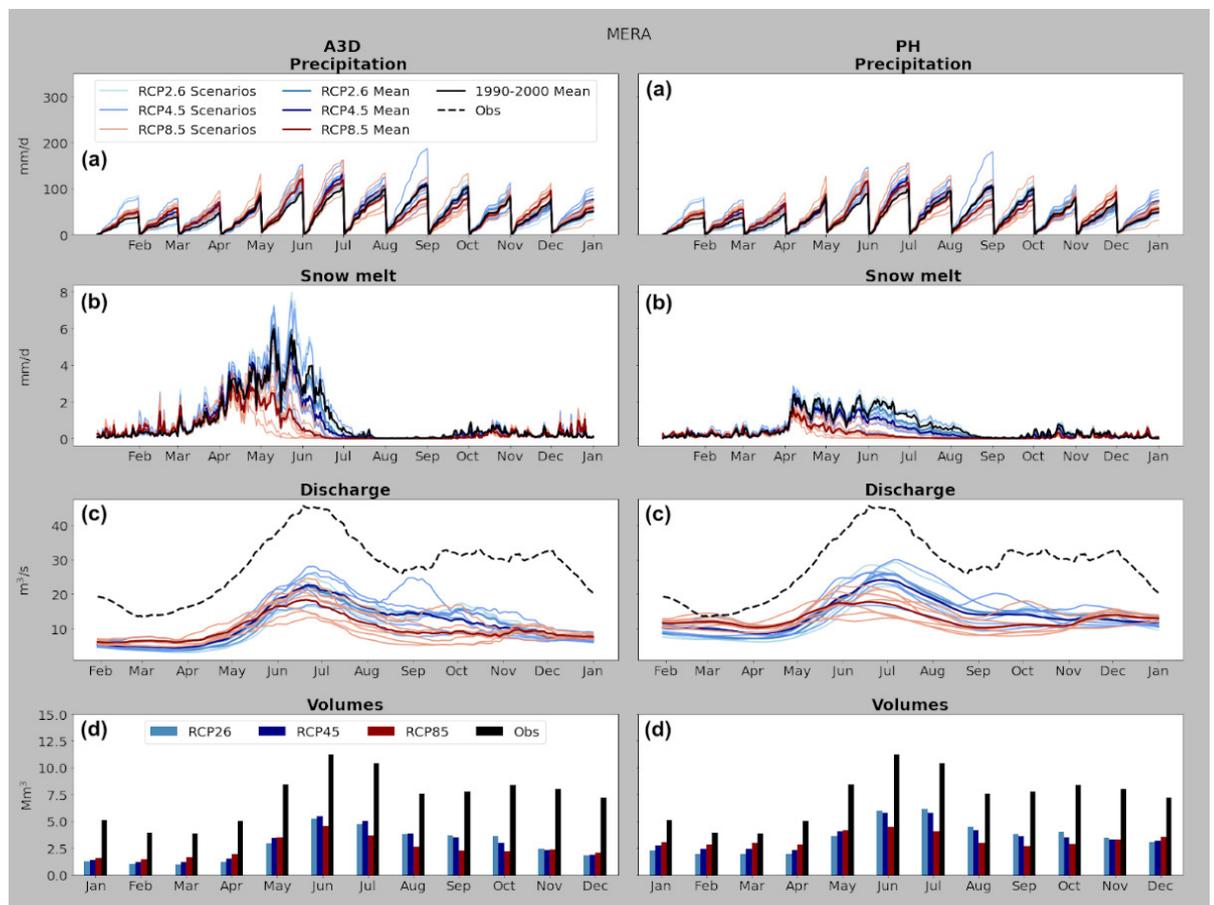


Fig. 8 - Scenari di cambiamento climatico sul il bacino del Dischma per la decade 2080-2090 in confronto alla media di riferimento sulla decade 1990-2000 per la precipitazione (pannello (a)), la fusione nivale (pannello (b)), la portata (pannello (c)) e i volumi (pannello (d)) modellati da A3D (pannelli a sinistra) e da PH (pannelli a destra). Le precipitazioni ed i volumi vengono riportati come valori mensili cumulati. La fusione nivale viene riportata in media sui giorni dell'anno. La portata viene riportata in media sui giorni dell'anno e smussata da una media mobile con una finestra di 30 giorni.



(dicembre-marzo). Tali risultati sono in linea con studi precedenti. Sebbene le tendenze siano simili tra i due modelli di fusione, l'entità dei cambiamenti è piuttosto diversa. Il modello con bilancio energetico A3D sembra essere più sensibile ai cambiamenti climatici rispetto al modello *Degree-Day*PH: non solo la fusione nivale prevista è significativamente superiore (fino a +50%), ma anche le variazioni rispetto al periodo di riferimento sono più marcate, per entrambi i bacini (vedi Fig. 8 e 9, pannelli (b)). Le differenze nell'entità della fusione e nel cambiamento sono per lo più attribuite ai mesi primaverili e estivi. Per spiegare ciò, è necessario discutere nuovamente le basi dello schema di fusione *Degree-Day*. I principali processi fisici coinvolti nel bilancio energetico sono la radiazione a onde lunghe in entrata e in uscita, la radiazione a onde corte assorbita, il flusso di calore turbolento e la fusione. L'approccio *Degree-Day* di PH per la stima della fusione nivoglaciale si basa sulla temperatura dell'aria, considerata un buon predittore per la maggior parte

dei flussi energetici che partecipano al bilancio, e sulla radiazione a onde corte assorbita. Lo scostamento previsto nella stagione di fusione influisce sulla stagionalità del regime di portata per entrambi i bacini idrografici.

Le Fig. 8 e 9 mostrano un aumento delle portate tardo autunnali e invernali per entrambi i bacini, che è probabilmente legato alla maggiore fusione della neve nei mesi di fine autunno.

Tuttavia, i cambiamenti nella stagionalità delle portate sono più pronunciati quando si guarda ad A3D sul bacino di Dischma. Anche se non si prevede che il periodo del picco di portata si sposti in modo significativo, la media di RCP8.5 riproduce una curva di portata che viene traslata di un mese rispetto alle osservazioni medie (vedi Fig. 9c). Lo stesso schema è riprodotto dai volumi mensili previsti (vedi Fig. 9d).

Un altro aspetto interessante che questa analisi mette in luce riguarda l'entità delle portate previste per il bacino del Mera. Come mostrato dai pannelli (c) e (d) in Fig. 8 che riportano portata e

volumi, entrambi i modelli riproducono una significativa riduzione della portata del fiume. Questo comportamento è previsto solo per il fiume Mera in quanto nessuna massa sembra essere persa per il Dischma (Fig. 9), dove la curva è traslata dalle nuove condizioni climatiche ma i volumi sono nel complesso preservati. Le riduzioni di portata arrivano fino al -85% per RCP2.6, -82% per RCP4.5, -86% per RCP8.5 secondo A3D e al -77%, -78% e -82% secondo PH. Infine, è interessante notare che la fusione della neve e la portata nell'RCP2.6 sono generalmente superiori rispetto all'RCP8.5. Con l'aumento delle temperature, è probabile che le precipitazioni assumano più spesso forma liquida, che solida. Di conseguenza, la neve si accumulerà solo ad altitudini elevate o molto elevate (dove le basse temperature possono persino ridurre o rallentare la fusione), al contrario delle altitudini medio-alte dove le nevicate e l'accumulo di neve saranno notevolmente inferiori, con conseguente riduzione nella quantità di neve fusa.

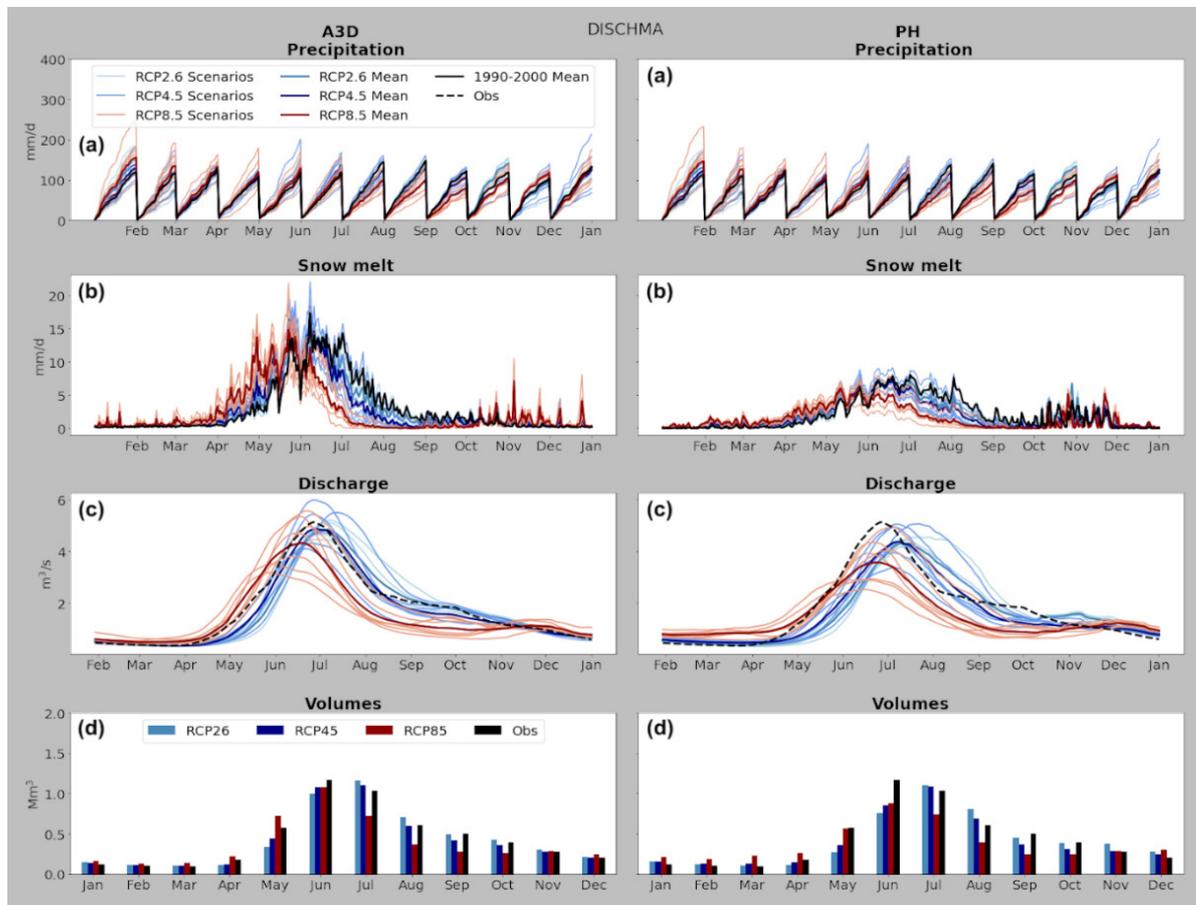


Fig. 9 - Scenari di cambiamento climatico sul il bacino del Mera per la decade 2080-2090 in confronto alla media di riferimento sulla decade 1990-2000 per la precipitazione (pannello (a)), la fusione nivale (pannello (b)), la portata (pannello (c)) e i volumi (pannello (d)) modellati da A3D (pannelli a sinistra) e da PH (pannelli a destra). Le precipitazioni ed i volumi vengono riportati come valori mensili cumulati. La fusione nivale viene riportata in media sui giorni dell'anno. La portata viene riportata in media sui giorni dell'anno e smussata da una media mobile con una finestra di 30 giorni.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I punteggi annuali della performance dei modelli suggeriscono che il modello PH più semplice operi meglio dei modelli A3D+SF nel bacino del Mera, ottenendo risultati meno soddisfacenti nel bacino del Dischma. Il modello PH nel Dischma mostra tuttavia un errore in termini di tempistica della stagione di fusione, a dispetto degli alti valori annuali di NSE (0.71) e KGE (0.78). L'analisi stagionale delle metriche mostra un quadro diverso, con una migliore rappresentatività della catena di modelli A3D+SF, in particolare nel bacino del Dischma.

In generale, A3D riproduce la dinamica della fusione in modo più corretto rispetto a PH. PH tende a riprodurre una fusione piuttosto costante nel tempo. Un punto chiave per quanto riguarda le prestazioni più elevate di A3D nel Dischma rispetto a PH è la maggiore risoluzione temporale alla quale si risolve il bilancio energetico. Lo schema di fusione utilizzato da PH si basa sulla temperatura media giornaliera, il che significa che se la tale media è inferiore alla soglia di fusione, il modello non simulerà la fusione della neve, mentre la temperatura potrebbe raggiungere valori più elevati durante il giorno e potrebbe invece verificarsi fusione (dinamica oraria del

fenomeno di accumulo/fusione nivale). Di conseguenza, la fusione durante la stagione primaverile è ritardata in PH. Studi precedenti hanno dimostrato che l'adozione di passaggi temporali più brevi nella modellazione idrologica può essere vantaggiosa per le simulazioni di portata, non solo per eventi di breve durata, ma anche per l'analisi dei risultati su una scala temporale più ampia. Ciò tuttavia richiede di avere serie temporali forzanti a risoluzione oraria, cosa che non sempre accade, in particolare per gli scenari di cambiamento climatico.

I modelli qui utilizzati ottengono prestazioni inferiori nel bacino del Mera rispetto al Dischma. La spiegazione è duplice. In primo luogo, il bacino del Mera è fortemente regolato da dighe, non considerate nei modelli. Gli errori dei modelli (sovrastima del deflusso in estate e sottostima in inverno) corrispondono verosimilmente al modello di utilizzo delle dighe: accumulo in estate per produrre energia elettrica in inverno durante il picco di domanda. Oltre alla regolazione, un altro punto chiave che incide sulla rappresentazione delle portate nel bacino del Mera potrebbe essere la scarsità di dati di input. La mancanza di dati potrebbe essere problematica per i modelli con grado di complessità più elevato come A3D, in quanto più sen-

sibili alla scarsa interpolazione dei dati meteorologici. La scarsità di dati meteorologici di input nel bacino del Mera, rispetto al Dischma, potrebbe spiegare perché il A3D non supera il modello PH. L'importante differenza che osserviamo nella stagionalità della fusione della neve tra i due modelli non consente confronti sulle prestazioni dei modelli di flusso. Tale confronto dovrebbe essere eseguito forzando entrambi i modelli di flusso con lo stesso input, cosa che non è stata possibile qui. Il modulo di *flow routing* di PH è profondamente legato al modulo di fusione della neve nel modello.

I risultati illustrati in Fig. 8 e 9 mostrano che ci sono due limiti sostanziali nell'utilizzo di uno schema di fusione *Degree-Day* per applicazioni sui cambiamenti climatici, nonostante i suoi vantaggi in termini di dati di input. I parametri *Degree-Day* di PH sono calibrati e fissati per ogni mese. Di conseguenza, il modello mostra meno sensibilità ai cambiamenti della temperatura dell'aria e cattura i cambiamenti nella stagionalità della fusione in maniera minore. D'altra parte, le temperature generalmente più elevate previste per la fine del secolo possono portare a (1) meno nevicate e un più rapido invecchiamento del manto nevoso e (2) a fusione anticipata. Entrambi gli



effetti comportano un'albedo inferiore durante il periodo di fusione, poiché la neve vecchia ha un'albedo inferiore rispetto alla neve nuova. In A3D, l'albedo della neve viene calcolato ad ogni passo temporale con lo specifico modulo di SNOWPACK. L'albedo invece è imposta come parametro fisso all'interno del modello PH, quindi non è stato possibile catturare l'eventuale riduzione. Di conseguenza, il contributo della radiazione netta a onde corte è probabilmente sottostimato, portando a tassi di fusione inferiori in primavera e in estate. Inoltre, in condizioni climatiche modificate, i parametri che sono stati calibrati o fissati in base alle condizioni attuali potrebbero non riprodurre correttamente il flusso di base in condizioni future.

Per concludere, i nostri risultati sono duplici. Da un lato, confermano sul bacino quasi naturale del Dischma che l'uso dei modelli *Degree-Day* per il futuro è discutibile, poiché tali modelli si basano su parametri calibrati nelle condizioni climatiche attuali. D'altra parte, il caso del Mera ha suggerito che l'uso di modelli di fusione complessi potrebbe essere di fatto superfluo se applicato a grandi bacini fortemente regolati e scarsamente monitorati.

Il limite maggiore di questo caso studio di modelli a confronto è sicuramente la scarsità di dati sul bacino del Mera. Una più fitta rete di monitoraggio per i dati meteorologici in input avrebbe probabilmente contribuito a risultati più accurati. Dati di funzionamento delle dighe, se disponibili, avrebbero potuto essere utilizzati per convalidare le ipotesi di ritenzione e rilascio di acqua, per accoppiare il modello PH, con la produzione di energia come è stato fatto negli studi precedenti. Per SF, invece, tale attuazione non è ancora disponibile. Nonostante tali limiti, il confronto tra modelli è stato comunque possibile e ha portato alla luce molti aspetti interessanti per sviluppi futuri nella modellizzazione e il monitoraggio dei bacini alpini, altamente sfruttati per la produzione idroelettrica nel contesto del cambiamento climatico.

Bibliografia

- Bocchiola, D., Soncini, A., Senese, A., & Diolaiuti, G. (2018). Modelling hydrological components of the Rio Maipo of Chile, and their prospective evolution under climate change. *Climate*. <https://doi.org/10.3390/cli6030057>
- Casale, F., Bombelli, G. M., Monti, R., & Bocchiola, D. (2020). Hydropower potential in the Kabul River under climate change scenarios in the XXI century. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3–4), 1415–1434. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03052-y>
- Gallice, A., Bavay, M., Brauchli, T., Comola, F., Lehning, M., & Huwald, H. (2016). StreamFlow 1.0: An extension to the spatially distributed snow model Alpine3D for hydrological modelling and deterministic stream temperature prediction. *Geoscientific Model Development*, 9(12), 4491–4519. <https://doi.org/10.5194/GMD-9-4491-2016>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/S10113-013-0499-2/FIGURES/8>
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Gørgen, K., Jacob, D., Lüthi, D., Van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., & Wulfmeyer, V. (2014). Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7(4), 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/GMD-7-1297-2014>
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., & Satyawali, P. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), 147–167. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3)
- Lehning, M., Völksch Ingo, I., Gustafsson, D., Nguyen, T. A., Stähli, M., & Zappa, M. (2006). ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes*, 20(10), 2111–2128. <https://doi.org/10.1002/HYP.6204>
- Rajczak, J., Kotlarski, S., Salzmann, N., & Schär, C. (2016). Robust climate scenarios for sites with sparse observations: a two-step bias correction approach. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1226–1243. <https://doi.org/10.1002/JOC.4417>
- Zappa, M., Pos, F., Strasser, U., Warmerdam, P., & Gurtz, J. (2003). Seasonal Water Balance of an Alpine Catchment as Evaluated by Different Methods for Spatially Distributed Snowmelt Modelling. *Hydrology Research*, 34(3), 179–202. <https://doi.org/10.2166/NH.2003.0003>
- 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. <https://doi.org/10.5194/TC-13-1125-2019>

*Nota (1) Il presente articolo costituisce un riadattamento dello studio condotto da *** Carletti et al., 2022 ***, in una versione ridotta e semplificata che tuttavia ne illustra premesse, metodi e risultati principali. L'articolo nella sua versione integrale è stato recentemente pubblicato sulla rivista HESS, a cui si rimanda il lettore per ulteriori approfondimenti è firmato Carletti F., Michel A., Casale F., Bocchiola D., Lehning M., and Bavay M.: A comparison of hydrological models with different level of complexity in Alpine regions in the context of climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-562>, in review, 2021. Il link all'articolo è il seguente: <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2021-562/>*