

Precipitazioni puntuali estreme

Sommario

Le carte delle precipitazioni puntuali estreme mostrano la quantità delle precipitazioni per eventi rari di forte intensità nel clima attuale. Le analisi possono essere rappresentate per periodi di ritorno da 2 a 300 anni. Attualmente i risultati sono disponibili per le precipitazioni estreme cumulate su 72, 48, 24, 12 e 6 ore e su 180, 60, 10, 5 e 2 minuti. In seguito verranno integrate anche le analisi per altre durate. Per ogni punto della griglia può essere visualizzata una tabella contenente i livelli di ritorno (mediana e incertezza) per il punto centrale della cella. Si noti che la scala cromatica varia tra le mappe dei vari intervalli di durata di accumulo delle precipitazioni. Per l'interpretazione dei risultati è importante prendere in considerazione le note restrittive riportate nel capitolo 4 del testo accompagnatorio.

Autrici e autore: Sophie Fukutome¹, Sonia Alouini^{1,2}, Christoph Frei¹

¹ Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, Operation Center 1, CH-8058 Zürich-Flughafen

² Center for Climate Systems Modelling C2SM, ETH Zurich, Zurich

1 Introduzione

La conoscenza della quantità delle precipitazioni che possono derivare da eventi rari di forte intensità costituisce una base di informazioni fondamentale, ad esempio per valutare i rischi di catastrofi naturali o per il dimensionamento dei sistemi di drenaggio. Tali informazioni sono ricavate da lunghe serie di misurazioni delle precipitazioni e fornite sotto forma di livelli di ritorno associati a specifici periodi di ritorno. Il livello di ritorno per il periodo di ritorno T è definito come la somma delle precipitazioni che, nel clima odierno e all'ubicazione scelta, viene superata con una probabilità di $1 / T$ nel corso di un anno. Le precipitazioni comprendono sia la pioggia (precipitazione in forma liquida) che la neve (precipitazione in forma solida).

In Svizzera le informazioni disponibili sui livelli estremi di precipitazioni per le stazioni con lunghe serie di misurazioni sono numerose. Esse sono ottenibili su climate-extremes.ch per precipitazioni cumulate su durate che vanno da 10 minuti (per 67 stazioni) a 5 giorni (per 341 stazioni) [1, 2]. Tuttavia, essendo un paese caratterizzato da fenomeni climatici ricorrenti su piccola scala, le informazioni legate unicamente alle singole stazioni non sono sufficienti. Data la rapida variazione del clima su brevi distanze orizzontali, queste informazioni limitate all'ubicazione delle stazioni non sono sufficienti, poiché non sono in grado di rappresentare adeguatamente il clima in un punto qualsiasi della Svizzera. Le mappe qui riportate colmano questa lacuna, fornendo informazioni complete su scala nazionale sui livelli di ritorno, calcolate per una griglia con una risoluzione di circa 1 km. Anche le rappresentazioni spaziali si basano sulle serie di misurazioni delle singole stazioni, ma l'inclusione dei dati dell'intera rete di misurazione consente di stimare i livelli di ritorno nelle zone situate tra le stazioni. A causa dell'interpolazione spaziale, le stime di queste carte sono soggette ad incertezze supplementari rispetto a quelle delle stazioni stesse.

Già negli anni '90 sono state pubblicate delle carte delle precipitazioni puntuali estreme in Svizzera nella forma cartacea dell'Atlante idrologico della Svizzera [3, 4]. I risultati qui rappresentati si basano su serie

di dati più recenti e di qualità più affidabile. Anche il metodo di analisi utilizzato è stato modernizzato: le ipotesi alla base del modello statistico sono più credibili, gli effetti topografici su scala ridotta sono presi in considerazione e le incertezze vengono quantificate. Le differenze tra le mappe pubblicate qui e quelle precedenti sono discusse al capitolo 5.

Attualmente sono disponibili mappe con livelli di ritorno per precipitazioni cumulate su 72, 48, 24 e 12 ore e su 180, 60, 10, 5 e 2 minuti, per nove diversi periodi di ritorno tra 2 e 300 anni. Le analisi coprono il comprensorio idrologico svizzero e per questo si basano anche su serie di dati provenienti da paesi confinanti. Mappe riguardanti ulteriori durate cumulate delle precipitazioni sono attualmente in preparazione e verranno successivamente integrate nella piattaforma di dati e analisi dell'Atlante idrologico.

2 Dati e metodi

I dati utilizzati per la realizzazione delle mappe dipendono dalla rete di misurazione disponibile per il periodo in questione e dall'entità del controllo di qualità. MeteoSvizzera registra le osservazioni a intervalli di 10 minuti e 1 giorno (ogni giorno alle 06:00 UTC). Il controllo di qualità dipende dalla disponibilità di informazioni indipendenti ed è quindi più completo per le osservazioni giornaliere, seguite dalle aggregazioni orarie (ogni ora allo scoccare dell'ora). Anche se sono disponibili osservazioni di 10 minuti, i risultati sono più affidabili se basati su osservazioni orarie. Di conseguenza, la realizzazione delle mappe per 60 e 180 minuti e per 6 e 12 ore si basa su osservazioni orarie, mentre le mappe per 24, 48 e 72 ore utilizzano aggregazioni delle precipitazioni giornaliere. Per le implicazioni relative alla stima e alla convenzione di denominazione, vedere la sezione 2.3. La tabella 1 mostra un elenco del numero di stazioni, della durata massima osservata e del numero minimo di anni considerati per le diverse durate. I dati relativi a 60 minuti e 24 ore sono descritti in dettaglio di seguito, poiché sono rappresentativi delle condizioni con una durata inferiore a un giorno o di diversi giorni.

| Durata | Regione | Numero di stazioni | Numero min. di anni | Periodo di riferimento |
|--------------------------|----------|--------------------|---------------------|------------------------|
| 10 minuti | Svizzera | 70 | 20 | 1981–2023 |
| | Estero | 88 | 10 | |
| 60 minuti | Svizzera | 69 | 15 | 1981–2020 |
| | Estero | 100 | 10 | |
| 180 minuti, 6, 12 ore | Svizzera | 71 | 15 | 1981–2023 |
| | Estero | 112 | | |
| 24, 48, 72 ore | Svizzera | 418 | 30 | 1961–2020 |
| | Estero | 78 | | |

Tabella 1. Dati utilizzati per l'analisi spaziale dei valori estremi per ogni durata (10, 60, 180 minuti e 6, 12, 24, 48, 72 ore); per le mappe di 2 e 5 minuti non erano disponibili osservazioni.

Poiché 10 minuti è l'intervallo di misurazione più breve disponibile su un numero sufficiente di anni, per le mappe delle durate di 5 e 2 minuti è stato utilizzato un metodo differente. I periodi di 10 minuti e oltre sono sottoposti a una complessa analisi statistica spaziale, mentre i periodi molto brevi sono estrapolati indirettamente dalla mappa dei 10 minuti.

2.1 Dati

L'analisi spaziale delle precipitazioni su 60 minuti utilizza i dati di 69 stazioni di MeteoSvizzera e di 100 stazioni dei paesi limitrofi per il periodo 1981–2020. Nella selezione delle stazioni si è presupposta una durata di misurazione di almeno 15 anni in Svizzera e di almeno 10 anni nei paesi limitrofi. Per le precipitazioni su 24 ore, invece, sono stati utilizzati i dati di 418 stazioni di MeteoSvizzera e 78 stazioni estere per il periodo 1961–2020 (lunghezza della serie di misura di almeno 30 anni). I dati precedenti al 1961, sono stati tralasciati deliberatamente per minimizzare un possibile influsso delle variazioni climatiche a lungo termine [5]. I dati sono stati sottoposti a un controllo di qualità, con eccezioni per quelli provenienti dall'estero, ma non sono stati corretti per errori sistematici di misurazione. Questi ultimi sono tuttavia relativamente deboli in caso di forti precipitazioni e per eventi che hanno luogo principalmente in estate e autunno [6].

2.2 Analisi spaziale

Il metodo utilizzato per l'analisi spaziale è descritto in dettaglio in [7]. Qui ci limitiamo a riassumere le linee generali della procedura. Il metodo si basa sulla modellizzazione dei «massimi per blocchi» (block maxima in inglese) con la «distribuzione generalizzata dei valori estremi» (GEV, Generalised Extreme Value distribution in inglese) (ad es. [8]), un approccio molto diffuso nell'analisi dei valori estremi. Tuttavia, diversamente dalla prassi normale, qui vengono modellati i massimi di precipitazioni stagionali (non annuali). In questo modo è possibile separare precipitazioni intense di diversa natura durante l'elaborazione dei dati e i prerequisiti teorici alla base dell'analisi dei valori estremi sono meglio soddisfatti. I risultati stratificati stagionalmente sono infine combinati per derivarne la distribuzione dei massimi annuali. Unicamente i risultati dei massimi annuali vengono visualizzati sulla piattaforma di dati e analisi. Le mappe con i livelli di ritorno per le singole stagioni sono disponi-

bili su climate-extremes.ch e, a titolo di esempio, nel capitolo 3.

Nell'analisi spaziale dei valori estremi, i parametri della distribuzione GEV sono considerati come campi spaziali e a loro volta come realizzazione (non osservata) di un modello stocastico (campo casuale gaussiano, GRF). Le due componenti stocastiche, GEV e GRF, sono abbinate nel quadro di un modello gerarchico bayesiano tramite verosimiglianza composta (composite-likelihood) e tutti i parametri sono stimati utilizzando un algoritmo di Monte-Carlo con catene di Markov [9, 10, 11, 7].

L'applicazione di questo modello spaziale dei valori estremi in Svizzera offre tre proprietà di particolare valore: (1) il metodo consente di integrare informazioni supplementari sulle variazioni spaziali su piccola scala (campi predittivi), così da considerare meglio gli effetti della topografia e le differenze tra le regioni climatiche; (2) la stima simultanea dei parametri a partire dai dati di tutte le stazioni consente di considerare nell'analisi le informazioni provenienti dall'intera rete di misurazione per ogni ubicazione, riducendone così le incertezze; (3) l'inferenza Bayesiana utilizzata fornisce una stima probabilistica completa, cioè una distribuzione di frequenza per ogni livello di ritorno. La distribuzione stimata fornisce informazioni dettagliate sul grado di incertezza (cfr. anche [7] e capitolo 4).

Sulla piattaforma di dati e analisi sono riportati i quantili caratteristici della distribuzione stimata. Le mappe mostrano la mediana (quantile 50%). Le tabelle visualizzate cliccando sulla mappa mostrano i quantili 2.5%, 50% e 97.5% della distribuzione stimata. L'intervallo compreso tra i quantili 2.5% e 97.5% indica l'intervallo di confidenza del 95% della stima.

2.3 Correzione del campione

In idrologia è noto da tempo che i livelli di ritorno su 24 ore stimati sulla base delle misurazioni giornaliere delle precipitazioni – accumulate tra le 6:00 UTC e le 6:00 UTC del giorno successivo – sono sottostimati [11, 12]. Il motivo è che un evento di 24 ore che si estende oltre il limite delle 6:00 UTC viene registrato in due valori giornalieri più piccoli, il che porta a valori massimi stagionali o annuali inferiori.

Per le analisi presentate qui, grazie al numero maggiore di stazioni e un controllo di qualità più completo, l'analisi statistica è stata effettuata su 24 ore con le precipitazioni giornaliere e non con finestre mobili del-

le precipitazioni su 24 ore in ogni ora. Per determinare i valori di ritorno per i totali di precipitazione mobili (24 ore), i parametri GEV delle analisi stagionali sono stati corretti. Questa correzione è stata determinata tenendo conto dei dati delle stazioni con dati di misurazione ad alta risoluzione temporale tramite una regressione lineare dei parametri GEV. Ciò provoca uno spostamento delle distribuzioni, in funzione della stagione, verso valori leggermente più alti (si veda anche [12]). Allo stesso modo, le mappe da 2 e 3 giorni sono stati modificati per ottenere mappe da 48 e 72 ore.

Un approccio simile è stato utilizzato per periodi di 1 e 3 ore, poiché i campioni orari suddividono gli eventi in campioni più piccoli e portano a una sottostima dei livelli di ritorno. Come per le precipitazioni giornaliere, il modello è stato inizialmente adattato ai totali di 1 ora e 3 ore, quindi i parametri GEV sono stati corretti per simulare una finestra mobile di 60 e 180 minuti, rispettivamente. Poiché la correzione stimata diminuisce rapidamente con l'aumentare dei totali di accumulo, non è stata necessaria alcuna correzione per i modelli stagionali con precipitazioni di 6 e 12 ore.

Si noti che il campionamento delle precipitazioni di 10 minuti a intervalli di tempo fissi (HH:10, HH:20, ecc.) porta a una sottostima simile. Tuttavia, poiché non sono disponibili durate di misurazione più brevi, non è possibile stimare alcuna correzione.

D'ora in poi distingueremo tra aggregazioni non corrette e corrette con la seguente convenzione: per durate nell'intervallo orario (da 1 ora a 12 ore), x ore significa che i valori sono convenzionali, mentre x minuti significa che i valori sono corretti. Pertanto, le precipitazioni di 180 minuti sono corrette, mentre quelle di 3 ore non lo sono.

Per le durate nell'intervallo giornaliero (da 1 a 3 giorni) la precipitazione x giorni è convenzionale mentre la precipitazione x ore è corretta. Pertanto, mentre la precipitazione di 48 ore è corretta, i valori di precipitazione di 2 giorni non lo sono.

2.4 Estrapolazione a durate non osservate

Il metodo di estrapolazione sfrutta la correlazione tra i valori totali delle precipitazioni di diversa durata per ricavare i parametri GEV relativi alle precipitazioni di 5 e 2 minuti da quelli relativi alle precipitazioni di 10 minuti.

A tal fine, per ogni stagione i parametri GEV relativi alle precipitazioni di 10 minuti vengono moltiplicati per un fattore in corrispondenza di ciascun punto della griglia. I livelli di ritorno annuali vengono quindi determinati dalle distribuzioni GEV stagionali, esattamente come nelle analisi spaziali delle durate delle precipitazioni osservate.

Il fattore di moltiplicazione (denominato nella letteratura «semplice scalatura» [13, 14]) è considerato proporzionale al rapporto tra la durata (ad es. 5/10), dove l'esponente dipende dalla località e dalla stagione. L'esponente viene stimato separatamente per ogni stazione sulla base del rapporto tra i totali delle precipitazioni di 10 e 20 minuti e quindi interpolato su una

griglia di 1 km utilizzando il kriging con una covariata, in questo caso la regione (nord, Alpi o sud).

I dettagli relativi a questo metodo sono riportati nella documentazione metodologica sull'estrapolazione delle precipitazioni su 2 e 5 minuti alle stazioni all'indirizzo [1].

3 Risultati

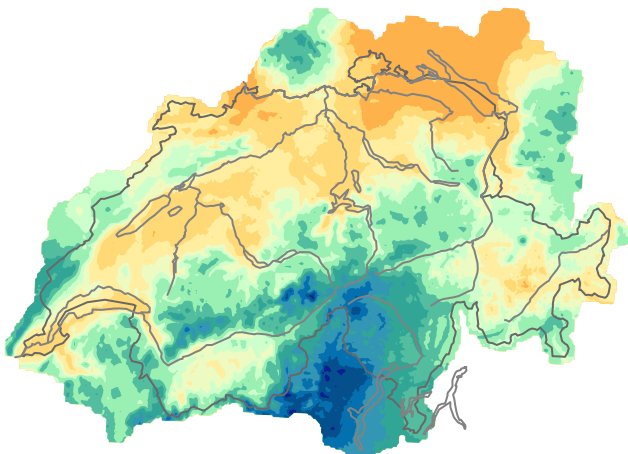
Le distribuzioni spaziali delle precipitazioni estreme in Svizzera presentano notevoli differenze a livello regionale e stagionale, e le precipitazioni di 60 minuti si distinguono chiaramente da quelle di 24 ore (Fig. 4, in basso). I livelli di ritorno centenari delle precipitazioni su 24 ore variano di circa un fattore 5 tra i valori più bassi del fondovalle vallesano (all'incirca 90 mm) e i valori più alti del Ticino occidentale (420 mm). È quindi interessante notare che la «Sonnenstube» della Svizzera è allo stesso tempo anche la zona con le precipitazioni più intense. A nord della cresta alpina principale, i valori più alti si trovano lungo le Prealpi centrali e orientali e nel Giura occidentale (Vallée de Joux).

L'andamento stagionale (Figura 1) mostra che lungo le Prealpi settentrionali le precipitazioni estreme di 24 ore si verificano soprattutto in estate. A ciò contribuiscono i temporali locali, ma anche eventi dinamici su larga scala con un forte trasporto e sollevamento di masse di aria umida (ad esempio nell'agosto 2005 [15]). A sud del crinale alpino, le precipitazioni estreme di 24 ore si verificano dalla primavera all'autunno, con valori di ritorno maggiori in autunno nel Ticino occidentale. Nel Vallese, i valori di ritorno sono inferiori in estate rispetto alle altre stagioni. Nel Giura occidentale, così come nelle Alpi vodesi, nelle Alpi vallesane settentrionali e in alcune parti dell'Oberland bernese, gli eventi più intensi hanno luogo in inverno.

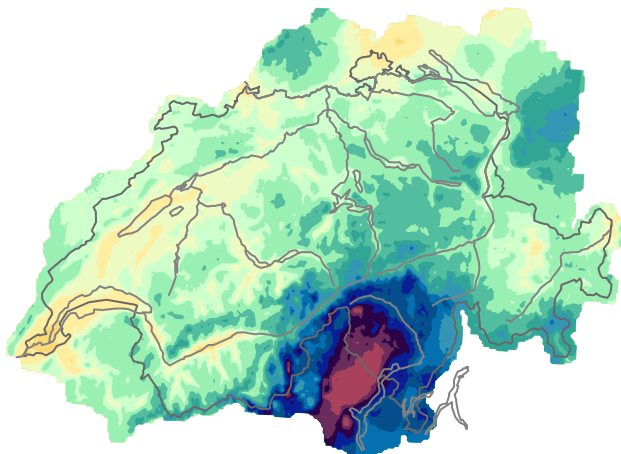
Nel caso di precipitazioni intense della durata di 60 minuti, la distribuzione spaziale differisce notevolmente da quello delle precipitazioni di 24 ore (si veda anche [16]). In particolare, la distribuzione delle precipitazioni intense su tutta l'area a nord della dorsale alpina è molto più uniforme e il contrasto nord-sud è molto meno pronunciato. Ci sono anche chiare differenze nel comportamento stagionale (Figura 2) rispetto alle precipitazioni su 24 ore. Le precipitazioni più abbondanti si verificano soprattutto in estate. A parte in inverno, in tutte le altre stagioni i valori di ritorno più alti si verificano in Ticino. Il Vallese e l'Engadina risultano avere gli estremi minori.

Le mappe stagionali dei livelli di ritorno su 6 ore (figura 3) evidenziano i cambiamenti nella distribuzione spaziale quando la durata delle precipitazioni aumenta da 60 minuti a 24 ore. I modelli variano da regione a regione e non sono univoci. Nell'Altopiano, i valori estremi delle precipitazioni su 6 ore in inverno e in primavera presentano caratteristiche simili a quelli su 24 ore, ma con un'influenza topografica attenuata. In estate, la distribuzione spaziale ricorda piuttosto le precipitazioni su 60 minuti, con precipitazioni intense che si estendono fino alla pianura. In autunno alcune

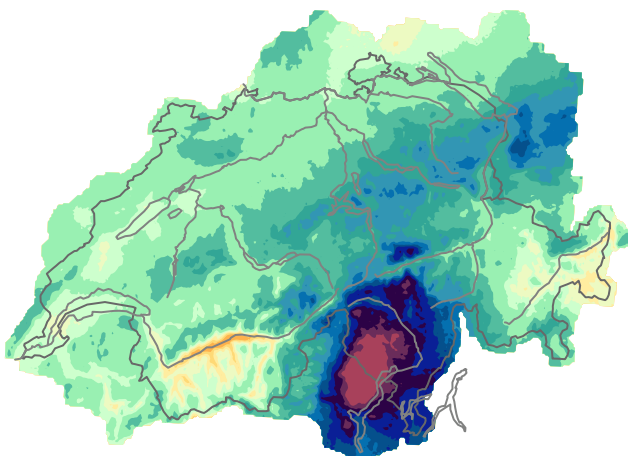
Inverno (dicembre, gennaio, febbraio)



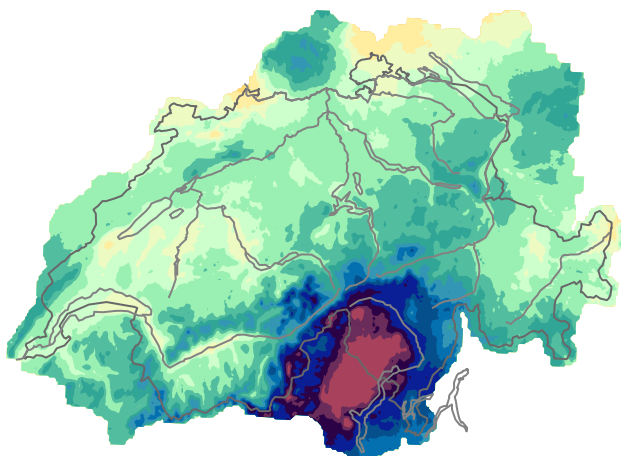
Primavera (marzo, aprile, maggio)



Estate (giugno, luglio, agosto)



Autunno (settembre, ottobre, novembre)



Valore di ritorno delle precipitazioni su 24 ore

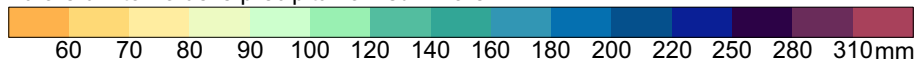


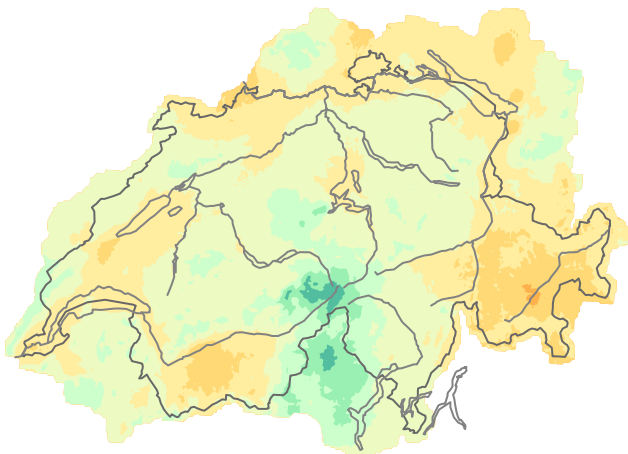
Figura 1. Precipitazioni su 24 ore con un periodo di ritorno di 100 anni in inverno, primavera, estate e autunno [mm/24 ore]

delle caratteristiche topografiche dei valori estremi su 24 ore sono visibili a nord e a ovest, ma il calo di intensità nelle Prealpi è simile alle precipitazioni su 60 minuti. In Ticino l'inverno ha caratteristiche simili a quelle delle precipitazioni su 60 minuti, ma con contrasti più marcati. In primavera, i valori più elevati si registrano nel sud, come nel caso dei valori estremi su 60 minuti, ma il contrasto ovest-est tipico dei periodi più lunghi si intensifica. In estate i valori più elevati non si registrano più nel sud, come nei periodi brevi, ma non raggiungono i livelli che assumono nei periodi più lunghi. Anche i valori secondari più elevati si registrano al confine orientale del Ticino, come nel caso degli estremi su 60 minuti. In autunno, le precipitazioni più estreme sono distribuite in modo simile agli estremi di 60 minuti, ma il forte contrasto con i valori del resto della Svizzera è evidente anche nei periodi lunghi. In Engadina, lungo il confine meridionale, si nota una fascia con maggiore intensità di precipitazioni, in particolare in primavera e in autunno, che ricorda i valori estremi su 24 ore. Il nord-est non è strutturato

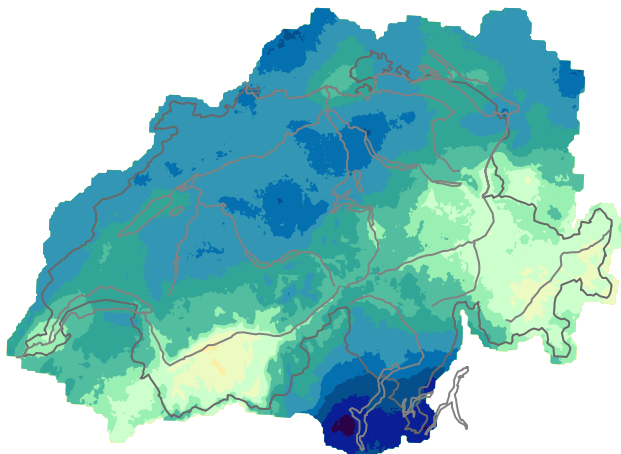
in modo così uniforme come nei valori estremi su 60 minuti, ma è meno pronunciato rispetto ai periodi più lunghi.

La stagionalità del comportamento estremo dipende dalla durata. Per periodi brevi, i livelli di ritorno più elevati per la maggior parte dei punti della griglia si verificano in estate e quelli più bassi in inverno. Con l'aumentare della durata, questa differenza si riduce, così come la differenza tra i livelli di ritorno di tutte le stagioni. Rispetto alle altre stagioni, i livelli di ritorno in inverno aumentano notevolmente tra i 60 minuti e le 12 ore e raggiungono i valori più elevati dell'anno nelle alte montagne del Vallese con una durata compresa tra 6 e 12 ore. Mentre in autunno i livelli di ritorno per periodi brevi corrispondono a quelli primaverili, per periodi più lunghi sono più elevati e nel sud, per periodi superiori a 12 ore, superano addirittura i valori estivi.

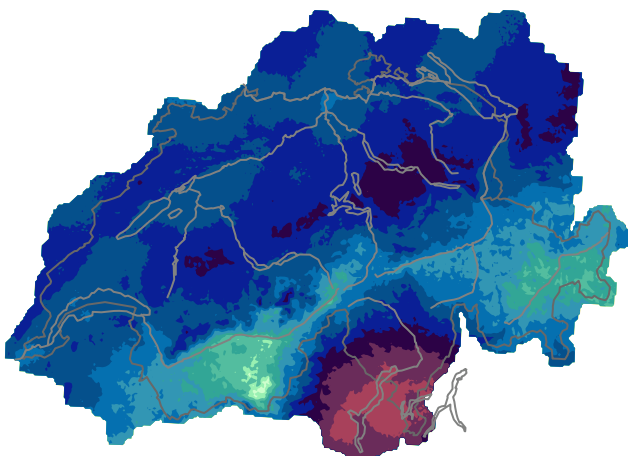
Inverno (dicembre, gennaio, febbraio)



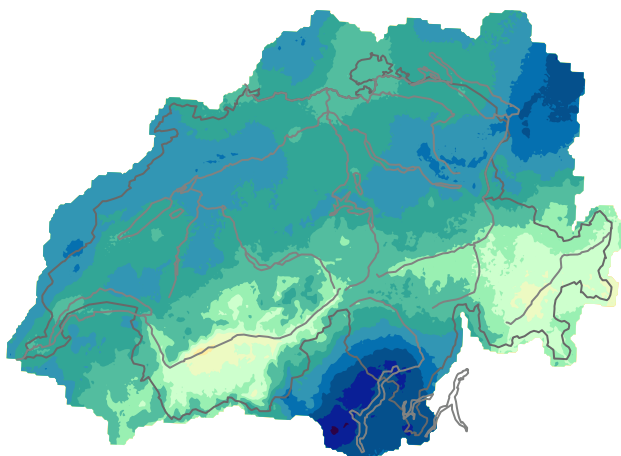
Primavera (marzo, aprile, maggio)



Estate (giugno, luglio, agosto)



Autunno (settembre, ottobre, novembre)



Valore di ritorno delle precipitazioni su 60 minuti

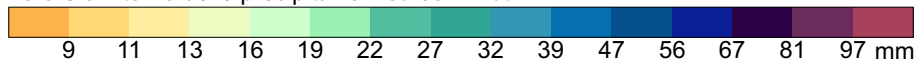


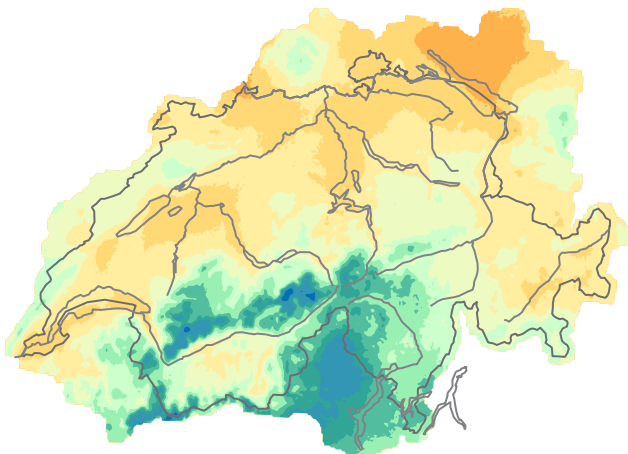
Figura 2. Precipitazioni su 60 minuti con un periodo di ritorno di 100 anni in inverno, primavera, estate e autunno [mm/60 minuti]

4 Interpretazione e utilizzo corretti

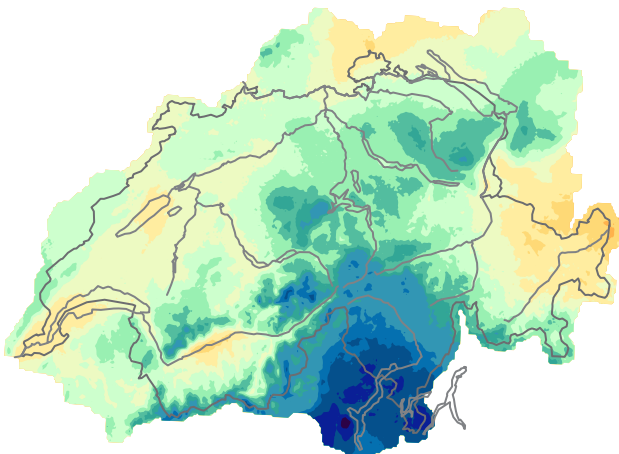
Per un'interpretazione corretta dei livelli di ritorno indicati è indispensabile tenere conto delle seguenti indicazioni:

- I livelli di ritorno descrivono le condizioni di precipitazioni puntuali. Il valore assegnato ad una griglia descrive le condizioni all'interno dell'elemento della griglia (più precisamente il centro), e non rappresenta invece la precipitazione areale media di una griglia. Le precipitazioni areali estreme non possono quindi essere lette direttamente dalle mappe qui riportate. **In particolare, non è possibile ricavare statistiche sulle precipitazioni nei bacini idrografici, ad esempio mediante una media spaziale dei valori di griglia**, perché ciò porta a una sopravvalutazione dei livelli di ritorno. È possibile convertire questi valori e derivare informazioni sulle precipitazioni areali estreme utilizzando le curve di riduzione pubblicate nell'atlante idrologico in forma cartacea (Tavola 2.5 [17]). Sono disponibili anche studi comparativi più recenti [18].
- La distribuzione generalizzata dei valori estremi GEV è alla base del modello statistico utilizzato. I livelli di ritorno mostrati in funzione del periodo di ritorno non seguono però la relazione secondo una GEV. Si tratta di una conseguenza dell'analisi stagionale stratificata e del metodo bayesiano utilizzato per la stima. Ne consegue che i livelli di ritorno per i periodi di ritorno diversi da quelli forniti non possono essere semplicemente interpolati, rispettivamente estrapolati con una semplice GEV. Tale interpolazione o estrapolazione è fortemente sconsigliata.
- Le stime dell'intensità delle precipitazioni rare sono inevitabilmente associate ad incertezze. Esse sono molto grandi per lunghi periodi di ritorno, specialmente per ubicazioni lontane dalle stazioni di misura. La rappresentazione quantitativa delle incertezze sotto forma di distribuzio-

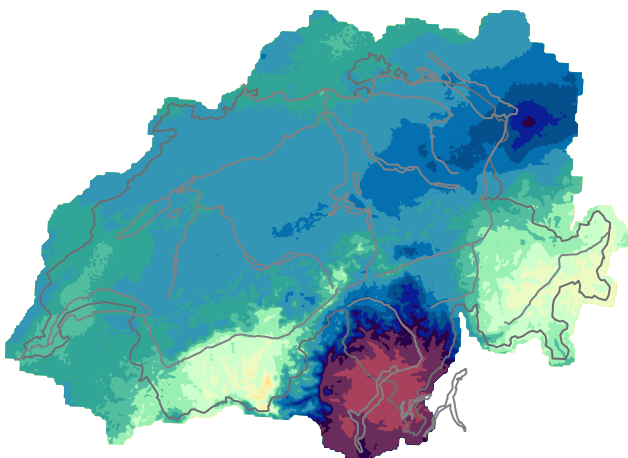
Inverno (dicembre, gennaio, febbraio)



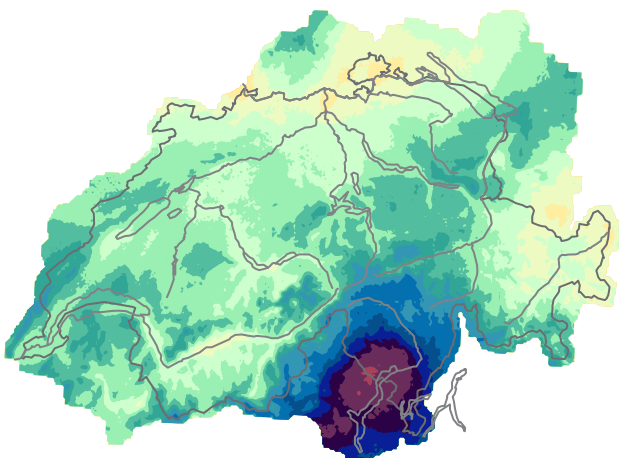
Primavera (marzo, aprile, maggio)



Estate (giugno, luglio, agosto)



Autunno (settembre, ottobre, novembre)



Valore di ritorno delle precipitazioni su 6 ore

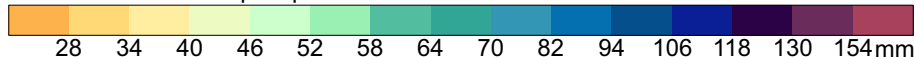


Figura 3. Livelli die ritorno ogni 100 anni delle precipitazioni in 6 ore in inverno, primavera, estate e autunno [mm/6 ore]

ni stimate è una componente importante delle analisi qui presentate. Si consiglia agli utenti di tenere conto di queste incertezze nelle loro applicazioni. La considerazione di queste incertezze porta a decisioni più solide e meno suscettibili a cambiamenti nelle stime, ad esempio quando nell'analisi sono inclusi nuovi eventi di precipitazioni intense. L'intervallo di confidenza del 95 % può essere interpretato in modo tale che il livello di ritorno effettivo sia compreso entro i due limiti con una probabilità del 95 % e al di sotto del limite inferiore o al di sopra del limite superiore con una probabilità del 2.5 % ciascuno. La mediana divide la distribuzione stimata in due parti con una probabilità del 50 % ciascuna.

- Le analisi presentate sulla piattaforma di dati e analisi subiranno nel tempo degli aggiornamenti. Ciò consentirà di aggiornare le stime esistenti con i dati di eventi recenti e di sviluppare e migliorare la metodologia statistica. Le principali modifiche sono registrate in questo documento

(vedi capitolo 6). Generalmente i cambiamenti rientrano nell'intervallo di confidenza del 95 %, con una probabilità del 5 % che possano trovarsi al suo esterno.

- I livelli di ritorno presentati nella piattaforma di dati e analisi descrivono le condizioni del clima attuale (1961–2020 risp. 1981–2020 per 60 minuti o 24 ore, vedi tabella 1 per le altre durate). Si deve però presumere che la distribuzione delle precipitazioni intense cambierà in conseguenza dei cambiamenti climatici di origine antropica. Le analisi delle attuali simulazioni climatiche in Svizzera mostrano un aumento dei valori di ricorrenza stagionale per le precipitazioni giornaliere di $T = 10$ anni e $T = 100$ anni [19]. Per uno scenario con emissioni immutate (RCP8.5), si prevede un aumento del 10–25 % entro la fine del XXI secolo. In ogni modo le incertezze sono notevoli, soprattutto per quanto riguarda i cambiamenti previsti in estate. L'influenza dei cambiamenti climatici non può ancora essere stimata in modo

| Minuti | 2 | 5 | 10 |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $l/s \cdot m^2$ | $\times 1/120$ | $\times 1/300$ | $\times 1/600$ |
| $l/s \cdot ha$ | $\times 10000/120$ | $\times 10000/300$ | $\times 10000/600$ |

Tabella 2. Fattori di conversione delle unità

robusto per intervalli di durata sub-giornaliere; ci sono ancora incertezze molto grandi sia da parte dei dati osservati, sia da parte dei modelli. Tuttavia, sia i dati osservativi che le previsioni climatiche per il futuro indicano chiaramente un aumento delle precipitazioni estreme nell'arco di una giornata nella regione alpina ([20, 21, 22]).

- I livelli di ritorno sono indicati in mm per durata. Le unità di misura comunemente utilizzate per brevi durate sono $l/s \cdot m^2$ e $l/s \cdot ha$. I fattori di conversione per l'utilizzo sono riportati nella tabella 2.

5 Confronto con le tavole HADES 2.4 e 2.4²

Le attuali mappe B04 qui descritte sulle precipitazioni puntuali estreme con durata di 60 minuti e 24 ore sostituiscono le tavole 2.4 [3] e 2.4² [4] pubblicate in precedenza nell'edizione cartacea di HADES. La Figura 4 confronta questi grafici per un periodo di ritorno di 100 anni in una presentazione uniforme (notare la convenzione di denominazione introdotta nella sezione 2.3).

Le tavole precedenti mostrano campi relativamente uniformi con relazioni poco chiare riguardo alle caratteristiche topografiche e fisiche, come valli o massicci montuosi. Sia per le precipitazioni di 24 ore che per 1 ora, le precipitazioni più estreme descrivono un arco che va dal Ticino alla dorsale alpina e lungo le Prealpi nella Svizzera orientale. Nel resto della Svizzera gli estremi sono significativamente inferiori, soprattutto per le precipitazioni di 24 ore. Infine, le analisi del passato sono costellate da numerosi massimi e minimi locali che coincidono con la posizione delle stazioni (cfr. [3]) ma che appaiono fisicamente poco plausibili. Le mappe B04 qui pubblicate (Figura 4, terza riga) mostrano una struttura molto più dettagliata con caratteristiche topografiche chiaramente riconoscibili. L'arco delle precipitazioni più intense nelle 24 ore prosegue nella regione del Napf, nelle Alpi friburghesi e bernesi. Le valli alpine e il Giura sono chiaramente riconoscibili. Nel caso delle precipitazioni di 60 minuti, l'andamento spaziale in B04 differisce in modo particolarmente marcato dalle tavole precedenti. Le anomalie a sud e a nord sono separate e quella a nord si estende lungo tutte le Prealpi e la parte più elevata dell'altopiano centrale. Per entrambi gli intervalli di durata, i valori di ritorno in B04 sono per lo più superiori a quelli delle tavole precedenti, soprattutto nelle Prealpi occidentali e nell'Altopiano centrale, ma anche in Ticino.

Le differenze osservate sono dovute a varie ragioni. Da un lato, la maggiore qualità dei dati può aver

contribuito a valutazioni complessivamente più solide. Inoltre, le condizioni climatiche odierne possono essere leggermente cambiate rispetto al passato. Ci sono indicazioni in tal senso per le precipitazioni di 1 giorno di intensità moderata con periodi di ritorno < 1 anno [23] e per i massimi annuali (analisi di MeteoSvizzera). Tuttavia, la dimensione e la forma delle differenze tra le mappe indicano che i progressi metodologici hanno contribuito a una rappresentazione più affidabile delle precipitazioni estreme. Ecco una breve descrizione delle principali ripercussioni:

- L'uso della «statistica spaziale dei valori estremi» in B04 garantisce che l'analisi sia sempre guidata dalle informazioni dell'intero collettivo di stazioni. Questa metodologia non richiede un'analisi a priori (univariata) dei valori estremi nelle stazioni (come nelle tavole 2.4 e 2.4²) e quindi non soffre di massimi e minimi locali poco plausibili (bull's eyes) come risultato delle incertezze di stima in questa fase.
- La modellizzazione con informazioni esterne (covariabili) in B04 può, in interazione con l'applicazione stratificata stagionalmente, spiegare una maggiore varianza nei dati. Questo riduce l'incertezza dell'analisi e allo stesso tempo permette di rappresentare un maggior numero di dettagli spaziali. È probabile che l'aspetto «uniforme» del pannello 2.4² sia legato al «bias condizionale» che risulta dalla varianza dei dati non interpretata. Il «bias condizionale», la sottostima dei picchi locali e la sovrastima dei minimi locali, è una conseguenza diretta dell'incertezza nelle analisi spaziali (ad esempio, [24], [25]). I valori di ritorno significativamente più bassi nella tavola 2.4² rispetto a B04 nelle regioni con estremi localmente più elevati (ad esempio Ticino, Prealpi, Giura) sono una forte indizio di questo effetto.
- Per l'analisi delle precipitazioni di 1 ora nelle tavole 2.4 e 2.4², nelle stazioni che non erano attrezzate per misurare precipitazioni di durata inferiore a un giorno i massimi annuali orari sono stati estrapolati dalle misurazioni giornaliere. Questa procedura spiega probabilmente la grande somiglianza nei modelli spaziali dei due intervalli di durata e quindi anche la netta differenza con B04. L'analisi dei 60 minuti in B04 si basa esclusivamente su dati misurati.
- Alcune differenze sono dovute anche alla conversione non uniforme dei totali delle precipitazioni ad intervalli regolari in totali delle precipitazioni su finestre mobili della stessa durata. Nelle tavole precedenti, i risultati delle 24 ore mobili erano derivati dai massimi annuali corretti in modo moltiplicativo (fattore 1.143 [26]). I risultati orari invece non sono stati aggiustati. In B04, questi aggiustamenti (vedi sezione 2.3) sono stati stratificati stagionalmente e apportati ai parametri GEV, specifici per le condizioni in Svizzera. Questa procedura è più flessibile e tiene conto del

Tavola HADES 2.4 [3]: Totale di precipitazione su 24 ore

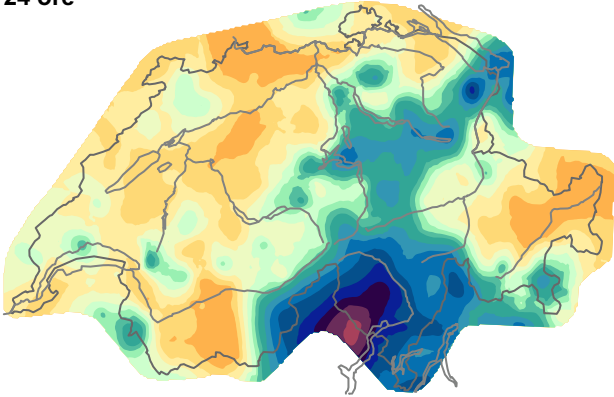


Tavola HADES 2.4 [3]: Totale di precipitazione su 1 ora

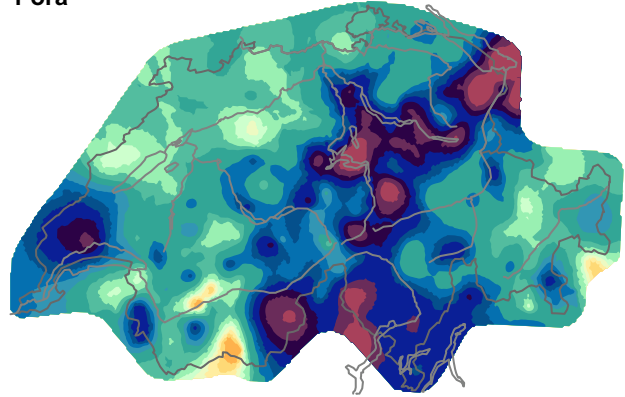


Tavola HADES 2.4² [4]: Totale di precipitazione su 24 ore

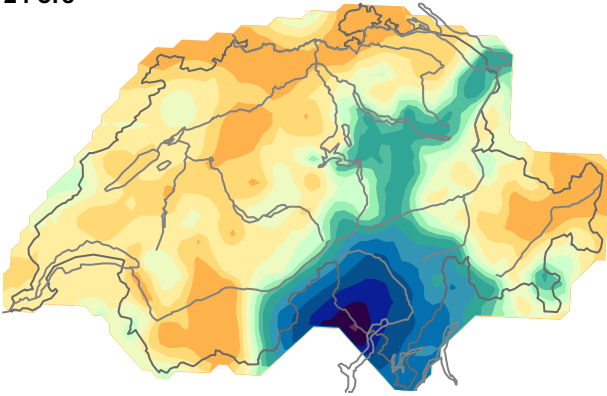
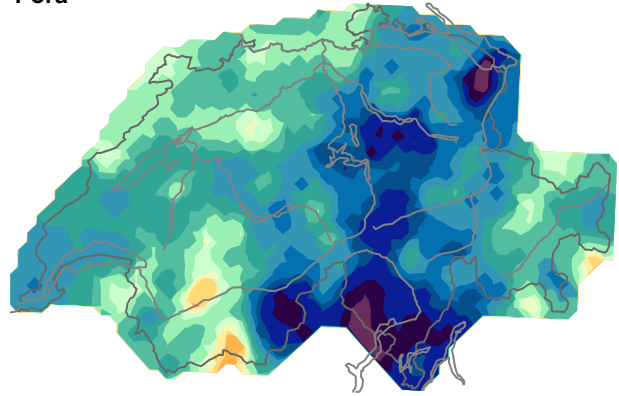
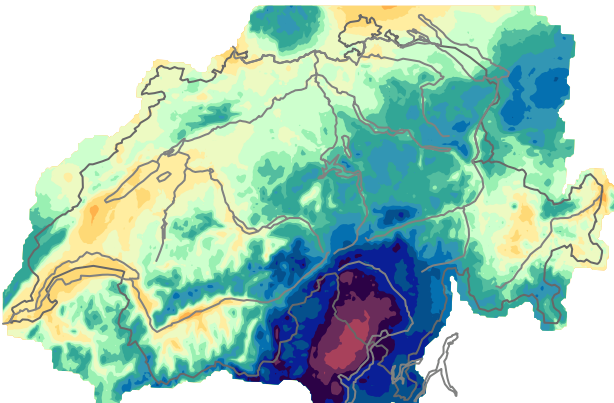


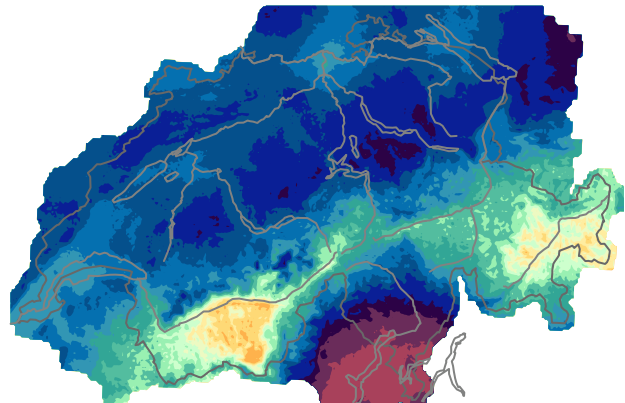
Tavola HADES 2.4² [4]: Totale di precipitazione su 1 ora



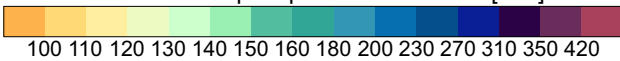
HADES B04: Totale di precipitazione su 24 ore



HADES B04: Totale di precipitazione su 60 minuti



Valore di ritorno delle precipitazioni su 24 ore [mm]



Valore di ritorno delle precipitazioni su 60 minuti [mm]

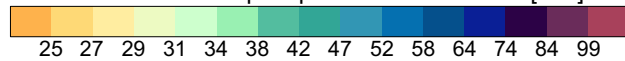


Figura 4. Confronto dei valori di ritorno di 100 anni per le precipitazioni di 24 ore (sinistra) e di 1 ora risp. 60 minuti (destra) da HADES, tavole 2.4 (sopra), 2.4² (in mezzo), e B04 (sotto)

fatto che il valore della correzione dipende dal periodo di ritorno.

Nel complesso, le analisi delle nuove mappe in B04 hanno eliminato le carenze metodologiche decisive delle mappe precedenti. Anche le nuove informazioni quantitative disponibili sulle incertezze sono un grande valore aggiunto. Le incertezze concernenti gli eventi molto rari sono considerevoli: ora se ne potrà tenere conto nella pratica.

6 Versioni

Tabella 3. Versioni

| Versione | Descrizione |
|-------------|--|
| v1.0 (2018) | Prime analisi delle precipitazioni giornaliere per giorno di calendario |
| v2.0 (2022) | Analisi per le precipitazioni di 24 ore e 60 minuti. Svizzera idrologica, con inclusione dei dati di altri paesi confinanti, griglia di 1 km, 1961–2020 e 1981–2020. Per le precipitazioni di 24 ore, la versione v2.0 differisce dalla v1.0 per due elementi essenziali: (a) i valori di ritorno si riferiscono a totali mobili (24 ore) invece che fissi (un giorno). Sono quindi generalmente più grandi rispetto alla v1.0. (b) Nella metodologia, la dipendenza dei valori massimi dei blocchi (misurati) viene tenuta in considerazione attraverso una verosimiglianza composta (Likelihood-Composite). Questo rende gli intervalli di incertezza dei valori di ritorno più realistici e, rispetto alla v1.0, di solito significativamente più ampi. |
| v3.0 (2025) | Analisi delle precipitazioni per 2, 5, 10, 180 minuti e 6, 12, 48 e 72 ore aggiunte. |

Bibliografia

- [1] MeteoSvizzera (2022). *Analisi dei valori estremi (versione 2022)*. <https://www.meteosvizzera.admin.ch/clima/il-clima-della-svizzera/primati-ed-estremi/analisi-dei-valori-estremi.html>. Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera. URL: <https://www.climate-extremes.ch>.
- [2] Fukutome, S., Schindler, A. e Capobianco, A. (2018). *MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation. Technical Report MeteoSwiss*. Third. Zürich.
- [3] Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. e Ufficio federale dell'ambiente UFAM (1992). Piogge puntuali estreme di durate e tempi di ritorno diversi 1901–1970. In: *Atlante idrologico della Svizzera*. Vol. 1. Tavola 2.4. <https://atlanteidrologico.ch/prodotti/versione-cartacea/precipitazioni/tavola-2-4>. Bern: Ufficio federale di topografia swisstopo.
- [4] Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. e Ufficio federale dell'ambiente UFAM (1997). Piogge puntuali estreme di durate e tempi di ritorno diversi 1901–1970. In: *Atlante idrologico della Svizzera*. Vol. 1. Tavola 2.4². <https://atlanteidrologico.ch/prodotti/versione-cartacea/precipitazioni/tavola-2-4b>. Bern: Ufficio federale di topografia swisstopo.
- [5] Serinaldi, F. e Kilsby, C. (2015). Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. In: *Advances in Water Resources* 77. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>, pp. 17–36. URL: <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.
- [6] Vuerich, E., Monesi, C., Lanza, L., Stagi, L. e Lanzinger, E. (2009). *WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges*. Rapp. tecn. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=15525#.W88p4y2B3dQ. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation WMO.
- [7] Frei, C. e Fukutome, S. (2026). Mapping extreme return levels of 24-hour precipitation in a region of complex topography and climate. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. in preparation.
- [8] Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- [9] Cooley, D., Nychka, D. e Naveau, P. (2007). Bayesian Spatial Modeling of Extreme Precipitation Return Levels. In: *Journal of the American Statistical Association* 102.479. <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>, pp. 821–840. URL: <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>.
- [10] Ribatet, M., Cooley, D. e Davison, A. C. (2012). Bayesian inference from composite likelihoods, with an application to spatial extremes. In: *Statistica Sinica* 22.2. <https://doi.org/10.5705/ss.2009.248>, pp. 813–845. URL: <https://doi.org/10.5705/ss.2009.248>.
- [11] Dyrddal, A. V., Lenkoski, A., Thorarinsdottir, T. L. e Stordal, F. (2014). Bayesian hierarchical modeling of extreme hourly precipitation in Norway. In: *Environmetrics*. <http://doi.org/10.1002/env.2301>, pp. 1–31. URL: <https://doi.org/10.1002/env.2301>.
- [12] Papalexiou, S., Dialynas, Y. e Grimaldi, S. (2016). Hershfield factor revisited: Correcting annual maximum precipitation. In: *Journal*

- of *Hydrology* 542. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>, pp. 884–895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>.
- [13] Gupta, V. K. e Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 95, NO. D3, pp. 1999–2009. URL: <https://doi.org/10.1029/JD095iD03p01999>.
- [14] Blanchet, J., Ceresetti, D., Molinié, G. e Creutin, J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for Intensity–Duration–Frequency analysis. In: *Journal of Hydrology* 540, pp. 82–95. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416303584>.
- [15] MeteoSchweiz (2006). *Starkniederschlagsereignis August 2005*. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211. Zürich: Meteoschweiz.
- [16] Fukutome, S. e Schindler, A. (2015). *Meteo-Swiss extreme value analyses: User manual and documentation*. A cura di Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss. Technical Report MeteoSwiss 255. Zürich.
- [17] Grebner, D., Roesch, T., Schwarb, M. e Ufficio federale dell'ambiente UFAM (1999). Precipitazioni regionali estreme di durate e tempi di ritorno diversi 1981–1993. In: *Atlante idrologico della Svizzera*. Vol. 1. Tavola 2.5. <https://atlantheidrologico.ch/prodotti/versione-cartacea/precipitazioni/tavola-2-5>. Bern: Ufficio federale di topografia swisstopo.
- [18] Haruna, A., Blanchet, J. e Favre, A.-C. (2024). Estimation of Intensity-Duration-Area-Frequency Relationships Based on the Full Range of Non-Zero Precipitation From Radar-Reanalysis Data. In: *Water Resources Research* 60.2. e2023WR035902 2023WR035902, e2023WR035902. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023WR035902>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2023WR035902>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023WR035902>.
- [19] National Centre for Climate Services NCCS, cur. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services NCCS. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- [20] Bauer, V. M. e Scherrer, S. C. (2024). The observed evolution of sub-daily to multi-day heavy precipitation in Switzerland. In: *Atmospheric Science Letters* 25(9), e1240. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.1240>.
- [21] Estermann, R., Rajczak, J., Velasquez, P., Lorenz, R. e Schär, C. (2025). Projections of heavy precipitation characteristics over the Greater Alpine Region using a kilometerscale climate model ensemble. In: *Journal of Geophysical Research:Atmospheres* 130, e2024JD040901. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024JD040901>.
- [22] Haslinger, K. et al. (2025). Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. In: *Nature* 639, pp. 667–672. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2>.
- [23] Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A. e Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 121.12. <https://doi.org/10.1038/175238c0>. URL: <https://doi.org/10.1038/175238c0>.
- [24] Olea, R. A. e Pawlowsky, V. (1996). Compensating for Estimation Smoothing in Kriging. In: *Mathematical Geology* 28.4. <https://doi.org/10.1007/BF02083653>, pp. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02083653>.
- [25] Frei, C. e Isotta, F. (2019). Ensemble spatial precipitation analysis from rain-gauge data: Methodology and application in the European Alps. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD030004>, pp. 5757–5778.
- [26] Weiss, L. (1964). *Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall*. HY 1. <http://doi.org/10.1016/j.adwatres.2014.12.013>. New York: Journal of the Hydraulics Division.