



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Influenza del cambiamento climatico sul regime delle precipitazioni intense nel Nord-Est italiano

Relatore

Prof. Marco Borga

Correlatore

Dr. Ing. Eleonora Dallan

Laureanda

Tiziana Rizzardi

Matricola

2023176

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Riassunto	1
Abstract	3
Introduzione e obiettivi	5
Area di studio	9
2.1 Area 1: bassa pianura veneta	12
2.1.1 <i>Inquadramento generale</i>	12
2.1.2 <i>Aspetti morfologici</i>	13
2.1.3 <i>Inquadramento idrografico</i>	14
2.1.4 <i>Caratteristiche climatiche</i>	15
2.2 Area 2: alto Cordevole.....	17
2.2.1 <i>Inquadramento generale</i>	17
2.2.2 <i>Aspetti morfologici</i>	17
2.2.3 <i>Inquadramento idrografico</i>	18
2.2.4 <i>Caratteristiche climatiche</i>	19
2.3 Area 3: Alto Adige occidentale	21
2.3.1 <i>Inquadramento generale</i>	21
2.3.2 <i>Aspetti morfologici</i>	21
2.3.3 <i>Inquadramento idrografico</i>	22
2.3.4 <i>Caratteristiche climatiche</i>	23
Modelli climatici	25
3.1 Modelli regionali EURO-CORDEX.....	26
3.2 Convection-Permitting Models CPM	27
3.3 Gli scenari di emissione.....	29
Dati.....	31
4.1 Dati pluviometrici disponibili.....	31
4.2 Dati da modello climatico CPM	35
Metodi.....	37
5.1 Estrazione delle serie massime annuali	37

5.2	Analisi statistica degli estremi di precipitazione: il modello probabilistico di Gumbel	38
5.3	Statistiche adottate per l'analisi dei dati	41
5.4	Correzione per la distorsione del modello climatico	43
5.5	Interpolazione IDW delle precipitazioni	45
	Risultati e discussione.....	47
6.1	Parametri statistici di correzione per la distorsione del modello.....	47
6.2	Analisi degli errori del modello climatico	52
6.2.1	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM non corrette per la distorsione.....</i>	<i>53</i>
6.2.2	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM corrette per la distorsione.....</i>	<i>58</i>
6.3	Analisi delle variazioni del modello climatico previste per il futuro prossimo 2041-2050.....	63
6.3.1	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM non corrette per la distorsione.....</i>	<i>64</i>
6.3.2	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM corrette per la distorsione.....</i>	<i>68</i>
6.4	Analisi delle variazioni del modello climatico previste per il futuro lontano 2090-2099.....	72
6.4.1	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM non corrette per la distorsione.....</i>	<i>73</i>
6.4.2	<i>Statistiche riferite a simulazioni CPM corrette per la distorsione.....</i>	<i>78</i>
6.5	Interpolazione dei quantili di precipitazione	83
	Conclusioni.....	94
	Allegato 1	99
	Bibliografia.....	105
	Sitografia	109
	Software.....	109
	Ringraziamenti	110

Riassunto

Il presente lavoro di tesi attinge all'ambito di studio dell'impatto dei cambiamenti climatici sul regime delle precipitazioni intense mediante l'impiego di modelli climatici. Lo studio dei regimi di precipitazioni estreme di durata sub-giornaliera, inferiori quindi alle 24 ore, è applicato all'Italia nord-orientale. Nello specifico, le aree oggetto di studio sono collocate nelle regioni Veneto e Alto Adige: la prima di queste è circoscritta alla bassa pianura veneta, la seconda è collocata in territorio Prealpino, in provincia di Belluno e la terza e ultima si inserisce in un contesto montano, precisamente nella parte occidentale della regione altoatesina. La scelta di focalizzare lo studio su queste tre aree è giustificata sia dalle loro diverse caratteristiche morfologiche, ma in maggior misura dal diverso livello di controllo orografico che esse esercitano sui fenomeni convettivi.

Le previsioni dei cambiamenti futuri del sistema climatico possono essere calcolate con una pluralità di modelli climatici di complessità crescente e con scale spaziali e temporali differenti. Assumendo gli aspetti appena descritti come linea guida, è opportuno avvalersi di un modello climatico che si adatti bene al contesto di studio analizzato, fornendo simulazioni modellistiche dettagliate e coerenti. Il tipo di modello climatico che restituisce simulazioni meteorologiche compatibili con l'area di studio, con le scale spaziali e temporali che caratterizzano gli eventi di pioggia, è individuato nei *Convection-Permitting Models CPM*. Le potenzialità di questi strumenti combinano un'elevata risoluzione spaziale con la capacità di rappresentare la convezione, una fonte dominante di precipitazioni che concorre in maniera significativa alla formazione di eventi meteorologici estremi. Le simulazioni climatiche fornite da CPM e impiegate in questo studio hanno una risoluzione spaziale di circa 2,2 km, risoluzione temporale di 1 ora e sono realizzate assumendo lo scenario futuro più critico relativamente alla concentrazione dei gas serra, aerosol e gas chimicamente attivi; tale scenario è definito RCP8.5.

Dopo aver individuato una linea di base costituita da dati di precipitazioni misurati in un periodo passato, a cui si accompagna l'impiego delle simulazioni da CPM, si vogliono individuare e quantificare le variazioni attese nel regime delle precipitazioni estreme future vicine e future lontane; questo dopo aver valutato gli errori nella ricostruzione delle precipitazioni intense per il periodo storico rispetto alla linea di base osservata.

L'operazione di valutazione degli errori nella ricostruzione delle precipitazioni intense fa riferimento al periodo storico 1996-2005 ed è realizzata mediante il confronto fra i dati rappresentativi della variabile di interesse, rappresentata numericamente dalle altezze di pioggia massime annuali per le durate pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore ricavate da 29 stazioni pluviometriche dislocate sui tre settori precedentemente definiti. In particolare, sono posti a confronto i valori di pioggia osservati dai pluviometri con quelli ottenuti da simulazioni corrispondenti, condizionate da modelli generali di circolazione. Allo stesso modo, le variazioni attese per i due futuri sono stabilite ponendo a confronto la linea di base, rappresentata dalla simulazione storica 1996-2005, rispettivamente con le due simulazioni future 2041-2050 e 2090-2099.

Si delineano così quattro differenti data-set, uno per ogni periodo temporale specificato. La valutazione del grado di realismo della simulazione climatica e la definizione delle variazioni attese per il futuro richiede, come operazione preliminare ai confronti tra simulazioni, l'applicazione ai massimi annuali del modello standard di analisi probabilistica delle precipitazioni di Gumbel, al fine di stimare i corrispettivi quantili di precipitazione.

Successivamente, si eseguono i confronti tra quantili al fine di quantificare gli errori che derivano dalle simulazioni e le variazioni attese. La quantificazione è espressa da tre parametri statistici, bias singolo normalizzato che permette di stimare il bias medio e deviazione standard; gli ultimi due sono rappresentati tramite grafici a barre in cui ogni parametro è rappresentato in funzione delle cinque durate considerate.

Infine, l'impiego di un metodo di interpolazione dei quantili di precipitazione associati a tempo di ritorno pari a 10 e a 20 anni, ha permesso di rappresentare, per ogni area di studio, le precipitazioni simulate per il periodo storico, per il futuro prossimo e per quello remoto. Tale raffigurazione consente e facilita l'osservazione delle variazioni delineate da CPM per il futuro rispetto alla linea di base storica.

Abstract

This thesis paper draws on the field of study of the impact of climate change on the regime of intense rainfall through the use of climate models. The study of extreme rainfall regimes of sub-daily duration, therefore less than 24 hours, is applied to north-eastern Italy. Specifically, the study area is located in the regions of Veneto and Alto Adige: the first of these is circumscribed to the low plain of Veneto, the second is located in the Prealpine, in Belluno's province and the third and last fits into a mountain context, it is located in the western part of the South Tyrolean. The choice to focus the study on these three sectors is justified, as well as by their different morphological characteristics, especially by the different orographic control they exert on convection.

Forecasts of future changes in the climate system can be calculated with a plurality of climatic models of increasing complexity and with different spatial and temporal scales. Taking the aspects described above as a guideline, it is appropriate to use a climate model that is well suited to the context of the study analyzed, providing detailed and consistent modeling simulations. The type of climate model that returns weather simulations compatible with the study area, with the spatial and temporal scales that characterize rain events, is identified in the Convection-Permitting models CPM. The potential of these instruments combines high spatial resolution with the ability to represent convection, a dominant source of precipitation that contributes significantly to the formation of extreme weather events. The climate simulations provided by CPM and used in this study have a spatial resolution of about 2.2 km, time resolution of 1 hour and are carried out assuming the most critical future greenhouse gas concentration scenario, aerosols and chemically active gases. This scenario is defined as RCP8.5. The decision to adopt the maximum level of emissions expected for the future stems from the desire to operate on a prudential basis.

Having identified a baseline of precipitation data measured in a past period, accompanied by the use of CPM simulations, The aim is to identify and quantify the expected changes in the regime of near and distant future extreme rainfall, after evaluating the errors in the reconstruction of intense rainfall for the historical period compared to the observed baseline.

The error assessment operation in the reconstruction of intense rainfall refers to the historical period 1996-2005 and is carried out by comparing the representative data of the variable of interest, numerically represented by the maximum annual rainfall heights for the duration of 1, 3, 6, 12 and 24 hours obtained from 29 rain stations located on the three sectors previously. In particular, the rainfall values observed by rainfall meters are compared with those obtained from corresponding simulations, conditioned by general circulation models. Similarly, the expected changes for the two futures are evaluated by comparing the simulated historical simulation and the future simulations, one referring to 2041-2050 and one to 2090-2099.

Four different datasets are thus outlined, one for each specified time period.

The assessment of the degree of realism of the climate simulation and the definition of the expected changes for the future requires, as a preliminary operation to comparisons between simulations, the application to annual maxima of the standard model of probabilistic analysis of precipitation of Gumbel, in order to estimate the amount of precipitation.

Next, quantile comparisons are made in order to quantify errors resulting from simulations and expected variations. The quantification is expressed by three statistical parameters, single normalized bias that allows to estimate the average bias and standard deviation; the last two are represented by bar graphs in which each parameter is represented in function of the five durations considered.

Finally, the use of a method of interpolation of the quantities of precipitation associated with return time of 10 and 20 years, has allowed to represent, for each area of study, the simulated precipitations for the historical period, for the near future and for the remote one. Such representation allows and facilitates the observation of the variations outlined by CPM for the future with respect to the historical baseline.

Capitolo 1

Introduzione e obiettivi

Il campo di ricerca rivolto ai cambiamenti climatici ricopre un interesse e una partecipazione multidisciplinare, considerata la vastità del tema del trattato. Si delinea infatti un quadro che descrive i cambiamenti climatici come un fattore che interviene in maniera trasversale su molti settori, includendo molteplici ambiti. Tra questi, quello inerente alle precipitazioni estreme e, più nello specifico, lo studio e l'analisi delle variazioni dell'intensità che caratterizza le precipitazioni estreme sub-giornaliere, richiede un'urgente e sistematica attenzione. La rapidità con cui il clima globale sta cambiando è oggi sempre più evidente, con conseguenze importanti ed evidenti, quali un aumento marcato della frequenza e della magnitudo con cui si verificano gli eventi meteorologici estremi.

Con il termine “eventi di precipitazione estrema” si indicano i fenomeni caratterizzati da ingenti volumi di pioggia che cadono in intervalli di durata di poche ore, spesso concentrandosi su superfici di limitata estensione e sono quindi rappresentati da valori che risultano essere straordinari rispetto alle medie di periodi più o meno lunghi. Negli ultimi anni il verificarsi di questi eventi, ma soprattutto l'intensificarsi della frequenza con cui questi si manifestano, si ritiene essere una conseguenza dell'influenza del cambiamento climatico. Le caratteristiche di questi eventi, ossia la rapidità e l'intensità con cui si manifestano, concorrono al verificarsi di disastri di tipo idrogeologico, essendo in grado di innescare risposte idrogeomorfiche rapide, come inondazioni improvvise e colate detritiche, le quali causano ogni anno numerose vittime e ingenti danni (Dallan et al., 2022). Alla luce di questa premessa, non risulta quindi strano se la ricerca scientifica rivolta allo studio dei cambiamenti climatici, ha molto a che fare con i rischi e con i processi decisionali che si sviluppano a tutti i livelli, da quello individuale, al governo locale, regionale, nazionale e oltre (Spano et al., 2020).

Per evidenziare la gravità della situazione globale si riporta quanto indicato dall'Ufficio delle Nazioni Unite per la Riduzione del Rischio di Catastrofi (UNDRR), secondo cui il numero di disastri naturali non è mai stato così elevato. Ogni anno questi fenomeni

provocano numerose vittime, colpiscono gravemente la popolazione e determinano ingenti perdite economiche, con un impatto devastante sugli sforzi realizzati per ridurre la povertà e promuovere lo sviluppo sostenibile. Dal 1991 al 2016, eventi geofisici quali terremoti, tsunami e attività vulcaniche ed eventi idrometeorologici e climatici come inondazioni, periodi di siccità e tempeste hanno causato 1,6 milioni di morti e colpito oltre 5,6 miliardi di persone. Durante questo arco temporale, gli eventi più frequenti sono stati le inondazioni, le tempeste, i periodi contraddistinti da temperature estreme e altri fenomeni legati alla meteorologia (UNDRR della Confederazione svizzera). La frequenza degli eventi di forte precipitazione è quindi aumentata nella maggior parte delle terre emerse, in linea con il riscaldamento globale e con gli aumenti di vapore acqueo osservato in atmosfera.

L'Italia non è immune da questi fenomeni. Basti pensare all'evento alluvionale che ha recentemente interessato la regione Marche, in particolare le provincie di Ancona, Pesaro e Urbino, nella notte tra il 15 e il 16 settembre 2022, provocando, oltre a danni di entità considerevole, ben 11 vittime, 50 feriti e lo sfollamento di oltre 150 persone.

Il territorio nazionale e, in particolare il Nord-Est, è più esposto della maggior parte dei Paesi globali ai disastri causati dalle tempeste, le quali hanno rappresentato, secondo la Protezione civile nazionale, il 75% delle richieste di stato di emergenza degli enti locali in Italia nel periodo 2012-2018 (Salvati et al., 2018). Anche i dati ISPRA del Rapporto "Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio" del 2018 confermano l'elevato livello di rischio a scala nazionale; si legge infatti che oltre 6 milioni di abitanti sono a rischio alluvioni, con un incremento del 4,4% rispetto a quanto si registrava nel 2015 (Tranchida G., 2021).

Dal punto di vista del regime delle precipitazioni, il territorio italiano è caratterizzato da una forte diminuzione del numero di giorni poco piovosi, mentre la frequenza di quelli con precipitazioni intense è in aumento in alcune regioni dell'Italia settentrionale (Lionello et al., 2009). Si prevede infatti che il riscaldamento globale modificherà il regime delle precipitazioni estreme, ed in modo particolare di quelle sub-giornaliere, come già indicato dall'esame dei dati raccolti negli ultimi decenni (Dallan et al., 2022). Infatti, sebbene non sia stato possibile osservare un trend omogeneo a livello nazionale, sono emerse tendenze crescenti significative per il Nord-Est italiano per diverse durate sub-giornaliere (Libertino et al. 2019).

In sintesi, si delinea una situazione per cui le cifre riguardanti il numero di vittime causate dagli eventi di tipo idrogeologico in Italia sono le più alte a livello europeo e ciò dimostra quanto lo studio di questo tipo di eventi sia fondamentale, in ambito idrologico e climatologico, ma allo stesso tempo abbia un forte impatto anche dal punto di vista sociale (Tranchida G., 2021).

La conoscenza delle variazioni climatiche future si basa sulle proiezioni sviluppate dai modelli climatici, i quali simulano per durate più o meno prolungate e per orizzonti temporali più o meno prossimi come sarà il clima futuro, evidenziando in particolare le possibili variazioni climatiche. Per rappresentare in maniera altamente significativa le precipitazioni estreme, in particolare quelle sub-giornaliere, vengono impiegati modelli climatici ad alta risoluzione, i cosiddetti *Convection-Permitting Models* CPM. Si tratta di modelli fisico-matematici di recente sviluppo sottoposti a costanti modifiche e aggiornamenti al fine di renderli il più attendibili e precisi possibile. I CPM si differenziano dai modelli globali e regionali, ampiamente utilizzati, oltre che per una maggior risoluzione anche per la capacità di risolvere in modo esplicito i processi convettivi atmosferici, i quali sono responsabili dei temporali estivi. La simulazione della convezione diviene quindi fondamentale per la corretta rappresentazione degli estremi sub-giornalieri, per questo i CPM forniscono una maggiore confidenza nelle future stime estreme (Roghani et al., 2022). La risoluzione spaziale elevata con cui operano questi applicativi consente di studiare direttamente i futuri cambiamenti nella frequenza, nell'intensità e nei modelli spazio-temporali di precipitazioni intense su terreni complessi. Un limite all'utilizzo di questi modelli nella modellazione del clima a lungo termine è costituito dalla necessità di utilizzare grandi risorse di supercalcolo. Tuttavia, sono stati recentemente compiuti progressi significativi nella potenza dei calcolatori e questo ha reso più accessibile il loro utilizzo nella previsione del clima.

Considerate le potenzialità di questa tipologia di modelli, essi sono impiegati nel presente lavoro di tesi. Lo studio si basa infatti sull'utilizzo dei modelli climatici ad alta risoluzione a convezione permessa, ossia i CPM, attraverso i quali si realizzano simulazioni delle precipitazioni per il Nord-Est italiano. Le simulazioni così ottenute costituiscono il dataset di base impiegato per la realizzazione delle elaborazioni caratterizzanti questo elaborato. Le precipitazioni sono simulate, a partire da una linea di base costituita da precipitazioni massime annuali osservate per il periodo 1996-2005, per un periodo storico

definito dal decennio 1996-2005 e per due scenari futuri, quello prossimo corrispondente al decennio 2041-2050 e quello remoto, rappresentato dall'arco temporale 2090-2099.

L'obiettivo generale dello studio è lo sviluppo di una metodologia che consenta di valutare gli impatti del clima che cambia e, in particolare, degli eventi di precipitazioni estreme su alcune aree circoscritte del Nord-Est italiano caratterizzate da un differente controllo orografico. Nello specifico, l'analisi delle variazioni future delle precipitazioni a scala temporale sub-giornaliera per il decennio prossimo 2041-2050 e per quello remoto 2090-2099 sono quantificate mediante un raffronto con la linea di base costituita dal periodo storico 1996-2005 mediante l'impiego del modello standard di analisi probabilistica delle precipitazioni, ossia il modello di Gumbel.

Gli ambiti territoriali su cui si focalizza lo studio sono tre: la zona situata a sud-ovest di Padova corrispondente alla bassa pianura veneta, il territorio posto in prossimità del bacino idrografico dell'alto Cordevole nell'ambito del bacino del Piave e il territorio dell'Alto Adige occidentale posto a ovest di Merano. Questi tre comprensori di ricerca assumono un significato legato alla morfologia specifica di queste tre aree, ma soprattutto al differente controllo orografico della convezione che le contraddistingue. Quest'ultimo permette di valutare il grado di dipendenza degli errori di simulazione rispetto a questo parametro.

L'obiettivo specifico del lavoro è la realizzazione di una valutazione degli errori nella ricostruzione delle precipitazioni intense nel periodo storico 1996-2005 per durate sub-giornaliere, sulle tre aree di indagine, mediante il confronto tra i quantili di pioggia simulati a partire dai dati osservati e da simulazioni corrispondenti. A questo proposito si accompagna quello di analizzare e definire le variazioni nel regime delle precipitazioni intense ottenute da simulazioni di precipitazione per il periodo storico, condizionate da modelli generali di circolazione, e per il futuro vicino e lontano, per le diverse aree di studio e per le diverse aggregazioni temporali delle piogge.

Si ritiene importante sottolineare che il range temporale limitato, pari a dieci anni, per il quale vengono realizzate le simulazioni delle precipitazioni, comporta l'impossibilità di indagare tempi di ritorno degli eventi con un'estensione temporale più vasta, al fine di evitare il verificarsi di errori di campionamento. I tempi di ritorno esplorati possono quindi essere al massimo pari al doppio del valore che indica la numerosità dei dati osservati, sono quindi vincolati a non superare i 20 anni.

Capitolo 2

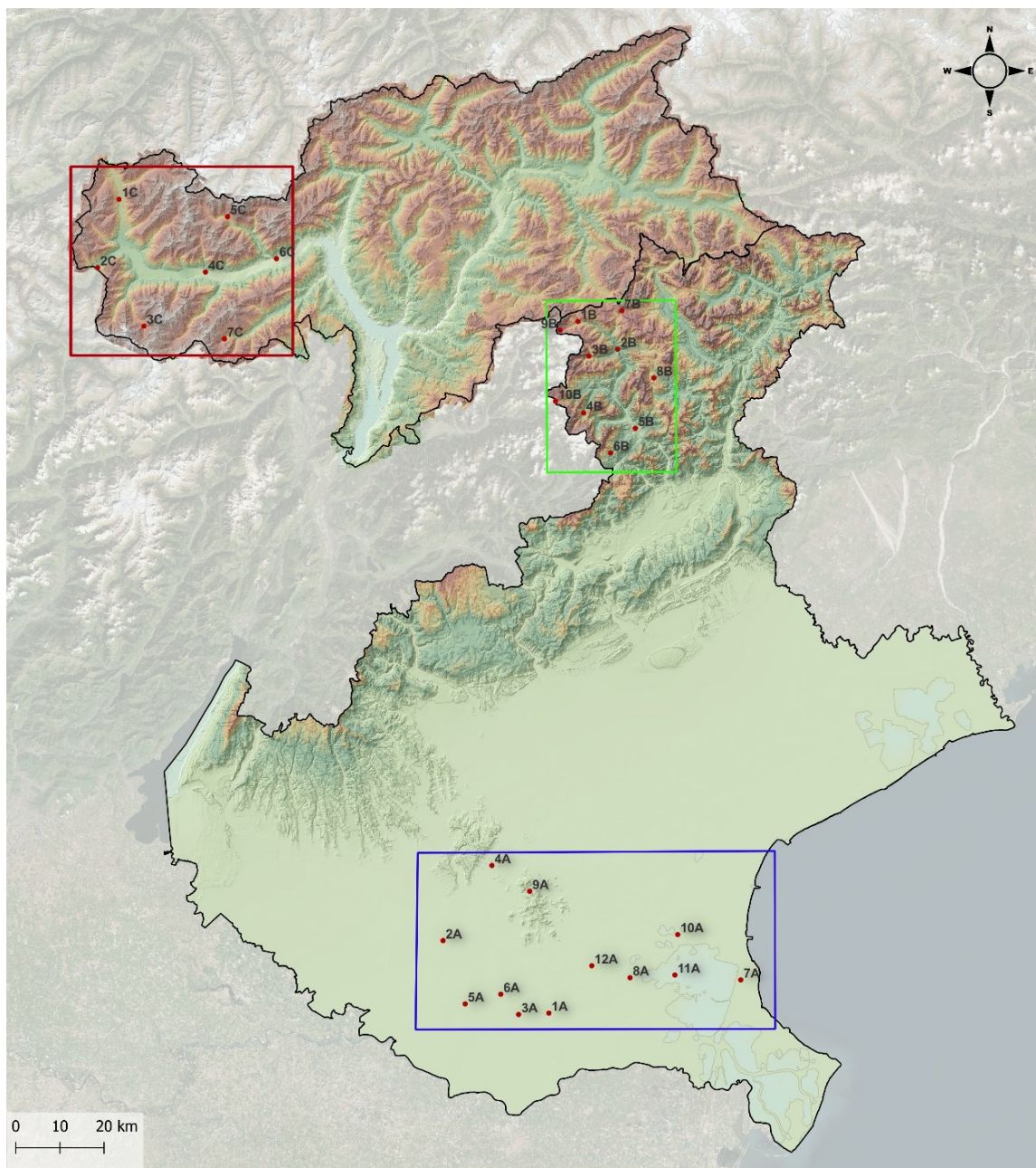
Area di studio

L'area oggetto di studio è collocata nel Nord-Est dell'Italia ed è costituita da un'ampia porzione di territorio che si estende dall'Alto Adige occidentale fino al Veneto meridionale, spaziando su una porzione di territorio che si sviluppa con quote variabili da -2 a 3.800 m s.l.m.. Le proprietà morfologiche, idrologiche, climatiche e altitudinali proprie di questo dominio ricoprono un ampio spettro di variabilità, ed è proprio questa diversità che motiva la scelta di individuare, all'interno di questo ampio contesto territoriale, tre specifiche sezioni su cui focalizzare le analisi. Questi ambiti di analisi sono i seguenti:

- i. Area 1: bassa pianura veneta;
- ii. Area 2: territorio contermina al bacino idrografico dell'alto Cordevole;
- iii. Area 3: Alto Adige occidentale.

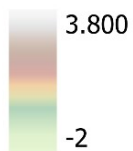
Per ciascuno di questi settori si individuano e selezionano un numero significativo di stazioni pluviometriche dalle quali si ricavano i dati massimi annuali, i quali costituiscono la linea di base assunta come riferimento per la realizzazione delle simulazioni per il periodo storico e per i due scenari futuri.

Le stazioni pluviometriche selezionate e i tre ambiti territoriali sopra elencati sono illustrati in *Figura 1* e saranno descritti in modo più dettagliato nei capitoli successivi.



Legenda:

Digital Terrain Model DTM (m s.l.m.)



• Stazioni pluviometriche

□ Confini regionali

Aree di studio:

□ Area 1: bassa pianura veneta

□ Area 2: alto Cordevole

□ Area 3: Alto Adige occidentale

Figura 1: Digital Terrain Model (DTM) raffigurante l'inquadramento territoriale delle tre aree analizzate nel presente studio, evidenziate con un rettangolo blu (Area 1), verde (Area 2) e rosso (Area 3) e ubicazione delle relative stazioni pluviometriche.

Il lavoro si focalizza su questi tre distinti settori data la loro peculiare localizzazione ed orografia, che porta ad un diverso controllo orografico esercitato sui fenomeni convettivi e a un effetto, a piccola scala, sulla distribuzione spaziale e sulle caratteristiche delle precipitazioni.

Dal punto di vista climatico, la parte nord-occidentale del dominio è caratterizzata da quantitativi minori di precipitazioni, corrispondenti in media a 500 mm annui. La sezione centrale, in corrispondenza delle Prealpi, è interessata da quantitativi nettamente maggiori, fino a 2.300-2.500 mm annui; questo è dovuto alla presenza della catena alpina, la quale costituisce il primo ostacolo orografico ai sistemi di precipitazione provenienti da sud e da ovest, i quali, impattando contro questa barriera, scaricano in quantità elevata la massa umida che li compone. Infine, nella zona di pianura e costiera la precipitazione annuale assume valori intermedi, pari a circa 800 mm annui.

Le differenti caratteristiche dei regimi pluviometrici che connotano le tre aree di indagine sono ben raffigurate in *Figura 2*, la quale rappresenta le precipitazioni medie annue dell'area alpina, espresse in millimetri.

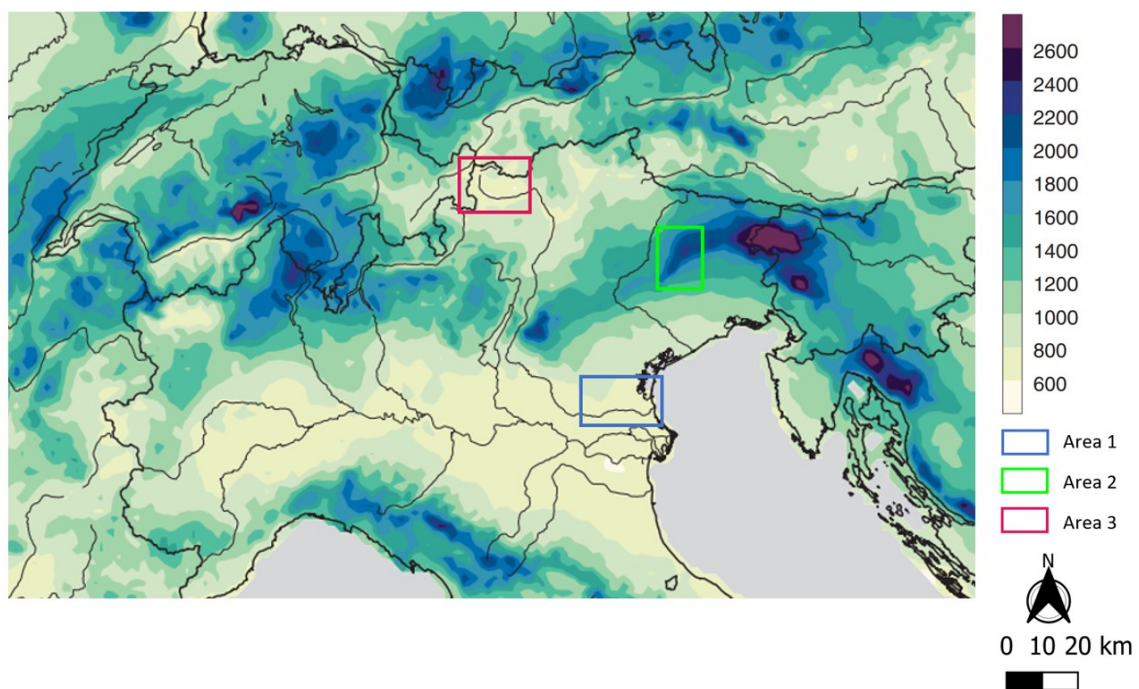


Figura 2: Precipitazione media (in millimetri) che cade annualmente sull'intero territorio alpino. Sono evidenziate con rettangoli di colore differente le tre aree di studio considerate nel presente lavoro (Fonte: Isotta F. A. et al., 2014).

2.1 Area 1: bassa pianura veneta

2.1.1 Inquadramento generale

L'Area 1 è circoscritta alla bassa pianura veneta e ingloba 12 stazioni pluviometriche, descritte in seguito al paragrafo 4.1, precisamente in *Figura 8* e in *Tabella 2* e sono ubicate tra le provincie di Padova, Rovigo, Venezia e Vicenza.

Si tratta di un ambiente spiccatamente di pianura che si estende tra il fiume Brenta e l'Adige fino raggiungere le coste adriatiche, ricoprendo così una quota consistente del territorio appartenente alla Pianura Padana veneta. Questa zona si estende su quote di poco superiori a 0 m s.l.m. e in alcuni casi, nelle aree limitrofe alla laguna di Venezia, è addirittura inferiore, come si osserva nel caso del pluviometro posto a Caverzere a una quota di -2 m s.l.m.

Come già precedentemente specificato, lo studio si focalizza su questo ambito territoriale dati gli aspetti morfologici, ma soprattutto climatici, che lo definiscono. La bassa pianura veneta, e il Veneto in generale, si pongono infatti in una zona di transizione tra l'areale centro-europeo, in cui predomina l'influsso delle grandi correnti provenienti dall'Oceano Atlantico e l'areale sud-europeo, in cui domina l'influsso degli anticicloni subtropicali del Mar Mediterraneo. A tali influssi fondamentali si associano altri fattori che influenzano in modo significativo il clima locale, quali la presenza dell'estesa fascia adriatica lungo il lato sud-orientale della regione e la delimitazione del bacino padano-veneto formata dalla catena alpina a nord e da quella appenninica a sud, con un'apertura principale verso est. Questo territorio si denota perciò per essere una zona di transizione tra l'ambiente continentale e quello marino e per il limitato effetto orografico esercitato dalla catena alpina, data la distanza dalle Alpi stesse.

2.1.2 Aspetti morfologici

L'ambito territoriale qui descritto corrisponde a una vasta area di bassa pianura, attraversata per alcuni tratti da rilievi collinari: i Colli Euganei, posti a Sud-Ovest di Padova e i Colli Berici, i quali sorgono a sud di Vicenza. I rilievi Euganei e quelli Berici, di chiara formazione vulcanica i primi e di origine marina i secondi, spezzano il territorio pianeggiante con morbide colline, le quali conferiscono una grande varietà di paesaggi che spaziano dai boschi ai frutteti fino alle grandi distese di vigne.

Nella bassa pianura veneta il sottosuolo è costituito da un'alternanza di materiali a granulometria fine (limi, argille e frazioni intermedie) con sabbie a variabile percentuale di materiali più fini (sabbie limose, sabbie debolmente limose, limi sabbiosi, ecc.). Gli acquiferi artesiani derivanti da questa struttura geologica sono caratterizzati da bassa permeabilità e contengono falde con bassa potenzialità e ridotta estensione.

La bassa pianura, di origine alluvionale, è interessata da un elevato grado di commistione tra usi agricoli e aree insediative, dove il primo di questi usi è preponderante, con un dominio della produzione cerealicola estensiva. Questa prevalente vocazione agricola del territorio è favorita dalla ricchezza di acque superficiali grazie all'articolato sviluppo di reti idrografiche dovuto allo scorrere del fiume Brenta e dell'Adige e all'elevata disponibilità ed estensione di campi pianeggianti. La variabilità spaziale della copertura e dell'uso del suolo ha significativi effetti sul clima e da tali effetti deriva la genesi dei diversi microclimi, dai cui caratteri dipendono in ultima analisi la quantità e la qualità delle produzioni agricole.

2.1.3 Inquadramento idrografico

La parte meridionale della pianura veneta, in cui rientra l'Area 1, è attraversata dal fiume Brenta e dal fiume Adige, come si osserva in *Figura 3*. Entrambi i fiumi sfociano nel mar Mediterraneo e costituiscono due rilevanti fonti di approvvigionamento idrico per l'intera regione.



Figura 3: Inquadramento idrografico dei principali fiumi che attraversano la bassa pianura veneta.

Il Brenta è il più consistente dei fiumi prealpini, si origina in Trentino in corrispondenza dei laghi di Levico e Caldonazzo, percorre tutta la Valsugana e il Veneto e, dopo uno sviluppo complessivo di 160 km, sfocia nelle vicinanze di Mestre, al di fuori della laguna di Venezia, nel Mar Mediterraneo.

L'Adige rappresenta invece il secondo fiume italiano per estensione del bacino imbrifero e terzo per lunghezza d'asta. Nasce in alta Val Venosta e si estende per 409 km attraversando l'Alto Adige, il Trentino e il Veneto, dove termina il suo percorso nel Mar Mediterraneo, in corrispondenza dei comuni di Chioggia e Rosolina.

Un'ulteriore fonte di approvvigionamento idrico importante è costituita dal fiume Bacchiglione. Esso si sviluppa interamente in Veneto con una lunghezza complessiva d'asta di 118 km, scorre nelle province di Vicenza, Padova e nella città metropolitana di Venezia e, nei pressi di Chioggia, si unisce al fiume Brenta per sfociare in ultima fase nell'alto Adriatico.

Il limite superiore della bassa pianura è segnato dalla linea delle risorgive che originano alcuni corsi di pianura, tra i quali appunto il Bacchiglione. Importante sottolineare anche la presenza di falde sotterranee profonde, dove in superficie l'acqua di risorgiva alimenta importanti pozzi artesiani, i quali sostengono estesi acquedotti per il rifornimento idropotabile di numerosi comuni vicentini e padovani. Dai corsi d'acqua superficiali e dalle falde si deriva e si attinge acqua anche per uso irriguo.

Infine, non si possono tralasciare le aree sotto il livello medio del mare, il cui regime idraulico è caratterizzato dalla presenza di un sistema di canali e impianti idrovori per la bonifica meccanica.

2.1.4 Caratteristiche climatiche

Come già precedentemente descritto, l'Area 1 è caratterizzata da un regime pluviometrico che presenta quantitativi medi annui moderati, corrispondenti a circa 800 mm. I regimi e la quantità delle precipitazioni sono variabili, si hanno infatti due massimi, uno primaverile e uno autunnale, con totali annui mediamente compresi tra 800 mm e un massimo di 1000 mm. L'inverno è la stagione che manifesta mediamente un quantitativo minore di precipitazioni; nelle stagioni intermedie prevalgono le perturbazioni atlantiche e mediterranee, con eventi pluviometrici a volte importanti. In estate i fenomeni temporaleschi registrati sono frequenti.

Il clima dell'Area 1 si caratterizza per la prevalenza di un certo grado di continentalità con inverni relativamente rigidi e umidi ed estati calde. Le temperature medie annue sono comprese fra i 13°C delle zone più interne e i 14°C della fascia litoranea. In condizioni di tempo anticiclonico la massa d'aria che sovrasta la pianura veneta manifesta condizioni di elevata stabilità o di inversione termica al suolo che si traducono in fenomeni stagionalità spiccata quali foschie, nebbie, gelate, afa e accumulo di inquinanti in vicinanza del suolo. Al verificarsi di tali fenomeni cooperano la presenza di importanti fonti di umidità quali areali irrigui e superfici marine e la presenza di brezze, fenomeni di circolazioni di venti deboli locali di origine termica.

L'area della bassa pianura comprende anche la fascia costiera, in cui l'azione mitigatrice delle acque è comunque limitata nonostante la vicinanza al mare. Questo si verifica

perché l'Adriatico è un mare interno, stretto e poco profondo, ma anche perché la dislocazione dell'areale marino lo pone in grado di mitigare solo le masse d'aria provenienti dai settori sud-orientali o orientali. Da ciò derivano temperature invernali che, seppur mitigate, sono comunque basse, in particolare per le incursioni della bora, fredda e asciutta, da nord-est.

Per quanto concerne il bilancio idroclimatico annuale, ovvero il saldo tra le precipitazioni e l'evapotraspirazione potenziale, esso diviene negativo nella fascia che comprende la parte meridionale della provincia di Verona, Padova, Venezia e tutta la provincia di Rovigo.

2.2 Area 2: alto Cordevole

2.2.1 Inquadramento generale

L'Area 2 è ubicata nella parte nord-occidentale del Veneto e ingloba una porzione consistente di territorio prealpino. Quest'aria comprende la valle del Cordevole e i suoi affluenti, bordata dalla chiostra delle Pale di San Martino, della Marmolada e del Gruppo del Sella a cavallo con il Trentino ed è quindi confinata nella porzione più a nord del bacino idrografico del torrente Cordevole.

Come precedentemente indicato a inizio del Capitolo 2, nell'ambito dell'analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sugli estremi di precipitazione, tale contesto territoriale diviene rilevante per l'effetto orografico della catena alpina che conferisce a questa zona la caratteristica di essere interessata, rispetto alle altre due aree indagate, da un consistente quantitativo di precipitazioni medie annue. Questa caratteristica è ben evidenziata in *Figura 2*, in cui sono rappresentate le precipitazioni medie annue dell'intero settore alpino.

2.2.2 Aspetti morfologici

I tratti morfologici che compongono il territorio in analisi possono essere definiti come spiccatamente montani. La struttura morfologica presenta caratteri molto articolati, con grandi differenze di quota e presenza di versanti a forte pendenza.

Il territorio qui definito come alto Cordevole rientra in parte nella regione naturale prealpina e in parte nella fascia prealpina; si estende infatti nelle Alpi Orientali e nelle Prealpi bellunesi. L'appartenenza di quest'area al contesto alpino è evidente data la presenza di numerosi rilievi, spesso intercalati da ampi altopiani. Essa è infatti circondata dalle estese aree rocciose costituite dal Gruppo delle Dolomiti, del Sella e della Marmolada. Si tratta quindi di un territorio prevalentemente montuoso, con la presenza di vette sopra i 3.000 m s.l.m.; la maggior parte delle cime più alte della provincia di

Belluno si trovano infatti in quest'area, come ad esempio il monte Pelmo e il monte Civetta, i quali raggiungono rispettivamente 3.168 e 3.220 m s.l.m.

In corrispondenza delle cime alpine si trovano aree sterili e prive di vegetazione, mentre nella zona montuosa che va degradando verso la collina si aprono aree silvo-pastorali che comprendono zone boscate e coltivate a pascolo o a vigneto, con presenza di notevoli criticità in relazione al progressivo abbandono delle aree e/o alla gestione non corretta dei boschi e/o dei pascoli (Zucaro R. e Povellato A., 2009).

2.2.3 Inquadramento idrografico

L'Area 2, dal punto di vista idrografico, si colloca nella porzione settentrionale del bacino idrografico del torrente Cordevole; tale inquadramento è illustrato in *Figura 4*. Il Cordevole è un torrente del Veneto che scorre nella porzione nord-occidentale della regione e fa parte delle Alpi orientali, ponendosi al confine tra due fra le più note catene montuose delle Dolomiti: il Gruppo del Sella a nord e il Gruppo della Marmolada a sud. È il principale affluente del fiume Piave, nonché il più lungo tra i torrenti interamente compresi nella provincia di Belluno.

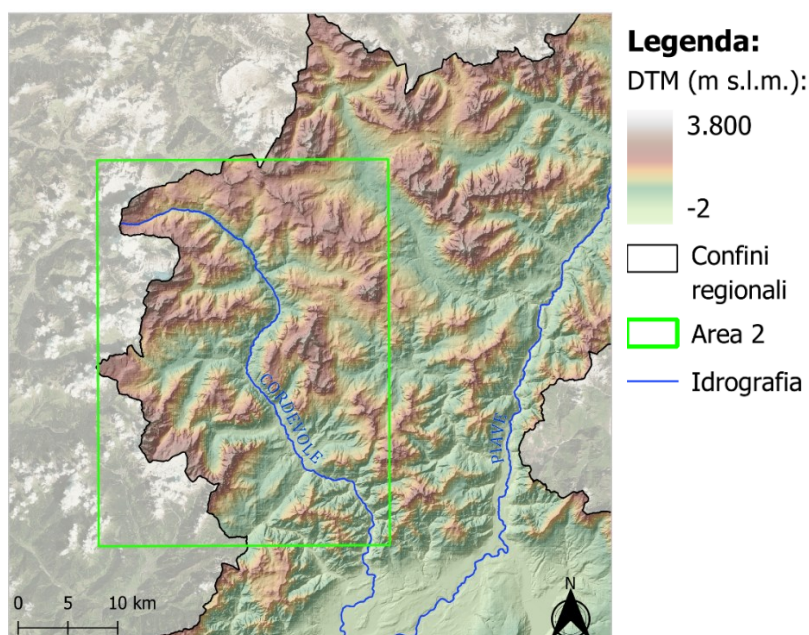


Figura 4: Inquadramento idrografico dell'Area 2 considerando i principali corsi d'acqua che attraversano il territorio in analisi.

Il bacino dell'alto Cordevole, in particolare il tratto compreso tra gli abitati di Caprile e Alleghe rappresenta un'area fragile dal punto di vista idraulico e idrogeologico. Ciò è dovuto alle caratteristiche geologiche locali, infatti, il sottobacino del torrente Fiorentina è una delle aree maggiormente dissestate.

In questo ambito territoriale si trova anche un'ulteriore fonte di approvvigionamento idrico importante, ossia il lago di Alleghe. Si tratta di un lago di origine naturale chiuso da una diga artificiale per permettere il controllo del deflusso e un aumento della capacità d'invaso.

2.2.4 Caratteristiche climatiche

Un aspetto fondamentale dal punto di vista climatico relativo a quest'area è rappresentato, come citato in precedenza, dal ruolo esercitato dalla catena alpina, la quale agisce sulla circolazione atmosferica alterandola profondamente. Le Alpi infatti in questa zona intercettano l'umidità dalla circolazione dando luogo a intensificazioni orografiche sui versanti sopravvento, originando così l'effetto Stau. Lo Stau è un vento di risalita che si presenta quando una corrente d'aria, nel superare un ostacolo montuoso, perde parte della sua umidità condensando sottoforma di precipitazioni. Localmente, questo fenomeno si verifica quando si registra bassa pressione sul golfo di Genova o sull'Adriatico (Zebisch et al., 2011). Per questo motivo le zone prealpine rappresentano le aree mediamente più piovose del Veneto, nelle quali le precipitazioni si intensificano e divengono più persistenti dando luogo, specie nel periodo autunnale, a eventi pluviometrici abbondanti (Barbi et al., 2018).

Dal punto di vista climatico, la zona dell'alto Cordevole è ascrivibile come regione climatica di tipo alpino con caratteristiche sub-oceaniche. Questa tipologia di clima è fortemente influenzata dall'altitudine e dall'esposizione, le quali variano notevolmente in base alla località e determinano situazioni differenti sia per quanto riguarda le temperature che le precipitazioni.

Le precipitazioni risultano abbondanti con valori medi che superano i 2.000 mm annui. L'andamento stagionale delle piogge è di tipo subequinoziale, con il massimo autunnale leggermente prevalente su quello primaverile ed un minimo invernale inferiore a quello

estivo; il valore minimo stagionale si registra in inverno. In autunno le precipitazioni tornano ad aumentare con un massimo in novembre corrispondente a 150-200 mm. La stagione autunnale si caratterizza non tanto per la frequenza dei giorni piovosi che sono in media 25, contro i 37 estivi e i 33 primaverili, quanto per la forte intensità delle precipitazioni: in autunno si possono abbattere piogge molto intense con quantità giornaliere che possono raggiungere i 250-300 mm (De Nadai G., 2011).

2.3 Area 3: Alto Adige occidentale

2.3.1 Inquadramento generale

L'Area 3 è costituita dalla zona occidentale dell'Alto Adige, precisamente l'ambito territoriale posto a ovest della città di Merano.

Lo studio si concentra su questa porzione di provincia altoatesina in quanto essa assume significato trattandosi di una zona situata nel tratto in cui le Alpi presentano una maggior ampiezza trasversale e questo fattore conferisce al clima locale una significativa aridità. I quantitativi di precipitazioni annue registrate sono per cui una diretta conseguenza dell'effetto esercitato dalle Alpi. Queste grandi catene montuose formano infatti un ostacolo fisico per le precipitazioni e per le perturbazioni che provengono da sud e da ovest, le quali scaricano in maniera significativa nei territori prealpini e giungono così nei territori sottovento, e quindi nella zona occidentale della regione altoatesina, in una forma decisamente più lieve e povera di umidità. Questo processo di attenuazione delle precipitazioni sottovento identifica il cosiddetto effetto Föhn.

2.3.2 Aspetti morfologici

Il territorio altoatesino in cui si colloca quest'area è posto sul versante meridionale del settore centro-orientale della catena alpina. Lungo lo spartiacque principale corre la cresta di confine, che a nord e a est separa l'Alto Adige dall'Austria e a ovest dalla Svizzera, mentre a sud-ovest il Gruppo Ortles-Cevedale e la catena delle Maddalene separano l'Alto Adige rispettivamente dalla Lombardia e dal Trentino occidentale. Ne deriva un paesaggio caratterizzato da rilievi marcati con versanti ripidi che danno origine ad un sistema vallivo assai articolato. La valle in cui rientra l'area di indagine qui descritta è la Val Venosta, la quale presenta una direttrice con andamento est-ovest.

Il territorio si estende con quote molto variabili, che spaziano da un minimo di 200 m s.l.m. in corrispondenza del fondovalle, fino ad arrivare alla quota massima di 3.851 m s.l.m., raggiunta dall'imponente massiccio del Gran Zebrù, posto nella parte sud-

occidentale dell'area di studio, in prossimità della stazione 3C. Una minima parte del territorio è situato ad un'altitudine inferiore ai 1.000 m s.l.m., mentre la maggior parte della superficie si trova sopra i 2.000 m di altitudine. La Val Venosta, la quale costituisce gran parte dell'area di analisi qui descritta, si caratterizza infatti per essere la valle altoatesina in cui si registrano i massimi dislivelli.

Il territorio risulta fortemente modellato dall'azione glaciale, con presenza di terrazzi glaciali ed anfiteatri morenici. I fondivalle sono caratterizzati da sedimenti di età più recente, la cui composizione è legata alla capacità di trasporto del corso idrico a monte.

2.3.3 Inquadramento idrografico

Sotto l'aspetto idrografico tale settore di studio risulta significativo in quanto, nel territorio che lo costituisce, si origina il fiume Adige, la cui rete idrografica si sviluppa lungo tutta la porzione occidentale della regione altoatesina, come si può osservare in *Figura 5*. L'Adige nasce a 1.525 m s.l.m., in corrispondenza del Passo Resia, in alta Val Venosta e si caratterizza per essere il secondo fiume per estensione a livello nazionale, con una lunghezza complessiva di 409 m. Esso attraversa tutto l'Alto Adige, il Trentino e il Veneto fino a sfociare nel Mare Adriatico.



Figura 5: Inquadramento idrografico della porzione occidentale dell'Alto Adige.

Il regime idrologico altoatesino è di tipo nivo-pluviale, con un'importante componente nivo-glaciale. Questa caratteristica influenza direttamente i corsi d'acqua dell'Alto Adige, i quali presentano una marcata magra invernale e una consistente morbida tardo primaverile, in corrispondenza dello scioglimento delle nevi sui rilievi. In funzione della quota della sezione di chiusura, della morfometria e della percentuale di aree si possono verificare morbide primaverili-estive o estivo-autunnali.

Un'importante fonte di approvvigionamento idrico per quest'area è costituita dai laghi, i quali sono presenti in maniera diffusa: nel contesto territoriale qui descritto rientrano il lago di Resia, il più esteso della regione e famoso per il campanile sommerso nelle sue acque, il vicino lago di San Valentino alla Muta, il lago di Vernago, il lago di Zoppolo, il lago di Quaira, il lago Gioveretto e il lago di Fontana Bianca.

Risulta significativa anche la presenza di ghiacciai, tra i quali i più estesi sono quelli appartenenti al gruppo Ortles-Cevedale e al gruppo Palla Bianca-Similaun, i quali costituiscono una fondamentale risorsa idrica soprattutto durante il periodo estivo.

2.3.4 Caratteristiche climatiche

È importante sottolineare la posizione geografica dell'Alto Adige, posta nel cuore delle Alpi, con la cresta montuosa principale a nord, i gruppi del Cevedale e dell'Adamello a ovest e le Dolomiti a est. Queste catene fungono da schermo contro le correnti umide e fanno dell'Alto Adige una regione secca a confronto di altre aree alpine.

In modo particolare il clima della Val Venosta, in cui rientra l'Area 3, si distingue per la sua mitezza soprattutto nel fondovalle e per essere la regione alpina caratterizzata dal minor tasso di precipitazioni all'interno dell'arco alpino.

Il clima a livello regionale è freddo e temperato grazie alla sua posizione privilegiata e protetta, incastonata a sud delle Alpi, le quali fanno sì che le perturbazioni giungano in quest'area in una forma decisamente più lieve rispetto a quanto avviene nelle altre regioni alpine.

Le elevate creste montuose determinano inoltre la formazione in questa zona del Föhn, un vento che porta con sé aria asciutta e calda poiché le masse d'aria si sono liberate dal vapore acqueo durante la fase di ascesa nel superamento della catena alpina.

Per quanto riguarda le precipitazioni, gli eventi pluviometrici sono distribuiti lungo tutto l'arco dell'anno, con valori cumulati caratteristici di un clima intra-alpino, che raggiungono valori massimi nel periodo estivo e valori minimi nei mesi di gennaio e febbraio, localizzati, come già visto, nella zona occidentale, dove la pioggia cumulata si attesta intorno ai 500 mm annui.

Capitolo 3

Modelli climatici

Il sistema climatico può essere pensato come un raggruppamento di vari sottosistemi in interazione tra loro: atmosfera, oceani, ghiaccio, suolo, vegetazione. Ogni cambiamento relativo a un sottosistema influisce sugli altri e ne subisce i feedback esercitando così una retroazione sulla causa stessa. L'evoluzione di questi sottoinsiemi è descritta dalle leggi fisiche e chimiche che ne governano lo stato. I modelli climatici si basano proprio su queste leggi fisiche e ne esprimono la complessità delle interazioni tra le parti del sistema climatico e la sua evoluzione nel tempo. Tali strumenti ricostruiscono il comportamento del clima facendo evolvere nel tempo il valore delle diverse grandezze che ne descrivono lo stato e che si possono anche misurare nel sistema reale (Caspani F. e Santoro D., 2014). L'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) nel Quarto Rapporto di Valutazione AR4 afferma che i modelli di circolazione globale GCM sono in grado di riprodurre le caratteristiche dei climi del passato e dei cambiamenti climatici (Randall et al., 2007). Essendo questi modelli rappresentazioni della realtà, presentano un certo grado di approssimazione che deve essere tenuto in considerazione soprattutto nella fase di caratterizzazione degli scenari futuri.

Lo sviluppo dei modelli climatici può sinteticamente essere descritto nel seguente modo: le molteplici leggi fisiche che descrivono l'evoluzione del sistema climatico e tutti i fattori che presumibilmente influenzano il clima vengono scalate in una simulazione numerica del pianeta e sono ripartite in vari box che ricoprono l'intera superficie terrestre. Si definiscono successivamente le equazioni matematiche che rappresentano i processi fisici in ciascun box e queste sono in seguito convertite in un codice numerico. L'impiego di un supercomputer consente di risolvere le equazioni per ciascun box e di simulare le variabili incognite per il periodo di simulazione utilizzando specifiche condizioni iniziali e al contorno. La capacità del modello di simulare il clima futuro ne definisce la bontà nel predire gli scenari climatici futuri.

La complessità, il numero di processi dinamici e l'esteso intervallo di scale spaziali e temporali che caratterizzano il clima terrestre hanno portato allo sviluppo di un ampio spettro di approcci modellistici differenti. I modelli climatici utilizzati per la proiezione del clima futuro vengono suddivisi in due categorie principali (Flato et al., 2013):

- Modelli Climatici Globali (GCM): sono contraddistinti da una bassa risoluzione e descrivono i processi a scala continentale o regionale;
- Modelli Climatici Regionali (RCM): vengono inseriti nei modelli globali consentendo di descrivere i processi su scala regionale e quindi a una maggior risoluzione.

Un GCM può fornire informazioni predittive affidabili su scale di circa 1.000 per 1.000 km che coprono quello che potrebbe essere un paesaggio molto diverso, da pianure costiere molto montuose a pianeggianti, ad esempio, con un potenziale molto variabile di inondazioni, siccità o altri eventi estremi. I RCM e il downscaling statistico empirico (ESD), ossia il processo di aumento della risoluzione spaziale e temporale dei risultati delle simulazioni da GCM, applicati su un'area limitata e guidati da GCM, possono invece fornire informazioni su scale molto più piccole supportando una valutazione e una pianificazione dell'impatto e dell'adattamento più dettagliate, che è vitale in molte regioni vulnerabili del mondo.

3.1 Modelli regionali EURO-CORDEX

Il *World Climate Research Programme* (WCRP) ha istituito nel 2009 una Task Force a cui ha assegnato il compito di sviluppare il programma CORDEX (*COrdinated Regional climate Downscaling Experiment*). Si tratta di un'iniziativa la cui missione è quella di generare proiezioni future del cambiamento climatico regionale per tutte le regioni terrestri del globo. CORDEX produce un insieme di molteplici modelli regionali a partire dai modelli di circolazione globale attraverso tecniche di downscaling dinamico o statico (Giorgi et al., 2009). Nel primo tipo di downscaling i risultati delle simulazioni da modelli climatici globali GCM vengono utilizzati come condizioni al contorno per nuove simulazioni effettuate con modelli a scala più dettagliata. La seconda tipologia di downscaling si basa invece su un legame statistico tra le variabili a grande scala, dette

perditori e quelle che vengono utilizzate per la descrizione della scala regionale, definite predittanti; tale legame viene definito studiando i dati delle serie storiche di entrambe le variabili (Flato et al., 2013).

CORDEX suddivide il globo terrestre in differenti domini, ossia regioni per le quali viene realizzato il ridimensionamento regionale. Complessivamente le regioni considerate sono 14 e quella in cui rientra il territorio studiato in questo elaborato è la Regione 4, la quale ricopre l'intera regione europea, da cui deriva il nome EURO-CORDEX assegnato ai modelli realizzati per questo settore. I modelli EURO-CORDEX prendono in considerazione le simulazioni climatiche globali dagli esperimenti del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) fino all'anno 2100.

3.2 Convection-Permitting Models CPM

I *Convection-Permitting Models* CPM sono modelli climatici che, oltre a descrivere accuratamente le caratteristiche della superficie terrestre e dell'orografia, rappresentano anche i processi a piccola scala che avvengono in atmosfera, tra i quali assume notevole importanza la convezione. La capacità di rappresentare la convezione li rende infatti particolarmente adatti ad essere impiegati nell'ambito delle statistiche climatiche relative a convezione profonda, regioni montuose o precipitazioni estreme.

L'accuratezza che caratterizza tali modelli è garantita da una spaziatura della griglia orizzontale inferiore a 4 km, la quale segna il passaggio dai *Large-Scale Models* LSM, aventi una griglia orizzontale superiore ai 10 km e quindi minor accuratezza, ai CPM. Questa evoluzione dei modelli offre l'opportunità di rivedere la misura in cui le proiezioni climatiche regionali, attualmente disponibili da modelli a risoluzione più grossolana, sono affidabili. Uno studio condotto da Prein et al. (2015) dimostra che il valore aggiunto dei CPM rispetto ai LSM si manifesta quando essi vengono applicati a piccole scale spaziali (inferiori ai 100 km e per durate sub-giornaliere), in regioni a orografia complessa e per statistiche di ordine superiore, a cui appartengono anche gli eventi estremi. Data la corrispondenza tra i criteri sopra definiti per l'adozione di questi modelli e le caratteristiche dell'area di oggetto di studio del presente lavoro, l'utilizzo dei CPM in tale contesto di analisi si dimostra essere coerente.

Un processo sottogriglia che si è dimostrato essere particolarmente critico nei LSM è la rappresentazione della convezione profonda attraverso schemi di parametrizzazione della convezione. La convezione profonda è una fonte dominante di precipitazioni in molte regioni del mondo e contribuisce in modo sproporzionato a eventi estremi come inondazioni improvvise e smottamenti dovuti a forti precipitazioni associate a sistemi convettivi su mesoscala (Prein et al., 2015). Al contrario di quanto si verifica nei LSM, nei CPM la dinamica della convezione atmosferica viene invece trattata con un'accuratezza sufficiente a rendere praticabile la disattivazione della parametrizzazione della convezione (Clark et al., 2016). I modelli a convezione permessa hanno così fornito ai centri di previsione meteorologica un cambiamento radicale nelle capacità di previsione delle precipitazioni, poiché essi non si basano più sugli schemi di parametrizzazione della convezione, riuscendo così a risolvere in modo esplicito la convezione profonda.

L'approccio di modellazione di base assunto in questo lavoro per la realizzazione delle simulazioni di precipitazioni intense è la modellazione ad area limitata, la quale nidifica telescopicamente domini ad area limitata a distanze di griglia orizzontali decrescenti con condizioni al contorno fornite da un GCM o da una rianalisi fino al raggiungimento di scale che consentono la convezione (Prein et al., 2015).

Il meccanismo su cui si basa questa modellazione è sinteticamente illustrato in *Figura 6* e risulta essere esplicativo, in maniera molto sintetica, dei meccanismi che permettono di definire i CPM: a partire dai Global Climate Models GCM si passa ai Regional Climate Models RCM, e in ultima fase si opera tramite i Convection-Permitting Models CPM.



Figura 6: Approccio di modellazione per simulazioni climatiche che consentono la convezione basato su modellazione ad area limitata. (Fonte: Prein et al., 2015)

3.3 Gli scenari di emissione

I modelli climatici regolano le simulazioni future in funzione di uno specifico scenario di emissione. Questi ultimi, sono definiti dal *National Centre for Climate Service* (NCCS) della confederazione svizzera come “rappresentazioni plausibili del futuro sviluppo delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol”. Costituiscono il primo step fondamentale per simulare il clima futuro poiché considerano differenti possibili evoluzioni dell’attività umana e sono perciò formulati secondo un ampio spettro di alternative. Si deve considerare che l’entità delle future emissioni antropiche dipende fortemente dalle decisioni prese sul piano politico a livello internazionale, dall’evoluzione della popolazione e dal progresso tecnologico.

La più recente generazione di scenari di emissione formulati sono i *Representative Concentration Pathway* (RCP), i quali designano un andamento rappresentativo dei gas a effetto serra e degli aerosol al fine di raggiungere un preciso obiettivo climatico definito da un prefissato andamento delle emissioni umane. Nello specifico, il Quinto Rapporto di Valutazione (AR5) dell’IPCC ha descritto quattro nuovi scenari RCP, definiti dal livello di forzante radiativo che è previsto sarà raggiunto nel 2100 e che viene confrontato con quello rilevato nel 1750. L’IPCC definisce il forzante radiativo come “una perturbazione imposta dall’esterno nel bilancio dell’energia radiante solare e infrarossa e viene misurato in W/m^2 alla tropopausa, lo strato che separa la troposfera dalla stratosfera”. Più precisamente, con perturbazione si intende la variazione tra il bilancio attuale e quello relativo alle condizioni preindustriali del 1750 (Forster et al., 2007).

Gli scenari RCP sono sinteticamente descritti in *Tabella 1* e rappresentati graficamente nel diagramma estratto dal report di sintesi dell’AR5 (*Figura 7*):

Scenario		Forzante radiativo	Aumento temperatura	Concentrazione CO ₂ eq. nel 2100
RCP2.6	Scenario di mitigazione	2,6 W/m ²	1°C – 2,3°C	490 ppm
RCP4.5	Scenario di stabilizzazione con riduzioni consistenti	4,5 W/m ²	1,7°C – 3,3°C	650 ppm
RCP6.0	Scenario di stabilizzazione con riduzione blande	6,0 W/m ²	2°C – 3,7°C	850 ppm
RCP8.5	Scenario ad alte emissioni	8,5 W/m ²	3,2°C – 5,4°C	> 1370 ppm

Tabella 1: Scenari RCP definiti dal National Centre for Climate Service e su cui si basano le simulazioni realizzate dai modelli climatici. (Fonte: Moss et al., 2007)

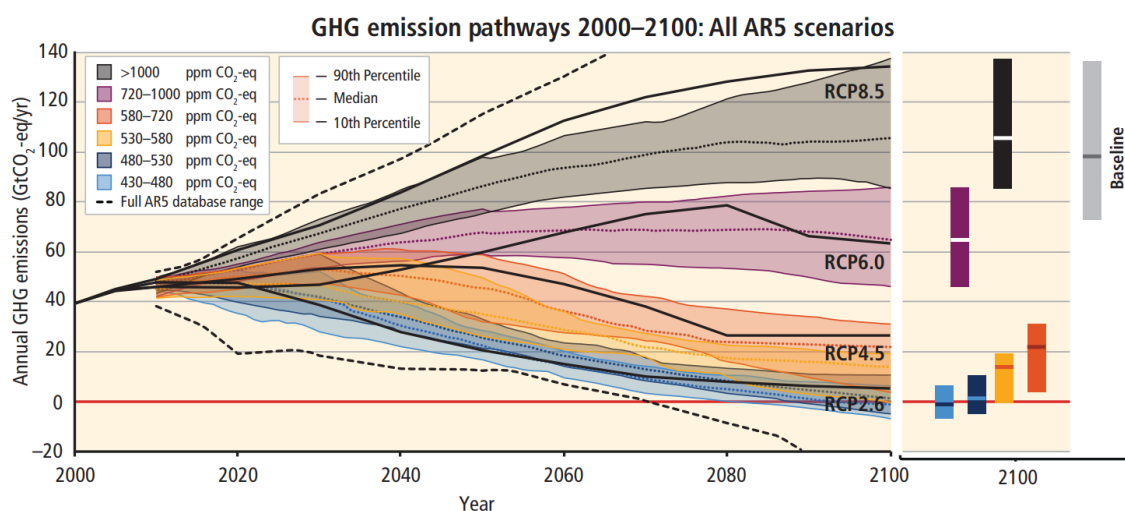


Figura 7: Rappresentazione grafica dei quattro scenari di emissione definiti RCP. (Fonte: AR5 Climate Change 2014, report di sintesi).

I quattro scenari si differenziano per livelli di criticità differenti, tali per cui lo scenario RCP2.6 considera che le emissioni globali di Green House Gas (GHG) raggiungeranno valori massimi tra il 2010 e 2020 per poi diminuire, lo scenario successivo, RCP4.5, considera un picco di emissioni nel 2040 e poi un declino; l'RCP6.0 prevede un picco di emissioni nel 2080 e cui segue una sensibile diminuzione. Infine, lo scenario più critico RCP8.5 considera un aumento continuo di emissioni per tutto il Ventunesimo secolo; il raggiungimento di tale soglia critica è una diretta conseguenza della non attuazione di politiche di mitigazione finalizzate alla riduzione e all'attenuazione dell'emissione di gas serra.

Capitolo 4

Dati

4.1 Dati pluviometrici disponibili

Gli eventi di precipitazione estrema analizzati in questo lavoro sono rappresentati dai valori massimi annuali di pioggia AM , registrati da una specifica selezione di pluviometri dislocati all'interno dei tre distretti territoriali precedentemente descritti. Le serie di AM sono suddivise e organizzate per specifiche durate sub-giornaliere, questo perché con il presente lavoro si vogliono studiare solamente gli eventi di precipitazione intensa con durata inferiore alle 24 ore. Le specifiche durate a cui si riferiscono i valori massimi annuali corrispondono allora a 1 ora, 3, 6 12 e 24 ore.

La fase preliminare di questo studio consiste in una dettagliata ricerca di serie storiche di precipitazioni registrate. Il processo di selezione delle stazioni pluviometriche da cui sono estratti i massimi annuali è regolato da due criteri guida: la completezza delle serie storiche misurate per l'arco temporale di osservazione e un numero di osservazioni cospicuo e sufficiente a derivare i massimi annuali per differenti durate; questo al fine di garantire una significatività statistica alle analisi svolte.

La base dati del presente lavoro è quindi costituita dai valori massimi annuali di durata sub-giornaliera registrati da 29 stazioni pluviometriche che coprono quote comprese nell'intervallo $-2 \div 2154$ m s.l.m. A seguire si riporta, per ciascuna area di studio, una figura rappresentativa dei pluviometri selezionati, a cui è associata una tabella riassuntiva delle informazioni principali che permettono di inquadrare e localizzare ogni stazione.

L'Area 1 è rappresentata da dodici stazioni pluviometriche dislocate tra le provincie di Padova, Rovigo, Vicenza e Venezia, come illustrato in *Figura 8*.

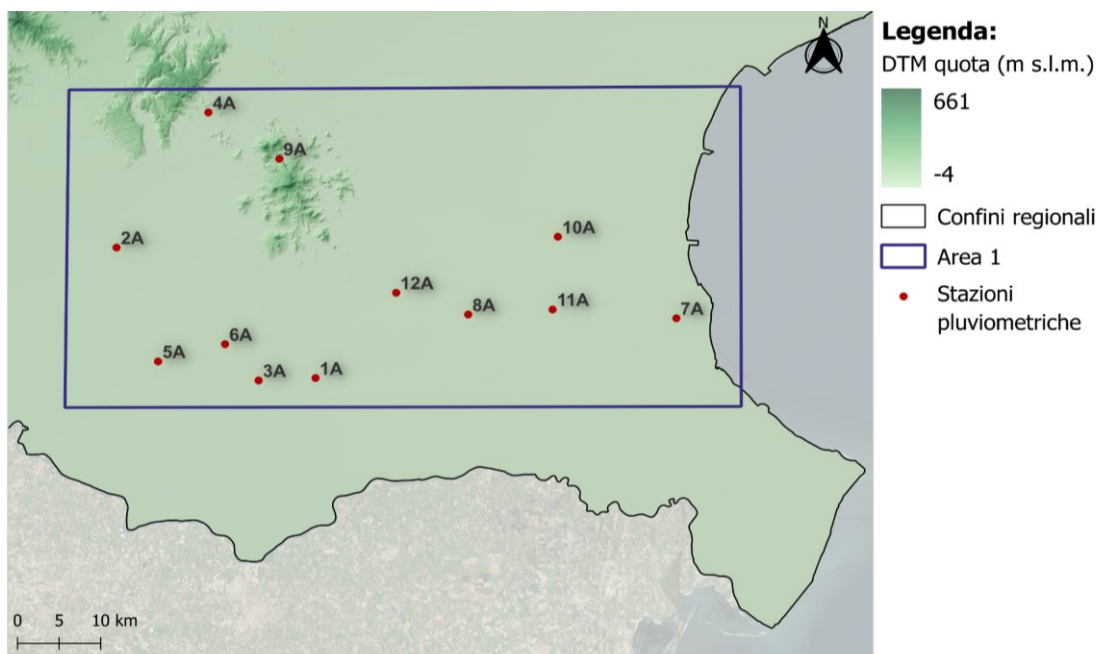


Figura 8: DTM di inquadramento dell'Area 1, in cui è illustrata la localizzazione delle stazioni pluviometriche rappresentative di quest'area.

Numeraz.	Codice	Nome	Quota m s.l.m.	Provincia	Coord. X UTM	Coord. Y UTM
1A	98	Concadirame	6	RO	714072	4996992
2A	106	Montagnana	12	PD	690106	5013424
3A	121	Lusia	6	RO	707216	4996685
4A	145	Barbarano Vicentino	16	VI	701169	5030446
5A	151	Masi	9	PD	695110	4999080
6A	152	Balduina	7	PD	703171	5001259
7A	168	Sant'Anna, Chioggia	0	PD	757518	5004521
8A	169	Agna	1	PD	732448	5004993
9A	170	Teolo	155	PD	709714	5024605
10A	175	Codevigo	0	PD	743245	5014789
11A	178	Cavarzere	-2	VE	742613	5005623
12A	182	Tribano	3	PD	723777	5007732

Tabella 2: Descrizione delle 12 stazioni pluviometriche costituenti l'ambito di indagine Area 1.

L'Area 2 comprende dieci pluviometri, di cui otto sono in provincia di Belluno e due sono ubicati sul confine tra il Veneto e il Trentino, come si vede in *Figura 9*.

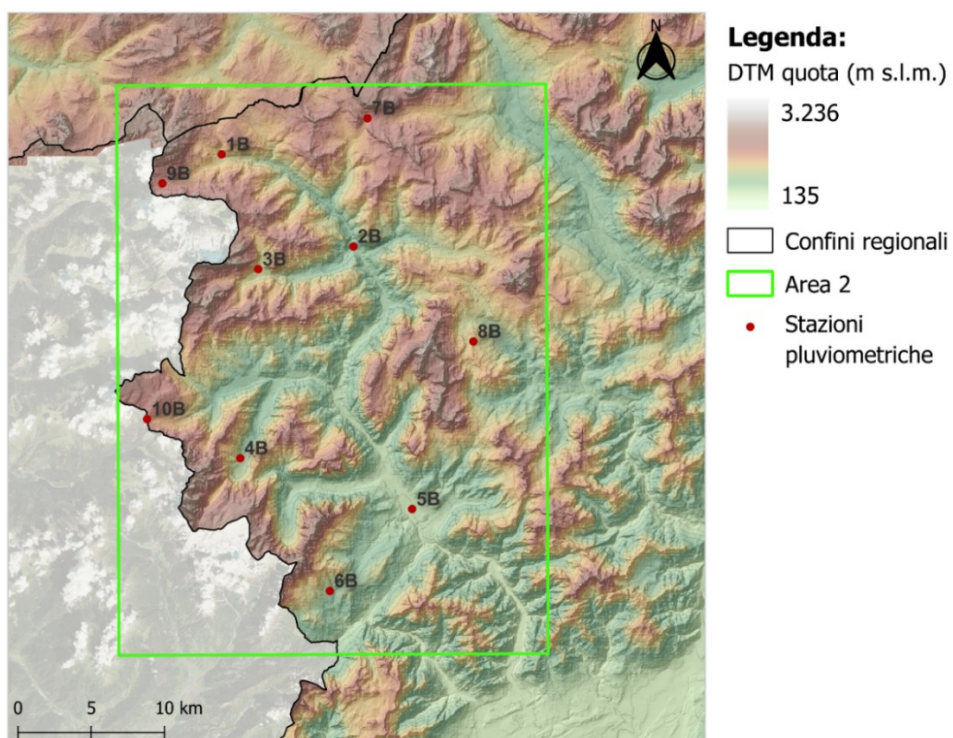


Figura 9: DTM raffigurante l'ubicazione delle corrispettive 10 stazioni pluviometriche.

Numeraz.	Codice	Nome	Provincia	Quota m s.l.m.	Coord. X UTM	Coord. Y UTM
1B	3	Arabba	BL	1642	720660	5153698
2B	9	Caprile	BL	1007	729655	5147407
3B	11	Malga Ciapela	BL	1475	723155	5145855
4B	15	Gares	BL	1365	721929	5132955
5B	19	Agordo	BL	585	733661	5129490
6B	21	Sant'Andrea, Gosaldo	BL	1254	728049	5123893
7B	37	Passo Falzarego	BL	2090	730613	5156155
8B	55	Pian del Crep, Val di Zoldo	BL	1741	737838	5140924
9B	80	Passo Pordoi	TN	2154	716615	5151711
10B	203	Passo Valles	TN	2042	715580	5135621

Tabella 3: Principali informazioni dei pluviometri associati all'Area 2.

L'Area 3 è rappresentata da sette stazioni pluviometriche, la cui collocazione è rappresentata in *Figura 10*. Le stazioni sono dislocate a quote che variano da un minimo di 541 m s.l.m. per la stazione di Naturno, fino a raggiungere la quota di 1.905 m s.l.m. in corrispondenza della stazione posta a Solda.

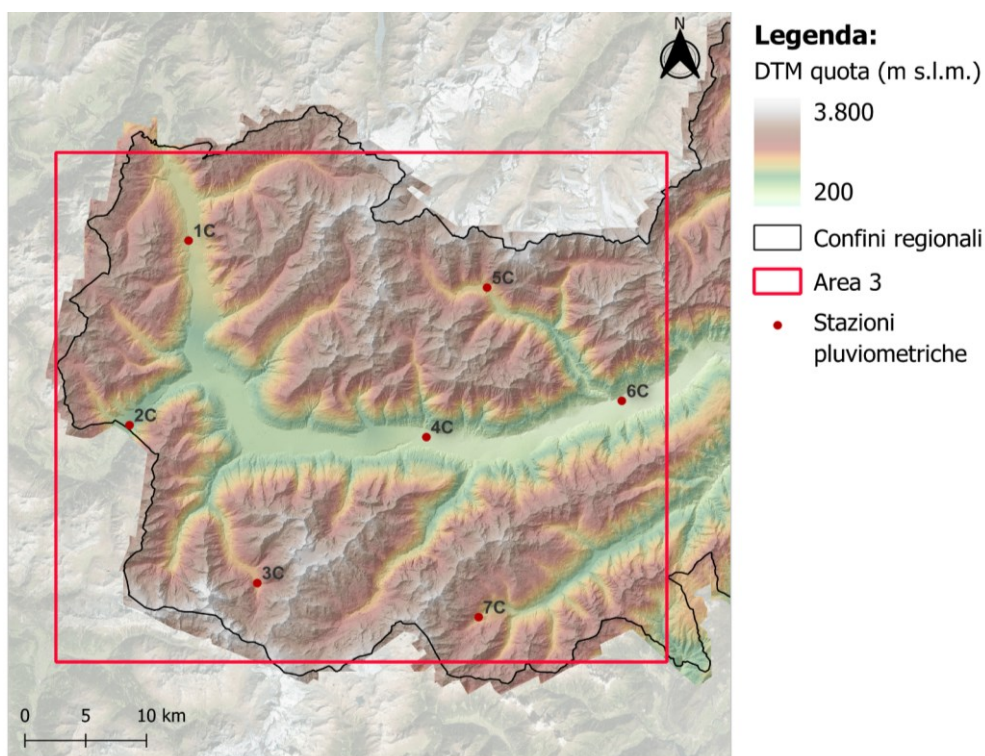


Figura 10: DTM relativo all'Area 3 e ubicazione dei 7 pluviografi individuati all'interno del territorio di competenza di tale area.

Numeraz.	Codice	Nome	Provincia	Quota m s.l.m.	Coord. X UTM	Coord. Y UTM
1C	220	S. Valentino alla Muta	BZ	1499	616720	5181393
2C	310	Tubre	BZ	1235	611860	5165895
3C	640	Solda	BZ	1905	622375	5152632
4C	970	Silandro	BZ	698	636292	5164894
5C	1580	Vernago	BZ	1700	641283	5177450
6C	1930	Naturno	BZ	541	652371	5167937
7C	2440	Fontana Bianca	BZ	1900	640591	5149772

Tabella 4: Informazioni relative alle stazioni pluviometriche rappresentative dell'area di studio 3.

I dati che costituiscono la linea di base impiegata per realizzare le simulazioni delle precipitazioni estreme sono ottenuti elaborando i dati di precipitazione ricavati dall'archivio dei dati meteorologici del sito Arpa (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) per quanto riguarda i pluviometri posti in Veneto, mentre i valori di pioggia misurati dai pluviometri ubicati nella porzione occidentale della regione altoatesina sono stati estratti dal sito Meteo Alto Adige. I dati di precipitazione ricavati da queste due banche dati ricoprono il decennio storico che intercorre tra il 1996 e il 2005, corrispondente al periodo in cui è disponibile la simulazione "storica" da CPM.

Si sono quindi individuate le stazioni pluviometriche per le quali si è verificata e accertata la disponibilità di tutte le misure di precipitazione nell'arco temporale analizzato, al fine di selezionare e definire la rete di pluviometri precedentemente descritta. Dalle serie di dati a risoluzione oraria, sono stati estratti i massimi annuali a diverse durate sub-giornaliere, con la metodologia descritta al Capitolo 5.1.

4.2 Dati da modello climatico CPM

Le valutazioni dell'impatto climatico e lo sviluppo di strategie di adattamento da regionale a locale richiedono la disponibilità di scenari di cambiamento climatico ad alta risoluzione, compresa una valutazione della loro robustezza e delle loro intrinseche incertezze (Jacob et al., 2014). Proprio per soddisfare tali esigenze e per realizzare uno studio ad elevato livello di dettaglio che garantisca risultati significativi, il modello climatico adottato per la realizzazione delle simulazioni, corrisponde al sotto-modello regionale Convection-Permitting Model CPM, appartenente all'insieme di modelli regionali definiti EURO-CORDEX.

Le simulazioni realizzate da CPM sono gestite dal Politecnico federale di Zurigo ETH Zurich attraverso il modello climatico regionale COSMO-crCLIM. COSMO (Consortium for Small-scale Modelling) identifica un consorzio istituito specificatamente per la modellistica climatica a piccola scala e opera con l'obiettivo di sviluppare, migliorare e mantenere un modello atmosferico idrostatico ad area limitata. Oltre al modello generale, molti altri programmi o ampliamenti di modello formano il sistema completo e tra questi rientra crCLIM. Si tratta di una modellazione climatica a risoluzione di convezione che

mira a sviluppare una capacità di modellazione climatica in grado di risolvere la convezione in un'area limitata. COSMO-crCLIM copre gran parte delle regioni alpine ed è definito nell'ambito di CORDEX. Quest'ultimo fornisce simulazioni per tre fasce temporali: il periodo storico 1996-2005, il futuro prossimo 2041-2050 e il futuro lontano 2090-2099.

I dati di precipitazione simulati impiegati in questo studio sono estratti nel punto della griglia implementata nel modello più vicino a ciascun pluviometro considerato. Da un punto di vista grafico si avrà quindi un punto posto in corrispondenza di ogni stazione pluviometrica e a ciascuno di questi corrisponde un punto posto sulla griglia del modello. Come già evidenziato, nell'ottica di realizzare uno studio regolato da una politica cautelativa, le simulazioni che caratterizzano il presente studio sono sviluppate in riferimento allo scenario di cambiamento climatico estremo, ovvero RCP8.5, contraddistinto dal livello massimo di criticità e sono sviluppate con una risoluzione spaziale di circa 2,2 km e con risoluzione temporale di 1 ora.

La realizzazione di simulazioni di precipitazioni estreme consente quindi di analizzare, oltre ai valori di precipitazione massimi annuali osservati da pluviometri, anche i dati di precipitazione massimi annuali simulati da modello climatico. A ciascuna area di studio corrisponderanno quindi, oltre ai AM osservati, anche tre simulazioni di valori massimi annuali: una riferita al periodo storico, una al futuro prossimo e una al futuro lontano.

Capitolo 5

Metodi

5.1 Estrazione delle serie massime annuali

Come descritto nel capitolo precedente, le serie massime annuali di precipitazione sono costituite dai dati misurati dai pluviometri per quanto riguarda le osservazioni e dai dati ottenuti da simulazioni CPM per quanto concerne le tre differenti serie simulate. I dataset costituenti le simulazioni ricoprono i tre periodi temporali per i quali i modelli CORDEX realizzano e forniscono le simulazioni: il periodo storico 1996-2005, il quale si sovrappone al decennio analizzato dalle osservazioni, il periodo futuro vicino 2041-2050, e infine quello futuro lontano 2090-2099.

I dati osservati dai pluviometri sono consultabili e scaricabili dal sito ARPAV per quanto riguarda la regione Veneto, il quale permette di scaricare direttamente le precipitazioni di massima intensità cumulate per ogni anno su cinque differenti durate orarie (1, 3, 6, 12 e 24 ore) e dal sito Meteo Alto Adige per quanto riguarda le stazioni ubicate in questa regione. Le precipitazioni massime annuali di durata sub-giornaliera simulate sono invece ricavate dalle simulazioni eseguite con CPM.

Il risultato di queste operazioni di estrazione e organizzazione dei dati AM osservati e simulati di durata sub-giornaliera corrisponde a quattro differenti serie di dati, le quali sono rinominate nel seguente modo:

- i. *Obs*: AM osservati da pluviometri nel periodo 1996-2005;
- ii. *Hist*: AM simulati da CPM per il decennio 1996-2005;
- iii. *Near future NF*: AM simulati da CPM per il futuro prossimo 2041-2050;
- iv. *Far future FF*: AM simulati da CPM per il remoto 2090-2099.

5.2 Analisi statistica degli estremi di precipitazione: il modello probabilistico di Gumbel

Le serie temporali sopra elencate sono analizzate statisticamente attraverso l'applicazione del modello probabilistico di Gumbel, al fine di collegare la magnitudo dell'evento di precipitazione estrema con la sua frequenza di accadimento, corrispondente al tempo di ritorno; si ricorda che i tempi di ritorno considerati in questo lavoro due e sono pari a 10 e 20 anni.

Il metodo probabilistico della distribuzione di Gumbel, anche definito come *distribuzione del valore estremo* dall'inglese *Extreme Value type I* (EV1) fa parte della famiglia di curve denominate *General Extreme Value* ed è uno dei metodi statistico-probabilistici più frequentemente usati nell'idrologia dei processi di piena (Benini G., 2000).

Si tratta di una distribuzione di probabilità a due parametri rappresentata dalla funzione di densità di probabilità di seguito riportata:

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

dove α e u sono i due parametri che descrivono la distribuzione; in particolare il primo controlla la forma del grafico che rappresenta la funzione (1) e il secondo ne regola la posizione.

α e u sono stimati con il *metodo dei momenti*, definito dalle seguenti equazioni:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} s}{\pi} \quad (2)$$

$$u = \bar{x} - n_e \frac{\sqrt{6} s}{\pi} \quad (3)$$

con s : varianza;

\bar{x} : media;

n_e : costante di Eulero posta pari a 0,5772.

Il metodo dei momenti è stato formulato per la stima dei parametri α e u che caratterizzano la distribuzione e permettono la costruzione della curva di Gumbel. Questo metodo impone l'uguaglianza tra momento campionario e la sua controparte, non osservabile, che caratterizza la popolazione, determinando lo stimatore come soluzione del sistema di equazioni che ne risulta.

Si procede con la determinazione del valore della variabile ridotta W_T mediante la seguente equazione, la quale richiede di essere riferita a un determinato tempo di ritorno T :

$$W_t = - \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (4)$$

In ultima fase viene calcolato il valore dei quantili di precipitazione X_T associati a una specifica durata e attesi per un evento di assegnato tempo di ritorno T , i quali sono così calcolati:

$$X_T = u + \alpha W_T \quad (5)$$

La rappresentazione dei quantili di precipitazione X_T secondo il modello di Gumbel si ritiene valida per massimi annuali di pioggia relativi a un qualsiasi intervallo di durata inferiore al giorno. Pertanto, la legge di Gumbel applicata ai massimi di generica durata d , espressa in ore, può essere rappresentata dalle *curve di probabilità pluviometrica*.

Le curve di probabilità pluviometrica sono delle funzioni che mettono in relazione l'altezza di precipitazione con la sua durata e vengono espresse mediante una legge di potenza che assume la seguente forma:

$$h_{a,T} = a_T \cdot d^n \quad (6)$$

dove: h è l'altezza di precipitazione e coincide quindi con i quantili di precipitazione X ;
 d è la durata in ore dell'evento considerato;
 T è il tempo di ritorno.

I termini a e n sono dei parametri che dipendono dalle caratteristiche pluviometriche: a dipende direttamente dal tempo di ritorno, n invece non dipende dal tempo di ritorno e assume dei valori che appartengono all'intervallo $(0, 1)$. Infatti, l'altezza della precipitazione è una funzione non decrescente della durata, di conseguenza $n > 0$. Osservando inoltre l'intensità media della precipitazione esprimibile come:

$$J_{a,T} = \frac{h_{a,T}}{a} = a_T \cdot d^{n-1} \quad (7)$$

essa presenta un andamento decrescente con il tempo, quindi necessariamente $n < 1$.

Queste curve vengono generalmente rappresentate con un diagramma bilogarithmico dove presentano un andamento lineare e, al variare del tempo di ritorno, si mantengono parallele.

Il modello di Gumbel, nel contesto del presente studio, viene applicato ai valori massimi annuali definiti precedentemente nel paragrafo 5.1. L'elaborazione statistica degli AM ha l'obiettivo di determinare la corrispondenza tra quantili di precipitazione assegnati a un prefissato tempo di ritorno e altezza di precipitazione, definendo quindi la relazione tra l'altezza di precipitazione che è espressione della magnitudo dell'evento e la sua frequenza, rappresentata dal tempo di ritorno.

Per ogni stazione, 5 durate di pioggia (1, 3, 6, 12 e 24 ore), e 4 diversi dati di partenza (Obs, Hist, Near Future, Far Future), sono stati quindi ottenuti i quantili per due tempi di ritorno, 10 e 20 anni, questo, come già indicato nel capitolo di introduzione, per limitare il verificarsi di errori di campionamento. Nel seguito si indicheranno i quantili con la seguente notazione: $X_{i,d,T,k}$, dove il pedice i indica il dataset di partenza ed assume i seguenti valori $i=Obs, Hist, NF, FF$, corrispondenti a osservazioni, CPM historical, Near future, Far future; d rappresenta la durata di pioggia in ore, T indica il tempo di ritorno, ed assume i due valori $T=10,20$ (anni); k indica la stazione pluviometrica.

La rappresentazione dei quantili in forma grafica restituisce le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica LSPP, le quali riportano in ascissa le durate sub-giornaliere e in ordinata l'altezza di precipitazione espressa in millimetri. L'equazione associata a ciascuna LSPP consente di derivare l'altezza di pioggia h prevista per assegnata durata d .

5.3 Statistici adottati per l'analisi dei dati

Gli statistici adottati per l'analisi dei dati e descritti in questo capitolo richiedono di porre a confronto le serie di quantili di precipitazione sopra descritte; questa operazione permette di realizzare un'analisi degli errori di distorsione del modello climatico e un'analisi delle variazioni previste nel regime delle precipitazioni estreme. Questo calcolo viene applicato anche alla media sull'area di riferimento dei massimi annuali.

Ne deriva che le serie di quantili di precipitazione X e le medie dei massimi annuali M sono poste a confronto nel seguente modo:

- a) Confronto osservazione con CPM historical: $X_{Obs,T,d}$ e $X_{Hist,T,d}$.
 $M_{Obs,d}$ e $M_{Hist,d}$.
- b) Confronto CPM historical con CPM futuri: $X_{Hist,T,d}$ e $X_{NF,T,d}$;
 $M_{Hist,T,d}$ e $M_{NF,T,d}$;
 $X_{Hist,T,d}$ e $X_{FF,T,d}$;
 $M_{Hist,T,d}$ e $M_{FF,T,d}$.

I confronti al punto a) permettono di analizzare gli errori derivanti dalla ricostruzione delle precipitazioni intense che caratterizzano il periodo storico simulato 1996-2005 rispetto alla linea di base osservata, dove le simulazioni del periodo storico sono effettuate tramite CPM e sono condizionate da modelli generali di circolazione.

Dai confronti al punto b) è invece possibile analizzare le variazioni simulate dal modello climatico, per il futuro vicino (NF) e quello lontano (FF), rispetto al decennio di base storico, al fine di individuare e valutare le variazioni nel regime delle precipitazioni intense simulate.

Tali confronti sono stati effettuati sulla base di tre parametri statistici:

- i. *bias singoli normalizzati BR*;
- ii. *bias medio BRM*;
- iii. *deviazione standard σ* .

In questa descrizione metodologica, con il termine *bias* si indica la differenza tra due specifici valori; si sottolinea però che nel seguito verranno distinti i concetti di “errore” quando questa differenza si riferisce al confronto osservazioni e CPM historical, e di “cambiamento” quando la differenza si riferisce al confronto tra i periodi simulati ed

esprime la variazione attesa delle precipitazioni future vicine e future lontane rispetto a quelle osservate nel periodo storico.

I BR sono differenze medie normalizzate calcolate sulle singole stazioni che in tale contesto esprimono lo scostamento tra due quantili calcolati tramite l'elaborazione dei AM. Lo stesso significato assume il confronto tra medie degli AM.

In maniera compatta, si può esprimere il calcolo di BR come:

$$BR_{Hist,d,T,k} = \frac{X_{Hist,d,T,k} - X_{Obs,d,T,k}}{X_{Obs,d,T,k}} \quad (8)$$

per i confronti al punto a) tra osservazioni e simulazione storica, e come:

$$BR_{NF,d,T,k} = \frac{X_{NF,d,T,k} - X_{Hist,d,T,k}}{X_{Hist,d,T,k}} \quad (9)$$

$$BR_{FF,d,T,k} = \frac{X_{FF,d,T,k} - X_{Hist,d,T,k}}{X_{Hist,d,T,k}} \quad (10)$$

per i confronti descritti al punto b) tra i periodi simulati, dove k la stazione pluviometrica.

Il secondo statistico calcolato è la distorsione media associata ai confronti precedentemente definiti, ossia il *bias medio BRM*. Questo è calcolato come media aritmetica applicata ai singoli $BR_{i,d,T,k}$, e considerando i pluviometri all'interno della stessa area di analisi:

$$BRM_{i,d,T,j} = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} BR_{i,d,T,k}}{n_j} \quad (11)$$

dove i indica il tipo di confronto: $i=Hist$ per i confronti di tipo a); $i=NF$ e FF per quelli di tipo b), d indica la durata di pioggia, T il tempo di ritorno (nel caso di confronto di quantili), j indica l'area di studio e n_j la numerosità dei pluviometri all'interno dell'area j .

La rappresentatività di questa valutazione media trova utilità calcolando come variano i singoli bias di stazione BR rispetto al bias medio BRM .

La deviazione standard σ è un buon stimatore delle incertezze casuali essendo un indice riassuntivo delle differenze dei valori di ogni osservazione rispetto alla media della variabile.

L'analisi della variabilità dei dati trova espressione nella determinazione della deviazione standard in quanto ogni osservazione possiede uno scostamento dalla media; tale scostamento assume valore nullo nel caso in cui non si verifichi dispersione poiché

l'osservazione ha lo stesso valore della media, valore negativo se l'osservazione ha valore più piccolo della media e valore positivo nel caso opposto in cui l'osservazione ha valore maggiore rispetto alla media.

La deviazione standard corrisponde alla radice quadrata con segno positivo della varianza, ossia della media delle deviazioni quadratiche e anche per questo parametro statistico si differenzia tra deviazione standard che esprime un errore per i confronti a) e deviazione standard che delinea una variazione attesa per i confronti b). Le formule per il calcolo di σ sono quindi così differenziate.

$$\sigma_{i,d,T,j} = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} [BR_{i,d,T,k} - BRM_{i,d,T,j}]^2}{n_j - 1} \quad (12)$$

dove i indica il tipo di confronto: $i=Hist$ per i confronti di tipo a), $i=NF$ e FF per quelli di tipo b); d la durata di pioggia, T il tempo di ritorno (nel caso di confronto di quantili), j indica l'area di studio e n_j la numerosità dei pluviometri all'interno dell'area j .

5.4 Correzione per la distorsione del modello climatico

La correzione per la distorsione del modello climatico, definita anche secondo il termine inglese *bias correction*, identifica l'operazione di correzione delle simulazioni realizzate con CPM per una specifica sorgente di errore, che nel presente studio corrisponde al bias medio BRM_{Hist} calcolato con l'equazione (11), il quale in questo contesto viene definito come *parametro statistico di distorsione*. Esso deriva dal confronto realizzato tra lo scenario osservato e quello futuro e ne esplica quindi lo scostamento.

L'operazione pratica di correzione del modello climatico si concretizza tramite la sottrazione dei BRM_{Hist} , calcolati sui massimi annuali, ai valori massimi annuali AM simulati per il periodo storico e per i due scenari futuri, al fine di perfezionare le simulazioni da CPM.

Tramite questa operazione si otterranno, oltre agli AM non sottoposti a correzione per la distorsione, gli AM corretti per la distorsione, che per una maggior intelligibilità definiamo \overline{AM} .

Il procedimento matematico così applicato a tutti i massimi annuali è il seguente:

$$\overline{AM}_{d,k,a} = \frac{AM_{d,k,a}}{1+BRM_{Hist,d,j}} \quad (13)$$

dove a è l'anno a cui è associato ciascun AM , d è la durata di precipitazione sub-giornaliera, k è la stazione pluviometrica appartenente all'area di studio j . L'anno a è compreso tra l'arco temporale 1996-2005 nel caso della simulazione storica, nell'orizzonte 2041-2050 per la simulazione futura prossima e nel decennio 2090-2099 quando si considera un AM riferito alla simulazione futura remota.

Il parametro statistico di distorsione viene applicato a tutte le simulazione realizzate con CPM, quindi agli AM della simulazione storica Hist, alla simulazione Near future 2041 e alla simulazione Far future.

L'ultima operazione di analisi che caratterizza il presente lavoro è quella di applicazione del modello probabilistico di Gumbel agli \overline{AM} corretti per la distorsione, con le procedure descritte nel paragrafo 4.2; in questo modo si ottengono dei quantili di precipitazione corretti, associati anche in questo caso a tempi di ritorno di 10 e 20 anni, che indichiamo in maniera compatta con: $\overline{X}_{i,d,T,k}$, dove il pedice i indica il dataset di partenza ed assume i seguenti valori $i=Obs, Hist, NF, FF$; d rappresenta la durata di pioggia in ore, T indica il tempo di ritorno, ed assume i due valori $T=10,20$ (anni); k indica la stazione pluviometrica.

Questa operazione permette di ripetere i confronti a) e b) al fine ultimo di analizzare se gli errori tra periodo storico osservato e periodo storico simulato e le variazioni tra scenari futuri subiscono delle modifiche.

5.5 Interpolazione IDW delle precipitazioni

Il metodo *Inverse Distance Weighting* (IDW) è utilizzato nel presente lavoro per interpolare spazialmente e visualizzare su mappe i valori dei quantili di precipitazione, riferiti agli *AM* originali e agli \overline{AM} corretti per la distorsione del modello.

L'interpolazione spaziale è il processo di manipolazione dell'informazione fornita da punti spaziali per i quali sono noti i valori di una determinata variabile, al fine di stimare i valori della stessa variabile per altri punti sconosciuti.

Una delle procedure che più frequentemente si riscontrano nell'analisi dei dati territoriali, è la stima di una variabile in corrispondenza di un sito per il quale non sono disponibili misure. Per ovviare a tale problema di mancanza di misure, si adotta il metodo dell'interpolazione spaziale, il quale permette di determinare i valori della variabile in esame da assegnare poi a un'area priva di misure, partendo da un elemento puntuale di valore noto, il quale viene definito sito di prelievo o stazione di misura. Questa procedura viene svolta con l'ausilio di un Sistema Informativo Geografico (GIS), il quale fornisce appositi moduli che consentono di eseguire attività di geoprocessing.

In ambiente GIS l'interpolazione spaziale dei punti aventi valore noto, permette di creare un'immagine raster, ossia una griglia formata da un insieme di pixel, in cui ad ogni cella quadrata è assegnato un valore stimato a partire dai punti di valore noto. Il valore stimato dipenderà dai valori misurati nei siti di misura e dalla distanza tra questi ed il sito di stima. Basando la procedura sull'utilizzo di un modello dati raster, costituito da una matrice regolare di pixel, è possibile ripetere la stima puntuale per ogni nodo della matrice, procedendo cella per cella, consentendo così di estendere la stima ad una qualsiasi superficie, ad un passo di campionamento che dipende dalla dimensione della cella. Il modello raster consente quindi di ripetere la stima puntuale per una serie di siti a passo regolare permettendo di costruire una superficie continua a partire da una serie di misure puntuali (Rossi R. e Dalla Fontana G., 2020)

Esistono diverse procedure di interpolazione, tra le più utilizzate di queste c'è appunto il metodo della media pesata sull'inverso della distanza, *Inverse Distance Weighted* (IDW). Nel metodo IDW i punti campione vengono pesati durante l'interpolazione in modo che l'influenza di ogni punto rispetto agli altri diminuisca in base alla distanza dal punto sconosciuto che si vuole stimare. I valori più vicini alla cella in esame assumono quindi

un maggior peso nel processo di interpolazione rispetto a quelli più lontani. L'azione di pesatura è inoltre regolata da un parametro di potenza esp , per cui al crescere di tale parametro diminuisce l'influenza dei punti più distanti. Il valore interpolato z per ciascuna cella è quindi uguale a:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{g_i^{esp}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^{esp}}} \quad (14)$$

dove: n è il numero di punti di misura utilizzati

g è la distanza di ogni punto dal centro della cella in esame

esp è il parametro di potenza (esponente), assunto in questo contesto pari a 3.

Capitolo 6

Risultati e discussione

6.1 Parametri statistici di correzione per la distorsione del modello

I parametri statistici di correzione per la distorsione del modello derivano, come descritto dettagliatamente al punto a) del Capitolo 5.3, dai confronti realizzati tra le medie dei massimi annuali M osservate nel periodo 1996-2005 e le medie dei massimi annuali M simulate per il medesimo decennio. I valori dei parametri così ottenuti, indicati come $BRM_{Hist,d}$ sono riportati in *Tabella 5* e a seguire sono rappresentati graficamente tramite opportuni grafici a barre in *Figura 11*, *Figura 12* e *Figura*. Il grafico rappresentativo dei parametri statistici di distorsione, calcolato per ogni area di studio e per ciascuna durata di pioggia, è associato a un ulteriore grafico in cui sono indicati i valori di deviazione standard $\sigma_{Hist,d}$, calcolati come indicato dall'equazione (12).

	Durata	Area 1: bassa pianura venera	Area 2: alto Cordevole	Area 3: Alto Adige occidentale
<i>Parametri statistici di distorsione</i>	1 ora	0,001	0,383	0,295
	3 ore	-0,017	0,369	0,249
	6 ore	0,024	0,392	0,161
	12 ore	0,069	0,428	0,179
	24 ore	0,114	0,682	0,299

Tabella 5: Parametri statistici di distorsione applicati ai valori massimi annuali AM al fine di implementare nel modello l'errore corrispondente allo scostamento registrato tra i dati osservati e quelli simulati da CPM per il periodo storico.

Area 1: bassa pianura veneta

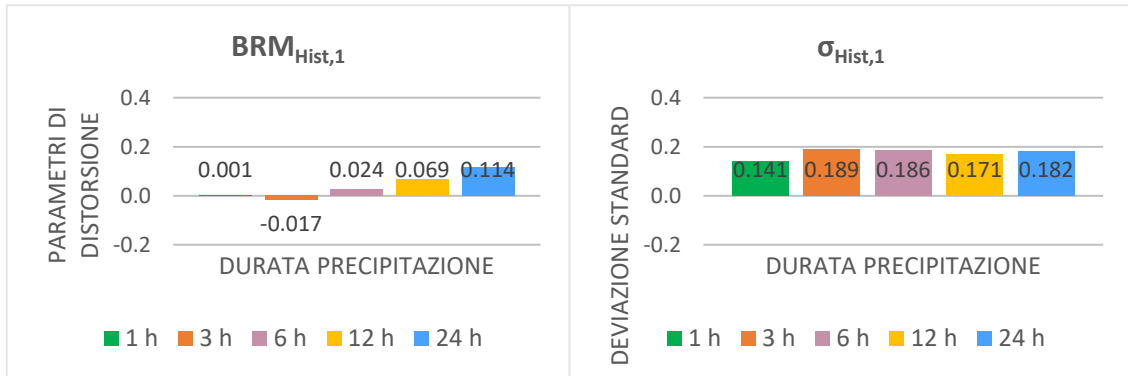


Figura 11: Parametri statistici di distorsione $BRM_{Hist,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,1}$ calcolati per l'Area 1 tramite il confronto tra medie dei massimi annuali osservate M_{Obs} e storiche simulate M_{Hist} .

Area 2: alto Cordevole

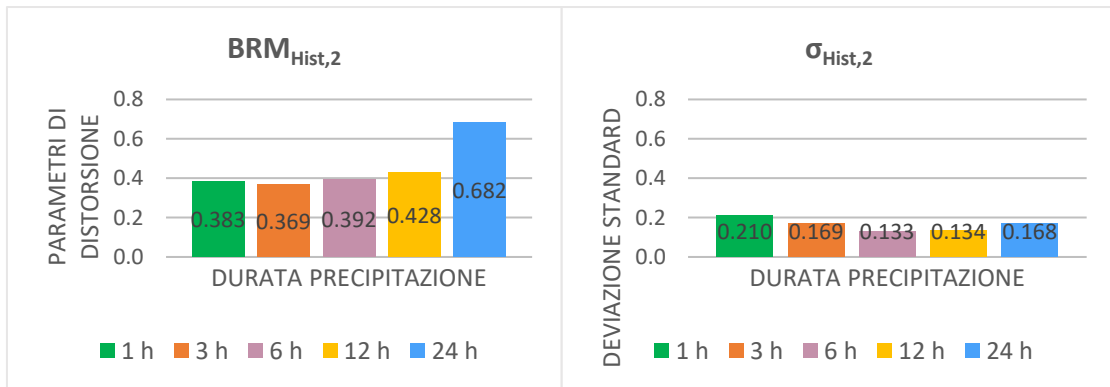


Figura 12: Parametri statistici di distorsione $BRM_{Hist,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,1}$ calcolati per l'Area 2 tramite il confronto tra medie dei massimi annuali osservate M_{Obs} e storiche simulate M_{Hist} .

Area 3: Alto Adige occidentale

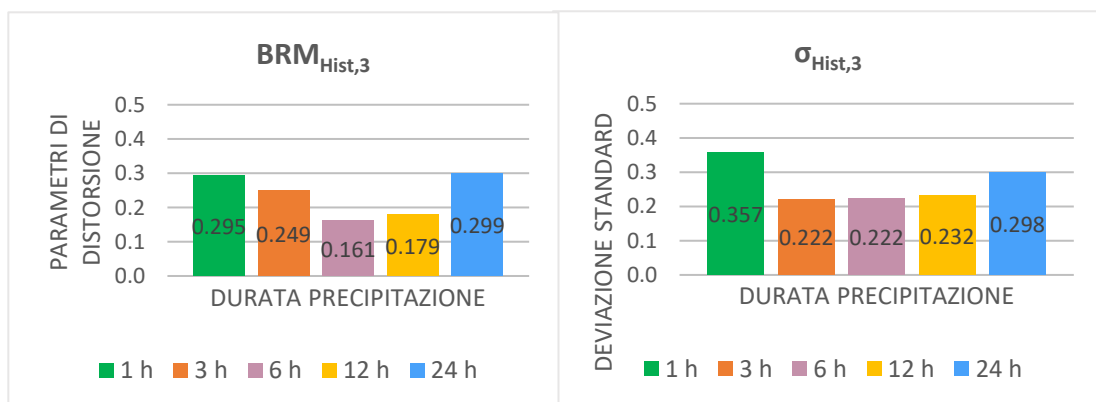


Figura 13: Parametri statistici di distorsione $BRM_{Hist,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,1}$ calcolati per l'Area 3 tramite il confronto tra medie dei massimi annuali osservate M_{Obs} e storiche simulate M_{Hist} .

I parametri statistici di distorsione sono sottratti ai massimi annuali AM di tutte e tre le serie di dati simulati (Historical, Near future e Far future), facendo corrispondere area di studio e durata di pioggia del parametro statistico a quella del singolo AM , secondo quanto indicato dall'equazione (13), al fine di correggere i valori per la specifica entità di errore. Inoltre, i valori delle deviazioni standard esprimono la variabilità dei parametri di distorsione $BR_{Hist,d}$ calcolati per ogni singola stazione pluviometrica appartenente a una delle tre aree di studio rispetto al parametro di distorsione $BRM_{Hist,d}$ rappresentativo dell'intera area.

Dall'osservazione dei parametri statistici di distorsione risulta evidente che essi assumono tutti valore positivo, ad eccezione dello statistico riferito alla zona della bassa pianura veneta, Area 1, per durata pari a 3 ore. Considerando che tali parametri esprimono l'errore medio normalizzato derivante dalla differenza tra i quantili di precipitazione storici e quelli osservati, il segno positivo indica che i quantili associati a AM simulati da modello CPM assumono valori maggiori rispetto a quelli derivanti da AM osservati, escluso il caso sopra descritto per cui si verifica la situazione inversa.

Concentrando l'analisi dei parametri sulle singole aree di studio, si osserva che l'area corrispondente alla bassa pianura veneta è quella in cui gli errori sono di ordine di grandezza inferiore rispetto a quanto avviene per gli altri due settori. In particolare, l'errore medio normalizzato ottenuto per durata di pioggia pari a 1 ora è molto contenuto, è infatti prossimo allo zero (valore pari a 0,001) e questo indica un buon grado di validità del modello CPM nella ricostruzione delle precipitazioni per quest'area e questa specifica durata. Inoltre, sempre per l'Area 1, il maggior valore del parametro statistico registrato, associato a durata 24 ore, risulta essere inferiore ai parametri ottenuti per le altre due aree di studio.

La zona dell'alto Cordevole è quella per la quale si registrano gli scostamenti di maggior entità. Il dato che quantifica lo scostamento massimo tra osservazioni e simulazioni è ottenuto per durata di pioggia di 24 ore e corrisponde a una differenza percentuale tra le due serie di dati del 68,2%, definendo quindi una sorgente d'errore significativa. Lo scostamento minimo registrato per quest'area è legato a una durata inferiore, pari a 3 ore, con un valore percentuale del 38,3%, delineando anche per questa durata un errore di entità importante.

I parametri di distorsione stimati per l'Alto Adige occidentale presentano valori intermedi rispetto alle due stazioni appena descritte, in cui il valore minimo registrato è associato alla durata di precipitazione pari a 6 ore ed è pari a 0,166, esprimendo quindi una sorgente d'errore abbastanza contenuta, mentre quello massimo è pari a 0,299 e lo si registra con una durata di 24 ore.

Inoltre, la zona della bassa pianura veneta è rappresentata da parametri statistici di distorsione il cui valore aumenta con il prolungarsi della durata delle precipitazioni. Questo andamento caratterizza anche i parametri riferiti all'Area 2, ad eccezione dei valori associati a durata 1 e 3 ore, mentre non lo si osserva per i parametri di distorsione che descrivono la zona dell'Alto Adige occidentale, in cui il dato di minor entità corrisponde alla durata intermedia di 6 ore. Si evince così che i range di ampiezza entro cui si collocano gli errori calcolati per l'Area 1 e per l'Area 3 sono contenuti, assumendo un valore che rappresenta la differenza tra dato minimo e dato massimo pari rispettivamente a 0,113 e 0,138, a fronte di un range con ampiezza pari 0,299 calcolato per l'Area 2, in cui, come già sottolineato, si sono riscontrati valori dei parametri di distorsione maggiori.

Dall'analisi dei valori di deviazione standard $\sigma_{Hist,d}$ si evince che i valori di $BR_{Hist,d}$ calcolati per l'Area 1 e l'Area 2, espressione quantitativa del discostamento tra osservazione e simulazione riferito a ogni singola stazione pluviometrica, si discostano di poco dal valore medio $BRM_{Hist,d}$, indicando quindi che quest'ultimo li rappresenta in maniera significativa. I valori di deviazione standard ottenuti sono infatti più contenuti per la zona della bassa pianura veneta, essi variano da 0,141 a 0,191 dove il primo è associato a durata 1 ora e quindi al parametro di distorsione minore e il secondo descrive il parametro di distorsione riferito a durata pari a 3 ore, il quale come visto in precedenza assume segno negativo.

Leggermente più elevati sono i valori di deviazione standard che descrivono l'Area 2. Questi variano da 0,133 a 0,210, dove il primo rappresenta $BRM_{Hist,d}$ pari a 0,392 riferito a durata di 3 ore, mentre il secondo è associato a $BRM_{Hist,d}$ pari a 0,383 per durata 1 ora. La variabilità rispetto al valore medio si mantiene contenuta e ciò indica che le differenze calcolate tra serie di dati osservati e storici simulati per ogni singola stazione pluviometrica assumono valori prossimi al valore medio $BRM_{Hist,d}$ che li rappresenta.

In ultima analisi, per l'Alto Adige occidentale si osserva che, come avviene per i valori dei parametri di distorsione, anche quelli riferiti alla deviazione standard si riscontrano valori maggiori rispetto alle altre due aree. Questi si collocano infatti in un range che varia da 0,222 ottenuto per durata pari a 3 e 6 ore e 0,357 riferito a durata 1 ora, esprimendo quindi una maggior ampiezza di variabilità dei parametri di distorsione calcolati per le singole stazioni pluviometriche rispetto al valore medio.

In sintesi, la simulazione storica realizzata per il consorzio territoriale della bassa pianura veneta, caratterizzato da una limitata capacità di esercitare un controllo orografico sulla convezione in quanto formato da un territorio principalmente pianeggiante in cui si inseriscono rilievi collinari le cui forme non sono sufficientemente marcate da costituire un ostacolo per le correnti che attraversano quest'area, restituisce parametri statistici di distorsione di minor entità esplicativi di una buona bontà nella ricostruzione delle precipitazioni storiche estreme.

Le simulazioni restituite per l'Alto Adige occidentale appaiono avere un grado di bontà moderato. La validità della simulazione è infatti descritta da parametri di distorsione di valore intermedio rispetto alle altre due aree analizzate; tale valore è sì moderato rispetto alla zona della bassa pianura veneta ma si ritiene essere non del tutto trascurabile.

Infine, le simulazioni eseguite per l'area dell'alto Cordevole, in cui il controllo orografico esercitato dalla catena alpina è importante data la presenza di massicci montuosi che raggiungono quote elevate, oltre i 3500 m s.l.m., risultano essere le più critiche in quanto si è stimato uno scostamento rispetto alla linea di base osservata più marcato che viene quindi interpretato come una minor affidabilità della simulazione storica. L'errore maggiore tra osservazione e simulazione storica lo si riscontra soprattutto per le durate di pioggia sub-giornaliere maggiori.

6.2 Analisi degli errori del modello climatico

I confronti tra le serie di quantili di precipitazione X , realizzati come descritto al punto a) del paragrafo 5.3, permettono di calcolare i bias singoli normalizzati $BR_{Hist,d,T,k}$ per ogni singola stazione pluviometrica, come definito dall'equazione (8), dai quali si ricava il valore del bias medio normalizzato $BRM_{Hist,d,T,j}$ e delle relative deviazioni standard $\sigma_{Hist,d,T,j}$. Il bias medio normalizzato quantifica l'errore del modello climatico nel ricostruire le precipitazioni estreme per il periodo storico simulato a partire dalla linea di base osservata.

La rappresentazione di questi parametri statistici riprende quella vista in precedenza per i parametri di distorsione. I valori sono infatti riportati graficamente tramite grafici a barre in cui l'asse delle ordinate riporta il valore dell'errore medio normalizzato $BRM_{Hist,d,T,j}$ o della deviazione standard $\sigma_{Hist,d,T,j}$ e l'asse delle ascisse riportata le cinque durate di precipitazione sub-giornaliera studiate (1, 3, 6, 12 e 24 ore). I grafici sono distinti per area di studio e per tempo di ritorno (10 e 20 anni).

Al paragrafo 6.2.1 sono riportati i grafici a barre derivanti dall'elaborazione dei quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello; il paragrafo successivo, il 6.2.2, riporta invece i grafici riferiti ai quantili di precipitazione \bar{X} stimati tramite l'elaborazione dei massimi annuali \overline{AM} corretti per la sorgente d'errore definita numericamente al Capitolo 6.1.

6.2.1 Statistici riferiti a simulazioni CPM non corrette per la distorsione

Area 1: bassa pianura veneta

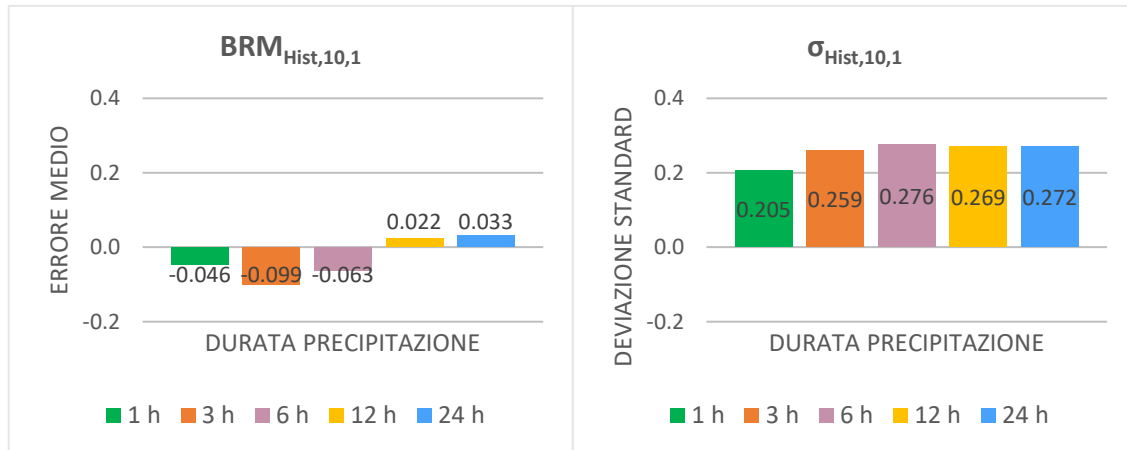


Figura 14: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 10 anni.

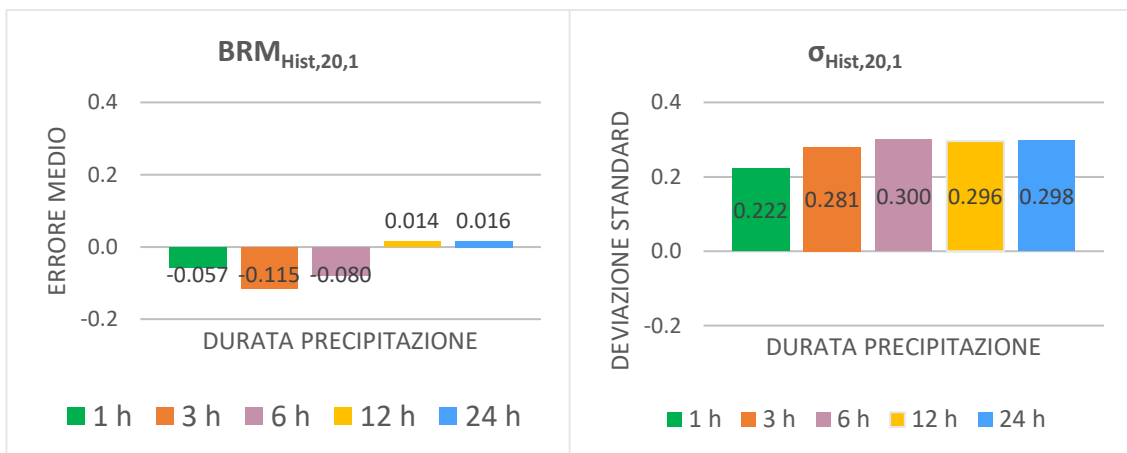


Figura 15: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 20 anni.

Area 2: alto Cordevole

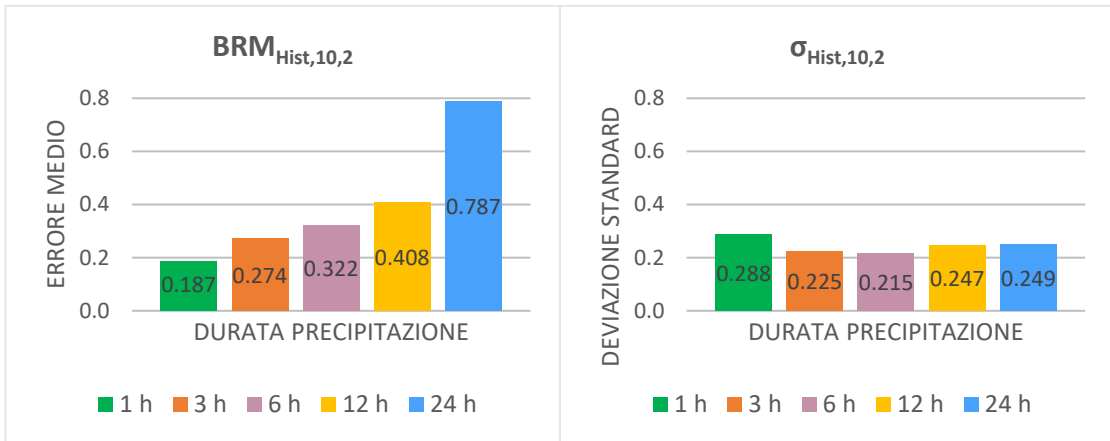


Figura 16: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,2}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 10 anni.

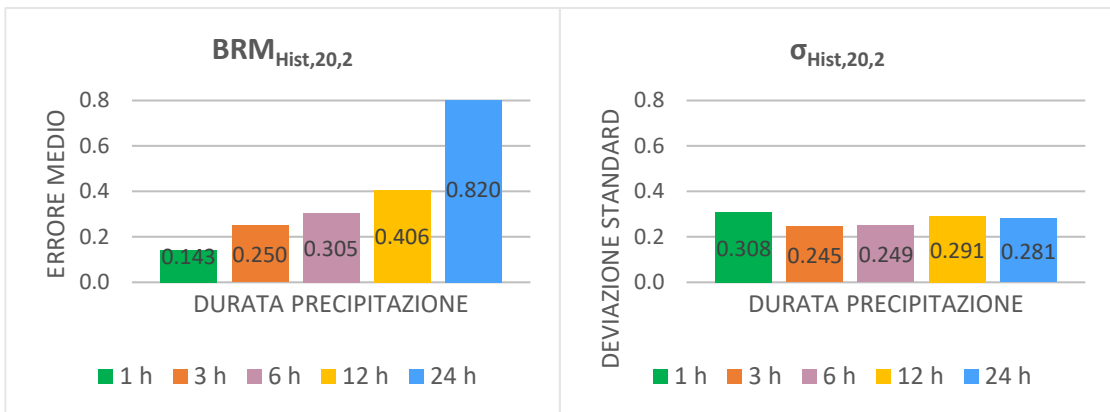


Figura 17: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 20 anni.

Area 3: Alto Adige occidentale

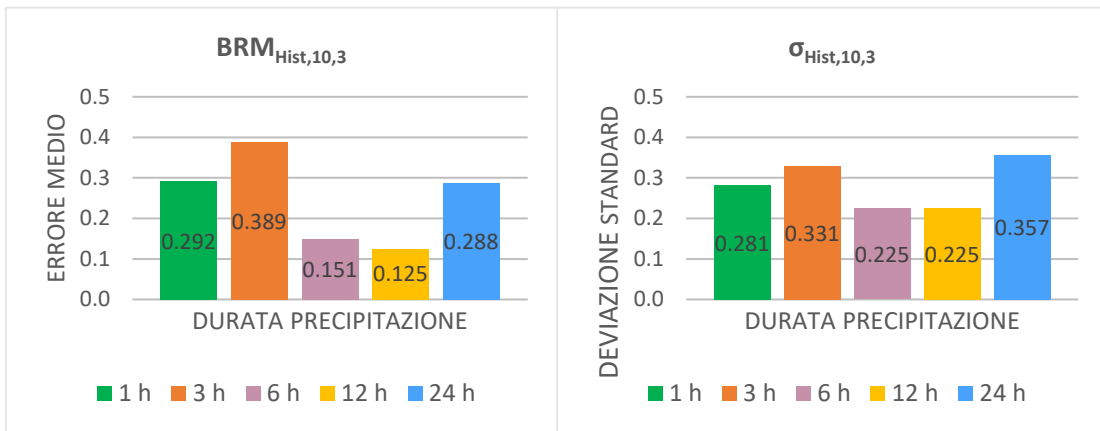


Figura 18: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,3}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 10 anni.

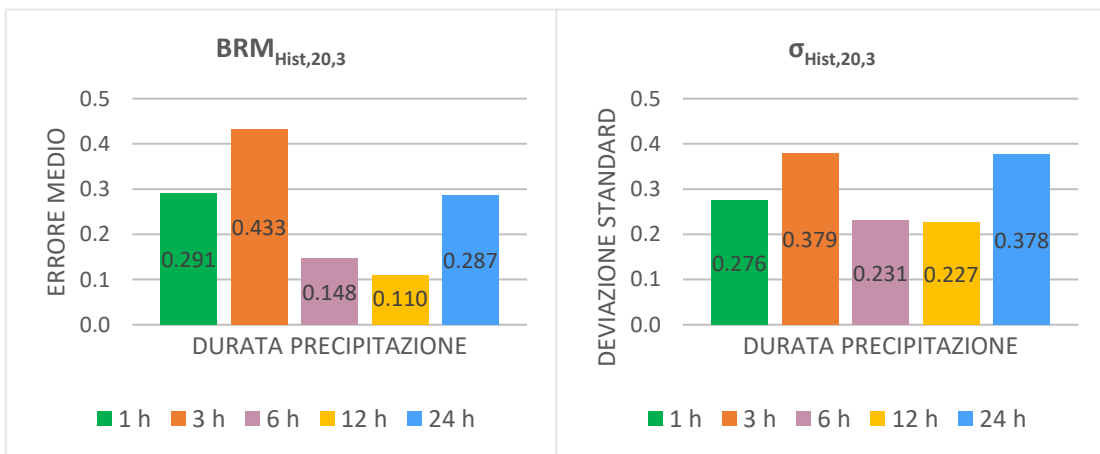


Figura 19: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per i quantili di precipitazione X associati a tempo di ritorno 20 anni.

L'analisi dei grafici a barre rappresentativi degli errori medi normalizzati permette di valutare la bontà delle simulazioni storiche realizzate da CPM rispetto alla linea di base osservata.

I risultati ottenuti per le tre aree di studio mostrano che in generale i valori maggiori di $BRM_{Hist,d,T,j}$ riferiti ai quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione sono quelli ottenuti per l'Area 2, l'alto Cordevole. In particolare, il valore massimo di errore è associato ai quantili di precipitazione calcolati con $T=20$ anni e per la durata di pioggia pari a 24 ore. Ciò avviene ovviamente anche per l'errore associato a $T=10$ anni, ma con un grado di errore minore, il quale, letto in chiave percentuale, risulta essere pari all'82% con $T=20$ anni che diminuisce al ridursi del tempo di ritorno considerato, assumendo un valore pari al 78,7% con $T=10$ anni.

Una buona bontà dei risultati si riscontra anche sui valori di deviazioni standard calcolati per quest'area. I valori sono contenuti in un range che varia da un minimo di 0,215 associato a $T=10$ anni e durata 3 ore a un massimo pari a 0,288 con stesso tempo di ritorno e durata pari a 1 ora. Con $T=20$ anni il range assume valori maggiori compresi tra 0,245 e 0,291. Si desume quindi che all'aumentare del tempo di ritorno diminuisce la variabilità degli errori calcolati per le singole stazioni pluviometriche attorno al valore medio.

Gli errori di minor entità si manifestano invece per l'Area 1, bassa pianura veneta, in maniera concorde a quanto riportato nell'analisi dei parametri statistici di distorsione. Per l'Area 1 i valori di $BRM_{Hist,d,T,j}$ si mantengono molto limitati, essendo infatti prossimi allo zero. Si ritiene importante sottolineare che i valori di $BRM_{Hist,d,T,j}$ per durata 1, 3 e 6 ore assumono segno negativo e ciò indica che i quantili derivanti da AM simulati sono inferiori rispetto a quelli calcolati da AM osservati.

I valori di deviazione standard ottenuti per l'Area 1 sono contenuti, in linea con quelli registrati per l'Area 2. Le deviazioni standard stimate sono infatti comprese tra 0,205 e 0,276 con $T=10$ anni, in cui il dato minore corrisponde a durata 1 ora e quello maggiore a durata 3 ore, mentre con $T=20$ anni i valori sono compresi tra 0,222 e 0,300 e si riferiscono alle stesse medesime durate.

Gli statistici che descrivono gli errori per l'Alto Adige occidentale, Area 3, mostrano un andamento differente rispetto alle prime due aree. Infatti, in questo caso l'errore non aumenta con l'aumentare della durata di pioggia, ma il valore minimo di $BRM_{Hist,d,T,j}$, lo

si registra per i quantili associati a una pioggia di 12 ore, mentre quello massimo è legato alla durata di 3 ore.

I valori di deviazione standard osservati per quest'area sono molto elevati: con $T=10$ anni si registrano valori compresi tra 0,225 corrispondente a durata 6 e 12 ore e 0,357 per la durata massima pari a 24 ore; anche per piogge di 3 ore la deviazione standard è elevata, si registra un valore pari a 0,331. Questi valori si intensificano con $T=20$ anni, arrivando ad ottenere il valore 0,379 per durata pari a 3 ore. Da queste osservazioni si desume che il valore di errore medio normalizzato $BRM_{Hist,d,T,j}$ calcolato per quest'area non è rappresentativo in maniera significativa degli errori calcolati sulle singole stazioni pluviometriche.

In generale quindi, una maggior bontà della simulazione storica dei massimi annuali AM non corretti per la distorsione rispetto alla linea di base osservata, che si ripercuote quindi sui quantili di precipitazione X , la si ottiene l'area della bassa pianura veneta, mentre una maggior entità degli errori di distorsione del modello contraddistingue la simulazione effettuata per l'alto Cordevole. La bontà della simulazione riferita all'area dell'Alto Adige occidentale risulta quindi intermedia tra le due. Questi risultati sono confermati anche dai valori e dagli andamenti osservati per le deviazioni standard.

6.2.2 Statistici riferiti a simulazioni CPM corrette per la distorsione

Area 1: bassa pianura veneta

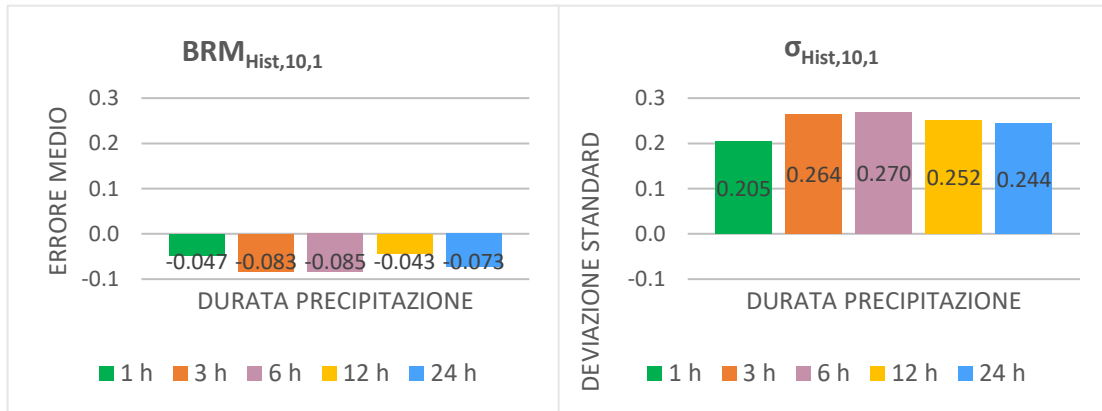


Figura 20: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,1}$ riferiti all'Area 1, calcolati per quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=10$ anni.

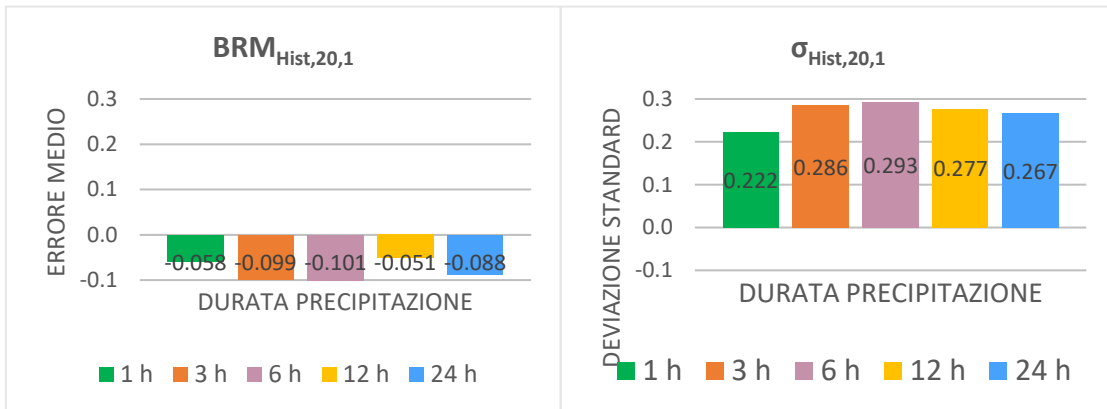


Figura 21: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,1}$ riferiti all'Area 1, calcolati per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=20$ anni.

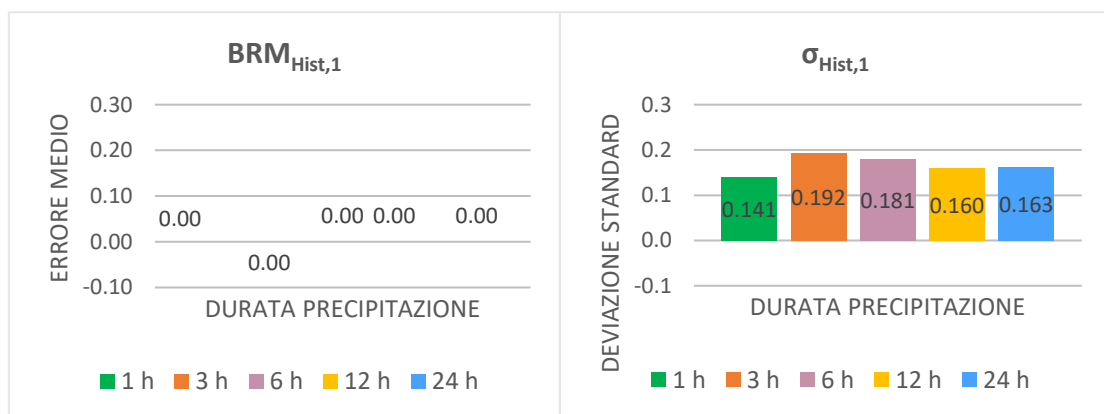


Figura 22: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,1}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,1}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} .

Area 2: alto Cordevole

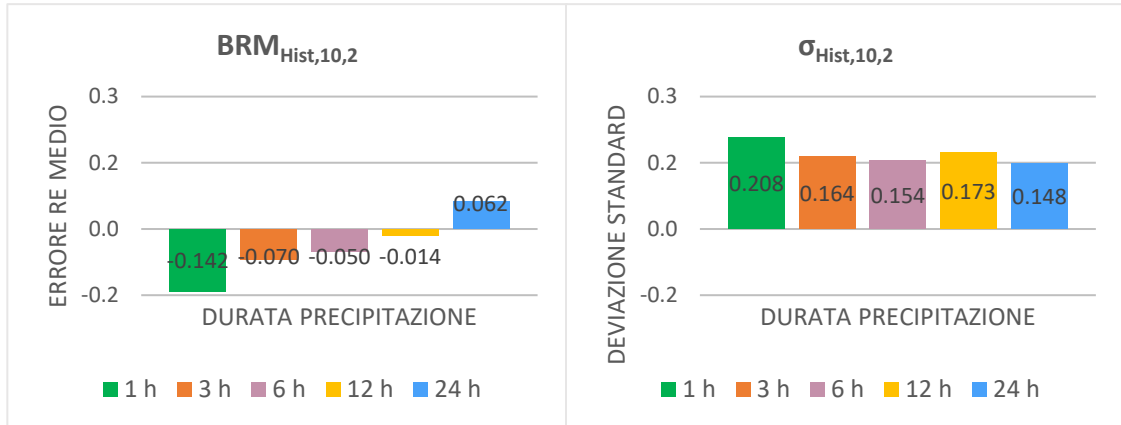


Figura 23: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,2}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,2}$ riferiti all'Area 2, calcolati per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=10$ anni.

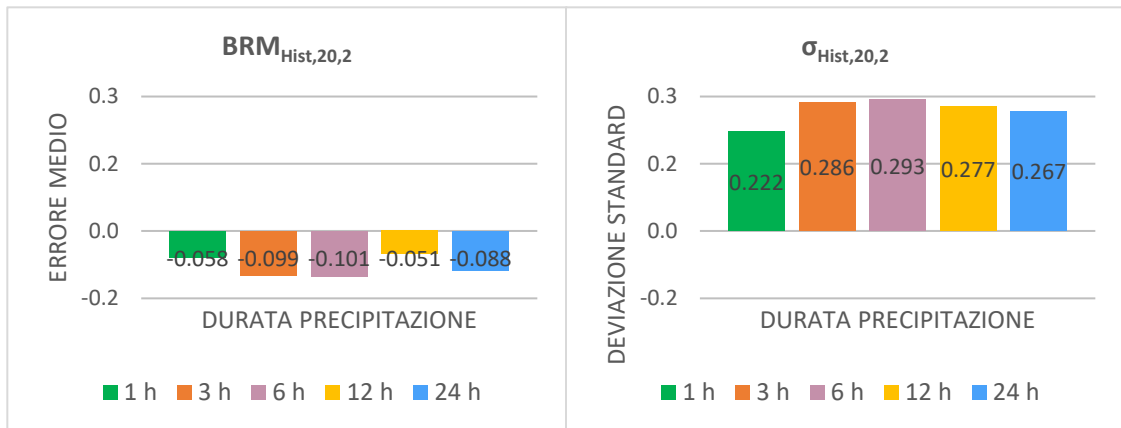


Figura 24: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,2}$ riferiti all'Area 2, calcolati per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=20$ anni.

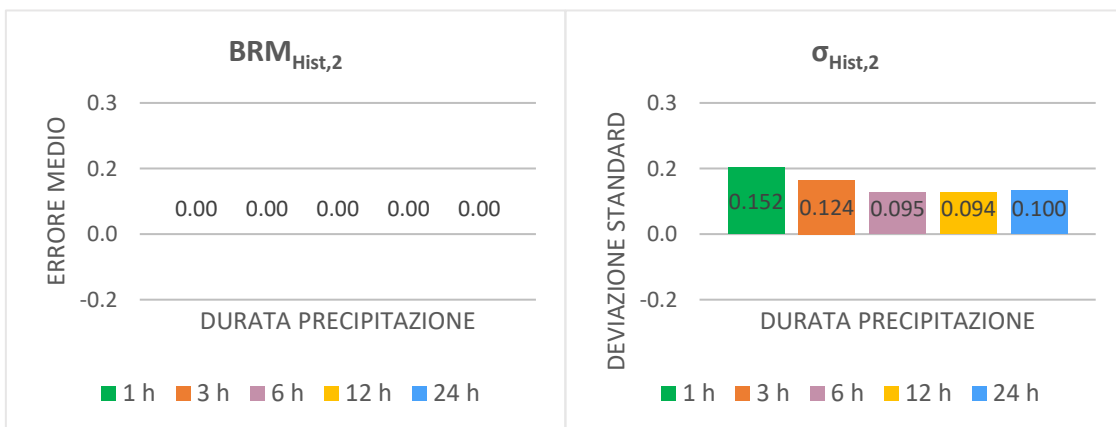


Figura 25: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,2}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} .

Area 3: Alto Adige occidentale

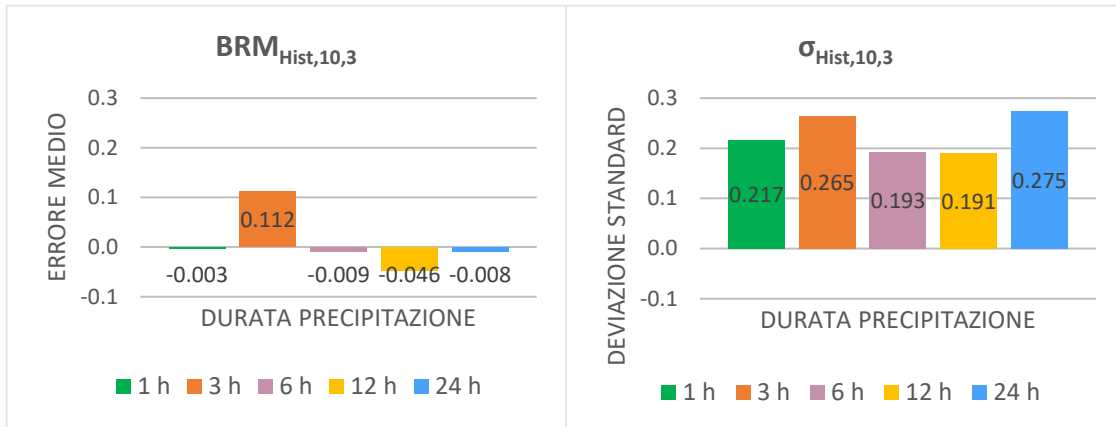


Figura 26: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,10,3}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,10,3}$ riferiti all'Area 3, calcolati per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=10$ anni.

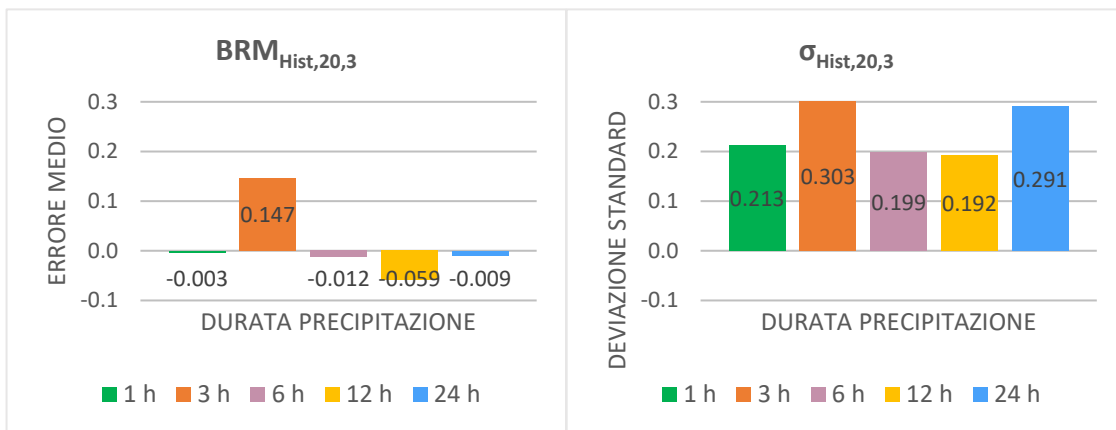


Figura 27: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,20,3}$ riferiti all'Area 3, calcolati per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e per $T=20$ anni.

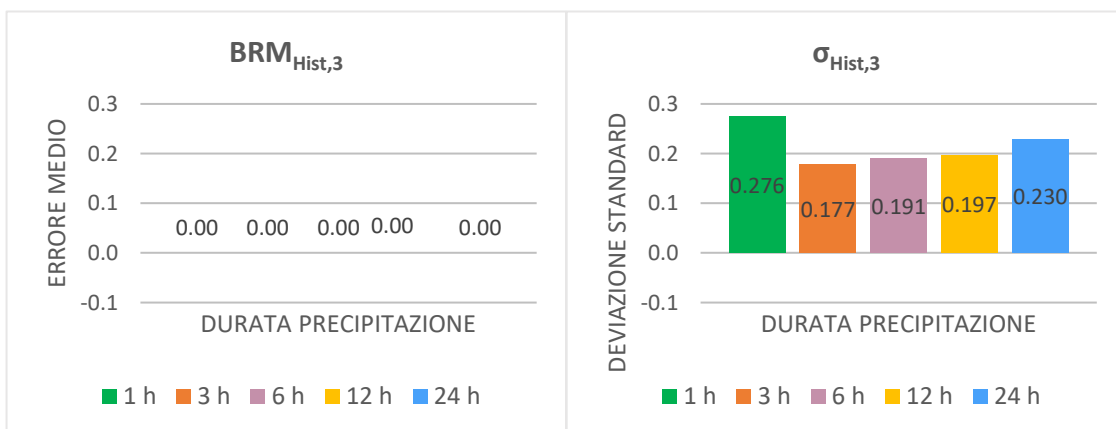


Figura 28: Errore medio normalizzato $BRM_{Hist,3}$ e deviazione standard $\sigma_{Hist,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} .

L'osservazione dei grafici rappresentativi degli errori che definiscono lo scostamento tra osservazioni e simulazioni storiche mostrano in maniera chiara l'effetto della correzione per la distorsione del modello applicata alle simulazioni.

In linea generale si registra per tutte le aree una riduzione dei valori dei $BRM_{Hist,d,T,j}$, sia per quantili associati a $T=10, 20$ anni che per le medie dei massimi annuali M , ad eccezione di alcuni singoli casi individuati nel grafico rappresentativo l'Area 1. Infatti, per $T=10$ anni si passa da una percentuale d'errore del 6,3% associata a durata 6 ore a 8,5%, dal 2,2% per durata 12 ore al 4,3% e dal 3,3% al 7,3% per le 24 ore. Questo aumento si ripete per $T=20$ anni ma solo per durata di pioggia pari a 6 ore (da 8% a 10,1%), per le altre durate si ha invece una riduzione dell'errore. I valori delle deviazioni standard subiscono leggere modifiche ma rispecchiano comunque lo stesso grado di scostamento rispetto al valore medio.

L'effetto delle correzioni più evidente lo si osserva nelle simulazioni realizzate per la zona dall'Alto Adige occidentale e dell'alto Cordevole, in cui a seguito della correzione gli errori medi si riducono in maniera importante. La simulazione corretta realizzata per l'Area 2, alto Cordevole, restituisce errori negativi e prossimi allo zero per tutte le durate di precipitazione ad eccezione del dato calcolato per $T=10$ anni e durata 24 ore, pari a 0,062, il quale si mantiene comunque molto limitato. Anche l'Area 3 è rappresentata da errori negativi e prossimi allo zero per quasi tutte le durate, ad eccezione del dato riferito a durata 3 ore a cui sono associati valori percentuali di $BRM_{Hist,d,T}$ pari a 11,2% per $T=10$ anni e 14,7% per $T=20$ anni. In questo caso, tale errore risulta essere quello massimo tra quelli ottenuti per le cinque durate, rispecchiando quindi l'andamento osservato per la stessa area di studio nel caso dei quantili X non corretti per la distorsione.

Per tutte e tre le aree di studio e per tutte le durate di precipitazione si ottengono valori degli errori medi normalizzati calcolati per le medie dei massimi annuali M pari a 0,00, esprimendo quindi per tale fattore una validità molto elevata della simulazione, raggiunta grazie alla correzione della stessa per la distorsione del modello.

Per quanto riguarda invece le deviazioni standard $\sigma_{Hist,d,T}$ e $\sigma_{Hist,d}$, esse assumono per i tre domini analizzati, un range di variabilità moderato che oscilla tra valori minimi pari a 0,154 (Area 2, $T=10$ anni, durata 6 ore) a un massimo di 0,303 (Area 3, $T=20$ anni, durata 3 ore). I valori di deviazione standard più contenuti sono quelli riferiti alle medie dei

massimi annuali \bar{M} calcolate per l'Area 3; questo indica che i valori simulati per quest'area sono caratterizzati da un range di variabilità ridotto rispetto al valore medio. In generale, le deviazioni standard riferite alle medie dei massimi annuali \bar{M} assumono valori inferiori rispetto a quelle calcolate per i quantili di precipitazioni \bar{X} e non si osserva una variazione significativa rispetto a quanto analizzato nel paragrafo 6.2.1.

6.3 Analisi delle variazioni del modello climatico previste per il futuro prossimo 2041-2050

Nel presente capitolo si presentano i valori di variazione, definiti $BRM_{NF,d,T,j}$ per i quantili X e $BRM_{NF,d,j}$ per le medie dei massimi annuali M , calcolati tramite i confronti descritti al punto b) del paragrafo 5.3 con l'equazione (11), mentre le relative variazioni standard $\sigma_{NF,d,T,j}$ e $\sigma_{NF,d,j}$ sono stimate con l'equazione (12). I valori di variazione e di deviazione sono illustrati in forma grafica tramite grafici a barre.

Come già precedentemente specificato, in questo caso i valori di $BRM_{NF,d,T,j}$ e di $BRM_{NF,d,j}$ rappresentano le variazioni simulate da modello climatico per il futuro vicino 2041-2050 rispetto al periodo storico simulato di base 1996-2005 e permettono così di individuare e descrivere le variazioni nel regime delle precipitazioni estreme future.

L'organizzazione del capitolo riprende quella vista per il capitolo precedente: nel prossimo paragrafo, il 6.3.1 sono riportati i parametri statistici calcolati tramite l'elaborazione dei massimi annuali AM non corretti per la distorsione del modello, mentre nel successivo paragrafo, il 6.3.2 i grafici sono riferiti ai massimi annuali \overline{AM} corretti.

6.3.1 Statistici riferiti a simulazioni CPM non corrette per la distorsione

Area 1: bassa pianura veneta

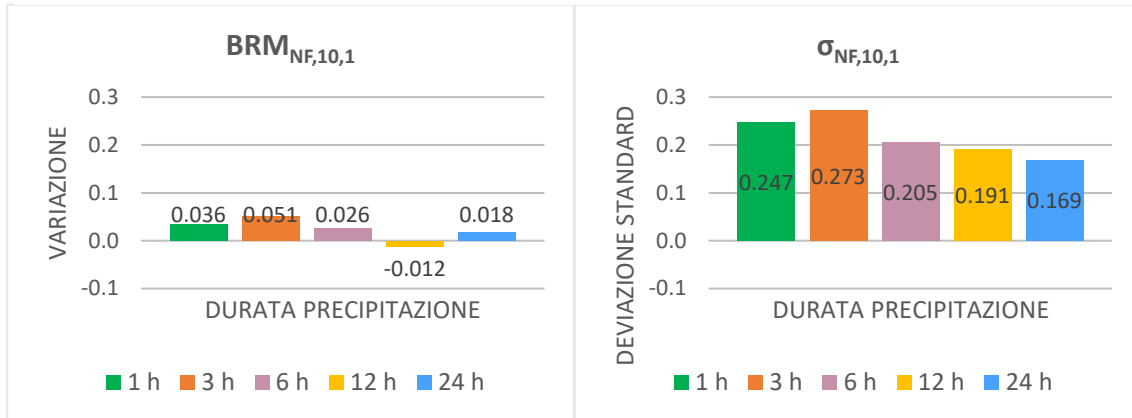


Figura 29: Variazione $BRM_{NF,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

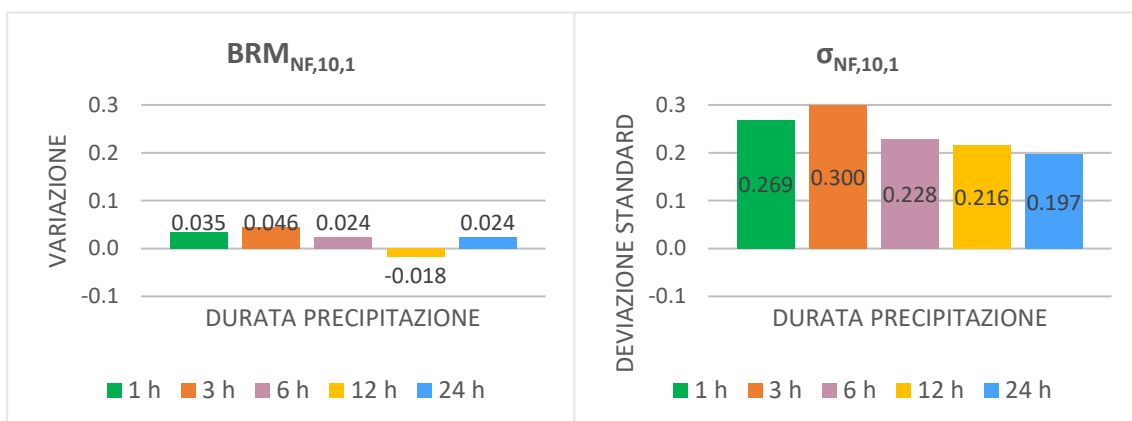


Figura 30: Variazione $BRM_{NF,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

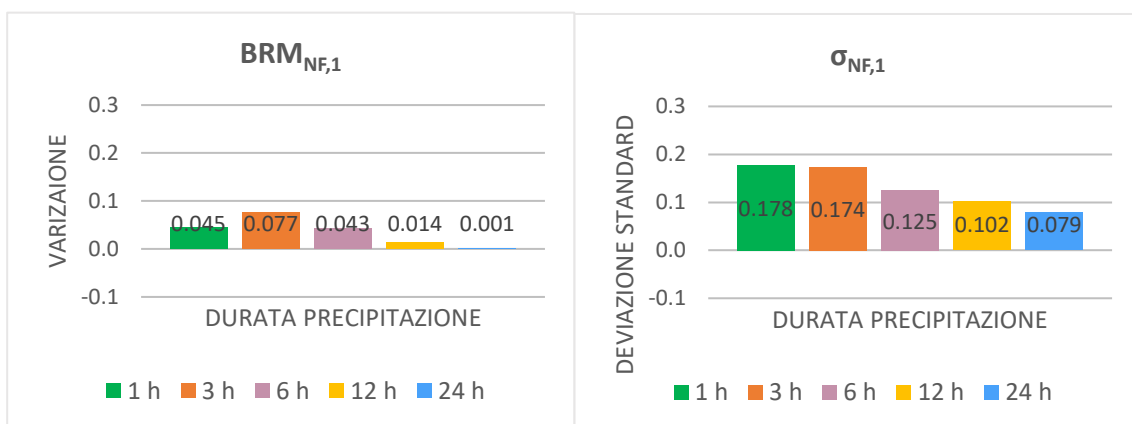


Figura 31: Variazione $BRM_{NF,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Area 2: alto Cordevole

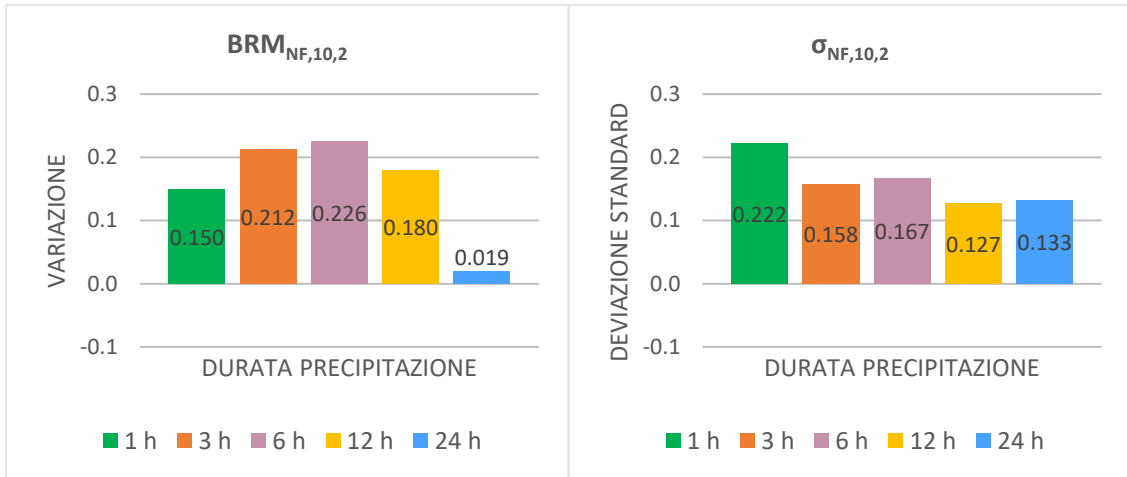


Figura 32: Variazione $BRM_{NF,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,1}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

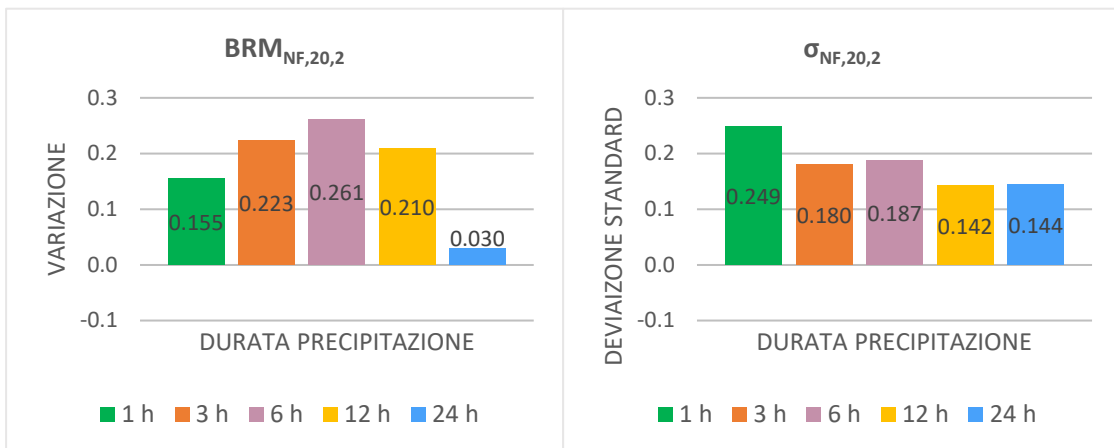


Figura 33: Variazione $BRM_{NF,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

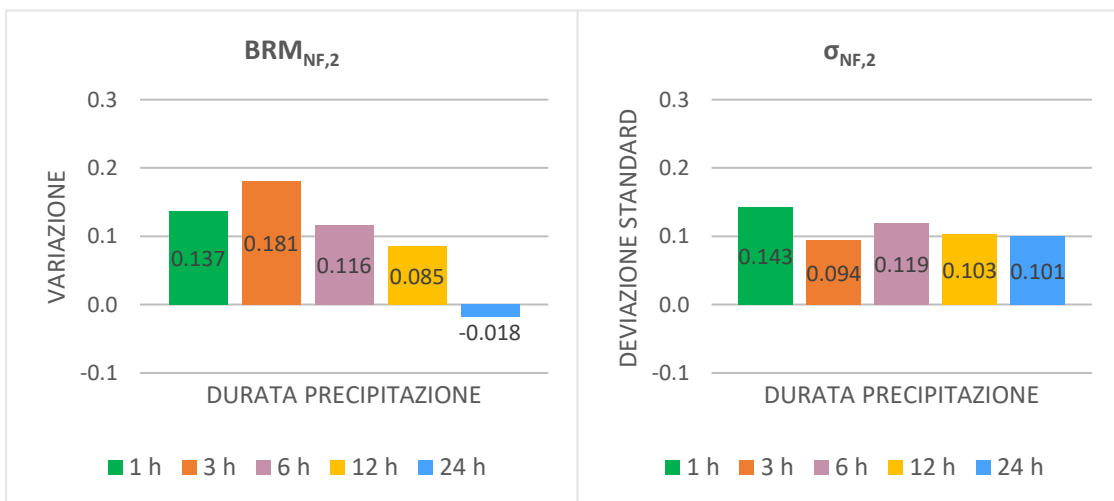


Figura 34: Variazione $BRM_{NF,2}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,2}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Area 3: Alto Adige occidentale

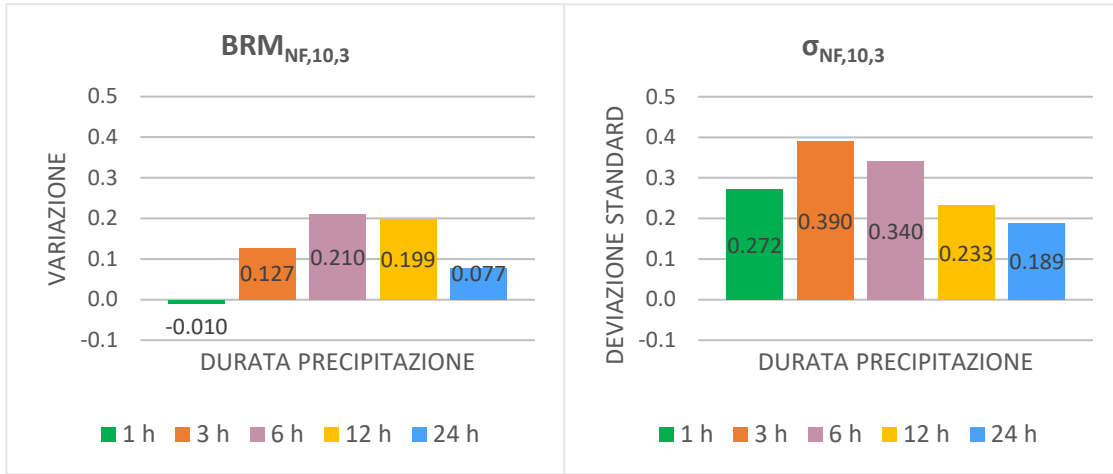


Figura 35: Variazione $BRM_{NF,10,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

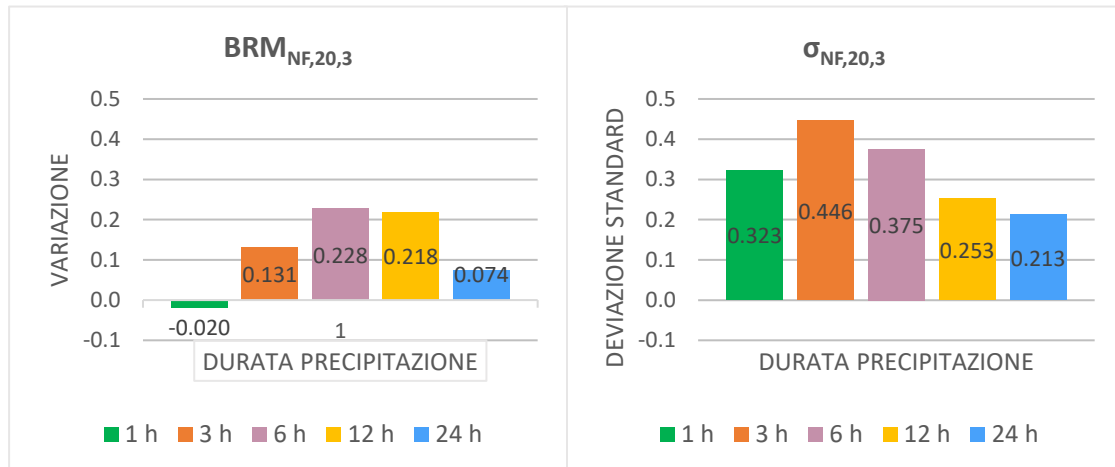


Figura 36: Variazione $BRM_{NF,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

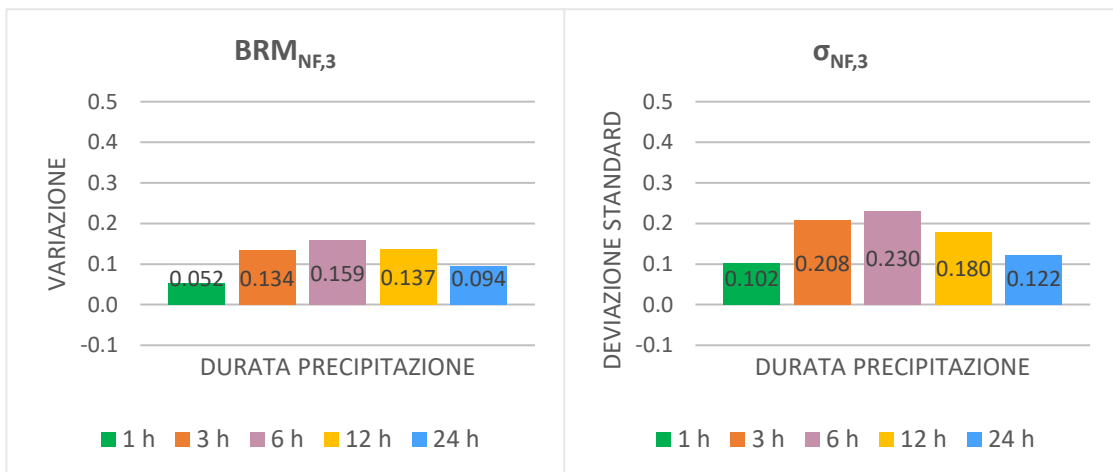


Figura 37: Variazione $BRM_{NF,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Dall'osservazione dei grafici ottenuti per le tre aree di studio si evince che le simulazioni CPM prevedono per il futuro prossimo un aumento delle precipitazioni per le tre aree. L'aumento più marcato si riscontra nell'Area 2 e per durate di precipitazione intermedie, pari a 3, 6 e 12 ore, per le quali per T=10 anni sono stati calcolati incrementi $BRM_{NF,d,T,j}$ espressi in forma percentuale pari rispettivamente a +21,2%, +22,6% e +18% che con T=20 anni aumentano raggiungendo variazioni positive pari a +22,3%, +26,1% e +21%. Per quest'area la variazione calcolata per il futuro prossimo rispetto allo storico, associata a durate di pioggia di 24 ore, risulta essere contenuta, assumendo un valore del 0,019 (corrispondente a +1,9%) con T=10 anni e dello 0,030 (pari al +3%) con T=20 anni. Anche i valori di deviazione standard che ne descrivono la variabilità sono modesti: 0,133 per T=10 che aumenta a 0,144 per T=20.

Anche per l'Alto Adige occidentale si delineano aumenti di maggior entità per le durate intermedie (3, 6 e 12 ore). Nello specifico, sono stimate variazioni positive pari al +12,7% per durata pari a 3 ore, +21% per durata di 6 ore e +19,9% per piogge di 6 ore, considerando T=10 anni. Queste variazioni, con T=20 anni, subiscono un leggero incremento, si ottiene infatti rispettivamente: +13,1%, +22,8% e +21,8%. Importante sottolineare che i valori di $BRM_{NF,6,10,3}$ e $BRM_{NF,6,20,3}$ sono rappresentati da una deviazione standard significativa, pari rispettivamente a 0,390 e a 0,446. Si evince quindi che la variabilità delle variazioni calcolate per le singole stazioni pluviometriche assegnate all'Area 3 rispetto al valore medio (0,390 e 0,446) è moderatamente elevata.. Alla durata di precipitazione di 1 ora è associata una variazione negativa, benché minima, pari a -1% con T=10 anni che aumenta al -2% con T=20 anni.

Le variazioni più contenute sono quelle riferite all'Area 1, essendo tutte prossime all'unità, per entrambe i T esplorati. I valori di $BRM_{NF,6,10,3}$ e $BRM_{NF,6,20,3}$ descrivendo una leggera diminuzione dei quantili di precipitazione associati a durata pari a 6 ore; per le altre durate si registra invece un aumento. Le deviazioni standard calcolate per sono significative, oscillando da un massimo pari a 0,300 stimato per T=20 anni e durata 3 ore a un minimo di 0,079 stimato per durata 24 ore riferita alla media dei massimi annuali M . In sintesi, le simulazioni realizzate per il futuro prossimo prevedono un generale aumento dei massimi annuali di pioggia, in particolare per le durate intermedie di 3 e 6 ore; questo aumento è più marcato per l'area prealpina e per quella altoatesina, mentre lievi variazioni positive si registrano per la bassa pianura veneta.

6.3.2 Statistici riferiti a simulazioni CPM corrette per la distorsione

Area 1: bassa pianura veneta

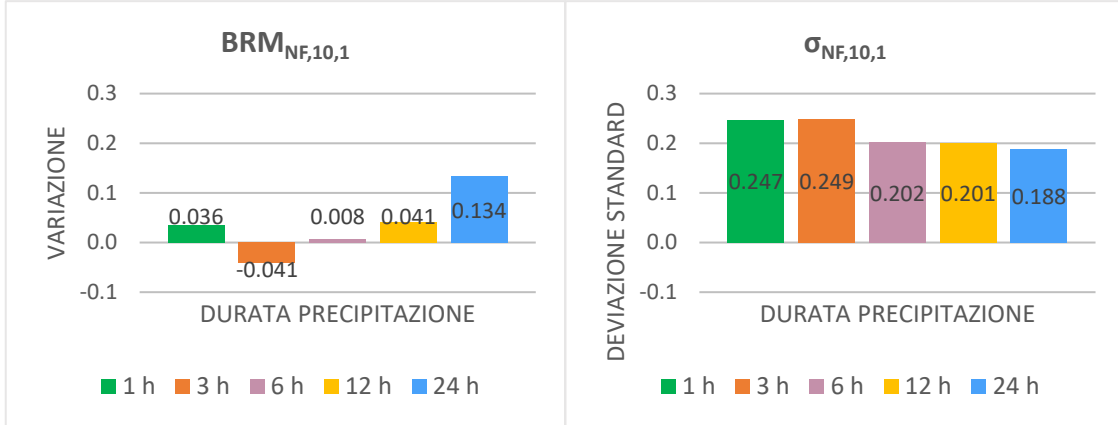


Figura 38: Variazione $BRM_{NF,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

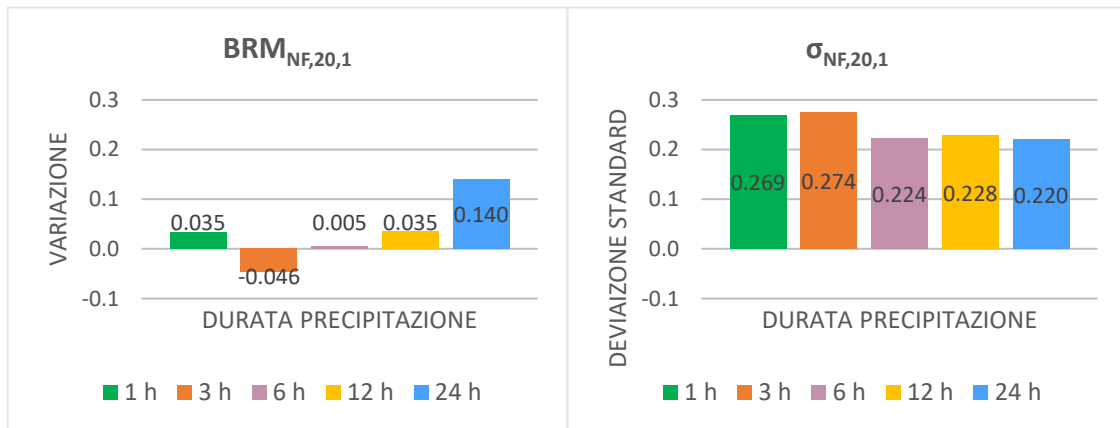


Figura 39: Variazione $BRM_{NF,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni nni.

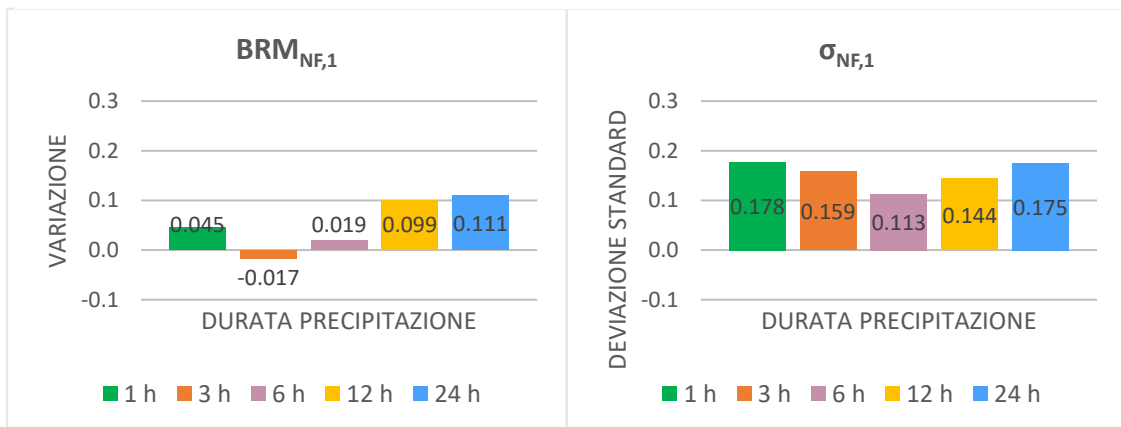


Figura 40: Variazione $BRM_{NF,1}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corretti per la distorsione.

Area 2: alto Cordevole

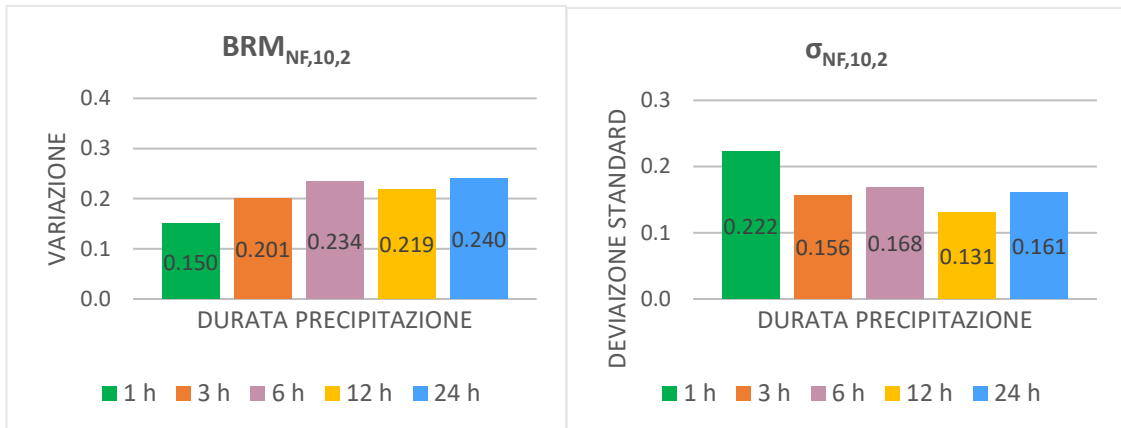


Figura 41: Variazione $BRM_{NF,10,2}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

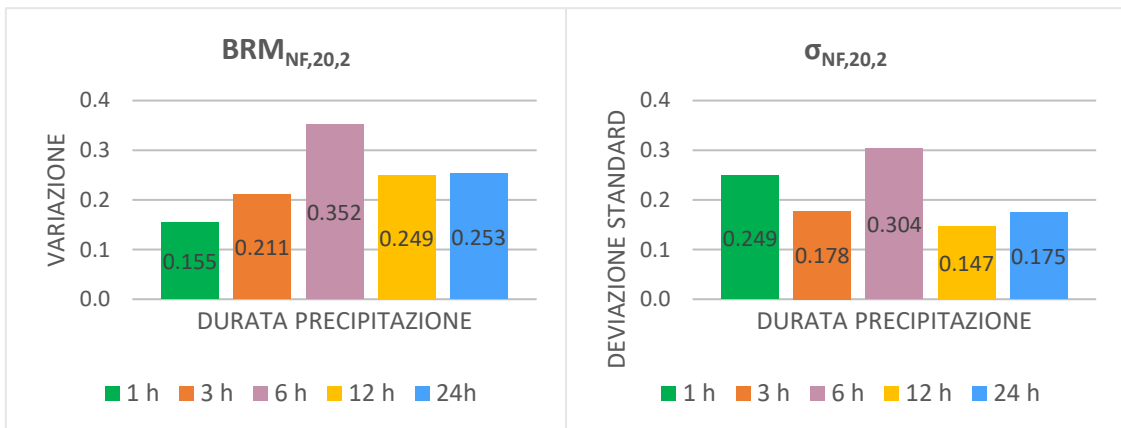


Figura 42: Variazione $BRM_{NF,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

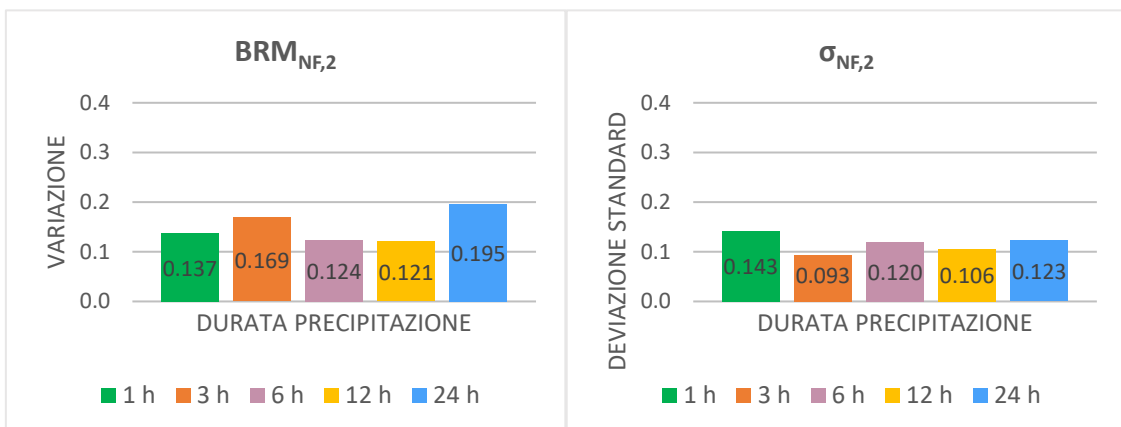


Figura 43: Variazione $BRM_{NF,2}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corrette per la distorsione.

Area 3: Alto Adige occidentale

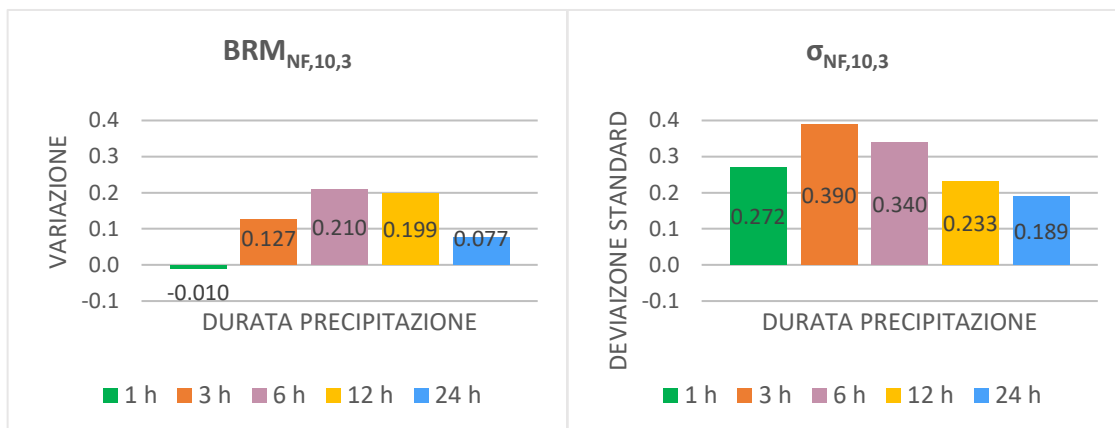


Figura 44: Variazione $BRM_{NF,10,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,10,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

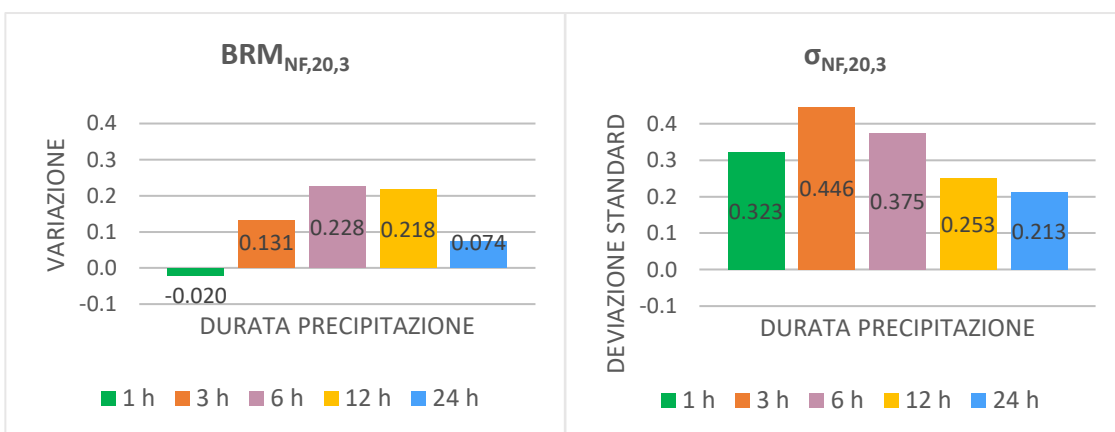


Figura 45: Variazione $BRM_{NF,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,20,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

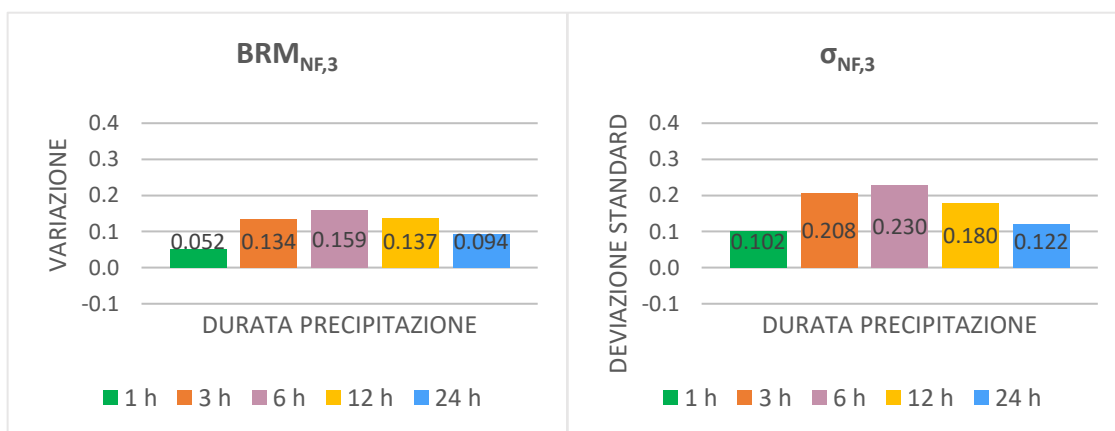


Figura 46: Variazione $BRM_{NF,3}$ e deviazione standard $\sigma_{NF,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corrette per la distorsione.

La correzione dei massimi annuali AM per la distorsione comporta un cambiamento nei valori che quantificano la variazione delle precipitazioni estreme future rispetto alla linea di base e nelle rispettive deviazioni standard.

Nella bassa pianura veneta la variazione $BRM_{NF,d,T,j}$ associata a durata pari a 3 ore a seguito di correzione diviene negativa, assumendo un valore percentuale che quantifica la variazione tra simulazione storica e futura prossima pari al -4,1% con $T=10$ anni, che diviene pari a -4,6% con $T=20$ anni. Al contrario, la durata di 12 ore da negativa (-1,2%) prima della correzione diventa positiva dopo la correzione (+4,1%). La variazione più consistente si registra per i quantili \bar{X} associati a una precipitazione di 24 ore, con un incremento del +13,4% con $T=10$ anni e del +14% con $T=20$ anni. Si osserva inoltre che, per quest'area, le variazioni calcolate per durata pari a 1 ora non subiscono una variazione rispetto a quelle calcolate con AM non corretti per la distorsione, di conseguenza anche i valori delle rispettive deviazioni standard non variano. I dati di deviazione standard stimate per le durate più prolungate, 12 e 24 ore, subiscono invece un leggero incremento rispetto a quanto riportato nei grafici riferiti alla stessa area per AM non corretti, mentre diminuiscono leggermente per durata di pioggia di 3 e 6 ore.

L'area dell'alto Cordevole è rappresentata da variazioni positive che caratterizzano tutte le durate di pioggia. La variazione più consistente rispetto alla linea storica simulata corrisponde a $T=20$ anni e durata 6 ore, con un valore di $BRM_{NF,6,20,2}$ espresso in percentuale pari a +35,2%. Confrontando i valori dei parametri statistici rappresentativi della variazione ottenuti per i massimi annuali \overline{AM} rispetto a quelli calcolati con AM non corretti, gli andamenti ottenuti per le durate di pioggia pari a 1, 3, 6 e 12 ore corrispondono, mentre per la durata di 24 ore si osserva un significativo aumento rispetto a quanto ottenuto prima della correzione. Infatti, mentre per AM non corretti è stata calcolata una variazione percentuale del +1,9% con $T=10$ anni e del +3% con $T=20$ anni, a seguito di correzione della simulazione tali variazioni assumono valori pari rispettivamente a +24% e al +25,3%, sottolineando così un effetto marcato della correzione della simulazione. L'andamento appena descritto caratterizza anche il dato di $BRM_{NF,2}$ riferito alle medie dei massimi annuali corrette \bar{M} .

Le simulazioni che restituiscono massimi annuali corretti \overline{AM} per il periodo 2041-2050 eseguite per l'Alto Adige occidentale, sono quelle che, in seguito all'applicazione del parametro di distorsione del modello, non manifestano alcun cambiamento nei valori di

$BRM_{NF,d,T,j}$, $BRM_{NF,d,j}$ e $\sigma_{NF,d,T,j}$, $\sigma_{NF,d,j}$ rispetto agli stessi valori calcolati per i massimi annuali AM non corretti per la simulazione. Questo indica che le simulazioni realizzate per quest'area sono contraddistinte da un buon grado di bontà.

L'applicazione del modello CPM a quest'area prevede per il futuro prossimo 2041-2050, una leggera diminuzione delle precipitazioni di durata oraria, come precedentemente descritto nel paragrafo 6.3.1, a fronte di un aumento del +12,7% per piogge di 3 ore, del +21% per le 6 ore, +19,9% per durate di 12 ore, mentre per piogge di 24 ore si osserva una variazione positiva più contenuta, pari al +7,7%, questo considerando un eventi di precipitazione estrema associati a un tempo di ritorno di 10 anni. Con un tempo di ritorno di 20 anni le variazioni assumono rispettivamente tali valori: -2%, +13,1%, +22,8%, +21,8% e +7,4%.

6.4 Analisi delle variazioni del modello climatico previste per il futuro lontano 2090-2099

Il presente capitolo riporta i medesimi parametri statistici presentati nel capitolo precedente, quindi $BRM_{NF,d,T,j}$ per i quantili X , $BRM_{NF,d,j}$ per le medie dei massimi annuali e allo stesso modo $\sigma_{NF,d,T,j}$ e $\sigma_{NF,d,j}$, ottenuti tramite i confronti definiti al punto b) del paragrafo 5.3, con la differenza che questi si riferiscono al periodo futuro remoto, corrispondente al decennio 2090-2099. Questi valori quantificano quindi le variazioni previste dalle simulazioni realizzate per il futuro remoto 2090-2099 rispetto alla linea di base storica simulata 1996-2005.

Anche in questa sezione sono riportati inizialmente, nel paragrafo 6.4.1, i grafici a barre descrittivi per ciascuna area di indagine delle simulazioni non corrette per la distorsione e a seguire, nel paragrafo 6.4.2, quelli riferiti a simulazioni corrette.

6.4.1 Statistici riferiti a simulazioni CPM non corrette per la

Area 1: bassa pianura veneta

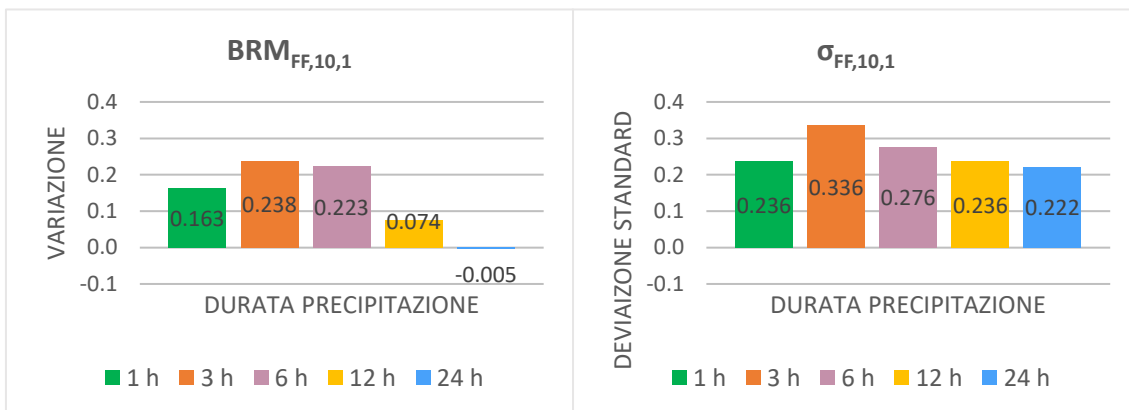


Figura 47: Variazione $BRM_{FF,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,10,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

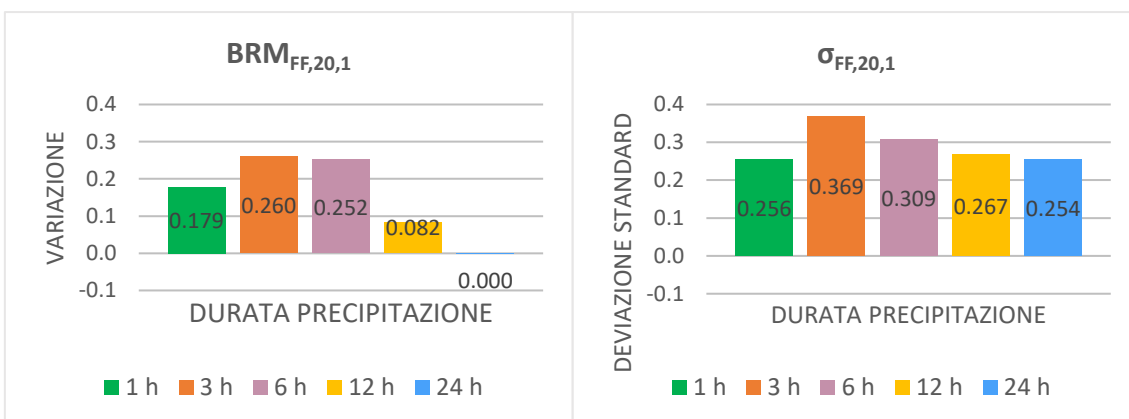


Figura 48: Variazione $BRM_{FF,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

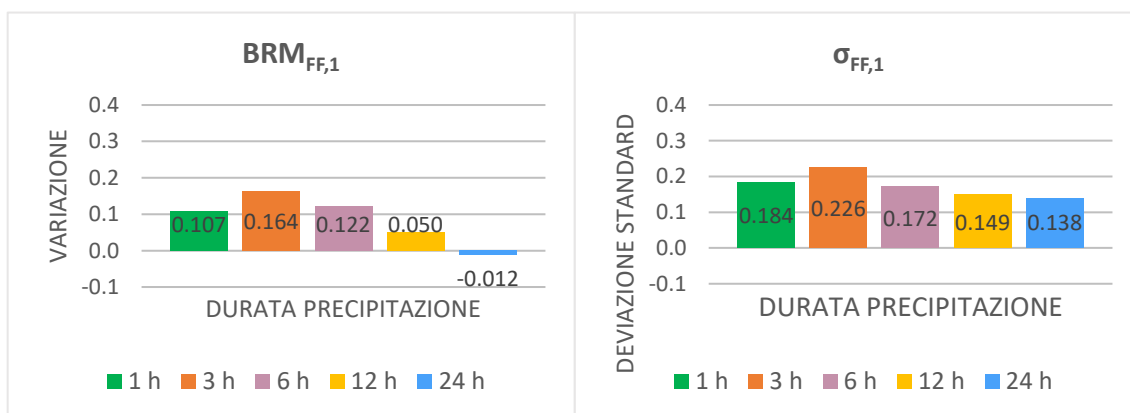


Figura 49: Variazione $BRM_{FF,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Area 2: alto Cordevole

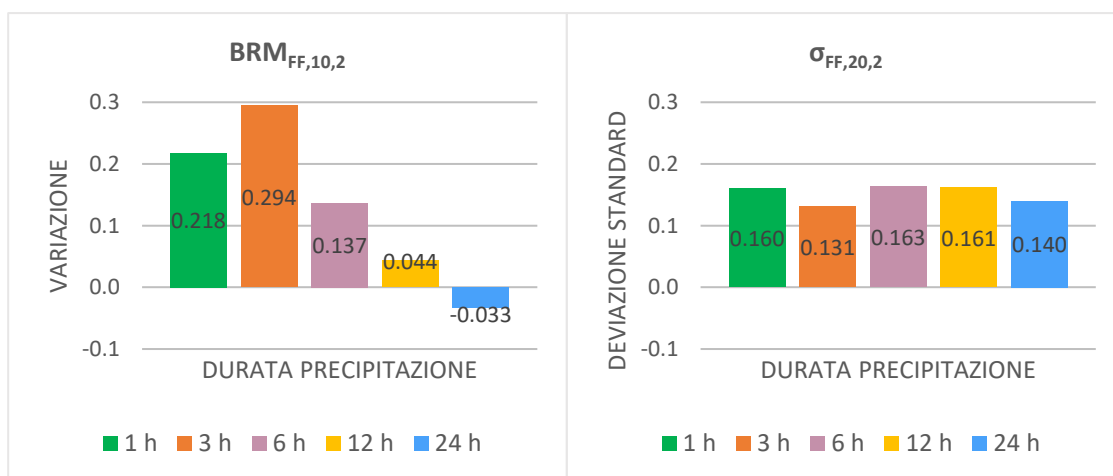


Figura 50: Variazione $BRM_{FF,10,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,10,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

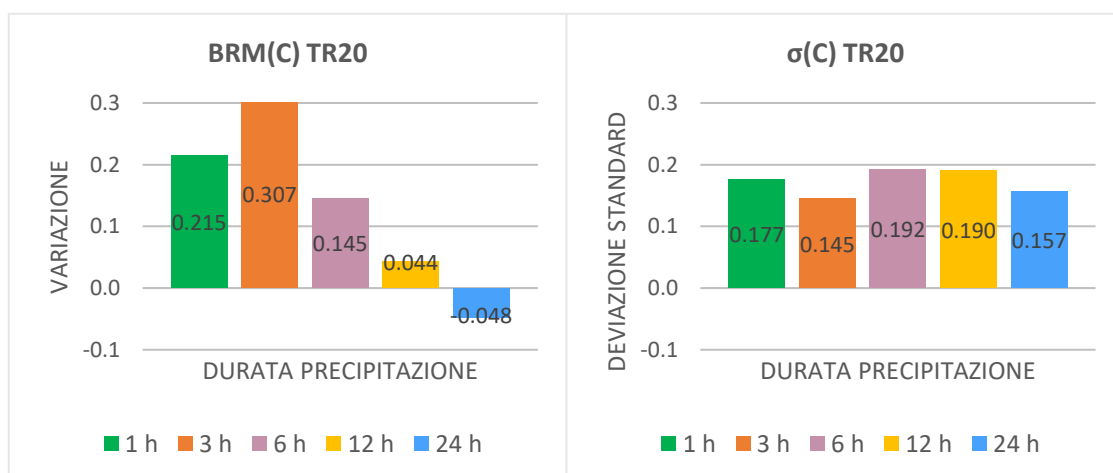


Figura 51: Variazione $BRM_{FF,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

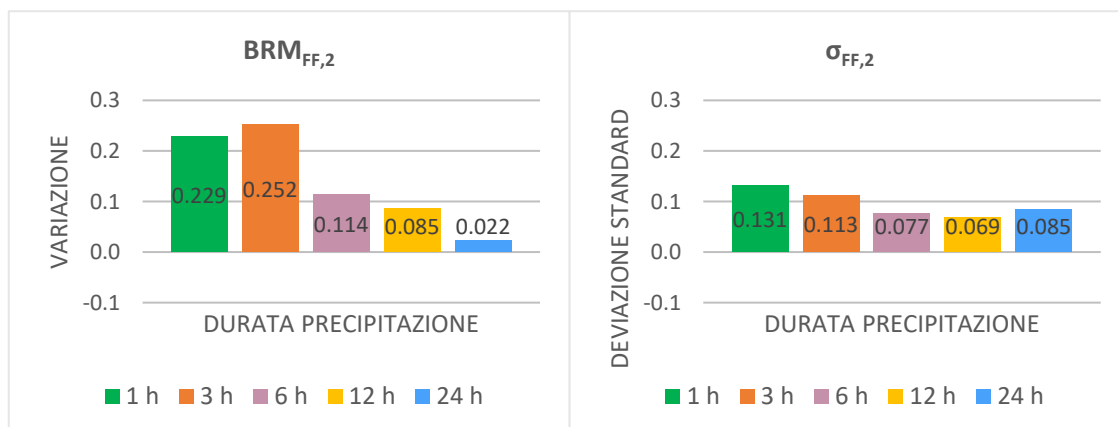


Figura 52: Variazione $BRM_{FF,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Area 3: Alto Adige occidentale

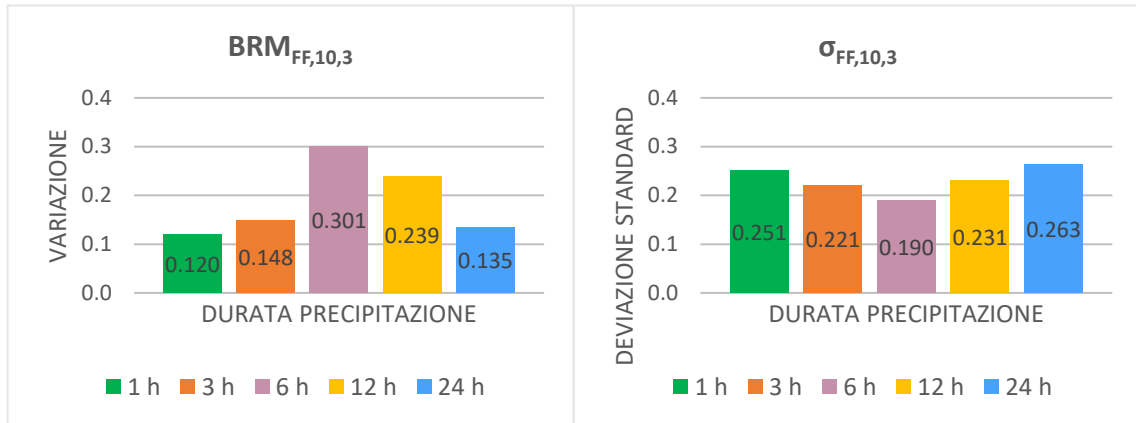


Figura 53: Variazione $BRM(C)$ e deviazione standard $\sigma(C)$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

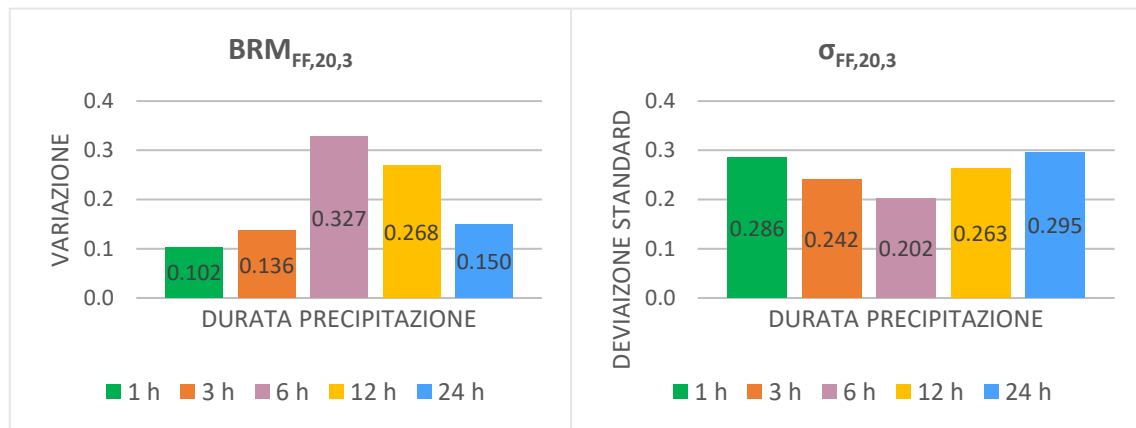


Figura 54: Variazione $BRM_{FF,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione X non corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

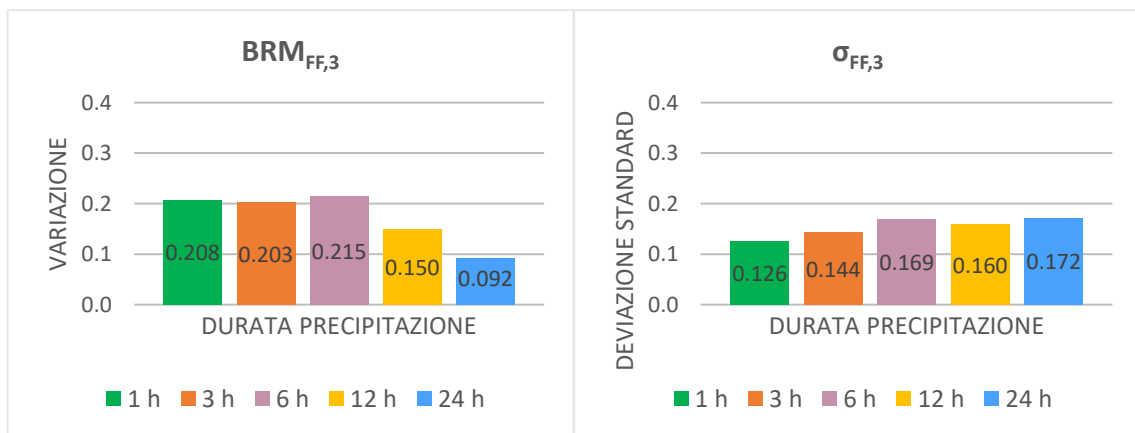


Figura 55: Variazione $BRM_{FF,3}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione M non corrette per la distorsione.

Le simulazioni realizzate da CPM per il futuro remoto 2090-2099 delineano un generale aumento delle precipitazioni estreme ma le per le tre aree sono caratterizzate da situazioni che le differenziano.

Per quanto concerne la bassa pianura veneta, Area 1, al contrario di quanto restituiscono le simulazioni realizzate per il futuro prossimo 2041-2050, per il decennio 2090-2099 sono previste variazioni più consistenti per tutte le durate di pioggia analizzate ad eccezione dei quantili associati a precipitazioni di 24 ore. Infatti, i valori percentuali dei $BRM_{FF,d,T,j}$ stimati per la durata di precipitazione massima sono pari a +0,5% con T=10 anni e registrano una variazione nulla con T=20 anni, contrassegnando il fatto che non si prevede per lo scenario futuro remoto alcuna variazione rispetto alla linea di base storica simulata. Per le altre durate invece le variazioni previste sono più consistenti per entrambi i tempi di ritorno indagati. L'aumento maggiore è legato a durata pari a 3 ore sia con T=10 anni, pari al +23,8%, che con T=20 anni, pari al +26%. Di entità più limitata sono invece le variazioni calcolate per le altre durate. I dati di deviazione standard associati alle variazioni $BRM_{FF,d,T,j}$ ottenute per l'Area 1 sono moderati, variano infatti da un dato massimo pari a 0,369 associato a durata di 3 ore, a uno minimo pari a 0,254 per durata di pioggia di 24 ore. Tali valori si riducono rispettivamente a 0,336 e 0,222 con T=10 anni e si riferiscono alle stesse durate.

La zona dell'alto Cordevole si differenzia da quella di pianura in quanto sono previste per il futuro remoto variazioni più consistenti rispetto a quanto simulato per il futuro prossimo. Questo si verifica in particolare per le durate di 1 e 3 ore, mentre le variazioni risultano essere di minor entità per le altre durate di pioggia.

Nella zona prealpina le variazioni attese per il futuro remoto rispetto alla linea di base storica sono contraddistinte da quantili di precipitazione riferiti a durata pari a 3 ore per i quali si prospetta un incremento del +29,4% con T=10 anni e del +30,7% con T=20 anni. Anche per quest'area, per la durata di precipitazione pari a 24 ore, è prevista una variazione negativa, come è stato osservato per l'Area 1; è infatti previsto un decremento pari al -3,3% con T=10 anni che aumenta con T=20 anni, assumendo una variazione del -1,8%. La variabilità descritta dalle deviazioni standard per quest'area di indagine risulta essere abbastanza contenuta, non viene infatti superato il valore di 0,249.

Le simulazioni eseguite per la zona dell'Alto Adige occidentale restituiscono variazioni positive più consistenti per quantili di precipitazione di 3 ore, pari al +30,1% con T=10

anni che diventa una variazione del +32,7% con T=20 anni, le quali sono quantificate come variazioni più contenute per quantili di pioggia di 12 ore (rispettivamente +23,9% e +26,8%). Le piogge associate a quantili di 1 ora presentano invece variazioni più contenute rispetto alla linea di base storica, pari al +12% con T=10 anni che diminuisce a +10,2% con T=20 anni. Rispetto a quanto descritto per il futuro prossimo, in quest'area tutte le durate di pioggia considerate sono associate a valori di $BRM_{FF,d,T,j}$ più consistenti, per il decennio 2090-2099 un aumento della criticità.

Grazie alle analisi svolte in questo paragrafo si può concludere indicando che le variazioni calcolate per il futuro remoto rispetto al periodo storico simulate sono più consistenti per l'Alto Adige occidentale, in particolare per i quantili di precipitazione associati a durate intermedie. Si mantengono invece più contenute per le altre due aree, bassa pianura veneta e alto Cordevole, per le quali i quantili di precipitazione associati a durata pari a 24 ore sono rappresentati da una variazioni più limitate.

6.4.2 Statistici riferiti a simulazioni CPM corrette per la distorsione

Area 1: bassa pianura veneta

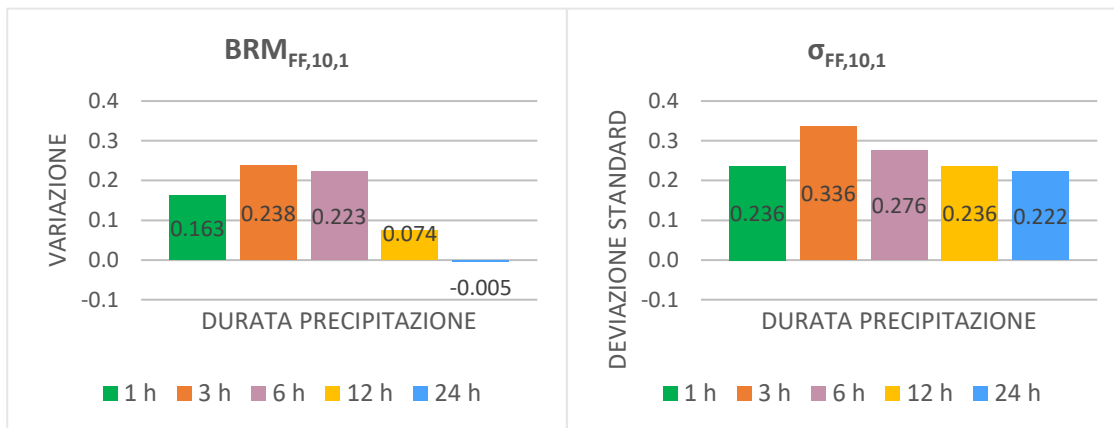


Figura 56: Variazione $BRM_{FF,10,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,10,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

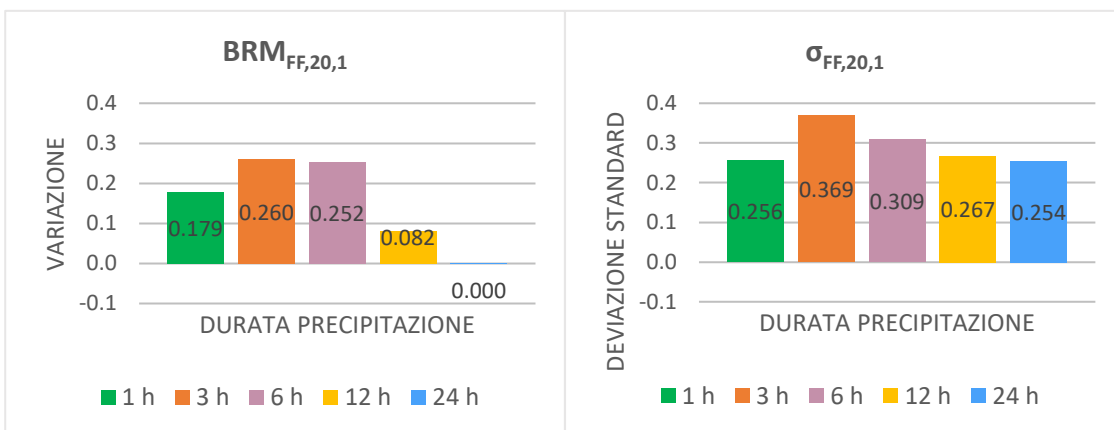


Figura 57: Variazione $BRM_{FF,20,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,1}$ calcolati per l'Area 1 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

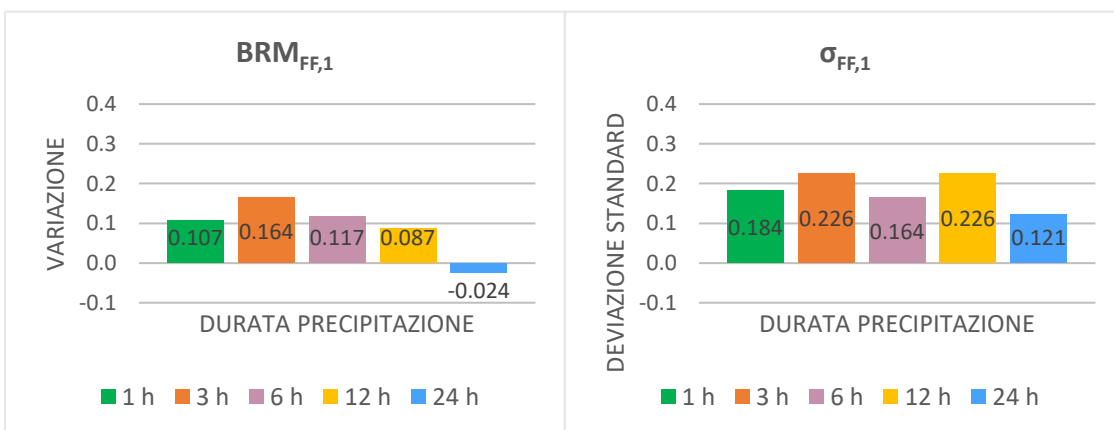


Figura 58: Variazione $BRM_{FF,1}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,1}$ riferiti all'Area 1 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corretti per la distorsione.

Area 2: alto Cordevole

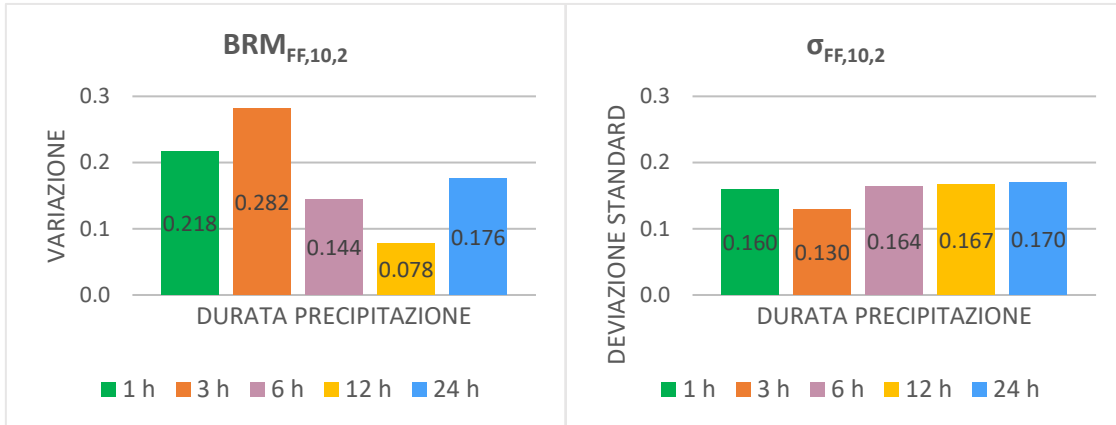


Figura 59: Variazione $BRM_{FF,10,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,10,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

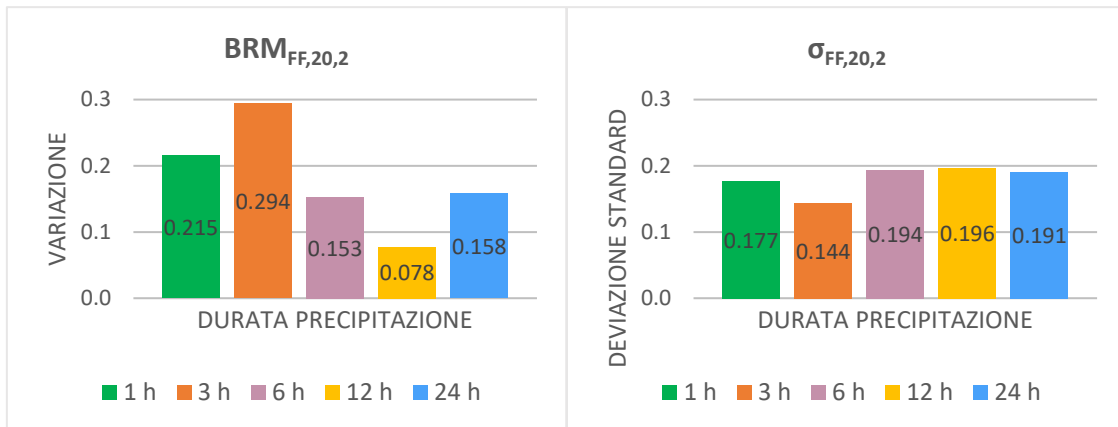


Figura 60: Variazione $BRM_{FF,20,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,2}$ calcolati per l'Area 2 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

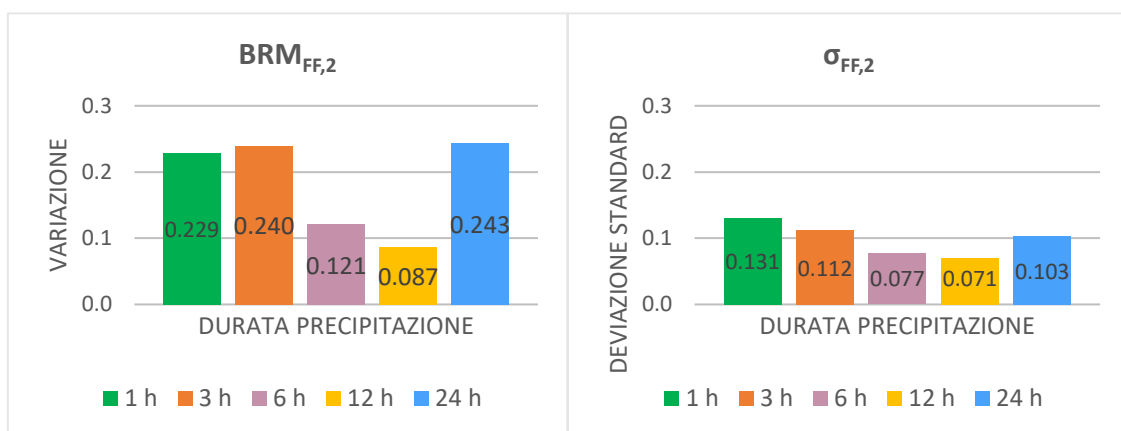


Figura 61: Variazione $BRM_{FF,2}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,2}$ riferiti all'Area 2 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corrette per la distorsione.

Area 3: Alto Adige occidentale

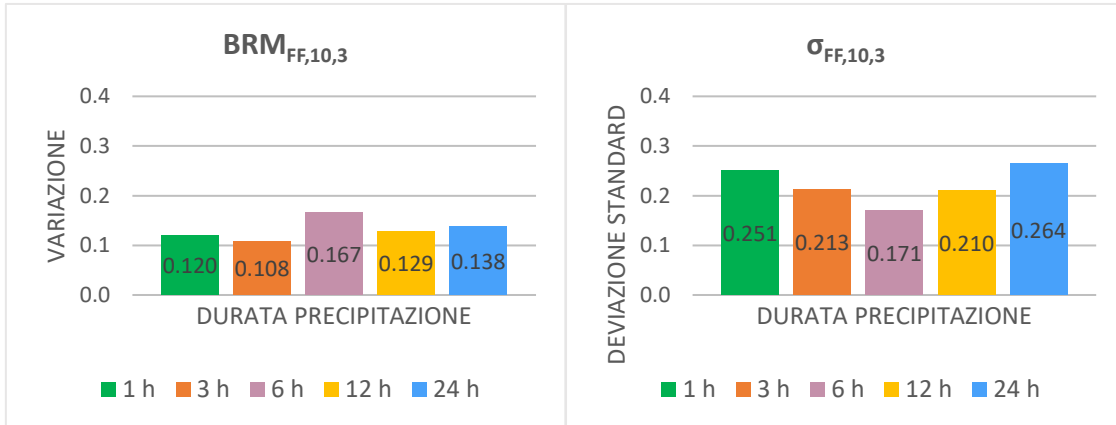


Figura 62: Variazione $BRM_{FF,10,3}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,10,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 10 anni.

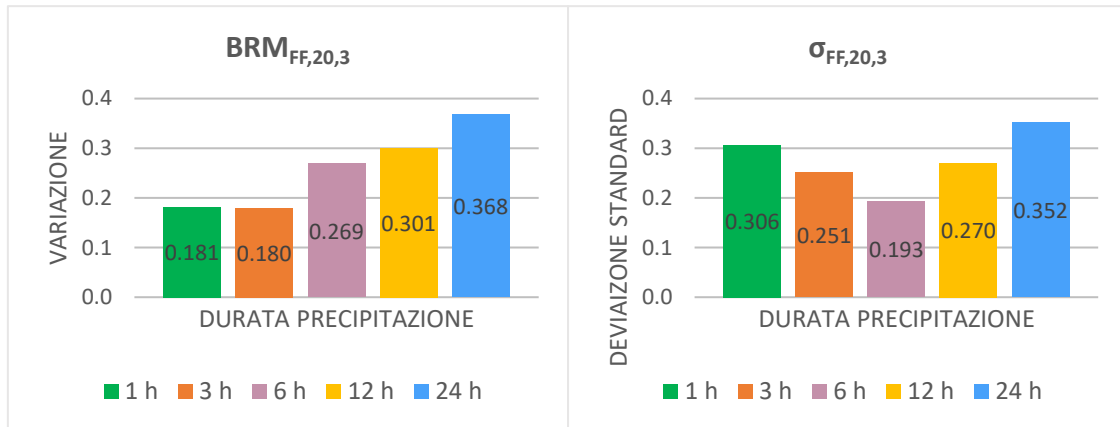


Figura 63: Variazione $BRM_{FF,20,3}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,20,3}$ calcolati per l'Area 3 per i quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello e associati a tempo di ritorno pari a 20 anni.

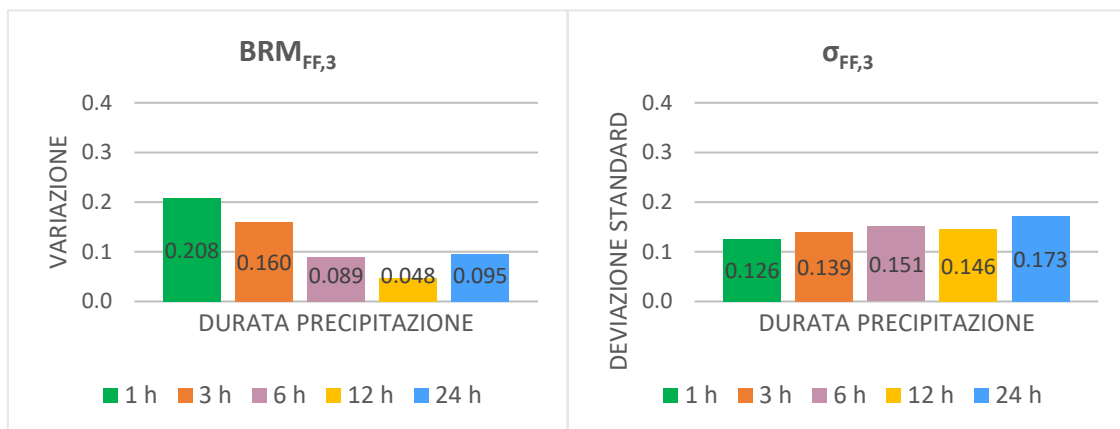


Figura 64: Variazione $BRM_{FF,3}$ e deviazione standard $\sigma_{FF,3}$ riferiti all'Area 3 e calcolati per le medie dei massimi annuali di precipitazione \bar{M} corrette per la distorsione.

Il risultato della correzione per la distorsione delle simulazioni realizzate per il futuro remoto 2090-2099 esprimono un cambiamento rispetto alle variazioni perviste dalle simulazioni non corrette per il futuro prossimo 2041-2050. Infatti, in seguito alla correzione dei massimi annuali AM , si osserva che la simulazione contraddistinta da un grado di bontà maggiore è quella realizzata per l'Area 1, mentre nel caso precedente è risultato essere quella riferita all'Area 3.

Le variazioni calcolate per la bassa pianura veneta, riferite al futuro prossimo, risultano essere buone in quanto non si osservano cambiamenti nei valori assunti da $BRM_{FF,d,T,j}$, $BRM_{NN,d,T,j}$ e da $\sigma_{FF,d,T,j}$, $\sigma_{FF,d,j}$, rispetto agli stessi fattori calcolati invece dal confronto tra simulazioni non corrette.

Per la zona dell'alto Cordevole si osserva una leggera variazione rispetto a quanto precedentemente simulato nei valori di $BRM_{FF,d,T,j}$ associati a durata pari a 3, 12, 24 ore. In particolare, il cambiamento rilevato per le prime due durate è contenuto, mentre risulta essere importante per durata pari a 24 ore. Infatti, da una iniziale variazione negativa prevista per i quantili X non corretti per la distorsione (pari a -3,3%), a seguito di correzione la stessa variazione è stimata essere positiva, precisamente pari a +17,6% con $T=10$ anni, che diviene pari a +15,8% con $T=20$ anni. I valori delle deviazioni standard rappresentativi delle durate sub-giornaliere riferite a questa simulazione sono molto contenuti, si ottengono infatti dati che spaziano in un range che varia da 0,130 a 0,191 per quanto riguarda i quantili \bar{X} , e in un range ancor più ristretto per le medie dei massimi annuali \bar{M} , variabile da 0,071 a 0,131.

Una situazione caratteristica si delinea per l'Alto Adige occidentale. Infatti, si presenta un cambiamento nelle variazioni calcolate per i quantili corretti \bar{X} rispetto a quanto osservato per i quantili non corretti X , tale per cui la variazione prevista con $T=10$ anni per durata pari a 6 ore si riduce da +30,1%, nel primo caso a +16,7% nel caso di quantili corretti, a cui si associa un valore di deviazione standard modesto, pari a 0,171. Anche per la durata di 12 ore si osserva una riduzione della variazione calcolata, passando da +23,9% a +12,9%. I valori di variazione ottenuti per le altre durate mantengono invece lo stesso ordine di grandezza. Per $T=20$ anni si manifesta un significativo cambiamento rispetto a quanto descritto per la simulazione non corretta per la distorsione. Sono infatti stati stimati valori percentuali di $BRM_{FF,d,T,j}$, riferiti a quantili corretti \bar{X} , pari a: +18,1% con durate di 1 e 3 ore, +26,9% per 6 ore, +30,1% per 12 ore e +36,8% con 24 ore. Questi

risultati si discostano molto dai valori ottenuti per i quantili non corretti X , in particolare per le durate maggiori, i quali corrispondono rispettivamente a: +10,2%, +13,6%, +32,7%, +26,8% e +15%. Le deviazioni standard rappresentative di tali variazioni sono di entità maggiore rispetto a quanto osservato per l'Area 2 e spaziano infatti da 0,306 a 0,171, definendo così una somiglianza rispetto ai valori calcolati per lo stesso parametro per l'Area 1.

6.5 Interpolazione dei quantili di precipitazione

Le figure di seguito riportate sono il risultato del processo di interpolazione con metodo IDW, descritto al paragrafo 5.5, dei quantili di precipitazione calcolati per ogni stazione pluviometrica tramite l'applicazione del metodo di Gumbel. In particolare, i dati inseriti in input nel software GIS sono i quantili di precipitazione corretti \bar{X} che derivano dalle serie di dati massimi annuali \overline{AM} , definite Hist, Near future e Far future, i quali sono riportati in forma tabellare nell'*Allegato 1*.

Le immagini rappresentano quindi, per ciascuna area, i quantili di precipitazione \bar{X} associati a tre delle durate di precipitazione sub-giornaliere analizzate in questo studio, precisamente la durata minima, media e massima: 1, 6 e 24 ore. L'interpolazione è realizzata considerando per ciascuna area di indagine sia i quantili di precipitazione associati a tempo di ritorno degli eventi di precipitazione estrema pari a 10 anni (raffigurati in *Figura 65*, *Figura 67* e *Figura 69*), che a tempo di ritorno di 20 anni (*Figura 66*, *Figura 68* e *Figura 70*).

Osservando la differente colorazione cromatica assegnata ai pixel che compongono le immagini, la quale all'aumentare del valore di \bar{X} sfuma dal blu, al giallo fino al rosso, è possibile analizzare e valutare per ogni area di studio la variazione prevista da modello CPM per i differenti decenni considerati, a partire dal periodo storico simulato 1996-2005, passando poi allo scenario futuro prossimo 2041-2050 per analizzare infine i valori interpolati per lo scenario futuro remoto 2090-2099. In sintesi, l'analisi delle figure riportate in questo capitolo consente di analizzare la variazione degli eventi di precipitazione estrema di durata sub-giornaliera simulata da modello CPM per i due futuri indagati in questo studio rispetto alla linea di base storica simulata.

Area 1: bassa pianura veneta
T= 10 anni

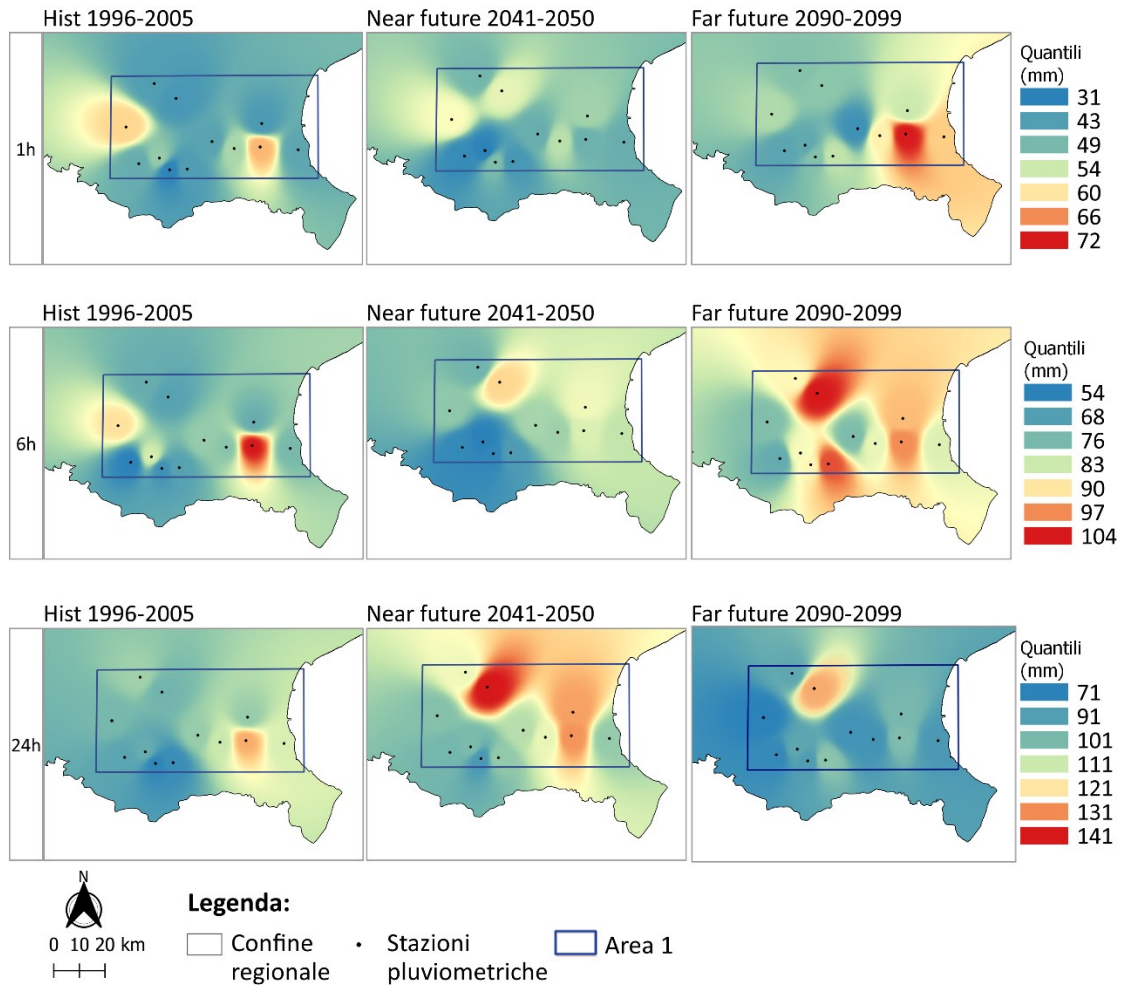


Figura 65: Rappresentazione per l'Area 1 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione, associati a tempo di ritorno 10 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore), corretti per la distorsione del modello. L'interpolazione dei quantili è realizzata con metodo IDW (Inverse Distance Weighted).

L'osservazione delle 9 figure sopra riportate, riferite all'Area 1 con tempo di ritorno pari a 10 anni, riporta in maniera evidente come all'aumentare della durata di precipitazione corrisponda un incremento del valore assunto dai quantili di precipitazione. Questo aumento si verifica anche passando dal periodo storico simulato Hist, al futuro più prossimo definito dal decennio 2041-2050 a quello più remoto 2090-2099. In particolare, per durata di precipitazione assegnata ai quantili pari a 1 ora, si evince che per lo scenario remoto è prevista un'intensificazione generale delle precipitazioni, che diviene più marcata in corrispondenza della stazione 11A ubicata a Cavarzere, mentre per lo scenario Far future l'interpolazione restituisce valori minori in corrispondenza delle stazioni 2A e 11A (Montagnana e Cavarzere) rispetto alla linea di base storica simulata, i quantili si riducono infatti da circa 64 mm per la stazione 2A e 66 mm per la 11A a circa 60 mm e 54 mm.

Per le precipitazioni estreme di durata 6 ore il modello prevede un marcato aumento soprattutto per il decennio 2090-2099 rispetto alla linea di base, infatti la parte nord-orientale dell'Area 1 presenta quantili di precipitazione elevati, che assumono valori tra i 90 e i 104 mm assegnati alla stazione 9A- Teolo. Per i quantili di precipitazione associati a durata 24 ore sono previsti valori compresi nel range 71-141 mm e l'interpolazione di questi valori restituisce due situazioni molto differenti per i due scenari futuri rispetto alla linea di base. Il decennio 2041-2050 è infatti interessato da un generale aumento dei valori dei quantili di precipitazione su tutta l'area, che raggiunge il valore massimo pari a 141 mm in prossimità delle stazioni 9A, ubicata in corrispondenza dei Colli Berici, e diminuiscono leggermente per le stazioni 10A e 11A, con valori pari a circa 131 mm.

Il decennio remoto 2090-2099 è invece caratterizzato da una generale riduzione dei quantili di precipitazione, sia rispetto allo scenario Near future che rispetto alla linea di base storica simulata. Infatti, su tutta l'area si osserva una gradazione blu corrispondente a quantili di pioggia pari a 71-90 mm, ad eccezione che per l'area posta in prossimità della stazione 11A, la quale risulta essere, come per il Near future, quella contraddistinta da valori maggiori, che in questo scenario corrispondono a circa 130 mm.

Area 1: bassa pianura veneta
T= 20 anni

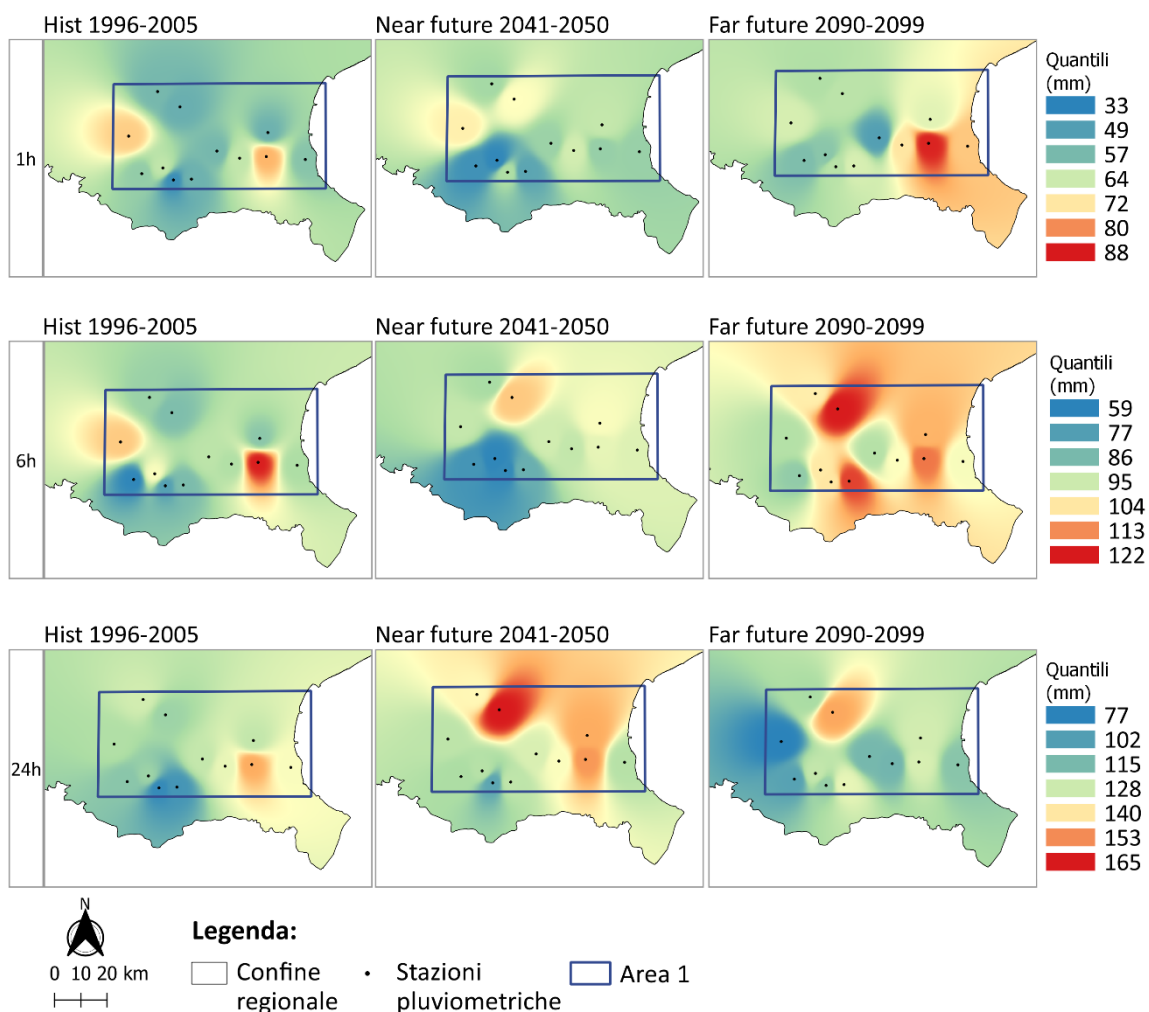


Figura 66: Rappresentazione per l'Area 1 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione X corretti per la distorsione del modello, associati a tempo di ritorno 20 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore). L'interpolazione dei quantili è realizzata con metodo IDW (Inverse Distance Weighted).

La situazione descritta per tempo di ritorno pari a 20 anni per l'area della bassa pianura veneta mantiene gli stessi aspetti osservati per tempo di ritorno pari a 10 anni, quindi un'intensificazione delle precipitazioni con l'avanzare degli scenari futuri per durata pari a 1 ora, una leggera riduzione dei valori assunti dalla stazione 11A per lo scenario Near future rispetto alla serie Hist, con significativa intensificazione generale su tutta l'area per durata intermedia pari a 6 ore e infine un incremento del valore rappresentativi dei quantili di precipitazione per il decennio 2041-2050 rispetto alla linea di base storica che va a ridursi per lo scenario futuro remoto 2090-2099.

Ovviamente, la rappresentazione dei quantili con $T=20$ anni si differenzia da quella analizzata precedentemente con $T=10$ anni per un aumento dei valori minimi e massimi associati a ciascuna durata di pioggia: per durata 1 ora i valori variano infatti dall'intervallo minimo-massimo pari a 31-72 mm con $T=10$ anni a 33-88 mm con $T=20$ anni, per durata 6 ore aumentano da 54-104 mm a 59-122 mm e infine per durata 24 ore si osserva un incremento del range da 71-141mm a 77-165 mm.

Area 2: alto Cordevole
T= 10 anni

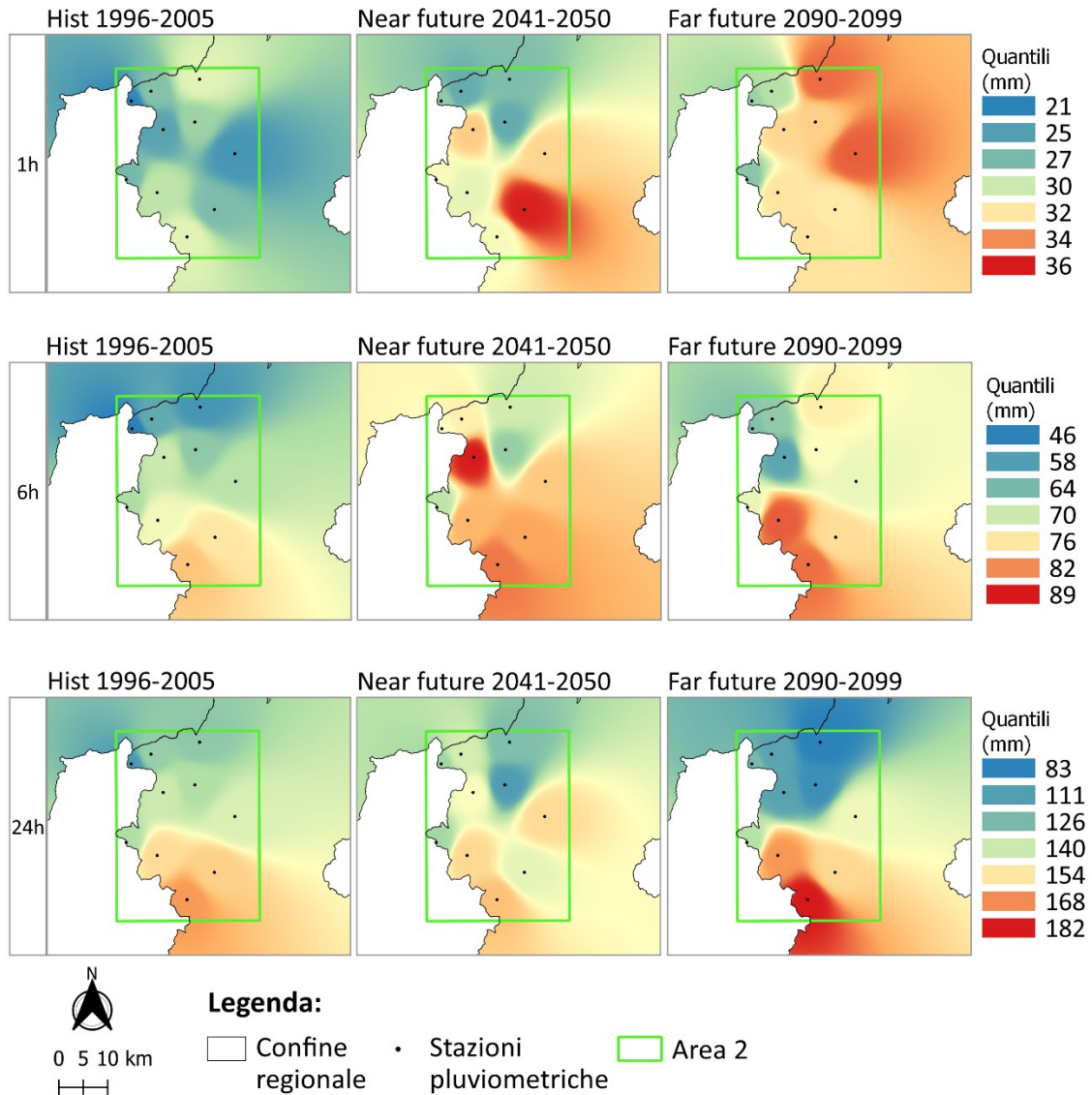


Figura 67: Rappresentazione per l'Area 2 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello, associati a tempo di ritorno 10 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore). L'interpolazione dei quantili è realizzata con metodo IDW (Inverse Distance Weighted).

I quantili di precipitazione \bar{X} calcolati per l'Area 2 con T=10 anni registrano valori inferiori per durata pari a 1 ora e 6 ore rispetto a quelli calcolati per l'Area 1, mentre per durata pari a 24 ore si osserva un aumento (da un range di 77-165 mm si ottiene per l'Area 2 un range pari a 83-182 mm).

Le interpolazioni dei quantili di precipitazione eseguite per durate pari a 1 ora e 6 ore mostrano una situazione che manifesta i valori più elevati per lo scenario Near future, in cui per la prima durata considerata si osserva che nella parte posta a nord dell'Area 2 si hanno quantitativi di pioggia inferiori, pari a circa 27 mm, con un leggero aumento in corrispondenza della parte nord-orientale, dove si registrano valori pari a 34-36 mm. Per durata di pioggia di 6 ore e per lo stesso scenario invece i quantitativi di pioggia sono maggiori e raggiungono il valore massimo di 89 mm in prossimità della stazione 3B ubicata presso Malga Ciapela. Per entrambe le durate di precipitazione considerate si osserva una leggera diminuzione dei quantitativi di pioggia per il futuro remoto rispetto al futuro più prossimo, ma comunque un generale aumento delle precipitazioni rispetto alla linea di base storica simulata.

Le simulazioni e interpolazioni realizzate per durate pari a 24 ore mostrano invece una situazione più insolita, tale per cui si verifica una leggera diminuzione delle precipitazioni passando dal periodo storico 1996-2005 al futuro prossimo 2041-2050, in particolare in corrispondenza delle stazioni 1B, 2B, 5B e 9B (poste rispettivamente ad Arabba, Caprile, Agordo e sul Passo Pordoi), mentre in corrispondenza del pluviometro 8B, collocato in Val di Zoldo presso il Pian del Crep, è evidenziata una diminuzione dei quantili, da circa 160 mm a 140 mm. Per la stessa durata di pioggia e stesso scenario futuro è invece previsto un aumento rispetto al periodo storico e a quello futuro prossimo, che si concentra nella parte meridionale dell'Area 1, i cui valori dei quantili variano da circa 150 mm a un massimo di 182 mm, mentre per la sezione settentrionale si osserva una riduzione delle precipitazioni, le quali assumono valori pari a circa 83-100 mm.

Area 2: alto Cordevole
T= 20 anni

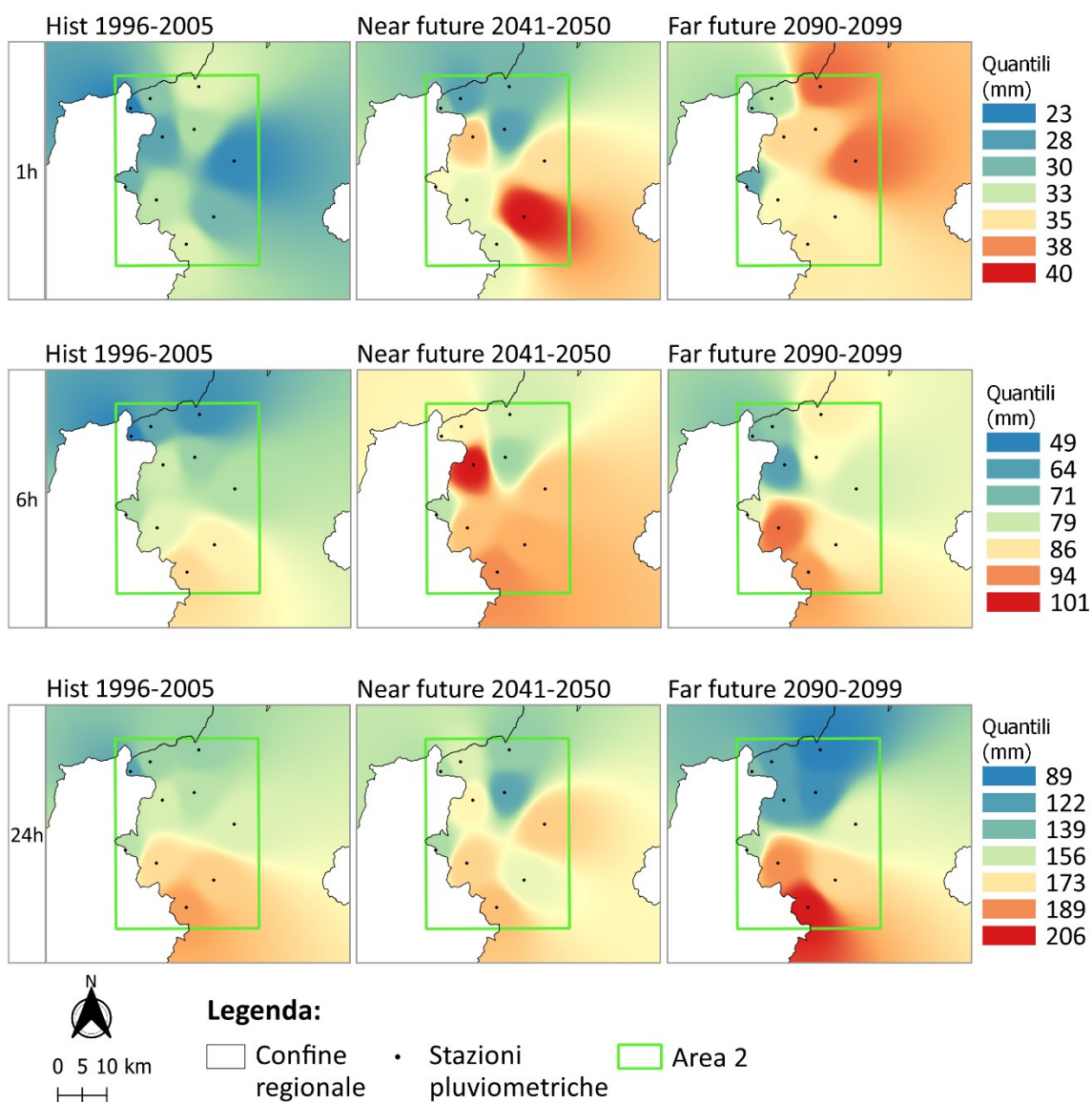


Figura 68: Rappresentazione per l'Area 2 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello, associati a tempo di ritorno 20 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore). L'interpolazione dei quantili è realizzata con metodo IDW (Inverse Distance Weighted).

La situazione osservata per la stessa area di studio, ossia l'alto Cordevole, con tempo di ritorno pari a 20 anni, restituisce gli stessi andamenti descritti per tempo di ritorno pari a 10 anni, sia per quanto riguarda le variazioni assunte dai due scenari futuri simulati rispetto allo storico simulato, sia per le tre differenti durate di pioggia, contraddistinti da un aumento dei valori dei quantili per tutte e tre le durate di pioggia descritte.

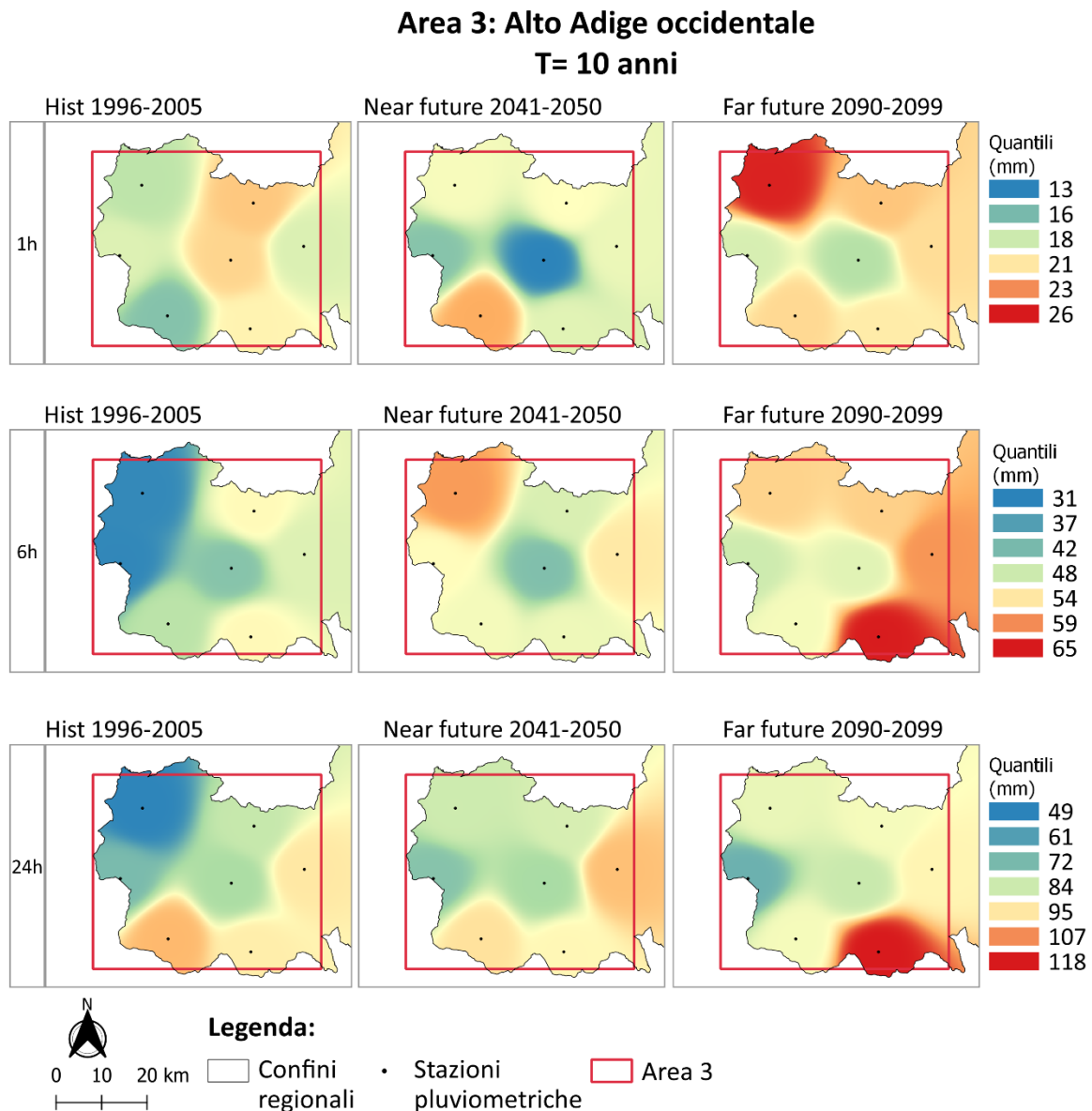


Figura 69: Rappresentazione per l'Area 3 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello, associati a tempo di ritorno 10 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore).

La zona dell'Alto Adige occidentale si caratterizza per essere quella, tra le tre aree studiate, contraddistinta da quantitativi di pioggia minori.

L'analisi delle variazioni previste dalle simulazioni effettuate da CPM e rappresentate tramite interpolazione IDW, restituisce una situazione in cui si registra un generale incremento delle precipitazioni diffuso su tutta l'area per lo scenario Near future rispetto alla linea di base storica simulata, il quale si accentua per lo scenario Far future, in particolare in corrispondenza di alcuni specifici punti. Per durata pari a 1 ora nello scenario 2041-2050 si osserva una marcata diminuzione in corrispondenza della stazione 4C-Silandro, la quale indica una variazione negativa tale per cui da circa 20 mm nel Near future si raggiungono i 13 mm nel Far future, mentre appare evidente un aumento che contraddistingue la stazione 3C- Solda. La stazione 4C subisce un ulteriore incremento nel futuro remoto 2090-2099, registrando valori pari a circa 18 mm e tale incremento caratterizza anche la zona adiacente a San Valentino alla Muta (1C), per la quale sono simulati quantili di precipitazione pari a 26 mm.

Per la durata di 6 ore risulta evidente per il decennio 2041-2050 un aumento delle precipitazioni nella parte nord-ovest dell'Area 3, passando da circa 31 mm a circa 50 mm, mentre per lo scenario Far future, nella stessa sezione, si osserva una leggerissima diminuzione dei valori; un aumento dei quantili contraddistingue invece la parte posta a nord-est, la quale assume valori che spaziano da 59 mm a un massimo di 65 mm in corrispondenza del pluviometro 7C (Fontana Bianca).

I quantili di precipitazione simulati per durata pari a 24 ore evidenziano un marcato incremento che caratterizza lo scenario 2090-2099 rispetto al periodo storico 1996-2005 e allo scenario 2041-2050 in prossimità della stazione 7C, alla quale sono assegnati valori pari a 118 mm. Un aumento lo si registra anche per la zona corrispondente al pluviometro 1C, che dai 49 mm riferiti al periodo storico aumentano a circa 84 mm per il Near future fino ad arrivare a circa 95 mm nel Far future. La sezione orientale dell'Area 3, in prossimità della stazione 6C-Naturno, mostra per il Near future prima un leggero aumento dei quantili di precipitazione rispetto al periodo storico, passando da circa 95 mm a circa 100 mm e poi una diminuzione dal Near future al Far future, per il quale i valori diminuiscono a 90 mm.

Area 3: Alto Adige occidentale
T= 20 anni

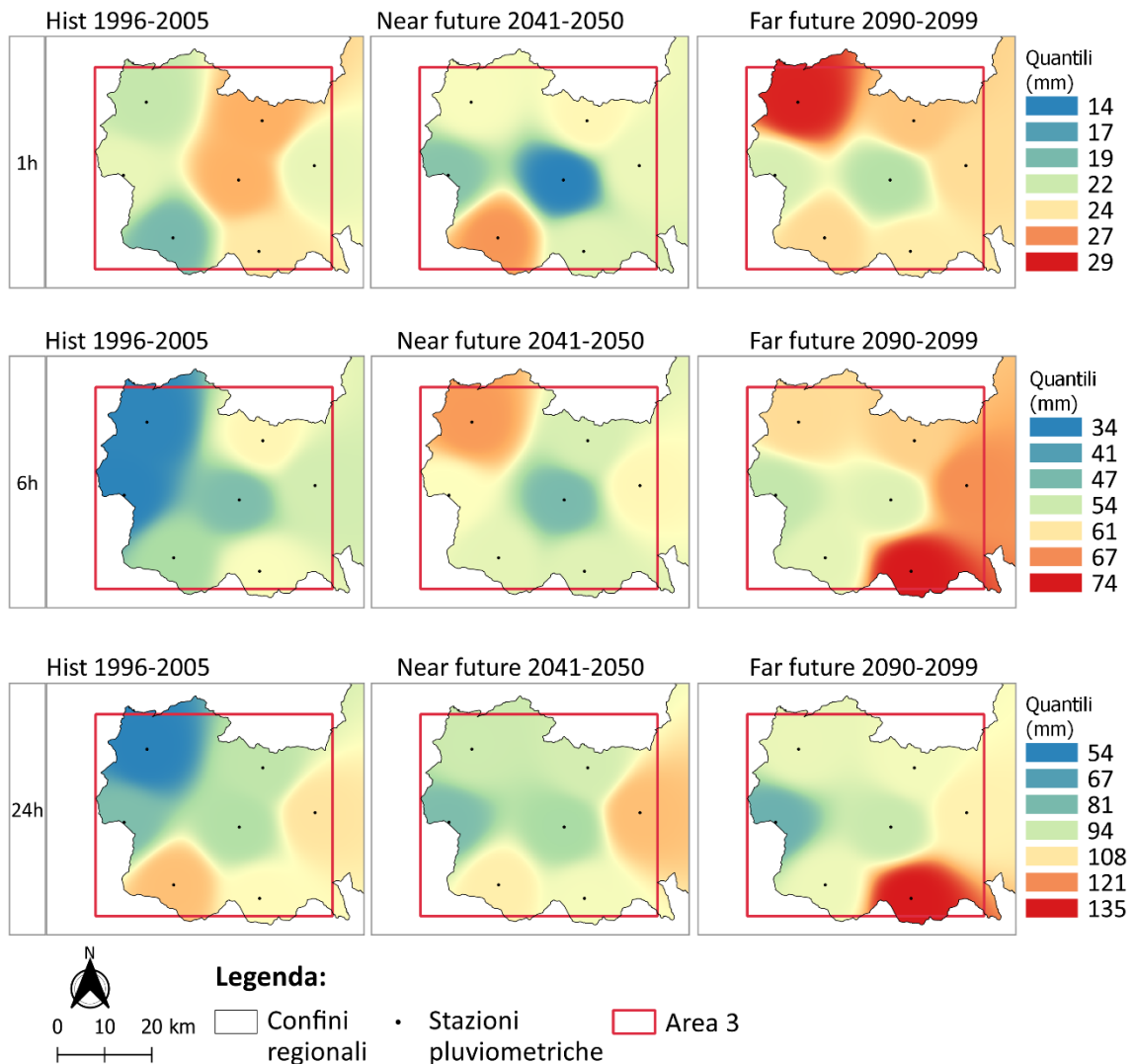


Figura 70: Rappresentazione per l'Area 2 delle simulazioni Hist Near future e Far future definite dai quantili di precipitazione \bar{X} corretti per la distorsione del modello, associati a tempo di ritorno 20 anni e classificati in base a tre durate di pioggia (1, 6 e 24 ore).

Le simulazioni dei massimi annuali *AM* eseguite per l'Alto Adige occidentale con tempi di ritorno pari a 20 anni non evidenziano cambiamenti rispetto a quanto descritto nel paragrafo precedente. Si sottolinea solamente un aumento dei valori associati ai quantili di precipitazione per tutte e tre le durate di precipitazione considerate. La variazione positiva più importante è registrata per durata pari a 24 ore, per la quale è previsto un aumento che si esprime passando da un range definito dall'intervallo 49-118 mm con T=10 anni a 54-135 mm con T=20 anni.

Capitolo 7

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo di valutare l'accuratezza dei modelli climatici ad elevata risoluzione spaziale e temporale nella simulazione delle precipitazioni estreme di durata sub-giornaliera. Per conseguire tale scopo sono state considerate tre aree di riferimento nel Nord-Est italiano (bassa pianura veneta; alto Cordevole; Alto Adige occidentale), caratterizzate da diversa struttura orografica e da diverse caratteristiche climatiche e sono inoltre state utilizzate le simulazioni realizzate per il periodo storico 1996-2005.

I risultati ottenuti dall'analisi delle statistiche di errore (relative alle simulazioni non corrette per la distorsione del modello) indicano una maggior capacità del modello CPM nel ricostruire le precipitazioni estreme nelle aree a basso controllo orografico della convezione (rappresentate dalla bassa pianura veneta), mentre gli errori aumentano per le aree a forte controllo orografico della convezione, che corrispondono in questo studio all'area dell'alto Cordevole.

Nell'area di pianura è stato infatti registrato, per piogge di 3 ore e tempo di ritorno di 10 anni, un errore medio massimo pari al 9,9%, che con tempo di ritorno pari a 20 anni raggiunge l'11,5%. Si deve infatti considerare che, all'aumentare del tempo di ritorno implementato nel calcolo dei quantili aumenta anche l'errore medio. Gli errori maggiori sono invece stati riscontrati in ambito prealpino, nell'alto Cordevole: si è osservato un aumento dell'errore medio all'aumentare della durata di precipitazione, fino a raggiungere un valore percentuale massimo di errore del 78,7% per durata 24 ore. Nella zona dell'Alto Adige occidentale gli errori maggiori sono associati alle durate minime e massime, pari a 1 e 3 ore e a 24 ore.

Ripetendo questa analisi sulle simulazioni storiche corrette per la distorsione del modello, si ottengono risultati diversi. Infatti, la correzione delle simulazioni ha restituito errori medi normalizzati molto contenuti e che risultano assumere segno negativo per quasi tutte le durate sub-giornaliere considerate e in tutte e tre le aree di studio. Si sottolineano solamente due eccezioni, che corrispondono all'area dell'alto Cordevole dove il

parametro statistico BRM_{i,d,T_j} si osserva essere positivo per durata pari a 24 ore e tempo di ritorno 10 anni e per la zona dell'Alto Adige occidentale, dove si individua BRM_{i,d,T_j} positivo per durata pari a 3 anni e per entrambe i tempi di ritorno.

Per questo primo punto, assunto come specifico obiettivo del lavoro di tesi, si può quindi sinteticamente concludere che, sulla base dei risultati ottenuti, il modello fornisce simulazioni con una maggior capacità di ricostruire il regime delle precipitazioni intense per le aree a basso controllo orografico e, all'aumentare del controllo orografico corrisponde una riduzione del grado di validità delle simulazioni. Per quanto riguarda invece la correlazione tra errore medio e durate di precipitazione a scala sub-giornaliera, non sono stati evidenziati legami significativi tra queste due variabili. Inoltre, l'elaborazione delle simulazioni al fine di applicare una correzione per la distorsione del modello ha restituito per tutte e tre le aree di studio degli errori medi limitati, prossimi allo zero, da cui si evince che, a seguito di correzione per la distorsione del modello la validità delle simulazioni è elevata, indipendentemente dal livello di controllo orografico esercitato sulla convezione che caratterizza l'area su cui si eseguono le simulazioni.

Il secondo punto di questo lavoro si pone l'obiettivo di analizzare e quantificare le variazioni nel regime delle precipitazioni intense, descritte dalle simulazioni fornite da CPM, per i due scenari futuri osservati: futuro vicino 2041-2050 e futuro lontano 2090-2099.

Per quanto riguarda il primo futuro analizzato, il decennio 2041-2050, si sottolinea innanzitutto che non si osservano differenze con elevata significatività tra le simulazioni delle precipitazioni non corrette per la distorsione e quelle corrette. Infatti, le variazioni previste per il futuro per le tre aree di studio sono abbastanza coerenti tra le due simulazioni. Nello specifico, l'area dell'Alto Adige è quella che presenta una maggior coerenza tra le due simulazioni per quanto riguarda la variabile di interesse, ossia la variazione attesa per i quantitativi di precipitazione. Questa simulazione prevede per durata pari a 1 ora una piccola riduzione delle precipitazioni (-1%) con tempo di ritorno pari a 10 anni, mentre variazioni positive più consistenti sono previste per le durate intermedie (circa +20%). Si sottolinea che questi risultati sono accompagnati da un valore di deviazione standard moderato, per cui si deve tenere presente che vi è una moderata variabilità dei dati simulati per ciascuna stazione pluviometrica all'interno di quest'area. Una minor corrispondenza tra simulazioni corrette e non corrette si osserva invece nelle

altre due aree, bassa pianura veneta e alto Cordevole. In particolare, si osserva che il dato di variazione attesa per il futuro vicino che subisce una maggior influenza dal processo di correzione è quello calcolato per durata pari a 24 ore: per la bassa pianura veneta da una variazione futura prevista da simulazione non corretta pari a 1,8%, a seguito di correzione si attesta una variazione rispetto al periodo storico simulato pari al 13,4% (tempo di ritorno 10 anni), mentre per la zona dell'alto Cordevole a partire da un valore pari 1,9% si quantifica una variazione del 24%.

Le variazioni del regime delle precipitazioni atteso per il decennio 2041-2050 sono contenute per la bassa pianura veneta, si prevedono infatti aumenti massimi del 4% per le durate più contenute mentre un aumento più significativo, pari al 13,4% è atteso per durate pari a 24 ore. Di entità più consistente sono le variazioni attese per la zona dell'alto Cordevole: è stimato un aumento del 15% per quantili di precipitazione di 1 ora e del 20-24% per le altre durate.

L'analisi delle variazioni attese per il futuro lontano 2090-2099 restituisce un quadro leggermente differente rispetto a quello descritto per il 2041-2050. Confrontando infatti la simulazione corretta per la distorsione con la simulazione non corretta, si osserva che l'area che presenta una minor variazione nei parametri statistici calcolati è la bassa pianura veneta, per la quale è previsto per il futuro prossimo 2090-2099 un'intensificazione delle precipitazioni nell'ordine del 20% per le durate intermedie di 3 e 6 ore, aumenti di minor entità sono previsti per piogge di durata pari a 1 e 12 ore, mentre non si registra nessuna variazione per piogge di durata pari a 24 ore. Per la zona dell'alto Cordevole si osserva un cambiamento nelle variazioni previste dalla simulazione corretta rispetto a quella non corretta per le precipitazioni di 24 ore; infatti, mentre inizialmente era prevista una diminuzione delle piogge a seguito di correzione si attende un incremento abbastanza significativo, del 15% circa. In quest'area le variazioni positive più consistenti sono associate alle durate inferiori pari a 1 e 3 ore, corrispondenti al 21% e 28%. mentre più contenute sono le variazioni previste per le altre durate.

Infine, per la zona dell'Alto Adige le durate che subiscono una variazione maggiore a seguito di correzione del modello sono quelle intermedie, pari a 6 e 12 ore. Per quest'area si attende per il decennio 2090-2099 un incremento delle precipitazioni estreme, per tutte cinque le durate considerate, pari a circa il 15%.

Si può allora concludere sostenendo che è previsto un generale aumento delle precipitazioni estreme di durata sub-giornaliera su tutte e tre le aree analizzate in questo studio, in particolare l'area per cui sono previsti incrementi maggiori è la zona dell'alto Cordevole, sia per il futuro prossimo che per quello remoto, mentre variazioni minori sono attese per la bassa pianura veneta. Per entrambe le aree si registra un'intensificazione delle precipitazioni per durata pari a 3 ore, ma per la prima area un significativo aumento caratterizza anche le piogge di 6 ore mentre per la seconda area questo aumento è associato alle precipitazioni di 1 ora, questo si verifica per entrambi i tempi di ritorno esplorati.

Per la zona dell'Alto Adige sono invece previsti aumenti dello stesso ordine per tutte le durate sub-giornaliere con tempo di ritorno pari a 10 anni, mentre per tempo di ritorno pari a 20 anni si osserva una variazione più consistente per le durate maggiori.

Queste valutazioni, condotte per la prima volta in questa regione sulla base di modelli climatici ad alta risoluzione, risultano fondamentali per delineare una base scientifica solida atta a sostenere il processo decisionale per le fasi di programmazione, pianificazione e allocazione delle risorse individuate per attuare politiche e strategie di adattamento ai cambiamenti climatici, al fine di ridurre il rischio idrologico ed idraulico ad esso associato.

Allegato 1

Le seguenti tre tabelle riportano i valori dei quantili di precipitazione, calcolati con il metodo di Gumbel descritto al Capitolo 5.1, per ciascuna stazione pluviometrica assegnata alla corrispondente area di studio.

I quantili di precipitazione, espressi in millimetri e riferiti alla relativa durata di precipitazione su-giornaliera sono calcolati per ciascun pluviometro considerando due tempi di ritorno, pari a 10 e a 20 anni. Sono suddivisi nelle quattro serie di dati definite al Capitolo 5.1 dai punti i., ii., iii. e iv. e corrispondono quindi ai quantili di precipitazione X calcolati dai massimi annuali AM rilevati da ogni stazione pluviometrica nel decennio storico 1996-2005, mentre le tre serie simulate (Hist, Near future e Far future) riportano i quantili di precipitazione \bar{X} stimati elaborando statisticamente i massimi annuali \overline{AM} corretti per la distorsione del modello tramite l'implementazione dei parametri statistici di distorsione indicati in *Tabella 5*.

Area 1: bassa pianura veneta									
Num. stazione	Durata	Quantili di precipitazione (mm)							
		Obs 1996-2005		Hist 1996-2005		Near future 2041-2050		Far future 2090-2099	
		T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20
1A	1 h	39.9	45.6	36.3	40.2	35.1	38.3	48.1	54.0
	3 h	80.1	94.4	58.4	66.1	42.5	45.4	80.6	93.7
	6 h	97.5	114.6	61.9	69.1	60.4	66.8	100.1	118.1
	12 h	102.4	119.0	69.5	77.0	72.7	80.2	101.9	119.5
	24 h	122.7	143.8	74.8	81.7	93.8	104.5	99.1	115.0
2A	1 h	55.9	65.3	58.9	68.9	54.1	63.1	46.7	53.8
	3 h	78.0	90.9	74.4	87.1	64.1	73.5	62.9	70.8
	6 h	83.4	96.9	86.5	101.1	70.2	79.7	68.7	76.7
	12 h	92.4	106.7	87.5	100.8	80.3	90.1	68.6	75.0
	24 h	102.9	119.6	89.1	100.9	91.7	104.0	71.2	77.1
3A	1 h	51.8	61.7	31.7	34.9	42.6	47.5	43.1	49.1
	3 h	85.6	104.0	50.1	55.5	48.1	52.3	72.8	82.7
	6 h	102.4	124.4	57.9	64.3	55.5	60.3	83.8	95.5
	12 h	106.6	127.7	69.1	77.4	62.9	67.7	89.1	101.4
	24 h	123.5	147.3	72.4	78.9	78.3	85.8	86.1	95.8
4A	1 h	48.8	56.9	36.5	41.2	41.2	46.1	43.2	47.9
	3 h	59.0	68.1	47.8	52.7	49.3	54.6	73.6	82.5
	6 h	63.7	72.1	64.6	72.8	66.2	74.7	83.7	94.1
	12 h	73.3	81.7	81.9	93.4	91.4	105.3	87.2	95.3
	24 h	84.1	91.7	95.7	109.4	108.3	123.4	91.6	99.1
5A	1 h	45.4	52.6	39.4	44.3	32.8	35.4	37.8	42.0
	3 h	61.3	71.9	50.8	56.5	42.2	46.1	52.3	57.8
	6 h	77.6	91.8	54.3	59.7	56.0	62.3	64.1	71.8
	12 h	81.5	94.8	71.3	81.0	70.9	80.2	69.5	77.9
	24 h	91.3	106.1	82.5	93.5	88.4	99.7	75.4	84.8
6A	1 h	47.6	54.8	44.6	50.4	31.3	33.9	38.6	43.3
	3 h	82.0	98.9	74.2	86.3	45.0	49.4	63.3	71.5
	6 h	95.4	115.3	77.6	89.9	54.2	59.7	81.7	95.0
	12 h	98.3	117.6	81.3	93.3	65.9	73.4	89.7	104.5
	24 h	106.7	126.2	85.5	96.8	90.1	102.2	91.4	105.6
7A	1 h	43.8	49.5	38.1	43.0	39.7	44.8	59.7	69.9
	3 h	76.7	86.8	50.6	56.9	65.5	75.2	77.6	90.5
	6 h	94.4	107.4	67.5	75.5	75.3	84.5	78.6	89.3
	12 h	108.9	123.5	85.2	96.5	83.5	91.8	78.0	87.1
	24 h	126.6	144.7	104.4	119.7	94.2	102.3	83.9	93.4

8A	1 h	37.1	40.8	46.3	50.6	47.5	53.2	56.0	64.8
	3 h	49.5	52.6	60.7	66.1	57.3	63.3	77.5	89.1
	6 h	55.8	59.5	69.6	76.3	71.7	79.5	80.1	90.5
	12 h	68.0	74.5	91.3	103.8	93.9	105.5	82.8	92.3
	24 h	80.4	90.3	101.6	115.4	107.3	120.3	81.0	89.4
9A	1 h	42.8	48.4	35.2	39.8	51.9	60.5	43.8	49.5
	3 h	59.6	66.4	50.7	57.2	69.6	81.3	84.7	98.0
	6 h	77.2	87.9	61.9	69.5	87.9	101.4	104.0	122.3
	12 h	99.4	114.8	77.4	86.8	122.7	143.7	115.5	134.0
	24 h	115.0	132.6	87.9	96.8	141.8	165.4	126.8	144.3
10A	1 h	36.2	40.9	35.7	40.2	45.6	50.9	49.1	55.8
	3 h	63.7	74.3	48.6	52.7	63.4	69.4	77.2	88.1
	6 h	77.2	90.4	64.6	71.1	80.8	89.7	90.9	105.4
	12 h	92.3	106.8	84.2	94.3	100.5	112.3	96.1	110.9
	24 h	104.8	121.8	94.4	105.5	126.3	143.6	95.7	109.5
11A	1 h	45.1	52.0	61.6	72.9	40.3	44.6	71.9	87.0
	3 h	61.8	71.2	92.3	108.6	66.7	74.2	86.4	102.3
	6 h	71.8	82.5	104.1	121.9	78.1	86.1	95.4	112.5
	12 h	83.8	96.2	120.4	141.3	105.3	119.4	98.6	114.8
	24 h	91.4	104.5	124.6	143.6	127.8	146.6	97.0	110.9
12A	1 h	37.1	41.2	37.5	41.1	39.6	45.2	33.9	37.4
	3 h	55.4	63.6	66.1	74.5	55.9	63.3	49.1	53.7
	6 h	60.6	68.4	70.7	78.2	72.4	82.1	68.2	77.0
	12 h	73.2	82.5	83.1	92.4	86.1	96.8	77.8	88.4
	24 h	85.9	97.7	94.5	105.9	98.8	111.3	80.8	90.1

Area 2: alto Cordevole									
Num. Stazione	Durata	Quantili di precipitazione (mm)							
		Obs 1996-2005		Hist 1996-2005		Near future 2041-2050		Far future 2090-2099	
		T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20
1B	1 h	27.4	32.2	23.6	26.2	22.7	24.5	25.3	27.9
	3 h	37.3	41.0	40.5	44.7	44.8	49.0	48.2	53.8
	6 h	53.4	59.1	50.7	54.7	69.3	77.2	54.5	59.4
	12 h	78.0	86.7	76.8	84.1	101.8	114.6	70.4	75.4
	24 h	95.8	105.6	104.1	115.8	120.5	136.4	92.3	99.8
2B	1 h	29.8	34.6	24.4	27.5	22.7	24.5	30.7	33.7
	3 h	44.4	50.3	36.9	40.8	42.0	46.1	55.3	62.4
	6 h	54.2	59.5	54.3	60.5	54.9	61.1	66.9	74.9
	12 h	67.1	71.9	75.2	83.1	73.3	81.3	74.8	81.1
	24 h	86.8	93.4	110.1	123.9	90.2	100.6	86.6	93.5
3B	1 h	27.6	31.8	22.4	24.7	30.9	34.7	30.4	33.7
	3 h	39.8	44.4	40.4	44.6	61.1	69.4	41.0	43.8
	6 h	49.4	53.1	60.8	68.2	88.3	101.2	50.1	53.5
	12 h	76.1	82.5	97.6	112.3	121.8	139.8	68.3	72.9
	24 h	100.6	109.3	118.0	134.4	131.8	151.3	92.2	100.1
4B	1 h	21.4	23.6	25.7	28.4	27.4	30.4	29.7	32.0
	3 h	36.5	39.3	43.4	47.5	54.9	60.2	58.9	63.5
	6 h	58.8	64.0	65.6	71.0	76.7	84.9	83.7	93.5
	12 h	93.3	101.8	97.6	105.5	113.9	127.9	121.1	136.3
	24 h	127.8	140.2	143.4	160.1	144.4	163.0	161.3	182.7
5B	1 h	35.3	39.7	23.4	25.5	35.8	40.2	29.5	32.2
	3 h	64.8	73.0	44.3	48.2	55.0	60.8	57.3	63.7
	6 h	102.9	117.6	70.4	77.3	78.4	87.8	71.7	77.0
	12 h	154.6	178.5	100.0	109.2	108.8	122.9	116.4	129.7
	24 h	189.0	215.7	147.2	164.9	125.2	140.8	144.6	160.9
6B	1 h	28.5	31.7	27.3	30.0	28.1	30.2	29.8	32.6
	3 h	56.7	62.8	45.6	48.9	51.9	56.1	58.7	63.9
	6 h	87.2	96.6	74.7	80.8	81.7	91.0	82.3	89.5
	12 h	135.7	153.9	106.6	114.8	120.5	134.8	129.4	143.8
	24 h	172.6	194.3	160.7	179.4	151.0	170.2	182.2	205.6
7B	1 h	23.6	26.7	27.2	30.2	23.5	25.6	33.9	37.8
	3 h	41.8	46.9	43.4	47.9	43.9	48.4	60.6	69.0
	6 h	55.8	62.0	48.3	51.4	61.3	68.5	69.5	77.6
	12 h	75.7	83.3	75.7	83.5	88.3	100.5	72.3	78.0
	24 h	99.3	108.8	102.3	114.7	99.6	113.4	83.1	89.4

8B	1 h	24.2	27.3	21.8	23.4	30.4	33.3	34.2	37.7
	3 h	38.7	43.3	39.5	42.7	54.9	61.3	54.3	58.7
	6 h	61.5	68.7	58.8	63.3	74.4	84.3	64.8	69.1
	12 h	90.0	100.2	92.1	102.4	116.5	133.4	102.6	113.0
	24 h	113.9	125.0	122.0	135.5	143.6	164.8	128.1	140.4
9B	1 h	37.4	45.4	21.2	22.8	24.0	26.4	24.4	26.7
	3 h	49.3	57.7	36.4	39.7	46.9	52.1	45.5	51.2
	6 h	55.2	63.0	45.6	49.1	67.2	75.8	53.3	58.0
	12 h	66.2	74.4	67.8	73.8	93.9	107.1	73.9	80.9
	24 h	73.5	80.8	89.9	100.2	105.9	120.0	98.5	109.2
10B	1 h	36.0	42.4	23.3	25.3	28.2	31.3	23.8	25.0
	3 h	42.5	47.4	38.1	41.8	39.3	42.2	48.7	53.6
	6 h	56.2	61.5	57.0	62.6	59.3	64.9	64.5	71.3
	12 h	86.6	96.0	82.4	91.5	86.5	95.4	86.6	96.0
	24 h	116.5	128.8	109.5	123.9	106.4	118.7	111.4	122.9

Area 3: Alto Adige occidentale									
Num. stazione	Durata	Quantili di precipitazione (mm)							
		Obs 1996-2005		Hist 1996-2005		Near future 2041-2050		Far future 2090-2099	
		T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20	T=10	T=20
1C	1 h	22.5	25.9	17.0	19.0	19.2	21.3	25.8	29.2
	3 h	26.8	29.0	22.6	24.4	42.3	48.6	35.3	38.7
	6 h	36.8	40.1	31.6	34.3	57.6	65.4	52.7	58.4
	12 h	46.4	50.7	41.8	45.5	68.6	77.5	64.9	72.2
	24 h	59.8	65.9	49.5	53.6	73.5	82.2	79.2	89.3
2C	1 h	14.7	16.4	18.2	20.6	15.4	16.8	18.0	19.3
	3 h	31.9	35.6	28.0	31.4	33.7	37.8	32.0	35.2
	6 h	44.5	49.2	31.5	34.1	48.3	53.9	43.0	47.1
	12 h	57.3	62.9	42.9	47.2	58.7	65.3	57.0	64.2
	24 h	71.9	79.0	59.8	66.9	61.4	66.8	57.8	63.9
3C	1 h	12.4	14.1	15.3	16.3	22.8	26.0	21.1	23.3
	3 h	22.2	24.3	29.8	32.8	39.4	44.6	34.7	38.1
	6 h	32.5	35.6	41.2	44.2	47.0	51.1	47.0	51.0
	12 h	48.1	53.1	64.9	71.3	65.7	70.2	67.8	75.0
	24 h	63.3	69.6	98.5	109.9	89.9	98.4	81.6	90.1
4C	1 h	29.5	34.4	21.2	25.2	13.1	14.0	16.7	18.5
	3 h	33.5	38.0	30.1	34.4	24.2	26.5	29.8	32.9
	6 h	39.8	43.7	37.1	40.6	36.8	40.2	45.0	50.1
	12 h	53.4	59.0	49.1	54.3	57.1	64.3	58.7	64.9
	24 h	70.4	79.2	66.5	75.9	66.1	73.7	72.6	81.1
5C	1 h	18.9	21.6	21.7	25.3	19.5	22.0	21.8	24.6
	3 h	27.7	29.9	39.3	46.2	32.9	37.6	34.1	38.0
	6 h	43.9	48.3	48.6	55.3	44.2	49.4	52.9	59.9
	12 h	71.0	80.7	59.8	66.0	59.4	66.6	62.2	69.3
	24 h	89.6	101.9	71.9	78.9	75.3	83.9	81.7	91.3
6C	1 h	20.5	22.8	18.1	20.6	18.8	20.8	20.9	23.4
	3 h	32.3	35.7	32.2	36.6	34.4	38.0	40.1	45.5
	6 h	49.2	55.1	44.6	48.9	50.3	55.0	57.9	66.1
	12 h	67.4	76.2	67.4	75.1	79.0	89.7	67.3	75.1
	24 h	77.5	87.3	88.6	100.9	97.1	110.3	85.8	97.5
7C	1 h	19.9	22.2	20.0	22.6	18.4	20.3	20.3	22.1
	3 h	28.0	30.2	39.3	44.9	30.6	33.0	41.9	47.7
	6 h	42.2	46.1	48.7	53.5	46.3	50.5	64.8	74.1
	12 h	68.3	76.0	62.6	66.4	65.5	71.1	94.9	108.6
	24 h	104.1	118.2	87.3	95.2	85.3	91.7	118.1	134.7

Bibliografia

- Barbi A., Cola G. e Marani L., (2018), *Inquadramento climatico del Veneto*, pg. 4.
- Benini G., (1974), *Sistemazioni idraulico-forestali*, CLEUP, Cooperativa Libreria Editrice degli Studenti dell'Università di Padova.
- Caspani D. e Santoro F., (2014), *Influenza dei cambiamenti climatici sulla frequenza delle inversioni termiche dell'atmosfera in Pianura Padana: trend storico e proiezioni del modello MED-CORDEX-CMCC*, Politecnico di Milano, relatore Caserini S., correlatore Cacciari C., Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio.
- Clark, P., Roberts, N., Lean, H., Ballard, SP e Charlton-Perez, C. (2016), *Convection-permitting models: a step-change in rainfall forecasting*. *Met. App*, 23: 165-181. <https://doi.org/10.1002/met.1538>.
- Daly C., Gibson W. P., Johnson G. L. e Pasteris P., (2002), *A knowledgebased approach to the statistical mapping of climate*, *Climate research*, 22(2): 99–113.
- Dallan E., Roghani B., Fosser G., Schaer C., Marani M., Borga M. e Marra F., (2022), *Projected changes in subdaily extreme precipitation over an alpine transect at convection-permitting scale*, EMS Annual Meeting Abstract, Vol. 19, EMS2022-510, 2022, <https://doi.org/10.5194/>.
- De Nadai G., (2011), *Caratteristiche forestali di alcuni siti frequentati in periodo riproduttivo da civetta capogrosso (Aegolius funereus L.) in provincia di Belluno*, relatore prof. Colpi C., correlatore prof. Mezzavilla F., tesi di laurea in Scienze Forestali e Ambientali, Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R., (2007) *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S. C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M., (2013) *Evaluation of Climate Models*, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R., (2009) *The Cordex Framework*, Bulletin, Volume 58, 3.
- Isotta F. A., Frei C., Weilguni V., Percec Tadi M., Lassagues P., Rudolf B., Pavan V., Cacciamani C., Antolini G., Ratto S. M., Munari M., Micheletti S., Bonati V., Lussana C., Ronchi C., Panettieri E., Marigon G., Vertacnik G., (2014), *The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data*, International Journal of Climatology, Volume 34, pg. 1669.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al., (2014), *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*, Reg. Environ Change 14, 563–578 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Libertino A., Ganora D., e Claps P., (2019), *Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: The case of Italy*, Geophysical Research Letters, 46, 7437–7446. <https://doi.org/10.1029/2019GL083371>.
- Lionello P., Baldi M., Brunetti, M., Cacciamani C., Maugeri M., Nanni, T., Pavan V., e Tomozeiu, R., (2009), *Eventi climatici estremi: tendenze attuali e clima futuro sull'Italia*, I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti, Bononia University Press, Bologna, 81-106.
- Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emori S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J. F., Manning M., Matthews B., Meehl J., Meyer, L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., Van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., Van Ypersele J. P., Zurek M., (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emission*, Climate Change, Impacts, and response Strategie, Technical Summay of Intergovernmental Panel on Cliamte Change.

- Pantillon F., Lerch S., Knippertz P., Corsmeier U., (2018), *Forecasting wind gusts in winter storms using calibrated convection-permitting ensemble*, Q J R Meteorol Soc. 2018; 144:1864-1881. Doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3380>
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., et al. (2015), *A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges*, Rev. Geophys., 53, 323– 361. Doi:10.1002/2014RG000475.
- Ramanzin M. e Somnavilla G., (2003), *Piano Faunistico Venatorio Provinciale-aggiornamento 2003-2008*, Amministrazione Provinciale di Belluno, Assessorato alla tutela della fauna, alle attività ittiche e venatorie, Dipartimento di Scienze Zootecniche, Università degli Studi di Padova.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A. & Taylor, K. E., (2007), *Climate models and their evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds), 589–662 Cambridge: Cambridge University Press.
- Righetto M. e Segato M., (2014), *Relazione idrologica illustrativa dell'elaborazione dei dati, del modello di bilancio idrologico e dei modelli di cambiamento climatico*, Beta studio- water and natural resources consultants, pg. 103.
- Roghani B., Dallan E., Fosser G., Schär, C., Marani M., Borga, M. e Marra, F. (2022). *Changes in future subdaily extreme precipitation at convection-permitting scale over an alpine transect*, No. EGU22-5924, Copernicus Meetings.
- Rossi R. e Dalla Fontana G., (2020), *Appunti del corso Applicazioni GIS in idrologia*, Università degli Studi di Padova, Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali, Anno Accademico 2020/2021.

- Salvati P., Petrucci O., Rossi M., Bianchi C., Pasqua A.A., Guzzetti F. (2018), *Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy*. *Sci. Total Environ.*, 610–611 (2018), pp. 867-879.
- Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolf M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriaco M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., Rizzo A., Santini M., Sini E., Staccione A., Villani V., Zavatarelli M., (2020), *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia*, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici CMCC, doi: 10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO.
- Tranchida G., (2021), *Analisi spaziale dell'andamento delle precipitazioni estreme in Italia su base morfologica e geomorfologica tramite metodologie GIS-base*, relatore Claps. P. e Mazzoglio P., Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Torino.
- Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2018*, ISPRA, Rapporti 287/2018.
- Zebisch M., Pedoth L., Niedrist G., Tappeiner U., Elmi M., Pinzger S., Pistocchi A. e Tasser E., (2011), *Rapporto sul clima- Alto Adige*, EURAC research Bolzano, pg. 105: III.
- Zucaro R. e Povellato A., (2009), *Programma interregionale di monitoraggio dei sistemi irrigui delle regioni centro settentrionali. Rapporto sullo stato dell'irrigazione in Veneto*, Istituto Nazionale di Economia Agraria (INEA), Ministero delle Politiche agricole, alimentari e forestali, pg. 26.

Sitografia

<https://www.arpa.veneto.it/> 21/07/2022

<https://cordex.org/> 06/07/2022

<https://crclim.ch/> 07/08/2022

<https://meteo.provincia.bz.it/stazioni-meteo-valle.asp> 22/07/2022

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home.html> 14/08/2022

<https://www.ipcc.ch/> 02/09/2022

Software

Le analisi dei dati sono state realizzate con **Microsoft Excel 2021**.

Per l'elaborazione dei dati in ambiente GIS è stato utilizzato **Quantum GIS**.

QGIS Development Team, 2009, versione 3.26.2-Buenos Aires, QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.org>

Ringraziamenti

La scrittura di queste frasi di ringraziamento, tocco finale di questa tesi e più in generale di tutto il percorso universitario, è accompagnata da un sentimento di gioia e di soddisfazione, velato da una lieve malinconia per il bel capitolo che si sta concludendo.

Dedico questo mio traguardo a Nicole, Sofia, Omar e Nicolò, a cui devo le più belle risate fatte in vita mia! Lo so, non bastano queste semplici righe per ringraziarvi dei momenti indimenticabili che abbiamo passato assieme, ci vorranno anche un po' di brindisi!

Un grazie di cuore alla mia famiglia per il supporto, l'incoraggiamento e per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso che, non posso negare, mi ha rivoluzionato la vita. Grazie per la pazienza dimostrata, nonostante il mio esserci e non esserci, il mio andare e tornare. Un pensiero speciale va alle mie nonne Rina e Rita, questo traguardo è anche merito vostro.

Un ringraziamento va al mio relatore Marco Borga e alla correlatrice Eleonora Dallan per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro e per il sostegno, contributo fondamentale che mi ha permesso, con questa tesi, di vincere un Premio allo Studio. A tal proposito, devo un ringraziamento al Consorzio GAL Patavino e al Consorzio Adige Euganeo per l'interesse dimostrato e per il riconoscimento verso il mio lavoro.

Inutile dire che tutto questo lavoro non è solo frutto della mia fatica, senza il sostegno e l'aiuto di tante persone non sarebbe stato così completo e, spero, valido.