

Valutazione dei Rischi Climatici e della Vulnerabilità del Sistema AQP

Convenzione Operativa n° 2 Report finale dell'attività CG01.49.2.12

INVASI – Analisi delle leggi Intensità-Durata-Frequenza (variazione in severità e frequenza degli eventi estremi attesi in futuro per prefissati periodi di ritorno) e implicazioni sul pericolo di intorbidimento dell'acqua invasata e di interramento dei serbatoi

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
Acquedotto Pugliese S.p.A.



Autori

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui
Cambiamenti Climatici

Paola Mercogliano
Roberta Padulano
Matteo Pesce
Mario Raffa

Acquedotto Pugliese S.p.A.

Gianluigi Fiori
Vincenzo Patruno
Davide Ritossa
Luciano Venditti
Gerardo Ventafridda

Sommario

Premessa	4
1. Inquadramento territoriale	5
2. Nota metodologica: il modello VAPI.....	5
2.1 Campania.....	7
2.2 Puglia	9
2.3 Basilicata.....	10
3. Nota metodologica: bias correction degli estremi	12
3.1 Il Delta Quantile Mapping	13
3.2 Il Delta Quantile Mapping applicato ai massimi annuali di pioggia	15
3.3 Criticità e opportunità nell'utilizzo del dataset nella Convenzione.....	17
4. Nota metodologica: analisi e restituzione dei risultati.....	17
4.1 Analisi delle incertezze	17
4.2 Analisi della pioggia estrema (variazione della severità)	18
4.3 Analisi della pioggia estrema (variazione della frequenza)	19
5. Risultati.....	20
5.1 Valori di altezza di pioggia massima annuale sul periodo di riferimento.....	20
5.2 Valori di altezza di pioggia massima annuale attesi in futuro	22
5.3 Variazione attesa in futuro dell'altezza di pioggia massima annuale	30
5.4 Variazione attesa in futuro della frequenza	32
5.5 Sintesi per bacino, per tempo di ritorno e per durata	34
6. Discussione	37
7. Conclusioni e messaggi chiave.....	39
Bibliografia.....	41

Premessa

Il presente Report è riferito all'attività CG01.49.2.12: Aggiornamento delle leggi di pioggia VAPI (target "Invasi superficiali – qualità"). L'attività consiste nella valutazione di nuove leggi di pioggia, che tengano conto dell'effetto del cambiamento climatico sull'orizzonte temporale futuro 2021-2050 per diversi scenari di concentrazione, per i bacini individuati da Acquedotto Pugliese S.p.A. (AQP) in corrispondenza di sbarramenti (dighe e traverse) per uso idropotabile.

Lo scopo finale dell'analisi è quello di comprendere, seppure in modo qualitativo, se è da attendersi un aumento (in intensità o frequenza) della criticità degli eventi alluvionali sui bacini oggetto di studio, utilizzando come variabile rappresentativa ("proxy") il regime delle piogge estreme. Con una certa approssimazione, si può infatti supporre che un aumento di intensità e frequenza delle piogge estreme possa tradursi in un aumento di intensità e frequenza delle piene estreme, con entità certamente diversa a causa dell'effetto "filtro" operato dal bacino e dalle sue caratteristiche (in altre parole, tutti i processi che influiscono sulla trasformazione degli afflussi in deflussi). A sua volta, comprendere il regime alluvionale da attendersi in futuro permette di inferire, seppure – ancora – in modo qualitativo, sul possibile incremento degli eventi di intorbidimento dell'acqua invasata, soprattutto se in abbinamento a livelli di invaso particolarmente bassi. Inoltre, le piogge estreme, di per sé, sono direttamente responsabili dei fenomeni erosivi, nella loro quota parte legata, appunto, al distaccamento diretto di particelle di suolo per effetto dell'impatto delle singole gocce di pioggia. È ampiamente dimostrato che, maggiore è l'intensità della pioggia, maggiore è l'azione erosiva esplicata e, a parità di condizioni del suolo, maggiore è il materiale eroso. Tale materiale, trasportato dal ruscellamento e in parte depositato lungo il bacino, potrebbe arrivare all'invaso: un aumento nell'intensità e frequenza di questi eventi potrebbe comportare accelerazioni nel processo di interramento e, potenzialmente, una diminuzione della capacità di invaso rispetto alle condizioni attuali.

L'analisi in oggetto utilizza, per la rappresentazione delle condizioni di riferimento del regime meteorico estremo, le leggi di pioggia VAPI¹, in altre parole il riferimento ufficiale stabilito dalla normativa per l'Italia. Tali leggi legano l'altezza di pioggia (o la sua intensità) massima annuale, la durata degli eventi e la loro frequenza (ovvero il tempo di ritorno), e sono pertanto note, nella letteratura scientifica, come "curve IDF" (o "DDF"), dove IDF sta per "Intensity – Duration – Frequency" e DDF sta per "Depth – Duration – Frequency". Le due tipologie di curve sono derivabili l'una dall'altra, e per convenzione si utilizza in genere il termine "IDF" anche quando la variabile oggetto di studio è l'altezza di pioggia. Nella letteratura tecnica italiana si utilizza invece l'espressione generica "legge di pioggia". L'aggiornamento delle curve IDF verrà condotto seguendo l'approccio statistico proposto da Padulano et al. (2019) sulla base delle 14 catene di simulazione climatiche EURO-CORDEX identificate di default per la Convenzione, per l'orizzonte temporale 2021-2050 sotto i tre Representative Concentration Pathways RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

¹ <http://www.idrologia.polito.it/gndci/Vapi.htm>

1. Inquadramento territoriale

La Figura 1 mostra i bacini idrografici oggetto di studio (nel seguito identificati come “bacini AQP”). Tali bacini sono articolati, dal punto di vista idrologico, nei due compartimenti di Napoli e Bari (i cui Annali Idrologici hanno fornito i dati storici necessari per la calibrazione delle leggi di pioggia attualmente in vigore) e nelle tre regioni idrologicamente omogenee di Campania, Basilicata e Puglia:

- 1) “Fortore” (fiume Fortore, chiuso in corrispondenza della Diga di Occhito);
- 2) “Conza” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della Diga di Conza);
- 3) “Traversa Santa Venere” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
- 4) “Locone” (fiume Locone, chiuso in corrispondenza della Diga del Locone);
- 5) “Cogliandrino” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Cogliandrino);
- 6) “Traversa Sarmento” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
- 7) “Monte Cotugno” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Monte Cotugno);
- 8) “Pertusillo” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della Diga del Pertusillo);
- 9) “Traversa Agri” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
- 10) “Traversa Sauro” (Torrente Sauro chiuso in corrispondenza della suddetta traversa).

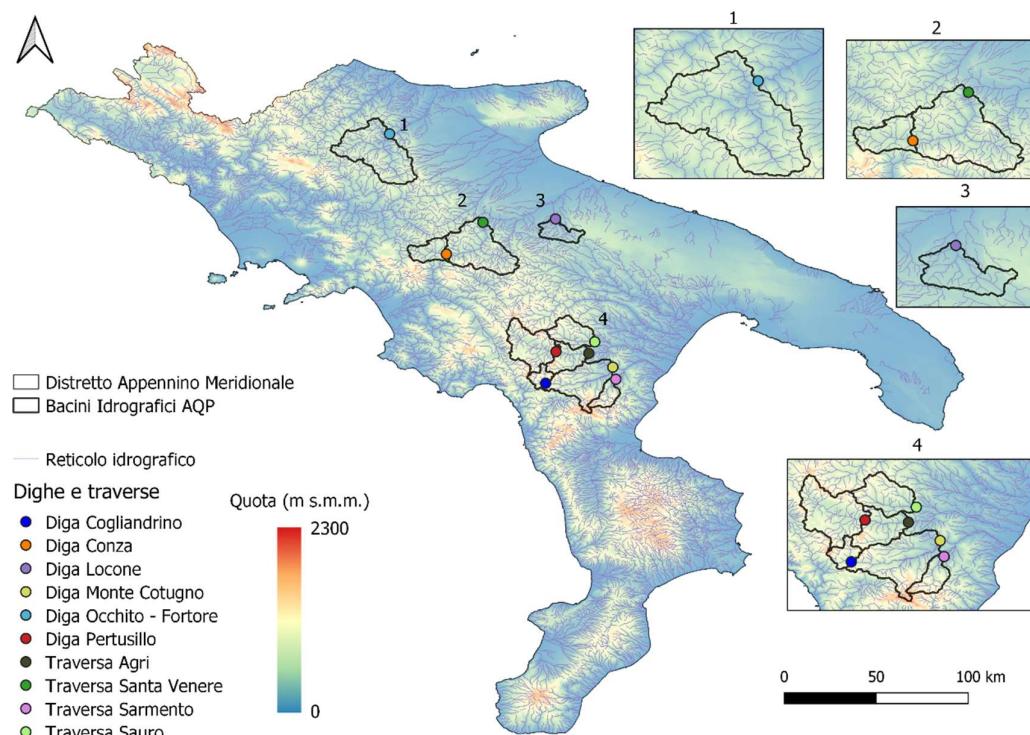


Figura 1. Mappa dei bacini individuati da AQP in corrispondenza di sbarramenti per uso idropotabile.

2. Nota metodologica: il modello VAPI

Le leggi di pioggia sul territorio italiano sono state individuate negli anni '90 nell'ambito del progetto VAPI (VALutazione delle Plene) coordinato dal CNR – GNDCI (Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche) attraverso una procedura idrologica nota come “regionalizzazione”. La regionalizzazione si basa sul presupposto che gli eventi estremi in un territorio ampio (ad esempio l'Italia) possano essere ricondotti ad un'unica distribuzione di probabilità, di cui però i parametri variano sul territorio. Ciò consente di poter individuare il “miglior” modello di probabilità utilizzando come base dati un gran numero di

osservazioni raccolte sull'intero territorio in esame; successivamente, si vanno con opportuni strumenti statistici ad individuare dei cluster di osservazioni tra i quali i parametri del modello di probabilità siano significativamente diversi.

In Italia, tale procedura è stata effettuata sia per le piene sia per le piogge estreme. Per le piene, la variabile utilizzata è il massimo annuale di portata al colmo di piena, definita come, appunto, il valore massimo in ogni anno del livello di portata più alto raggiunto durante l'evento di piena. In un'ottica di cambiamento climatico, concentrarsi su tale variabile appare poco utile dal momento che nulla ci dicono i modelli climatici in proposito (pertanto non sarebbe possibile stimarne il cambiamento atteso). Per quanto riguarda le piogge, la variabile presa in considerazione è il massimo annuale di altezza di pioggia sulle durate di riferimento di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Anche in questo caso, i modelli climatici non sono *direttamente* utili poiché, sebbene la loro risoluzione temporale nativa sia l'ora, se ne consiglia l'applicazione con una risoluzione massima giornaliera, per la quale i valori simulati sono considerati sufficientemente robusti. Tuttavia, come spiegato in seguito, l'approccio proposto consente, partendo da simulazioni con risoluzione giornaliera, di inferire sulla variazione attesa per le durate di pioggia sub-giornaliera sotto una serie di assunzioni.

Concentrandosi sulla pluviometria – ma analoghe considerazioni possono essere fatte per l'idrometria – l'approccio VAPI si basa sul concetto di “pioggia indice” (*index storm*), secondo il quale un evento di pioggia massima annuale di qualsivoglia durata d e tempo di ritorno T può essere visto come il prodotto tra la media μ dei massimi annuali di pari durata e un fattore di crescita k_T esclusivamente funzione del tempo di ritorno:

$$h(d, T) = \mu[h(d, T)] \cdot k_T(T) \quad (1)$$

È ampiamente dimostrato che il primo termine, la media, può essere ridotto a una funzione più o meno complessa (bi-, tri-, tetra-parametrica) della durata della pioggia e di altre variabili quali, ad esempio, la quota media del bacino o la distanza dalla costa. Per il secondo termine, è stato dimostrato che la distribuzione di probabilità più adatta è il modello TCEV (*Two-Component Extreme Value*), una funzione tetra-parametrica generata dalla fusione di due distribuzioni di Gumbel che vanno a modellare la parte bassa (eventi convettivi) e la parte alta (eventi ciclonici) dei dati. In altre parole, l'approccio della pioggia indice consente di separare la parte deterministica del processo dalla parte probabilistica.

Stabilito questo approccio sul territorio italiano, i parametri per entrambe le componenti sono stati determinati individuando singole aree omogenee all'interno delle quali i parametri potessero essere considerati costanti, e significativamente diversi da altre aree omogenee. Per il fattore di crescita, la distribuzione di probabilità TCEV è la seguente:

$$\Phi(k_T) = \exp \left\{ -\Lambda_1 \cdot \exp(-\eta k_T) - \Lambda_* \cdot \left(\Lambda_1^{1/\theta_*} \right) \cdot \exp \left(-\frac{\eta k_T}{\theta_*} \right) \right\} \quad (2)$$

dove Φ è la probabilità cumulata di non superamento, e i quattro parametri hanno il seguente significato:

- $\theta_* = \theta_2/\theta_1$ rappresenta il rapporto tra la media della magnitudo degli eventi ciclonici e quella degli eventi convettivi, ed è un valore superiore all'unità.
- Λ_* è una funzione del rapporto tra il numero medio annuo di eventi ciclonici e quello di eventi convettivi, con il primo sempre superiore al secondo).
- Λ_1 è il numero medio annuo di eventi convettivi.
- η è il rapporto tra la media delle osservazioni su un bacino e θ_1 .

Ricordando il rapporto che lega la probabilità di non superamento al tempo di ritorno ($T = 1/[1 - \Phi]$), la TCEV è stata concepita nell'ambito del progetto VAPI in modo tale da rappresentare soprattutto la coda destra della distribuzione, ovvero i massimi associati a tempi di ritorno molto alti; si sconsiglia quindi di applicare tale metodologia per tempi di ritorno molto bassi (ad esempio $T = 2$ anni, che corrisponde alla mediana della distribuzione). I valori dei parametri della TCEV sono forniti per ciascuna regione ritenuta omogenea; per l'Eq. 2, le regioni omogenee sono piuttosto ampie e spesso coincidenti con le regioni amministrative. Per quanto riguarda invece la funzione che lega la media dei massimi annuali a durata e (spesso) quota media del bacino, questa è identificata (sia come struttura della funzione, sia come parametri) a livello più locale, con aree omogenee molto più particolareggiate rispetto alle regioni amministrative.

In Tabella 1 vengono riportati, per ciascuna regione di riferimento per i bacini AQP, i parametri dell'Eq. 1. Nel seguito invece viene proposto il dettaglio, regione per regione, dell'espressione e dei parametri della legge empirica che fornisce la media dei massimi annuali di pioggia al variare della durata e – in alcuni casi – della quota.

Tabella 1: Parametri della distribuzione di probabilità dei massimi annuali delle piogge (Eq. 2).

Regione omogenea	θ_*	A_*	A_1	η
Campania	2.136	0.224	41	4.688
Basilicata* (sottozona A)	2.632	0.104	20.64	3.841
Puglia	2.352	0.772	45	5.662

*La Basilicata è l'unica regione suddivisa in due zone omogenee A e B; la sottozona B non è rilevante per i bacini AQP.

2.1 Campania

Quanto qui riportato fa riferimento al Rapporto Regionale *Valutazione delle Piene in Campania* (Rossi & Villani 1995)² e indagini effettuate in data successiva che ne costituiscono aggiornamento. L'area interessata dall'analisi comprende i bacini del versante Tirrenico (dal fiume Liri-Garigliano al fiume Bussento). La rete di dati, al 1980, era composta da 319 stazioni di misura della precipitazione con almeno 10 anni di dati. Per questa regione, i parametri del modello TCEV sono mostrati in Tabella 1, mentre la legge empirica per le piogge medie è la seguente:

$$\mu[h(d, T)] = f(d, z) = \frac{d \cdot A_0}{\left(1 + \frac{d}{d_c}\right)^\beta} \quad (3a)$$

$$\beta = C - D * z \quad (3b)$$

dove μ è la media dei massimi annuali di pioggia, in [mm/hr], d è la durata della pioggia, in [hr], z è la quota, in [m s.l.m.m.]. I parametri sono riportati in Tabella 2 per le sei zone omogenee della Campania, rappresentate in Figura 2.

² <http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/Napoli.pdf>

Tabella 2: Parametri dell'Eq. 3.

Zona omogenea (Figura 2)	A_0 [mm/hr]	d_c [hr]	C	$D \cdot 10^5$
1	77.08	0.3661	0.7995	8.6077
2	83.75	0.3312	0.7031	7.7381
3	116.7	0.0976	0.7360	8.7300
4	78.61	0.3846	0.8100	24.874
5	231.8	0.0508	0.8351	10.800
6	87.87	0.2205	0.7265	8.8476

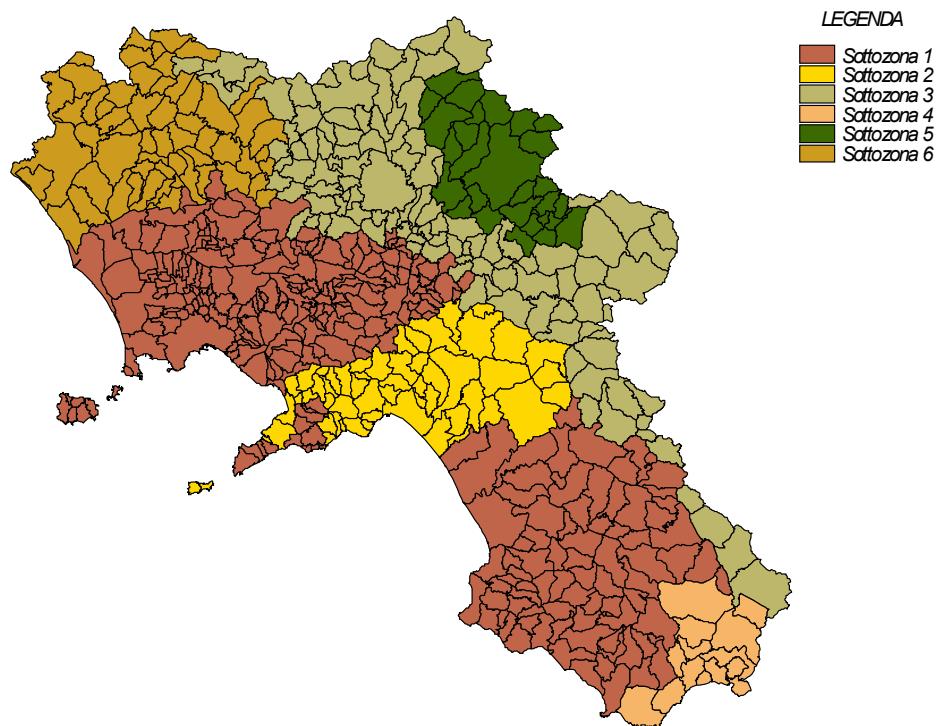


Figura 2: Aree pluviometriche omogenee individuate per il territorio della Campania.

Tra i bacini AQP che rientrano in questa regione omogenea vi è soltanto quello del Fortore, chiuso in corrispondenza della Diga di Occhito, che si trova al confine tra Campania, Molise e Puglia. Per questo bacino la sottozona omogenea di interesse è la numero 3 in Tabella 2. L'applicazione dell'Eq. 3b rende necessario il calcolo della quota media del bacino, che è stata valutata costruendo la curva ipsografica a partire dal modello digitale del terreno con risoluzione pari a 20 metri messa a disposizione dal Geoportale Nazionale³. Per il bacino, la quota media è risultata essere pari a 583 m.

³ <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>

2.2 Puglia

Quanto qui riportato fa riferimento al Rapporto Regionale *Valutazione delle piene in Puglia* (Copertino & Fiorentino 1994)⁴. L'area interessata dall'analisi comprende i bacini localizzati tra il fiume Ofanto a sud e il torrente Candelaro a nord. I dati pluviometrici usati erano gestiti dal SIMN, sezione di Bari. La rete, al 1985, era composta da 100 stazioni di misura con almeno 1 anni di osservazione. Per questa regione, i parametri del modello TCEV sono mostrati in Tabella 1, mentre, la legge empirica per le piogge medie è la seguente:

$$\mu[h(d, T)] = f(d, z) = ad^n \quad (4a)$$

$$n = \frac{Cz + D + \ln(\alpha) - \ln(a)}{\ln(24)} \quad (4b)$$

dove α è il rapporto tra la media dei massimi annuali di altezza di pioggia giornaliera e quella dei massimi annuali di altezza di pioggia associata a una durata di 24 ore (costante su tutta la regione). Per la Puglia, sono state identificate 4 aree omogenee (Figura 3), i cui parametri sono riportati in Tabella 3. Nel caso delle aree 2 e 4 non è stata stabilita una significativa relazione tra μ e la quota, motivo per cui è stato fornito il valore medio regionale di n .

Tabella 3: Parametri dell'Eq. 4.

Zona omogenea (Figura 3)	α	a [mm/hr]	$C \cdot 10^4$	D	n
1	0.89	28.7	50.3	3.959	-
2	0.89	22.2	-	-	0.247
3	0.89	25.3	5.31	3.811	-
4	0.89	24.7	-	-	0.256

I bacini che rientrano in questa regione omogenea sono quelli inclusi nel bacino dell'Ofanto, che va a formare la sottozona 4 in Figura 3: Locone, Conza e Traversa Santa Venere. Come si nota in Tabella 3, per tale zona non risulta nessuna dipendenza dalla quota del bacino, e pertanto n assume un valore costante pari a 0.256.

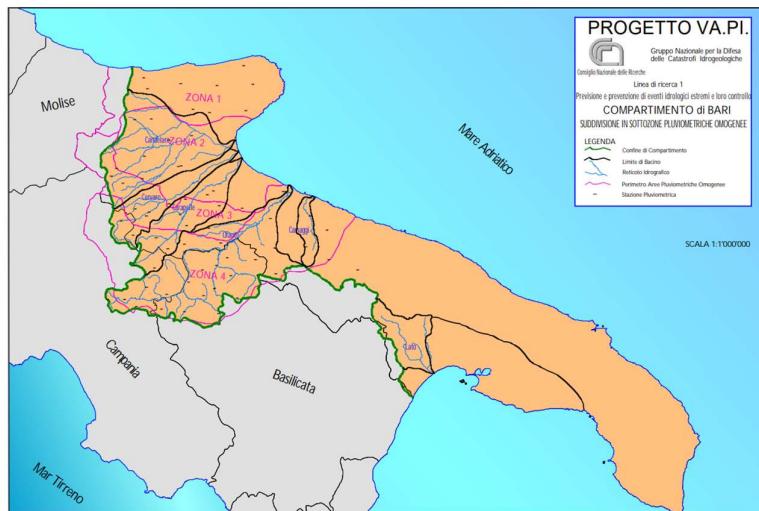


Figura 3: Aree pluviometriche omogenee individuate per il territorio della Puglia.

⁴ <http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapporti/Bari.htm>

2.3 Basilicata

Quanto qui riportato fa riferimento ai risultati del Progetto VAPI⁵ per il territorio del versante ionico della Basilicata (bacini di Bradano, Basento, Cavone, Agri e Sinni, per un totale di circa 8500 km²). I dati utilizzati sono tratti dalle pubblicazioni del SIMN relative ai Compartimenti di Catanzaro, Bari e Napoli. I dati pluviometrici utilizzati risultavano aggiornati al 1987, tuttavia per alcune stazioni è stato possibile utilizzare i dati aggiornati al 1992. I dati sono relativi a 55 stazioni pluviografiche con almeno 15 anni di dati. Per questa regione, la regionalizzazione è stata effettuata considerando due alternative (Figura 4):

- 1) L'intera regione Basilicata è una zona omogenea al primo e secondo livello;
- 2) La regione comprende, al secondo livello, una sottozona Nord composta da 70 stazioni ed una sottozona Sud-Ovest composta da 8 stazioni, mentre al primo livello la zona è unica. La sottozona che comprende le 8 stazioni si colloca a ridosso del massiccio del Pollino.

Con riferimento al modello TCEV, i parametri sono riportati in Tabella 1 per la sola sottozona A, poiché in ogni caso questa è l'unica area di interesse per i bacini AQP.

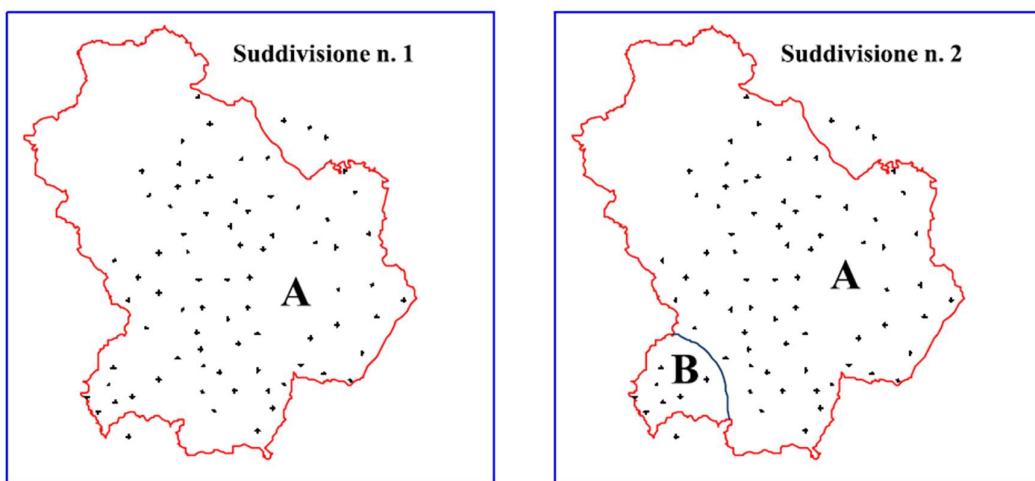


Figura 4. Ipotesi di suddivisione della Basilicata in sottozone pluviometriche omogenee.

La legge empirica per le piogge medie è la seguente:

$$\mu[h(d, T)] = f(d) = ad^n \quad (5)$$

I coefficienti a ed n stimati in ognuna delle 55 stazioni (Figura 4) sono stati interpolati spazialmente, nell'ambito del progetto VAPI, ottenendo delle isoline. Il rapporto di sintesi per la regione fornisce, oltre a tali isoline, sia i valori puntuali di entrambi i parametri per ogni stazione pluviometrica, sia i valori medi associati a ciascun bacino monitorato. Infine, mediante una opportuna trasformazione delle isoline in una mappa regolare, viene fornita una griglia di riferimento con risoluzione orizzontale pari a 10 km e l'elenco dei valori di $\log a$ e n per ciascuna delle celle. A questo punto, per la stima del valore medio su un'area quale un bacino idrografico, si possono considerare come valori dei parametri quelli ricavati mediante una media pesata dei valori delle celle che ricoprono il bacino stesso.

⁵ <http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/Basilicata.pdf>

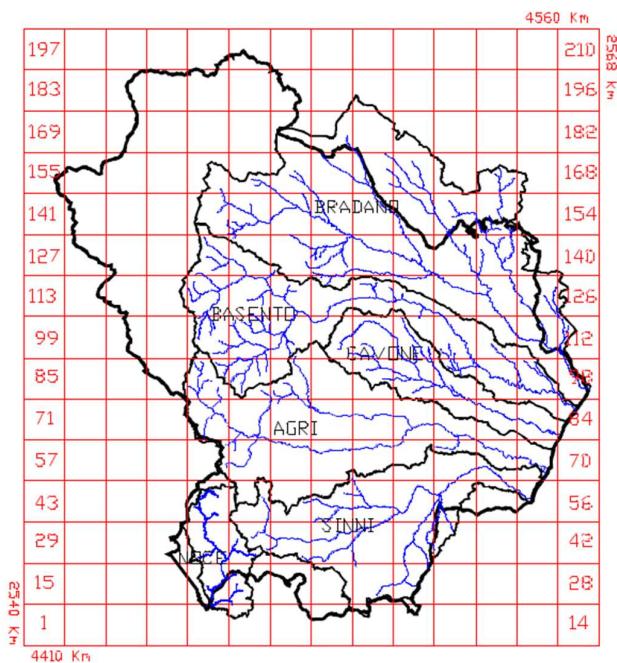


Figura 5. Griglia di lato 10 km applicata in corrispondenza della regione. Fonte: VAPI della Basilicata (Rapporto di Sintesi)

Tabella 4: Parametri dell'Eq. 5 su grigliato regolare (Figura 5).

Numero cella	X (Km)	Y (Km)	$\log(a)$	n	Numero cella	X (Km)	Y (Km)	$\log(a)$	n
5	2585	4415	1.477	0.381	53	2645	4445	1.408	0.377
6	2595	4415	1.457	0.398	54	2655	4445	1.415	0.355
7	2605	4415	1.431	0.412	55	2665	4445	1.423	0.340
8	2615	4415	1.407	0.420	61	2585	4455	1.378	0.370
9	2625	4415	1.406	0.420	62	2595	4455	1.351	0.377
10	2635	4415	1.414	0.420	63	2605	4455	1.317	0.389
18	2575	4425	1.455	0.372	64	2615	4455	1.301	0.385
19	2585	4425	1.477	0.380	65	2625	4455	1.321	0.377
20	2595	4425	1.455	0.403	66	2635	4455	1.349	0.372
21	2605	4425	1.414	0.414	67	2645	4455	1.377	0.364
22	2615	4425	1.379	0.420	68	2655	4455	1.395	0.346
23	2625	4425	1.376	0.420	69	2665	4455	1.414	0.325
24	2635	4425	1.399	0.415	74	2575	4465	1.363	0.350
32	2575	4435	1.467	0.375	75	2585	4465	1.336	0.354
33	2585	4435	1.465	0.390	76	2595	4465	1.317	0.356
34	2595	4435	1.437	0.404	77	2605	4465	1.301	0.366
35	2605	4435	1.382	0.416	78	2615	4465	1.304	0.370
36	2615	4435	1.345	0.420	79	2625	4465	1.321	0.367
37	2625	4435	1.350	0.417	80	2635	4465	1.339	0.361
38	2635	4435	1.390	0.403	81	2645	4465	1.363	0.347
39	2645	4435	1.415	0.384	82	2655	4465	1.380	0.331
47	2585	4445	1.427	0.386	83	2665	4465	1.407	0.310
48	2595	4445	1.395	0.399	84	2675	4465	1.434	0.295
49	2605	4445	1.342	0.409	87	2565	4475	1.356	0.333
50	2615	4445	1.315	0.406	88	2575	4475	1.339	0.338
51	2625	4445	1.332	0.394	89	2585	4475	1.318	0.341
52	2635	4445	1.370	0.389	90	2595	4475	1.301	0.339

Numero cella	X (Km)	Y (Km)	log(a)	n
91	2605	4475	1.301	0.347
92	2615	4475	1.311	0.360
93	2625	4475	1.326	0.359
94	2635	4475	1.341	0.347
95	2645	4475	1.365	0.331
96	2655	4475	1.391	0.309
97	2665	4475	1.419	0.293
98	2675	4475	1.443	0.279
101	2565	4485	1.342	0.323
102	2575	4485	1.333	0.319
103	2585	4485	1.316	0.320
104	2595	4485	1.301	0.322
105	2605	4485	1.301	0.333
106	2615	4485	1.316	0.346
107	2625	4485	1.334	0.347
108	2635	4485	1.355	0.327
109	2645	4485	1.380	0.307
110	2655	4485	1.407	0.294
111	2665	4485	1.435	0.280
112	2675	4485	1.435	0.280
116	2575	4495	1.336	0.299
117	2585	4495	1.320	0.299
118	2595	4495	1.311	0.304
119	2605	4495	1.304	0.322
120	2615	4495	1.321	0.327
121	2625	4495	1.342	0.322
122	2635	4495	1.377	0.303
123	2645	4495	1.405	0.281
124	2655	4495	1.428	0.270
125	2665	4495	1.447	0.260
126	2675	4495	1.455	0.260
131	2585	4505	1.331	0.287
132	2595	4505	1.324	0.298
133	2605	4505	1.322	0.310
134	2615	4505	1.334	0.306
135	2625	4505	1.366	0.292
136	2635	4505	1.405	0.275
137	2645	4505	1.431	0.257
138	2655	4505	1.447	0.240
139	2665	4505	1.455	0.240
145	2585	4515	1.348	0.280
146	2595	4515	1.339	0.285
147	2605	4515	1.341	0.291
148	2615	4515	1.357	0.286
149	2625	4515	1.397	0.270
150	2635	4515	1.442	0.248
151	2645	4515	1.447	0.233
152	2655	4515	1.455	0.230
153	2665	4515	1.455	0.235
159	2585	4525	1.374	0.273
160	2595	4525	1.356	0.272
161	2605	4525	1.356	0.272
162	2615	4525	1.384	0.264
163	2625	4525	1.423	0.254
164	2635	4525	1.447	0.235
165	2645	4525	1.455	0.220
166	2655	4525	1.455	0.220
167	2665	4525	1.455	0.220
175	2605	4535	1.382	0.258
176	2615	4535	1.412	0.250
177	2625	4535	1.441	0.240
178	2635	4535	1.452	0.230
190	2615	4545	1.441	0.241
191	2625	4545	1.447	0.235

I bacini che rientrano in questa regione omogenea sono quelli sottesi ai seguenti sbarramenti: Diga di Cogliandrino, Diga di Monte Cotugno, Diga del Pertusillo, Traversa Agri, Traversa Sarmento, Traversa Sauro.

3. Nota metodologica: bias correction degli estremi

L'approccio proposto da Padulano et al. (2019) per l'aggiornamento delle leggi di pioggia non è altro che una tecnica di bias correction basata sul Quantile Delta Mapping ("QDM", Cannon et al. 2015), la cui particolarità sta nel fatto che essa non è applicata, come da prassi, alla serie continua delle piogge giornaliere, bensì al solo sottoinsieme delle piogge giornaliere massime annuali. In aggiunta, l'approccio proposto destruttura l'equazione di base del metodo QDM per mantenere un parallelismo con il modello della pioggia indice, andando cioè a valutare separatamente i cambiamenti intercorsi, per effetto del cambiamento climatico, sulla media dei massimi annuali di pioggia e sul fattore di crescita.

I dati di input utilizzati per la presente attività sono le catene di simulazione climatica identificate per l'insieme delle attività della Convenzione (Tabella 5). Si tratta, in particolare, di 7 modelli regionali abbinati a 5 modelli globali, per un totale di 14 catene, per ciascuna delle quali le proiezioni sono disponibili per i tre scenari di concentrazione RCP 2.6, 4.5 e 8.5, su un grigliato irregolare con risoluzione orizzontale pari a circa 12 km. Per tutte le attività della Convenzione, compresa la presente, il periodo di riferimento scelto è il trentennio 1981-2010, mentre l'orizzonte temporale di interesse è il trentennio 2021-2050.

Tabella 5: Lista delle simulazioni climatiche adottate in questo studio.

Global Climate Model (Institution)	Regional Climate Model (Institution)	Realizzazione*
EC-EARTH (ICHEC, Ireland)	RCA4 (SMHI)	r12i1p1
	CLM4-8-17 (CLMcom)	r12i1p1
	RACMO22E (KNMI)	r12i1p1
	HIRHAM5 (DMI)	r3i1p1
HadGEM2-ES (UK Met Office UK)	RCA4 (SMHI)	r1i1p1
	RACMO22E (KNMI)	r1i1p1
	HIRHAM5 (DMI)	r1i1p1
MPI-ESM-LR (MPI, Germany)	RCA4 (SMHI, Sweden)	r1i1p1
	CSC-REMO2009 (MPI)	r2i1p1
	CSC-REMO2009 (MPI)	r1i1p1
M-CM5 (CNRM-CERFACS-CM5)	RACMO22E (KNMI)	r1i1p1
	ALADIN63 (CNRM)	r1i1p1
NorESM1-M (NCC)	RCA4 (SMHI)	r1i1p1
	REMO2015 (GERICS)	r1i1p1

* La realizzazione $r<N>i<N>p<N>$ viene utilizzata per distinguere simulazioni strettamente correlate che differiscono, ad esempio, per condizioni iniziali o parametrizzazioni fisiche.

Per ciascun bacino, viene definito un insieme di celle EURO-CORDEX che va a formare un box che contiene completamente l'area. Quindi, per ogni bacino, per ogni catena modellistica e per ogni scenario, viene ottenuta una serie di piogge giornaliere medie (mediate, cioè, tra i vari punti griglia compresi nel box) e viene estratto, per ogni anno di interesse, il valore massimo della pioggia giornaliera media spaziale. In definitiva, un singolo bacino viene ad essere associato a due campioni statistici, ciascuno di ampiezza pari a 30: il primo contenente i valori massimi annuali medi sul bacino nel periodo di riferimento, il secondo contenente i valori massimi annuali medi sul bacino nell'orizzonte futuro.

3.1 Il Delta Quantile Mapping

Come tutte le tecniche di bias correction, il metodo QDM (Cannon et al. 2015) misura l'effetto del cambiamento climatico come variazione tra la distribuzione di probabilità dei valori futuri e quelli presenti della variabile di interesse, in entrambi i casi ottenuti da un modello climatico. Quindi, la variazione così ottenuta (che solitamente è in forma di rapporto per la precipitazione, in forma di differenza per la temperatura) viene applicata alla distribuzione di probabilità dei valori osservati. Ciò che differenzia il QDM da altre tecniche più semplicistiche è l'assunzione che il "segnale climatico" (indicato nel seguito come "D") ovvero la "distanza" tra il presente e il futuro, valutati sulla base di un modello, possa essere non costante, bensì funzione del livello di probabilità. L'equazione alla base del modello è la seguente:

$$x_{bc} = x_o(T) \cdot \frac{\Phi_f^{-1}(T)}{\Phi_c^{-1}(T)} \quad (6)$$

dove x è la variabile di interesse (nel nostro caso il massimo annuale di pioggia giornaliera) e T è il tempo di ritorno, che, si ricorda, è l'inverso del complemento all'unità della probabilità di non superamento. I pedici " bc ", " o ", " f " e " c " indicano rispettivamente il valore bias-corretto (incognita del problema), il valore osservato, il valore futuro (restituito dal modello climatico sull'orizzonte temporale di interesse, per lo

scenario di concentrazione di interesse) e il valore corrente (restituito dal modello climatico sul periodo di riferimento scelto). L'Eq. 6 può essere letta in questo senso: trovate le distribuzioni di probabilità per i risultati del modello sul periodo corrente (Φ_c) e sul periodo futuro (Φ_f), per ciascuna osservazione x_o si va a leggere qual è il tempo di ritorno ad essa associato T in base all'insieme delle osservazioni, e per lo stesso tempo di ritorno si va a leggere quali sono i percentili corrispondenti nelle due distribuzioni fittate. Tale approccio necessita quindi di conoscere anche la distribuzione di probabilità delle osservazioni Φ_o (nel caso non sia conosciuta a priori, come nella condizione in oggetto). Ricordando la definizione di tempo di ritorno (Eq. 7), l'Eq. 6 può quindi essere riorganizzata ottenendo l'Eq. 8:

$$T(x_o) = \frac{1}{1 - \Phi_o(x_o)} \quad (7)$$

$$x_{bc} = \Phi_o^{-1}(T(x_o)) \cdot \frac{\Phi_f^{-1}(T)}{\Phi_c^{-1}(T)} \quad (8a)$$

$$x_{bc} = \Phi_f^{-1}(T(x_o)) \cdot \frac{\Phi_o^{-1}(T)}{\Phi_c^{-1}(T)} \quad (8b)$$

con lo stesso significato dei simboli. In questo modo, una volta trovate le distribuzioni di probabilità più adatte per ciascuno dei tre campioni, si può facilmente ottenere il valore futuro bias-corretto della variabile x per qualsivoglia tempo di ritorno T . L'Eq. 8 è presentata con una duplice organizzazione dei termini: nel primo caso (Eq. 8a) è messo in evidenza il ruolo del segnale climatico D, rappresentato dal rapporto tra i percentili futuri e presenti restituiti dal modello climatico per un qualsiasi tempo di ritorno; nel secondo caso (Eq. 8b) è messo in evidenza il ruolo del “bias” B, definito come discrepanza tra la realtà osservata e quella simulata dal modello e rappresentato dal rapporto tra i percentili osservati e restituiti dal modello sul tempo presente a parità di tempo di ritorno. In altre parole, nel primo caso si interpreta la bias correction come procedura in cui il modello climatico è usato per identificare il segnale climatico, che viene successivamente applicato alle osservazioni. Nel secondo caso la bias correction è vista come procedura in cui il modello climatico è usato per identificare il bias, e i valori futuri restituiti del modello vengono “corretti” moltiplicandoli per una sorta di fattore di correzione – il bias, appunto.

Il metodo QDM è evidentemente più oneroso, dal punto di vista computazionale, di altri metodi non parametrici come l'Empirical Quantile Mapping o l'ancor più semplice Linear Scaling, che considera il segnale climatico e il bias costanti, ovvero non funzione del tempo di ritorno ma stimabili come variazione tra i valori medi. L'onerosità sta in particolare nel dover effettuare fitting di modelli di probabilità per ogni catena di simulazione, per ogni scenario, per ogni periodo temporale di interesse. Tuttavia, questo approccio parametrico permette di svincolarsi dal numero di realizzazioni della variabile: in altre parole, non è necessario che i tre campioni abbiano la stessa ampiezza, purché ognuno abbia un'ampiezza tale da rendere sufficientemente robusta la stima della distribuzione.

La scelta del modello di probabilità è funzione delle caratteristiche della variabile da trattare. In caso di cumulati giornalieri o mensili di precipitazione, la distribuzione Gamma, definita per valori strettamente positivi della variabile, ha in genere le migliori performance, mentre ad esempio per la temperatura giornaliera o mensile (sia essa media, massima o minima) si adopera in genere la distribuzione Normale. Quando però la variabile da trattare è il massimo annuale di pioggia, è stato dimostrato che la distribuzione GEV è la più opportuna (Padulano et al. 2019).

3.2 Il Delta Quantile Mapping applicato ai massimi annuali di pioggia

Si supponga di sostituire nell'Eq. 8a alla variabile generica x quella oggetto di studio, ovvero $h(d,T)$: in via del tutto generica, l'approccio della pioggia indice può essere applicato, oltre alle osservazioni, anche a tutti gli altri termini dell'Eq. 8. In altre parole, ciascuno dei termini può essere visto come prodotto tra la media dei massimi annuali e un fattore di crescita, entrambi incogniti tranne che per quelli relativi alle osservazioni, che sono quelli direttamente forniti dal VAPI.

$$h_{bc} = \frac{\mu_o \cdot \mu_f}{\mu_c} \cdot \frac{k_{T,o}(T) \cdot k_{T,f}(T)}{k_{T,c}(T)} \quad (9)$$

Nell'Eq. 9, per semplicità di notazione, la media dei massimi annuali è rappresentata sinteticamente dal simbolo μ , e non è funzione del tempo di ritorno. A rigore, l'Eq. 9 è valida per qualunque durata d (dalla quale dipendono tutti i termini medi e il valore incognito bias corretto, ma non i fattori di correzione). Tuttavia, all'atto pratico, come detto, per i modelli climatici si considera come risoluzione massima quella giornaliera, e dunque l'Eq. 9 è da intendersi come applicata ai massimi annuali di altezza di pioggia giornaliera. Ricordando la duplice veste dell'Eq. 8, l'Eq. 9 può essere riscritta come segue:

$$h_{bc} = \left(\mu_f \cdot \frac{\mu_o}{\mu_c} \right) \cdot \left(k_{T,f}(T) \cdot \frac{k_{T,o}(T)}{k_{T,c}(T)} \right) \quad (10a)$$

$$h_{bc} = \mu_o \cdot k_{T,o}(T) \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_c} \right) \cdot \left(\frac{k_{T,f}(T)}{k_{T,c}(T)} \right) \quad (10b)$$

La prima struttura mette in evidenza come il valore finale bias corretto di pioggia giornaliera massima annuale può essere visto come il prodotto di due termini, di cui il primo rappresenta la media futura restituita dal modello, moltiplicata per un coefficiente correttivo rappresentativo del bias, e allo stesso modo il secondo termine rappresenta il fattore di crescita futuro moltiplicato anch'esso per un coefficiente correttivo rappresentativo del bias. La seconda struttura, invece, fa notare che il valore finale bias corretto può essere ottenuto moltiplicando il valore osservato, di prestabiliti durata e tempo di ritorno, per due fattori che rappresentano il primo il "cambiamento" atteso nella media, il secondo il "cambiamento" atteso nel fattore di crescita, entrambi ottenuti confrontando i risultati del modello tra l'orizzonte futuro e il periodo di riferimento. Ricordando che l'approccio della pioggia indice può essere utilizzato anche per h_{bc} si può scrivere inoltre:

$$h_{bc} = \mu_{bc} \cdot k_{T,bc} \quad (11a)$$

$$\mu_{bc} = \left(\mu_f \cdot \frac{\mu_o}{\mu_c} \right) = \left(\mu_o \cdot \frac{\mu_f}{\mu_c} \right) \quad (11b)$$

$$k_{T,bc} = \left(k_{T,f} \cdot \frac{k_{T,o}}{k_{T,c}} \right) = \left(k_{T,o} \cdot \frac{k_{T,f}}{k_{T,c}} \right) \quad (11c)$$

Dal punto di vista operativo, sulla base dei tre campioni statistici (osservazione, modello sul presente, modello sul futuro) le medie possono essere immediatamente calcolate, mentre i fattori di correzione vanno fittati con tre distribuzioni di probabilità (in realtà, per l'osservato sia la media che la distribuzione del fattore di crescita sono già forniti dal modello VAPI, e dunque sono già noti). Note le medie, si può immediatamente calcolare la media futura bias corretta (Eq. 11b). Quindi, al variare del tempo di ritorno, si calcolano i tre diversi percentili che consentono il calcolo del fattore di crescita futuro bias corretto mediante l'Eq. 11c. Infine, il prodotto tra i due fornisce il valore finale di altezza di pioggia giornaliera massima annuale da

attendersi in futuro. Rimane dunque da chiarire in che modo l'Eq. 11a possa fornire indicazioni su piogge di durata sub-giornaliera. L'assunzione di base è che i massimi annuali di pioggia giornaliera siano strettamente correlati a quelli riferiti a piogge di durata pari alle 24 ore:

$$\mu[h(\text{daily}, T)] = \gamma \cdot \mu[h(d = 24\text{hr}, T)] \quad (12)$$

Ad esempio, per la Campania Rossi & Villani (1994) dimostrano che γ è pari a 0.92, mentre la Tabella 3 indica che per la Puglia γ è pari a 0.89; per la Basilicata, tale informazione non è disponibile, ma per vicinanza territoriale si suppone che il rapporto possa essere posto a un valore medio tra le due regioni. Questo coefficiente è comunque sempre inferiore all'unità, poiché i massimi annuali di pioggia giornaliera (vincolati ad una specifica finestra temporale di 24 ore che parte dalle 9:00 del mattino) sono sempre inferiori a quelli relativi a 24 ore (che sono individuati usando una finestra mobile di 24 ore). Nell'ipotesi che il coefficiente γ stimato sulle osservazioni non cambi spostandosi nel futuro (cioè $\gamma_o = \gamma_{bc} = \gamma$) l'Eq. 11b può essere riscritta come:

$$\gamma \cdot \mu_{BC}^{24\text{hr}} = \gamma \cdot \mu_o^{24\text{hr}} \cdot \frac{\mu_f}{\mu_c} \Rightarrow \mu_{BC}^{24\text{hr}} = \mu_o^{24\text{hr}} \cdot \frac{\mu_f}{\mu_c} \quad (13)$$

dove l'apice "24hr" sta a segnalare la durata di riferimento della variabile. Se in più si ipotizza che la relazione empirica che lega la media alla durata ed eventualmente alla quota non cambi tra il presente e il futuro, l'Eq. 12 diventa valida per qualsiasi durata d , di cui $d = 24$ hr diventa un caso particolare:

$$\mu_{bc}(d, z) = \mu_o(d, z) \cdot \frac{\mu_f}{\mu_c} \quad (14)$$

dove μ_f e μ_c sono le medie dei massimi annuali di pioggia giornaliera. In definitiva, l'equazione finale della bias correction diventa:

$$h_{bc}(d) = \mu_o(d, z) \cdot k_{T,o}(T) \cdot \frac{\mu_f}{\mu_c} \cdot \frac{k_{T,f}(T)}{k_{T,c}(T)} \quad (15)$$

L'ultimo passaggio consente di determinare il tempo di ritorno, finora mai menzionato, del valore futuro bias-corretto, e consiste nel fissare una distribuzione di probabilità all'insieme dei valori bias-corretti di k_T derivanti dall'Eq. 11c.

Dal punto di vista operativo, l'applicazione di questa tecnica viene effettuata come segue. Come già menzionato, per ogni bacino, per ogni scenario e ogni catena modellistica si hanno due campioni statistici, derivanti dall'estrazione dei massimi annuali dalle serie di pioggia giornaliera restituite dal modello climatico sul periodo di riferimento 1981-2010 e sull'orizzonte futuro 2021-2050. Da questi due campioni si possono immediatamente calcolare le medie μ_f e μ_c ; i due campioni dei fattori di crescita $k_{T,f}$ e $k_{T,c}$ vengono ottenuti dividendo ciascun elemento del campione per la media del campione stesso, e per entrambi viene fissato un modello di distribuzione di probabilità GEV. Invece, il $k_{T,o}$ è immediatamente noto dall'Eq. 2 con i parametri della Tabella 1 per la regione di interesse, e anche $\mu_o[h(d, T)]$ può essere calcolato per qualunque durata mediante le Eq. 3, 4 o 5 a seconda della regione di interesse (con i parametri contenuti nelle Tabelle 2, 3 o 4 per l'area omogenea di interesse). Al fine di ottenere una stima robusta per la distribuzione di probabilità Φ_{bc} , si scelgono casualmente un grande numero (1000 nel presente documento) di valori di probabilità cumulata (ovvero tempi di ritorno) e per ciascuno di essi si calcola il valore osservato mediante le leggi di VAPI; la procedura di bias correction appena descritta consente quindi di pervenire a 1000 valori futuri bias-corretti, sui quali viene stimata la probabilità. Si noti che a rigore, essendo la distribuzione di partenza una

TCEV, anche quella bias-corretta dovrebbe essere una TCEV; tuttavia, per semplicità operativa (avendo la TCEV quattro parametri), è stata utilizzata una GEV (che ne ha soltanto tre). A questo punto, si impongono dei tempi di ritorno di interesse (nel nostro caso 5, 10, 20, 50 e 100 anni) e delle durate di interesse (1, 3, 6, 12 e 24 ore), e si può calcolare il valore futuro bias corretto di altezza di pioggia per quella durata applicando l'Eq. 15.

3.3 Criticità e opportunità nell'utilizzo del dataset nella Convenzione

In base alla descrizione proposta, l'approccio qui presentato appare particolarmente utile alle attività della Convenzione. A differenza infatti da quanto disponibile sulla piattaforma Copernicus C3S, la presente analisi è in grado di fornire, sebbene sotto alcune ipotesi semplificative, informazioni riguardanti il cambiamento atteso su piogge estreme di durata inferiore al giorno, sebbene mai inferiore all'ora (che è anche il limite di validità delle leggi di pioggia VAPI vigenti). Inoltre, la procedura è calibrata specificamente per i bacini oggetto di studio, svincolandosi da parametrizzazioni più generalizzate, e sulle finestre temporali di interesse. La procedura di bias correction proposta è soltanto una delle possibili tecniche esistenti, ma appare particolarmente utile per mantenere un parallelismo con il ben noto approccio VAPI, che costituisce il riferimento normativo italiano per qualsivoglia opera o intervento idrologico/idraulico. Come menzionato nella Nota metodologica, i dati utilizzati per calibrare i parametri delle leggi di pioggia VAPI sono spesso antecedenti al 1980, e dunque non sono del tutto compatibili con il trentennio di riferimento scelto. Tuttavia, non essendovi più una raccolta e pubblicazione sistematica e unificata dei dati di pioggia estrema, come era quella degli Annali Idrologici, non si può ricorrere ad alcun dato più recente (la stragrande maggioranza dei dataset spazialmente distribuiti disponibili si limitano infatti alla pioggia giornaliera).

4. Nota metodologica: analisi e restituzione dei risultati

In questa sezione viene presentato un approfondimento sull'approccio e le modalità utilizzate per analizzare i dati forniti dal dataset oggetto di studio, descritto in precedenza, nonché per restituire i risultati in un modo che sia rigoroso ma, allo stesso tempo, di immediata interpretazione e che garantisca flessibilità.

4.1 Analisi delle incertezze

Le incertezze associate alle stime effettuate in questa attività sono di diversa natura, tra cui:

- I. Incertezze legate alla tecnica di bias correction. Questo tipo di incertezza può essere quantificato solo confrontando i risultati con altri metodi, che non è l'oggetto di questa attività e costituirebbe un forte aggravio dal punto di vista computazionale.
- II. Incertezze legate all'utilizzo di un ensemble di modelli climatici (Tabella 5). Tali incertezze consistono nella variabilità dei risultati in termini di pioggia estrema allorquando si utilizzano diverse catene di simulazione climatica. Tale variabilità può essere facilmente quantificata confrontando tra loro i diversi output disponibili. L'approccio con cui tale fonte di incertezza può essere analizzata non è univoco: tuttavia, lo stato dell'arte solitamente fa riferimento ad un approccio di tipo statistico, in cui il valore più vicino alla "verità" è il valore medio, lo scostamento medio dalla "verità" è la deviazione standard. In altre parole, l'insieme delle realizzazioni di pioggia ottenute utilizzando in input al modello idrologico diverse simulazioni climatiche viene trattato come un vero e proprio campione statistico.

Per quanto riguarda la prima fonte di incertezza, come argomentato in Cannon et al. (2015) e Padulano et al. (2019), il QDM è certamente il più efficiente nel preservare il segnale climatico, soprattutto sulla coda destra della distribuzione che è quella di maggiore interesse. Ai fini di questa attività si ritiene quindi che la

procedura sia del tutto adeguata. Per quanto riguarda invece la seconda fonte, nei risultati l'analisi di tale incertezza verrà proposta in modo strutturato secondo quanto segue.

La media tra tutte le catene modellistiche, che prende il nome di “ensemble mean” (EM), rappresenta la migliore approssimazione della verità, e sarà quindi il principale risultato fornito. La “deviazione standard” (DS) associata alla media esprime la variabilità del campione: maggiore è la deviazione standard, più grande è la variabilità. Tuttavia, il valore assoluto di DS non è interpretabile se non in proporzione al valore di EM: valori di deviazione alti, associati a valori medi bassi, esprimono una maggiore aleatorietà rispetto ad analoghi valori di deviazione associati però a valori medi alti. Appare dunque utile considerare il “coefficiente di variazione” (CV), definito come rapporto tra DS e EM, che quantifica *di quante volte* la deviazione standard è maggiore della media. Quanto più è alto il valore di CV, tanto più è grande DS rispetto ad EM, tanto più è grande l'incertezza associata alla stima della “verità”. Tuttavia, una soglia di accettazione di CV può essere imposta soltanto in modo arbitrario, a seconda dello scopo delle analisi e dei dati a disposizione. Un campione statistico di soli 14 elementi (tanti quante sono le catene di simulazione climatica considerate) è abbastanza ridotto (solitamente si fa riferimento ad un'ampiezza pari a 10 come quella minima per analisi statistiche) e foriero di valutazioni non molto robuste. Tuttavia, si consideri che nella letteratura delle valutazioni riguardanti il cambiamento climatico un'ampiezza tale è assolutamente ragguardevole. In ogni caso, dato il numero di catene considerate sarebbe irrealistico pretendere un'incertezza troppo contenuta.

4.2 Analisi della pioggia estrema (variazione della severità)

Per i bacini oggetto di studio, l'output dell'analisi è costituito da valori di pioggia massima annuale associati a diverse durate della pioggia e diversi tempi di ritorno, per ogni catena modellistica e ciascuno scenario. In linea di principio, le analisi possono essere condotte con due approcci:

1. Analizzando separatamente i valori di pioggia sul periodo di riferimento e i valori di pioggia futuri, in altre parole fornendo, per ciascuno dei due periodi, un valore “vero” (EM) e l'incertezza (DS e/o CV).
2. Analizzando la variabile “variazione di altezza di pioggia” valutata come differenza (percentuale) tra i valori futuri e quelli correnti, fornendo per quest'ultima una stima del valore “vero” (EM) e l'incertezza (DS e/o CV).

Si noti che, per come è definita la procedura, che impone a monte la preservazione del segnale climatico, la correzione del bias sul periodo di riferimento restituisce risultati esattamente coincidenti con il riferimento stesso (legge VAPI): non vi è quindi alcuna variabilità al variare della catena climatica usata come input, e il riferimento è certo. Al contrario, per l'orizzonte futuro, ci si attende che la variabilità della pioggia sia più elevata, in funzione di quanto ciascuna catena di simulazione climatica è sensibile all'aumento di temperatura causato dal particolare scenario di concentrazione adottato come condizione iniziale e al contorno.

Si noti che la differenza tra i due approcci presenta anche un risvolto per quanto concerne l'interpretazione dei parametri di incertezza. Si supponga di avere un campione di valori di altezza di pioggia x_R sul periodo di riferimento (di media EM_1 , deviazione standard DS_1 e $CV_1 = DS_1/EM_1$) e un campione x_F sull'orizzonte futuro (di media EM_2 , deviazione standard DS_2 e $CV_2 = DS_2/EM_2$). Si definisca inoltre la variabile differenza $x_d = x_F - x_R$, associata a EM_3 , DS_3 e $CV_3 = DS_3/EM_3$. Nel caso migliore, in cui il valore di riferimento sia certo (tutte le simulazioni sul periodo presente danno lo stesso risultato, dunque $DS_1 = CV_1 = 0$), allora la variabilità della differenza è dovuta unicamente alla variabilità dei valori futuri, ovvero $DS_3 = DS_2$. Tuttavia, EM_3 sarà uguale a EM_2 sottratta del valore di riferimento (unico), e dunque $EM_3 \leq EM_2$. Di conseguenza, $CV_3 \geq CV_2$: in altre parole, per il solo effetto di aver effettuato un'operazione di sottrazione, il coefficiente di variazione è aumentato, poiché la deviazione standard si è trovata ad essere molto più grande della media. È inoltre da

notare che, quando EM_3 tende a zero (quando cioè la media della variazione attesa è nulla o comunque molto piccola), CV_3 tende rapidamente a infinito. Non è sorprendente quindi ottenere localmente valori di CV_3 "stranamente" elevati, ovvero di svariati ordini di grandezza superiori rispetto agli altri (altri bacini, altri scenari, altri mesi).

Dal punto di vista delle azioni di adattamento, è chiaro che il valore assoluto di pioggia estrema da attendersi in futuro è più utile della variazione, poiché esso può fungere, ad esempio, da valore di riferimento per la progettazione di interventi. L'informazione della variazione è invece sufficiente quando si voglia più che altro individuare e descrivere eventuali pericoli che possano insorgere o inasprirsi per effetto del cambiamento climatico. Nel caso in esame, non essendo coinvolti ulteriori processi (ad esempio idrologici) a valle della componente atmosferica, si ritiene che i valori futuri bias corretti possano essere visti come validi in valore assoluto. Ad ogni modo, per coerenza con tutte le attività della Convenzione, i risultati verranno presentati nella duplice veste di valori futuri bias corretti e variazioni attese in futuro rispetto al periodo di riferimento. Nel secondo caso, la variazione è valutata come differenza percentuale tra il futuro e il riferimento (per definizione del modello di bias correction, non c'è differenza tra la stima di tale variazione basata sul modello climatico oppure valutata tra il riferimento e il valore futuro bias corretto). Per la rappresentazione dei risultati, i tempi di ritorno di cui verranno direttamente restituiti i risultati sono 5, 10, 20, 50 e 100 anni, mentre le durate scelte sono quelle convenzionali di 1, 3, 6, 12 e 14 ore. Il tempo di ritorno pari a 2 anni è stato volutamente omesso poiché la documentazione VAPI suggerisce una minore affidabilità delle leggi di pioggia per tempi di ritorno bassi. È da notare che, per quanto attiene la variazione futura, per come il modello di bias correction è concepito la variazione percentuale è uguale per tutte le durate (infatti, essa è valutata per la durata pari a 24 ore e applicata arbitrariamente a tutte le altre durate).

4.3 Analisi della pioggia estrema (variazione della frequenza)

Analogamente ad altre valutazioni fatte nell'ambito della Convenzione, oltre a fornire l'informazione di quanto cambierà la pioggia estrema per uno stesso tempo di ritorno, può anche essere utile comprendere quanto cambierà la frequenza associata ad uno specifico evento. In altre parole, si può essere interessati a capire, per un'altezza di pioggia massima annuale di prefissata durata, che si verifica oggi con un certo tempo di ritorno, quale sarà il tempo di ritorno associato alla stessa pioggia in futuro. In linea di principio, valgono le stesse considerazioni fatte per la variazione in severità, con la differenza che si è interessati alla variazione percentuale $\Delta T = (T_{bc} - T_o)/T_o$, dove T_o è il tempo di ritorno di interesse (5, 10, 20, 50 e 100 anni) per il periodo di riferimento, e T_{bc} è il valore di tempo di ritorno associato alla pioggia che nel periodo di riferimento si verifica in media ogni T_o anni, ricavato tramite la bias correction (in altre parole, la frequenza futura di quell'evento). Sempre in linea di principio, tale valutazione viene fatta separatamente per ciascuna catena di simulazione climatica, e possono quindi essere valutate EM, DS e CV sia per T_{bc} sia per ΔT . Tuttavia, in questo documento l'analisi della variazione in frequenza è stata ritenuta poco utile, e anzi ostativa di una corretta interpretazione dei risultati, per via di quanto segue.

A rigore, essendo le funzioni di probabilità cumulata per definizione sempre crescenti, qualunque sia la loro specifica forma, ad un aumento della severità (cioè un aumento, nel nostro caso, dell'altezza di pioggia giornaliera massima annuale) deve corrispondere una diminuzione della probabilità di non superamento, ovvero del tempo di ritorno: tale considerazione, oltre che matematica, è anche intuitiva, poiché una pioggia meno severa si verifica più frequentemente, mentre una pioggia molto severa si verifica più raramente. È stato in effetti verificato che ciò accade sempre nella presente analisi. Quando si va però a ragionare in termini di ensemble mean, può accadere che, laddove l'altezza di pioggia mediamente (tra le varie catene climatiche) aumenta, il tempo di ritorno, in media, aumenti anch'esso, cosa non compatibile con la realtà.

Ciò accade perché, a causa della legge che lega probabilità e tempo di ritorno, ad un aumento anche piccolo della probabilità corrisponde un aumento enorme del tempo di ritorno: basti pensare che un aumento da 0.995 a 0.999 (cioè dello 0.4%) in probabilità corrisponde un aumento da 200 a 1000 anni (cioè del 400%) del tempo di ritorno. Ciò che accade operativamente è che vi siano delle singole catene di simulazione climatica che prevedono una diminuzione (modesta, dunque poco influente sull'ensemble mean) del percentile di pioggia, e un aumento enorme, dunque estremamente influente sull'ensemble mean, del tempo di ritorno. Questo risultato rende l'ensemble mean del tempo di ritorno bias-corretto, come anche della sua variazione attesa, poco informativa.

Allo scopo di fornire comunque questo tipo di risultato, che è particolarmente efficace per la comprensione degli effetti del cambiamento climatico, si è deciso di operare in modo semplificato andando a costruire, per ciascun bacino e ciascuno scenario, una nuova distribuzione di probabilità bias-corretta, risultante dalla media delle singole distribuzioni identificate per ciascuna catena di simulazione climatica, e con quella andare a ricavare il valore atteso del tempo di ritorno. Con questo ragionamento, si fornisce soltanto un risultato medio, privo dell'informazione di incertezza, ma comunque più rappresentativo dell'ensemble mean di ΔT .

5. Risultati

Nella seguente sezione sono presentati i risultati delle analisi in termini di variazione attesa dell'altezza di pioggia per una selezione di tempi di ritorno, nonché in termini di altezza di pioggia da attendersi in futuro per gli stessi tempi di ritorno e una selezione di durate; sono inoltre valutate, in modo semplificato, le variazioni attese in frequenza e i tempi di ritorno da attendersi in futuro. I valori di riferimento della pioggia (desunti dalle leggi di pioggia VAPI) sono sempre riportati per facilitare l'interpretazione dei risultati. In tutti i casi, i risultati sono rappresentati a mezzo dell'ensemble mean EM, e successivamente vengono presentate le incertezze in termini di DS e CV. Data la mole di risultati da presentare (dovuta ai diversi tempi di ritorno e durate considerati) non è possibile condensare i valori di riferimento e le variazioni attese in un'unica tabella; comunque, per facilitare la lettura dei risultati, vengono utilizzate opportune campiture (verde per i valori di riferimento, rosso/blu per le variazioni, giallo per l'incertezza).

5.1 Valori di altezza di pioggia massima annuale sul periodo di riferimento

Le Tabelle dalla 6 alla 10 mostrano i valori di altezza di pioggia massima annuale per una selezione di tempi di ritorno (5, 10, 20, 50 e 100 anni) e durate (1, 3, 6, 12 e 14 ore), fornite dalle leggi VAPI per i vari bacini e ritenute valide sul periodo di riferimento 1981-2010.

Tabella 6. Per ciascun bacino, valori di riferimento delle altezza di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per una durata della pioggia pari a 1 ora.

		d = 1 hr, riferimento 1981-2010				
invaso	\ T (anni)	5	10	20	50	100
Cogliandino		31.7	38.5	45.5	55.0	62.2
Conza		31.1	37.8	44.7	54.1	61.2
Fortore		27.1	31.8	36.8	44.1	50.2
Locone		31.1	37.8	44.7	54.1	61.2
Monte Cotugno		28.0	33.3	39.0	47.8	55.8
Pertusillo		27.0	32.2	37.7	46.2	53.9
Traversa Agri		25.7	30.7	35.9	44.0	51.4
Traversa Santa Venere		31.1	37.8	44.7	54.1	61.2
Traversa Sarmento		30.4	36.2	42.4	51.9	60.7
Traversa Sauro		25.3	30.2	35.4	43.3	50.6

Tabella 7. Per ciascun bacino, valori di riferimento delle altezze di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per una durata della pioggia pari a 3 ore.

d = 3 hr, riferimento 1981-2010					
invaso \ T (anni)	5	10	20	50	100
Cogliandino	49.2	59.8	70.7	85.4	96.7
Conza	41.2	50.1	59.3	71.6	81.1
Fortore	39.9	46.9	54.2	65.0	73.9
Locone	41.2	50.1	59.3	71.6	81.1
Monte Cotugno	43.7	52.1	61.0	74.8	87.3
Pertusillo	40.2	47.9	56.1	68.7	80.2
Traversa Agri	39.4	46.9	55.0	67.3	78.6
Traversa Santa Venere	41.2	50.1	59.3	71.6	81.1
Traversa Sarmento	47.7	56.9	66.6	81.6	95.3
Traversa Sauro	37.5	44.7	52.4	64.2	74.9

Tabella 8. Per ciascun bacino, valori di riferimento delle altezze di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per una durata della pioggia pari a 6 ore.

d = 6 hr, riferimento 1981-2010					
invaso \ T (anni)	5	10	20	50	100
Cogliandino	65.0	78.9	93.3	112.8	127.6
Conza	49.3	59.8	70.8	85.6	96.8
Fortore	50.2	58.9	68.2	81.7	93.0
Locone	49.3	59.8	70.8	85.6	96.8
Monte Cotugno	58.0	69.1	80.9	99.1	115.8
Pertusillo	51.6	61.5	72.0	88.2	103.0
Traversa Agri	51.5	61.4	71.9	88.0	102.8
Traversa Santa Venere	49.3	59.8	70.8	85.6	96.8
Traversa Sarmento	63.5	75.6	88.6	108.5	126.7
Traversa Sauro	48.1	57.3	67.1	82.2	96.1

Tabella 9. Per ciascun bacino, valori di riferimento delle altezze di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per una durata della pioggia pari a 12 ore.

d = 12 hr, riferimento 1981-2010					
invaso \ T (anni)	5	10	20	50	100
Cogliandino	86	104	123	149	169
Conza	59	71	85	102	116
Fortore	63	74	85	102	116
Locone	59	71	85	102	116
Monte Cotugno	77	92	107	131	154
Pertusillo	66	79	92	113	132
Traversa Agri	67	80	94	115	134
Traversa Santa Venere	59	71	85	102	116
Traversa Sarmento	84	101	118	144	168
Traversa Sauro	62	73	86	105	123

Tabella 10. Per ciascun bacino, valori di riferimento delle altezze di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per una durata della pioggia pari a 24 ore.

d = 24 hr, riferimento 1981-2010					
invaso \ T (anni)	5	10	20	50	100
Cogliandino	113.2	137.6	162.8	196.7	222.6
Conza	70.2	85.3	100.9	122.0	138.0
Fortore	78.4	92.0	106.4	127.5	145.1
Locone	70.2	85.3	100.9	122.0	138.0
Monte Cotugno	102.0	121.5	142.3	174.3	203.6
Pertusillo	85.1	101.4	118.8	145.5	169.9
Traversa Agri	88.1	104.9	122.9	150.6	175.8
Traversa Santa Venere	70.2	85.3	100.9	122.0	138.0
Traversa Sarmento	112.2	133.6	156.6	191.8	224.0
Traversa Sauro	79.0	94.1	110.3	135.1	157.8

Le Tabelle presentano una campitura in verde dove il riempimento completo corrisponde a un valore di altezza di pioggia pari a 150 mm, scelto in modo arbitrario in base all’insieme delle realizzazioni. Si evince che i tra bacini non vi è una grande variabilità nell’altezza di pioggia massima annuale, in linea con la considerazione che essi si trovano alquanto prossimi l’uno all’altro, e con simili caratteristiche orografiche e di distanza dal mare. I bacini più meridionali, ovvero quelli lucani, presentano in media l’altezza di pioggia maggiore rispetto a tutti gli altri (in particolare Cogliandrino, seguito da Traversa Sarmento e Monte Cotugno), sebbene di poco. I bacini pugliesi, inoltre, presentano valori identici poiché essi ricadono nella stessa zona omogenea, e, per la regione Puglia, all’interno delle leggi di pioggia non compare alcun parametro sito-specifico (come ad esempio la quota media del bacino). L’altezza di pioggia, ovviamente, aumenta all’aumentare della durata e del tempo di ritorno.

5.2 Valori di altezza di pioggia massima annuale attesi in futuro

Le Tabelle dalla 11 alla 25 mostrano i valori futuri bias-corretti da attendersi nei bacini di interesse sull’orizzonte temporale 2021-2050 per i tempi di ritorno considerati, per ciascuna durata e ciascuno scenario. In tali Tabelle sono in particolare riportati l’ensemble mean EM, ovvero la media dei singoli output della procedura di bias correction per ciascuna delle 14 catene di simulazione climatica, e il coefficiente di variazione CV. Per semplicità è omessa la deviazione standard, che è però può essere ricostruita come prodotto tra EM e CV. Per tutte le Tabelle la campitura segue lo stesso criterio adottato per i valori di riferimento, ovvero per l’ensemble mean il massimo riempimento verde corrisponde a un valore di 150 mm, mentre per il coefficiente di variazione il massimo riempimento giallo corrisponde a un valore di CV pari a 1.5 (ovvero una deviazione standard pari a 1 volta e mezza l’ensemble mean).

Ancora una volta, come per i valori di riferimento, le altezze di pioggia crescono al crescere del tempo di ritorno e della durata. Tuttavia, non vi è più uguaglianza per i valori relativi ai bacini afferenti all’Ofanto (Conza, Locone, Traversa Santa Venere) poiché, sebbene i valori di riferimento siano uguali, i valori forniti dalle catene di simulazione climatica sono invece diversi da bacino a bacino. Come per il riferimento, per i bacini lucani i valori di pioggia risultano più alti rispetto agli altri. Confrontando tra loro gli scenari di concentrazione, non si rilevano grosse differenze (una sintesi del ruolo dello scenario di concentrazione è proposta più avanti) né sull’ensemble mean, né sulle incertezze, rappresentate da CV, che però risultano essere particolarmente alte sul bacino del Fortore e su quello afferente la Traversa Sarmento sotto lo scenario RCP 4.5. Inoltre, come per l’ensemble mean, anche CV risulta aumentare sistematicamente all’aumentare del tempo di ritorno. Non vi è invece nessuna influenza della durata, ed infatti i valori di CV si ripropongono uguali per le diverse durate a parità di scenario. Ciò era atteso, in quanto il ruolo delle catene modellistiche è valutato sulla pioggia giornaliera e poi applicato a tutte le altre durate.

Tabella 11. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 2.6 e per una durata della pioggia pari a 1 ora.

d = 1 hr, RCP 2.6						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		32.9	40.4	49.1	63.6	78.0
Conza		31.8	38.7	46.4	58.7	70.1
Fortore		28.1	33.4	39.3	48.9	58.2
Locone		32.8	40.6	49.8	64.9	79.4
Monte Cotugno		30.8	38.0	46.2	59.1	71.3
Pertusillo		29.4	35.6	42.2	52.2	61.0
Traversa Agri		28.4	34.8	41.7	52.3	61.8
Traversa Santa Venere		32.5	39.9	48.1	61.1	73.2
Traversa Sarmento		32.5	39.5	46.8	57.3	66.0
Traversa Sauro		28.4	35.3	43.1	55.7	67.8
CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
Conza		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.1	0.3	0.4
Locone		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
Pertusillo		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Agri		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Traversa Sauro		0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

Tabella 12. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 4.5 e per una durata della pioggia pari a 1 ora.

d = 1 hr, RCP 4.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		33.8	41.1	49.0	60.8	71.0
Conza		32.2	38.6	45.2	54.8	62.7
Fortore		28.4	34.6	42.5	58.5	79.2
Locone		32.0	38.9	46.4	58.2	68.9
Monte Cotugno		27.8	33.5	39.7	48.8	56.7
Pertusillo		27.8	33.6	39.6	48.2	55.4
Traversa Agri		27.1	33.3	40.1	51.0	61.1
Traversa Santa Venere		32.2	39.8	48.7	63.3	77.6
Traversa Sarmento		30.5	38.4	49.1	75.3	118.6
Traversa Sauro		25.3	30.4	35.6	42.9	48.9
CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.5	0.9
Locone		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Agri		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.2	0.4	1.0	1.7
Traversa Sauro		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tabella 13. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 8.5 e per una durata della pioggia pari a 1 ora.

d = 1 hr, RCP 8.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		33.0	40.1	48.4	61.7	74.8
Conza		31.6	38.4	46.0	57.9	69.1
Fortore		28.6	34.1	39.9	48.8	56.6
Locone		32.9	40.5	49.0	62.7	75.7
Monte Cotugno		28.5	34.0	39.4	46.8	52.7
Pertusillo		27.9	33.5	39.2	47.2	53.6
Traversa Agri		26.1	31.5	37.1	45.4	52.5
Traversa Santa Venere		33.1	40.3	48.4	61.0	72.7
Traversa Sarmento		29.2	35.5	42.8	55.6	70.1
Traversa Sauro		26.8	32.4	38.2	46.8	54.0

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Locone		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Traversa Agri		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Traversa Santa Venere		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Sarmento		0.1	0.1	0.2	0.4	0.6
Traversa Sauro		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 14. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 2.6 e per una durata della pioggia pari a 3 ore.

d = 3 hr, RCP 2.6						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		51.2	62.8	76.3	98.9	121.2
Conza		42.1	51.2	61.5	77.8	92.9
Fortore		41.5	49.2	57.9	72.0	85.8
Locone		43.4	53.8	66.0	85.9	105.2
Monte Cotugno		48.2	59.5	72.2	92.5	111.4
Pertusillo		43.6	52.9	62.8	77.6	90.7
Traversa Agri		43.5	53.2	63.8	80.0	94.6
Traversa Santa Venere		43.1	52.8	63.7	81.0	97.0
Traversa Sarmento		51.0	62.0	73.4	89.9	103.7
Traversa Sauro		42.1	52.4	63.9	82.6	100.4

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
Conza		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.1	0.3	0.4
Locone		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
Pertusillo		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Agri		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Traversa Sauro		0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

Tabella 15. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 4.5 e per una durata della pioggia pari a 3 ore.

d = 3 hr, RCP 4.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		52.5	63.8	76.1	94.4	110.3
Conza		42.7	51.1	59.9	72.5	83.0
Fortore		41.9	51.0	62.7	86.2	116.8
Locone		42.4	51.5	61.5	77.1	91.3
Monte Cotugno		43.4	52.4	62.1	76.4	88.7
Pertusillo		41.3	49.9	58.9	71.7	82.3
Traversa Agri		41.4	50.9	61.4	78.0	93.5
Traversa Santa Venere		42.7	52.7	64.5	83.9	102.8
Traversa Sarmento		48.0	60.2	77.1	118.2	186.3
Traversa Sauro		37.4	45.0	52.8	63.6	72.5

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.5	0.9
Locone		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Agri		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.2	0.4	1.0	1.7
Traversa Sauro		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tabella 16. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 8.5 e per una durata della pioggia pari a 3 ore.

d = 3 hr, RCP 8.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		51.2	62.4	75.1	95.9	116.2
Conza		41.9	50.8	60.9	76.8	91.5
Fortore		42.2	50.2	58.8	71.9	83.5
Locone		43.6	53.6	65.0	83.1	100.3
Monte Cotugno		44.6	53.1	61.6	73.2	82.4
Pertusillo		41.5	49.8	58.3	70.1	79.7
Traversa Agri		40.0	48.1	56.8	69.5	80.3
Traversa Santa Venere		43.8	53.4	64.1	80.8	96.3
Traversa Sarmento		45.9	55.7	67.2	87.4	110.1
Traversa Sauro		39.8	48.0	56.6	69.3	80.0

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Locone		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Traversa Agri		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Traversa Santa Venere		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Sarmento		0.1	0.1	0.2	0.4	0.6
Traversa Sauro		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 17. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 2.6 e per una durata della pioggia pari a 6 ore.

d = 6 hr, RCP 2.6						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		67.6	82.9	100.8	130.6	160.0
Conza		50.3	61.2	73.5	92.9	110.9
Fortore		52.2	61.9	72.8	90.5	107.9
Locone		51.8	64.3	78.8	102.6	125.6
Monte Cotugno		63.9	78.8	95.8	122.6	147.7
Pertusillo		56.0	67.9	80.6	99.7	116.5
Traversa Agri		56.9	69.5	83.4	104.6	123.7
Traversa Santa Venere		51.5	63.1	76.1	96.7	115.8
Traversa Sarmento		67.9	82.4	97.7	119.6	137.8
Traversa Sauro		54.0	67.1	81.9	105.8	128.7

CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
Conza		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.1	0.3	0.4
Locone		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
Pertusillo		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Agri		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Traversa Sauro		0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

Tabella 18. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 4.5 e per una durata della pioggia pari a 6 ore.

d = 6 hr, RCP 4.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		69.3	84.2	100.4	124.6	145.6
Conza		51.0	61.0	71.6	86.6	99.2
Fortore		52.7	64.2	78.8	108.3	146.9
Locone		50.6	61.5	73.5	92.1	109.0
Monte Cotugno		57.6	69.5	82.3	101.3	117.6
Pertusillo		53.0	64.1	75.7	92.1	105.7
Traversa Agri		54.2	66.5	80.3	102.0	122.3
Traversa Santa Venere		50.9	63.0	77.0	100.1	122.7
Traversa Sarmento		63.8	80.1	102.6	157.2	247.8
Traversa Sauro		48.0	57.7	67.6	81.6	92.9

CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.5	0.9
Locone		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Agri		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.2	0.4	1.0	1.7
Traversa Sauro		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tabella 19. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 8.5 e per una durata della pioggia pari a 6 ore.

d = 6 hr, RCP 8.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		67.7	82.4	99.2	126.7	153.4
Conza		50.0	60.7	72.7	91.7	109.3
Fortore		53.1	63.2	74.0	90.4	105.0
Locone		52.1	64.0	77.6	99.2	119.8
Monte Cotugno		59.2	70.4	81.7	97.1	109.3
Pertusillo		53.3	64.0	74.9	90.1	102.4
Traversa Agri		52.3	63.0	74.3	90.9	105.1
Traversa Santa Venere		52.3	63.8	76.6	96.5	115.0
Traversa Sarmento		61.1	74.1	89.3	116.2	146.4
Traversa Sauro		51.0	61.5	72.6	88.8	102.6

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Locone		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Traversa Agri		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Traversa Santa Venere		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Sarmento		0.1	0.1	0.2	0.4	0.6
Traversa Sauro		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 20. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 2.6 e per una durata della pioggia pari a 12 ore.

d = 12 hr, RCP 2.6						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		89.23	109.44	133.06	172.39	211.23
Conza		60.11	73.08	87.75	110.97	132.49
Fortore		65.25	77.38	91.05	113.24	134.90
Locone		61.88	76.75	94.05	122.52	149.99
Monte Cotugno		84.75	104.55	126.97	162.62	195.89
Pertusillo		71.99	87.19	103.54	128.04	149.65
Traversa Agri		74.37	90.91	109.05	136.80	161.70
Traversa Santa Venere		61.48	75.30	90.88	115.52	138.34
Traversa Sarmento		90.22	109.57	129.84	158.97	183.28
Traversa Sauro		69.23	86.00	105.01	135.63	164.92

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
Conza		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.1	0.3	0.4
Locone		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
Pertusillo		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Agri		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Traversa Sauro		0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

Tabella 21. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 4.5 e per una durata della pioggia pari a 12 ore.

d = 12 hr, RCP 4.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		91.5	111.2	132.6	164.6	192.3
Conza		60.9	72.9	85.5	103.4	118.4
Fortore		65.9	80.3	98.6	135.5	183.7
Locone		60.4	73.4	87.7	110.0	130.2
Monte Cotugno		76.4	92.2	109.1	134.3	156.0
Pertusillo		68.1	82.4	97.2	118.3	135.8
Traversa Agri		70.9	87.0	105.0	133.4	159.9
Traversa Santa Venere		60.8	75.2	92.0	119.6	146.5
Traversa Sarmento		84.8	106.5	136.4	209.0	329.4
Traversa Sauro		61.5	73.9	86.7	104.5	119.1

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.5	0.9
Locone		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Agri		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.2	0.4	1.0	1.7
Traversa Sauro		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tabella 22. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 8.5 e per una durata della pioggia pari a 12 ore.

d = 12 hr, RCP 8.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		89.3	108.7	131.0	167.3	202.6
Conza		59.8	72.5	86.8	109.5	130.5
Fortore		66.4	79.0	92.6	113.0	131.3
Locone		62.2	76.5	92.6	118.5	143.0
Monte Cotugno		78.5	93.4	108.4	128.8	144.9
Pertusillo		68.5	82.2	96.2	115.7	131.5
Traversa Agri		68.4	82.3	97.1	118.9	137.4
Traversa Santa Venere		62.5	76.2	91.4	115.3	137.3
Traversa Sarmento		81.2	98.5	118.7	154.5	194.7
Traversa Sauro		65.3	78.8	93.0	113.8	131.5

CV (-)						
		CV (-)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Locone		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Traversa Agri		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Traversa Santa Venere		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Sarmento		0.1	0.1	0.2	0.4	0.6
Traversa Sauro		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 23. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 2.6 e per una durata della pioggia pari a 24 ore.

d = 24 hr, RCP 2.6						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		117.8	144.5	175.7	227.6	278.9
Conza		71.8	87.3	104.8	132.5	158.2
Fortore		81.4	96.5	113.6	141.3	168.3
Locone		73.9	91.7	112.3	146.3	179.1
Monte Cotugno		112.4	138.6	168.4	215.6	259.7
Pertusillo		92.5	112.0	133.0	164.4	192.2
Traversa Agri		97.2	118.9	142.6	178.9	211.5
Traversa Santa Venere		73.4	89.9	108.5	138.0	165.2
Traversa Sarmento		120.0	145.7	172.6	211.4	243.7
Traversa Sauro		88.7	110.2	134.6	173.8	211.4

CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.2	0.2	0.4	0.6
Conza		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.1	0.3	0.4
Locone		0.1	0.1	0.2	0.3	0.4
Monte Cotugno		0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
Pertusillo		0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Traversa Agri		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Traversa Sauro		0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

Tabella 24. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 4.5 e per una durata della pioggia pari a 24 ore.

d = 24 hr, RCP 4.5						
		EM (mm)				
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		120.8	146.9	175.1	217.3	253.9
Conza		72.7	87.1	102.1	123.5	141.4
Fortore		82.2	100.1	122.9	169.0	229.1
Locone		72.2	87.6	104.8	131.3	155.5
Monte Cotugno		101.2	122.2	144.7	178.0	206.8
Pertusillo		87.5	105.8	124.8	151.9	174.4
Traversa Agri		92.7	113.8	137.3	174.4	209.2
Traversa Santa Venere		72.6	89.8	109.8	142.8	175.0
Traversa Sarmento		112.8	141.6	181.3	277.9	438.0
Traversa Sauro		78.8	94.8	111.1	134.0	152.7

CV (-)						
invaso \ T (anni)		5	10	20	50	100
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Conza		0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.5	0.9
Locone		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Agri		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Santa Venere		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.2	0.4	1.0	1.7
Traversa Sauro		0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

Tabella 25. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [mm], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, dei valori attesi in futuro di altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno, per lo scenario RCP 8.5 e per una durata della pioggia pari a 24 ore.

d = 24 hr, RCP 8.5					
		EM (mm)			
invaso \ T (anni)		5	10	20	50
Cogliandrino		118.0	143.6	172.9	220.8
Conza		71.4	86.6	103.7	130.7
Fortore		82.8	98.5	115.5	141.0
Locone		74.3	91.3	110.6	141.5
Monte Cotugno		104.1	123.9	143.7	170.7
Pertusillo		88.0	105.6	123.6	148.6
Traversa Agri		89.4	107.6	127.0	155.4
Traversa Santa Venere		74.6	91.0	109.2	137.7
Traversa Sarmento		108.0	131.0	157.9	205.4
Traversa Sauro		83.7	101.0	119.2	145.9
CV (-)					
invaso \ T (anni)		5	10	20	50
Cogliandrino		0.1	0.1	0.1	0.1
Conza		0.1	0.1	0.2	0.3
Fortore		0.1	0.1	0.2	0.3
Locone		0.1	0.2	0.2	0.3
Monte Cotugno		0.1	0.1	0.1	0.1
Pertusillo		0.1	0.1	0.1	0.1
Traversa Agri		0.1	0.1	0.2	0.2
Traversa Santa Venere		0.1	0.2	0.2	0.3
Traversa Sarmento		0.1	0.1	0.2	0.4
Traversa Sauro		0.2	0.2	0.2	0.2

5.3 Variazione attesa in futuro dell'altezza di pioggia massima annuale

Le Tabelle dalla 26 alla 30 mostrano la variazione percentuale Δh dell'altezza di pioggia massima annuale attesa sull'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per ciascun bacino, ciascun tempo di ritorno e ciascuno scenario di concentrazione. In particolare, le Tabelle dalla 26 alla 30 mostrano l'ensemble mean EM della variazione percentuale, la deviazione DS e il coefficiente di variazione CV associati all'uso di un ensemble di catene di simulazione climatica. In tali Tabelle, per EM viene utilizzata una campitura rosso/blu in cui il blu pieno corrisponde a un incremento $\geq +20\%$, mentre il rosso pieno corrisponde a una diminuzione $\leq -20\%$. Come di consueto, CV presenta una campitura gialla con massimo riempimento per un valore di CV pari a 1.5.

Tabella 26. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per un tempo di ritorno pari a 5 anni. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

invaso \ T (anni)	T = 5 anni								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM (%)	\pm DS	CV	EM (%)	\pm DS	CV	EM (%)	\pm DS	CV
Cogliandrino	4.0	9.8	2.4	6.7	6.9	1.0	4.2	10.7	2.6
Conza	2.2	6.9	3.1	3.5	11.5	3.3	1.6	11.2	7.0
Fortore	3.9	7.1	1.8	4.9	10.9	2.2	5.7	8.9	1.6
Locone	5.2	10.9	2.1	2.8	11.5	4.2	5.8	14.2	2.5
Monte Cotugno	10.2	19.5	1.9	-0.7	10.1	14.4	2.1	12.3	5.9
Pertusillo	8.6	12.4	1.4	2.8	10.0	3.5	3.3	12.2	3.6
Traversa Agri	10.4	15.5	1.5	5.2	7.9	1.5	1.5	13.9	9.0
Traversa Santa Venere	4.5	11.5	2.5	3.4	10.5	3.1	6.3	14.2	2.3
Traversa Sarmento	6.9	17.9	2.6	0.5	12.3	24.3	-3.8	12.0	3.2
Traversa Sauro	12.3	15.5	1.3	-0.3	12.3	48.4	5.9	17.8	3.0

Tabella 27. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per un tempo di ritorno pari a 10 anni. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

invaso \ T (anni)	T = 10 anni								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV
Cogliandrino	5.0	15.9	3.1	6.8	9.1	1.3	4.4	9.3	2.1
Conza	2.3	8.8	3.9	2.0	13.7	6.8	1.5	15.0	10.3
Fortore	5.0	8.4	1.7	8.9	14.1	1.6	7.1	12.0	1.7
Locone	7.4	15.4	2.1	2.7	13.0	4.8	7.0	18.1	2.6
Monte Cotugno	14.1	24.4	1.7	0.6	12.7	20.2	2.0	12.8	6.5
Pertusillo	10.5	18.5	1.8	4.3	12.4	2.9	4.1	13.0	3.1
Traversa Agri	13.3	21.6	1.6	8.4	10.5	1.2	2.6	14.6	5.6
Traversa Santa Venere	5.4	13.7	2.5	5.3	12.2	2.3	6.6	16.1	2.4
Traversa Sarmento	9.0	22.0	2.4	6.0	18.9	3.2	-2.0	12.7	6.4
Traversa Sauro	17.1	22.8	1.3	0.6	13.2	20.6	7.2	19.3	2.7

Tabella 28. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per un tempo di ritorno pari a 20 anni. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

invaso \ T (anni)	T = 20 anni								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV
Cogliandrino	8.0	25.8	3.2	7.6	11.9	1.6	6.3	8.8	1.4
Conza	3.8	13.0	3.4	1.1	16.5	15.1	2.7	20.8	7.7
Fortore	6.8	15.3	2.3	15.6	26.9	1.7	8.5	17.4	2.0
Locone	11.3	23.3	2.1	3.8	16.5	4.4	9.6	24.6	2.6
Monte Cotugno	18.3	29.9	1.6	1.7	16.1	9.4	1.0	12.9	13.2
Pertusillo	12.0	26.2	2.2	5.1	15.0	3.0	4.0	13.5	3.4
Traversa Agri	16.0	29.5	1.8	11.7	15.8	1.3	3.4	15.8	4.7
Traversa Santa Venere	7.5	17.0	2.3	8.8	16.3	1.9	8.1	20.8	2.6
Traversa Sarmento	10.3	26.3	2.6	15.8	46.4	2.9	0.8	17.9	21.5
Traversa Sauro	22.0	34.0	1.5	0.7	14.3	20.1	8.1	20.9	2.6

Tabella 29. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per un tempo di ritorno pari a 50 anni. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

invaso \ T (anni)	T = 50 anni								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV	EM (%)	±DS	CV
Cogliandrino	15.7	46.5	3.0	10.5	16.7	1.6	12.3	16.0	1.3
Conza	8.6	22.1	2.6	1.2	21.2	17.0	7.1	32.0	4.5
Fortore	10.8	32.4	3.0	32.6	72.8	2.2	10.6	28.2	2.6
Locone	19.9	38.4	1.9	7.6	24.9	3.3	16.0	38.1	2.4
Monte Cotugno	23.7	38.7	1.6	2.1	21.5	10.0	-2.1	12.8	6.2
Pertusillo	13.0	38.9	3.0	4.4	18.6	4.2	2.1	14.2	6.6
Traversa Agri	18.8	42.5	2.3	15.9	27.7	1.7	3.2	18.4	5.7
Traversa Santa Venere	13.1	24.4	1.9	17.0	27.7	1.6	12.8	32.0	2.5
Traversa Sarmento	10.2	31.9	3.1	44.9	149.9	3.3	7.1	39.8	5.6
Traversa Sauro	28.7	54.8	1.9	-0.8	16.2	19.3	8.0	23.6	3.0

Tabella 30. Per ciascun bacino, ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per un tempo di ritorno pari a 100 anni. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

invaso \ T (anni)	$T = 100$ anni								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM (%)	\pm DS	CV	EM (%)	\pm DS	CV	EM (%)	\pm DS	CV
Cogliandrino	25.3	70.6	2.8	14.1	21.4	1.5	20.2	29.3	1.5
Conza	14.6	31.9	2.2	2.4	25.4	10.5	12.9	43.4	3.4
Fortore	16.0	52.1	3.3	58.0	149.0	2.6	12.9	39.6	3.1
Locone	29.8	54.2	1.8	12.6	34.6	2.7	23.7	53.3	2.2
Monte Cotugno	27.6	47.1	1.7	1.6	26.1	16.3	-5.6	12.7	2.3
Pertusillo	13.1	50.4	3.8	2.7	21.4	8.0	-0.6	14.6	23.6
Traversa Agri	20.3	54.2	2.7	19.0	41.0	2.2	2.2	21.2	9.7
Traversa Santa Venere	19.7	33.3	1.7	26.8	42.7	1.6	18.8	44.5	2.4
Traversa Sarmento	8.8	35.9	4.1	95.6	339.4	3.6	15.6	72.9	4.7
Traversa Sauro	34.0	75.7	2.2	-3.2	18.0	5.6	6.8	26.1	3.8

Questa tipologia di rappresentazione evidenzia più efficacemente il ruolo dello scenario di concentrazione. Infatti, si può osservare che è lo scenario RCP2.6 a fornire il maggiore incremento di pioggia massima annuale per tutti i bacini tranne poche eccezioni: Fortore, dove lo scenario più gravoso è RCP4.5 per tutti i tempi di ritorno; Traversa Sarmento, dove lo scenario più gravoso è RCP4.5 tutti i tempi di ritorno tranne il primo; Traversa Santa Venere, dove lo scenario più gravoso è RCP8.5 per $T = 5$ anni, RCP4.5 per tutti gli altri. In generale, lo scenario RCP2.6 presenta un comportamento spazialmente omogeneo, fornendo aumenti di entità simile tra tutti i bacini; più disomogenei sono gli altri scenari, con alcuni bacini soggetti a forti variazioni (soprattutto i bacini relativi a Traversa Agri, Traversa Santa Venere, Traversa Sarmento, Cogliandrino e Fortore) e altri soggetti a variazioni più blande. Addirittura, sono attesi in alcuni casi limitati variazioni negative, soprattutto per i tempi di ritorno più alti e sotto lo scenario RCP8.5 (ciò accade in particolare per Monte Cotugno e Traversa Sauro per tempi di ritorno di 50 e 100 anni, il primo sotto RCP8.5, il secondo sotto RCP4.5).

Per quanto attiene le incertezze, i valori di CV sono quasi sempre maggiori di 1.5, attingendo valori localmente molto alti in genere quando la variazione stimata è prossima allo zero (si veda ad esempio il bacino del Pertusillo sotto RCP8.5 per $T = 100$ anni). Gli unici bacini per i quali l'incertezza è ridotta sono Cogliandrino sotto RCP4.5 per $T = 5$ anni, e Traversa Agri sotto RCP4.5 per $T = 5$ e 10 anni, e Traversa Sauro sotto RCP2.6 per $T = 5$ anni. Tali valori di CV sono sempre associati a variazioni attese elevate: tuttavia non c'è sistematicità, poiché esistono valori di EM maggiori che però sono associati a CV più alti (si veda ad esempio Locone sotto RCP 8.5 per un periodo di ritorno di 100 anni).

5.4 Variazione attesa in futuro della frequenza

Le Tabelle dalla 31 alla 35 mostrano la variazione percentuale ΔT del tempo di ritorno atteso in futuro per altezze di pioggia che sono oggi associate ai periodi di ritorno di 5, 10, 20, 50 e 100 anni, ed inoltre i valori da attendersi in futuro per il tempo di ritorno. Tali valori sono ottenuti in via semplificata, come descritto nella Nota metodologica, utilizzando una distribuzione di probabilità bias-corretta fittizia, derivante dalla media delle distribuzioni ottenute per ogni catena di simulazione climatica. Non è quindi rappresentabile l'informazione dell'incertezza come definito nella Nota metodologica. Le celle in Tabella dalla 31 alla 35 presentano una campitura rosso/blu in cui il rosso pieno corrisponde a una variazione negativa $< -70\%$ e il blu pieno corrisponde a una variazione positiva $> +10\%$; tali soglie sono definite in modo arbitrario sulla base

dell'insieme delle realizzazioni. Il riferimento a cui tali variazioni devono essere applicate corrisponde, appunto, ai tempi di ritorno di riferimento riportati in testa a ciascuna tabella (5, 10, 30, 50 e 100 anni).

Tabella 31. Per ciascun bacino, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno di eventi oggi associati a un tempo di ritorno di 5 anni, per diversi scenari di concentrazione.

invaso	<i>T = 5 anni</i>					
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandrinò	-11.4	4.4	-18.7	4.1	-12.1	4.4
Conza	-6.7	4.7	-11.0	4.4	-4.8	4.8
Fortore	-12.6	4.4	-13.1	4.3	-17.9	4.1
Locone	-13.7	4.3	-8.2	4.6	-15.4	4.2
Monte Cotugno	-17.4	4.1	-5.9	4.7	-8.1	4.6
Pertusillo	-26.6	3.7	-7.7	4.6	-13.8	4.3
Traversa Agri	-29.4	3.5	-2.7	4.9	-8.8	4.6
Traversa Santa Venere	-12.8	4.4	-9.4	4.5	-17.3	4.1
Traversa Sarmento	-20.6	4.0	-7.5	4.6	6.3	5.3
Traversa Sauro	-29.8	3.5	-3.2	4.8	-17.3	4.1

Tabella 32. Per ciascun bacino, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno di eventi oggi associati a un tempo di ritorno di 10 anni, per diversi scenari di concentrazione.

invaso	<i>T = 10 anni</i>					
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandrinò	-16.1	8.4	-21.6	7.8	-14.8	8.5
Conza	-8.3	9.2	-8.0	9.2	-5.7	9.4
Fortore	-18.7	8.1	-26.4	7.4	-24.9	7.5
Locone	-21.3	7.9	-9.9	9.0	-21.2	7.9
Monte Cotugno	-27.7	7.2	-13.3	8.7	-13.5	8.6
Pertusillo	-37.0	6.3	-11.5	8.9	-21.7	7.8
Traversa Agri	-41.3	5.9	-12.1	8.8	-15.5	8.5
Traversa Santa Venere	-17.2	8.3	-16.2	8.4	-21.0	7.9
Traversa Sarmento	-31.4	6.9	-18.2	8.2	-2.3	9.8
Traversa Sauro	-42.2	5.8	-8.8	9.1	-23.7	7.6

Tabella 33. Per ciascun bacino, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno di eventi oggi associati a un tempo di ritorno di 20 anni, per diversi scenari di concentrazione.

invaso	<i>T = 20 anni</i>					
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandrinò	-24.9	15.0	-25.7	14.9	-21.6	15.7
Conza	-14.1	17.2	-5.2	19.0	-10.9	17.8
Fortore	-25.9	14.8	-40.6	11.9	-31.1	13.8
Locone	-31.4	13.7	-14.6	17.1	-29.2	14.2
Monte Cotugno	-37.2	12.6	-19.0	16.2	-17.7	16.5
Pertusillo	-45.5	10.9	-12.8	17.4	-27.7	14.5
Traversa Agri	-51.5	9.7	-21.2	15.8	-20.6	15.9
Traversa Santa Venere	-24.4	15.1	-26.2	14.8	-26.9	14.6
Traversa Sarmento	-40.0	12.0	-26.9	14.6	-12.2	17.6
Traversa Sauro	-52.6	9.5	-12.8	17.4	-27.9	14.4

Tabella 34. Per ciascun bacino, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno di eventi oggi associati a un tempo di ritorno di 50 anni, per diversi scenari di concentrazione.

invaso	$T = 50$ anni					
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandriño	-40.9	29.5	-35.1	32.4	-35.8	32.1
Conza	-28.0	36.0	-6.0	47.0	-24.3	37.9
Fortore	-35.8	32.1	-57.2	21.4	-37.9	31.1
Locone	-47.3	26.4	-26.4	36.8	-43.1	28.4
Monte Cotugno	-46.3	26.8	-21.4	39.3	-18.1	40.9
Pertusillo	-52.9	23.5	-6.8	46.6	-30.4	34.8
Traversa Agri	-61.5	19.2	-29.7	35.2	-22.2	38.9
Traversa Santa Venere	-38.0	31.0	-42.8	28.6	-38.7	30.7
Traversa Sarmento	-47.0	26.5	-33.4	33.3	-23.0	38.5
Traversa Sauro	-62.5	18.8	-12.3	43.8	-28.0	36.0

Tabella 35. Per ciascun bacino, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno di eventi oggi associati a un tempo di ritorno di 100 anni, per diversi scenari di concentrazione.

invaso	$T = 100$ anni					
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandriño	-53.7	46.3	-44.4	55.6	-48.3	51.7
Conza	-40.9	59.1	-11.0	89.0	-37.2	62.8
Fortore	-43.4	56.6	-67.7	32.3	-42.6	57.4
Locone	-59.2	40.8	-38.0	62.0	-54.4	45.6
Monte Cotugno	-50.6	49.4	-18.0	82.0	-13.2	86.8
Pertusillo	-55.8	44.2	6.9	106.9	-27.6	72.4
Traversa Agri	-66.7	33.3	-32.9	67.1	-18.3	81.7
Traversa Santa Venere	-49.8	50.2	-55.6	44.4	-49.3	50.7
Traversa Sarmento	-49.0	51.0	-34.1	65.9	-28.5	71.5
Traversa Sauro	-67.6	32.4	-5.8	94.2	-22.4	77.6

Le Tabelle dalla 31 alla 35 mostrano che lo scenario RCP2.6 è quello associato alle maggiori variazioni, e che, in generale, tutte le variazioni attese vanno nel senso di una diminuzione del tempo di ritorno, ovvero di un aumento in frequenza. In altre parole, eventi che oggi si verificano in media una volta ogni T anni, si verificheranno in futuro in media una volta ogni $T + \Delta T < T$, quindi più spesso. L'unica eccezione è costituita da Traversa Sarmento sotto RCP8.5 per 5 anni e Pertusillo sotto RCP4.5 per 100 anni, tuttavia in questo caso le variazioni attese sono, in valore assoluto, molto piccole. Non esiste necessariamente una consistenza tra i valori positivi di Δh e quelli negativi di ΔT , per via della diversa modalità con cui l'ensemble mean è stata ricavata (rigorosamente nel primo caso, in via semplificata nel secondo).

5.5 Sintesi per bacino, per tempo di ritorno e per durata

Le Tabelle dalla 36 alla 42 mostrano una sintesi dei risultati mostrati nei paragrafi precedenti, per meglio comprendere gli effetti del cambiamento climatico sul regime delle piogge estreme. In prima battuta, la Tabella 36 mostra i valori medi (mediati cioè tra le diverse durate) di altezza di pioggia massima annuale per i vari tempi di ritorno considerati, forniti dal VAPI e considerati validi per il periodo di riferimento 1981-2010. Come già evidenziato, si evince che i bacini lucani presentano valori di riferimento maggiori (quelli afferenti al bacino dell'Ofanto presentano valori coincidenti), ed inoltre per tutti i bacini i valori aumentano all'aumentare del tempo di ritorno. La Tabella 37 mostra invece, mediamente tra i vari tempi di ritorno, i valori di riferimento per le varie durate, mettendo in evidenza come i valori crescano al crescere della durata della pioggia. Infine, la Tabella 38 mostra, mediamente tra i vari bacini, i valori di riferimento per le diverse durate e i vari tempi di ritorno considerati. Naturalmente, in questo caso, come era prevedibile la pioggia

cresce al crescere della durata e del tempo di ritorno, quindi dall'angolo in alto a sinistra verso l'angolo in basso a destra della Tabella 38.

Tabella 36. Per ciascun bacino, mediamente tra le varie durate, altezza di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno.

invaso \ T(anni)	valori di riferimento				
	5	10	20	50	100
Cogliandrino	69.0	83.8	99.1	119.8	135.5
Conza	50.1	60.9	72.1	87.1	98.5
Fortore	51.7	60.7	70.2	84.1	95.7
Locone	50.1	60.9	72.1	87.1	98.5
Monte Cotugno	61.7	73.5	86.1	105.5	123.2
Pertusillo	54.0	64.4	75.4	92.4	107.9
Traversa Agri	54.4	64.8	75.9	93.0	108.6
Traversa Santa Venere	50.1	60.9	72.1	87.1	98.5
Traversa Sarmento	67.6	80.6	94.4	115.6	135.0
Traversa Sauro	50.3	60.0	70.2	86.0	100.5

Tabella 37. Per ciascun bacino, mediamente tra i vari tempi di ritorno, altezza di pioggia massima annuale, in [mm], per diverse durate della pioggia.

invaso \ d(hr)	valori di riferimento				
	1	3	6	12	24
Cogliandrino	46.6	72.4	95.5	126.1	166.6
Conza	45.8	60.7	72.4	86.5	103.3
Fortore	38.0	56.0	70.4	88.1	109.8
Locone	45.8	60.7	72.4	86.5	103.3
Monte Cotugno	40.8	63.8	84.6	112.2	148.7
Pertusillo	39.4	58.6	75.3	96.6	124.1
Traversa Agri	37.5	57.4	75.1	98.2	128.5
Traversa Santa Venere	45.8	60.7	72.4	86.5	103.3
Traversa Sarmento	44.3	69.6	92.6	123.1	163.6
Traversa Sauro	36.9	54.8	70.2	89.9	115.3

Tabella 38. Per ciascuna durata della pioggia, mediamente tra i vari bacini, altezza di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno.

d (hr) \ T(anni)	valori di riferimento				
	5	10	20	50	100
1	28.9	34.6	40.7	49.5	56.8
3	42.1	50.5	59.4	72.2	83.0
6	53.6	64.2	75.4	91.7	105.5
12	68.2	81.7	96.0	116.7	134.3
24	86.9	104.1	122.3	148.7	171.3

Le Tabelle 39 e 40 offrono una panoramica del ruolo dello scenario di concentrazione, sintetizzando i risultati per bacino mediamente tra i diversi tempi di ritorno (Tabella 39) e per tempo di ritorno mediamente tra i diversi bacini (Tabella 40). Si osserva che, mediamente tra i bacini e tra i tempi di ritorno, lo scenario RCP 2.6 è quello più gravoso, ovvero quello che comporta il maggiore aumento del massimo annuale di pioggia, con un valore medio pari a +13% (ricavato mediando i valori presenti in Tabella 34 o in Tabella 35 per quello scenario); segue lo scenario RCP 4.5 (+10.2%), a brevissima distanza, e infine lo scenario RCP 8.5 (+6.2%). Per quanto attiene le incertezze, esse sono in media (ottenibili cioè mediando i valori in Tabella 34 o Tabella 35) molto alte: quelle maggiori si ritrovano per lo scenario RCP 4.5 (7.0), quindi per lo scenario RCP 8.5 (4.9) e infine RCP 2.6 (2.3). È molto interessante notare che l'incertezza minore è associata alla variazione attesa maggiore.

Tabella 39. Per ciascun bacino, mediamente tra i vari tempi di ritorno, ensemble mean EM, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro dell'altezza di pioggia massima annuale. Tali valori possono essere considerati validi per tutte le durate della pioggia.

invaso \ T (anni)	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
Cogliandrinò	11.6	2.9	9.1	1.4	9.5	1.8
Conza	6.3	3.0	2.1	10.5	5.2	6.6
Fortore	8.5	2.4	24.0	2.1	9.0	2.2
Locone	14.7	2.0	5.9	3.9	12.4	2.4
Monte Cotugno	18.8	1.7	1.1	14.1	-0.5	6.8
Pertusillo	11.4	2.4	3.9	4.3	2.6	8.1
Traversa Agri	15.8	2.0	12.0	1.6	2.6	6.9
Traversa Santa Venere	10.0	2.2	12.3	2.1	10.5	2.4
Traversa Sarmento	9.0	3.0	32.6	7.5	3.6	8.3
Traversa Sauro	22.8	1.7	-0.6	22.8	7.2	3.0

Tabella 40. Per ciascun tempo di ritorno, mediamente tra i bacini, ensemble mean EM, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro dell'altezza di pioggia massima annuale. Tali valori possono essere considerati validi per tutte le durate della pioggia.

T (anni)	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
5	6.8	2.1	2.9	10.6	3.3	4.1
10	8.9	2.2	4.6	6.5	4.1	4.3
20	11.6	2.3	7.2	6.1	5.3	6.2
50	16.3	2.4	13.6	6.4	7.7	4.0
100	20.9	2.6	22.9	5.5	10.7	5.7

Il bacino per il quale si hanno in media le maggiori variazioni attese è Traversa Sarmento (+32.6% sotto RCP 4.5), seguito da Fortore (+24% sotto RCP 4.5) e da Traversa Sauro (+22.8% sotto RCP 2.6). Le maggiori variazioni di altezza di pioggia massima annuale si attendono, mediamente sul territorio, per un tempo di ritorno di 100 anni (+22.9% sotto RCP4.5, +20.9% sotto RCP 2.6, +10.7% sotto RCP8.5); in tutti i casi le variazioni attese crescono al crescere del periodo di ritorno. Tutti i risultati, in termini di variazione percentuale, possono essere considerati validi, secondo l'approccio proposto, per qualsiasi durata della pioggia.

Infine, le Tabelle 41 e 42 mostrano una sintesi dei risultati relativi alle frequenze attese per bacino e per tempo di ritorno. Dal punto di vista della distribuzione spaziale, le maggiori variazioni si hanno per il bacino afferente la Traversa Sauro (-50.9% sotto RCP2.6) seguito da Traversa Agri (-50.1% sotto RCP2.6) e infine da Pertusillo (-43.6% sotto RCP2.6). La Tabella 41 conferma che le variazioni sono maggiori per lo scenario RCP2.6 (-53.7% per 100 anni), seguito da RCP8.5 (-34.2% per 100 anni) e infine da RCP4.5 (-30% per 100 anni). In sostanza, le valutazioni sui tempi di ritorno confermano le principali risultanze dell'analisi sulle altezze di pioggia, in particolare riguardo allo scenario che fornisce l'inasprimento maggiore del regime delle piogge estreme.

Tabella 41. Per ciascun bacino, mediamente tra i tempi di ritorno di riferimento, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], del tempo di ritorno per diversi scenari di concentrazione. Tali variazioni sono da applicarsi a un tempo di ritorno (media dei tempi di ritorno considerati) pari a 37 anni.

invaso	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
Cogliandrino	-29.4	20.7	-29.1	23.0	-26.5	22.5
Conza	-19.6	25.2	-8.2	33.7	-16.6	26.5
Fortore	-27.3	23.2	-41.0	15.5	-30.9	22.8
Locone	-34.6	18.6	-19.4	25.9	-32.7	20.1
Monte Cotugno	-35.9	20.0	-15.5	30.2	-14.1	31.5
Pertusillo	-43.6	17.7	-6.4	36.9	-24.2	26.8
Traversa Agri	-50.1	14.3	-19.7	26.3	-17.1	29.9
Traversa Santa Venere	-28.4	21.8	-30.0	20.1	-30.6	21.6
Traversa Sarmento	-37.6	20.1	-24.0	25.3	-12.0	28.5
Traversa Sauro	-50.9	14.0	-8.6	33.9	-23.9	28.0

Tabella 42. Per eventi oggi associati a ciascun tempo di ritorno di riferimento, mediamente tra i bacini, variazione media, in [%] e valore futuro bias-corretto, in [anni], per diversi scenari di concentrazione.

T riferimento (anni)	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	EM (%)	T	EM (%)	T	EM (%)	T
5	-18.1	4.1	-8.7	4.6	-10.9	4.5
10	-26.1	7.4	-14.6	8.5	-16.4	8.4
20	-34.8	13.0	-20.5	15.9	-22.6	15.5
50	-46.0	27.0	-27.1	36.4	-30.2	34.9
100	-53.7	46.3	-30.0	70.0	-34.2	65.8

6. Discussione

I risultati delle analisi presentate dipingono un quadro in cui bisogna attendersi, in futuro, un aumento della magnitudo degli eventi estremi di pioggia abbastanza generalizzato (sia sul territorio, sia tra i diversi tempi di ritorno) per qualunque durata dell'evento, purché sovra-oraria (le leggi di pioggia VAPI sono infatti valide solo per durate maggiori di o uguali a 1 ora). In particolare, l'aumento maggiore di percentili è atteso sotto lo scenario RCP 2.6: tale osservazione rafforza la necessità di ricorrere a strategie e azioni di adattamento, per gestire quegli impatti negativi che, anche sotto lo scenario più ottimistico dal punto di vista del riscaldamento globale, non possono essere evitati. Naturalmente, questo importante risultato è limitato all'orizzonte temporale a breve termine 2021-2050, mentre nulla dicono le analisi rispetto al ruolo dello scenario di concentrazione in un futuro più lontano.

L'intero approccio si basa su alcune assunzioni fondamentali. In primo luogo, la tecnica del Quantile Delta Mapping (Cannon et al., 2015) è soltanto una delle possibili metodologie di bias correction, sebbene particolarmente apprezzata poiché in grado di cogliere le differenze, in termini di segnale climatico, tra la parte centrale e le code della distribuzione dei massimi annuali. L'applicazione diretta di tale tecnica agli estremi, e non ai valori grezzi giornalieri del modello, è inoltre non una consuetudine nella letteratura: essa non presenta particolari criticità quando il modello climatico proietta un inasprimento generalizzato (cioè per qualunque livello di probabilità) del regime delle piogge estreme, mentre potrebbe presentare dei limiti quando la proiezione indica un aumento della severità per alcuni tempi di ritorno, una diminuzione per altri. In questo caso infatti il campione finale bias-corretto potrebbe non essere sufficientemente rappresentativo della popolazione statistica. Infine, l'applicazione del bias e del segnale climatico, stimati entrambi su valori giornalieri, direttamente a piogge di durata pari a 24 ore e, per estensione, a piogge di qualsiasi durata, è arbitraria, sebbene non vi siano strumenti, nello stato dell'arte del cambiamento climatico, in grado di smentire efficacemente tale ipotesi.

Il metodo proposto di correzione degli estremi è parametrico, ovvero necessita di un *fitting* di modelli di distribuzione della probabilità cumulata per ciascuna delle catene di simulazione climatica, ciascuno degli scenari, ciascuno dei bacini e ciascuno dei periodi temporali di interesse, con un notevole effort computazionale. Tuttavia, l'effort è bilanciato dai vantaggi che tale approccio offre, poiché esso permette di estrarre valori per qualunque tempo di ritorno, e di considerare periodi temporali di qualsiasi lunghezza. Basandosi sull'utilizzo di modelli di probabilità, l'affidabilità dei risultati è certamente funzione della *goodness of fit* dei modelli scelti. Nel caso in esame, il modello utilizzato è la distribuzione GEV (Generalized Extreme Value), che è lo strumento usuale per interpretare la distribuzione degli estremi, siano essi massimi o minimi, anche se a rigore il campione finale bias-corretto dovrebbe avere la stessa distribuzione di probabilità delle osservazioni, cioè un modello TCEV. Si è preferito però ricorrere alla GEV anche in questo caso, dato il numero inferiore di parametri da dover calibrare. Anche se in questo documento i risultati del *fitting* non sono mostrati, il modello GEV è risultato adeguato per tutti i campioni analizzati, e dunque non si riscontrano criticità verosimilmente associate a questo processo. Infine, allo scopo di presentare i risultati nel modo più robusto possibile, sono stati tralasciati sia i tempi di ritorno più bassi (2 anni), per i quali sono segnalati dei limiti nella bontà del modello TCEV prodotto dal VAPI, sia i tempi di ritorno più alti (300 anni), per i quali si potrebbero evidenziare delle criticità dovute al fitting prodotto in questo lavoro.

I risultati dell'analisi sono presentati sia in termini di valori assoluti da attendersi in futuro, sia in termini di variazione attesa rispetto al periodo di riferimento, sia in termini di altezza di pioggia (approccio rigoroso), sia in termini di frequenza (approccio semplificato, privo dell'informazione di incertezza). Come spesso accade nello studio degli effetti del cambiamento climatico, le incertezze associate alla stima del valore futuro sono ridotte, mentre quelle associate alla stima della variazione percentuale sono rilevanti. Poiché i valori di riferimento, forniti dalle leggi VAPI, sono in questo documento considerate come un riferimento certo⁶, privo cioè di variabilità, l'unica variabilità è invece quella associata alla stima del valore futuro. Di conseguenza, come già evidenziato nella Nota Metodologica, l'aumento dell'incertezza quando si passa dal valore assoluto alla variazione attesa è unicamente dovuto al confronto tra la deviazione standard, che rimane uguale, e l'ensemble mean, che invece diminuisce fortemente poiché rappresentativa di una differenza. Rimane comunque interessante notare che le incertezze più ridotte sono sempre associate a variazioni rilevanti: in altre parole, laddove l'ensemble di modelli proietta un incremento notevole del massimo annuale (e quindi del pericolo), tale stima è anche da considerarsi robusta, o comunque più robusta di quella associata a incrementi più ridotti.

L'analisi del regime delle piogge estreme risulta di interesse per gli scopi della Convenzione non tanto di per sé, ma poiché gli eventi estremi di pioggia possono essere, a loro volta, *trigger* di processi ambientali che possono comportare pericoli di varia natura per l'approvvigionamento di risorsa idrica. In particolare, un aumento della severità degli estremi di pioggia potrebbe comportare, in via semplificata, un aumento nella severità degli eventi estremi di piena, con importanti conseguenze sulla qualità dell'acqua invasata, potendo inasprire fenomeni di intorbidimento specialmente se in abbinamento a bassi livelli di partenza per l'invaso. Similmente, un aumento della severità degli estremi di pioggia potrebbe comportare un maggiore numero di eventi sufficientemente intensi da classificarsi come "erosivi", andando ad inasprire i pericoli legati all'erosione dei suoli e al possibile interramento degli invasi allorquando il materiale eroso possa defluire fino

⁶ In realtà anche le leggi di pioggia elaborate dal VAPI presentano un'incertezza, rappresentata da una fascia di variazione centrata sulla legge di pioggia stessa. Tuttavia tale informazione non è presente all'interno dei report di sintesi, e raramente viene considerata nelle analisi.

all'invaso e lì sedimentare. In linea generale, la lettura delle variazioni attese deve essere abbinata alla lettura del valore di riferimento, per comprendere fino a che punto tali variazioni possano essere effettivamente critiche. In questo caso, stante l'osservazione che la variabilità spaziale dei risultati è modesta (non vi sono cioè enormi differenze da bacino a bacino), è presumibile che i bacini più impattati, in termini di pericolosità, siano quelli più estesi: a parità di aumento del percentile di pioggia, infatti, i deflussi generati dagli eventi futuri saranno certamente maggiori, e quindi più pericolosi in termini, ad esempio, di materiale solido trasportato, di quelli meno estesi.

7. Conclusioni e messaggi chiave

L'altezza di pioggia massima annuale, per diverse durate e diversi tempi di ritorno, valutata sui bacini aventi come sezioni di chiusura gli invasi oggetto di interesse, è considerata in questa attività come rappresentativa ("proxy") dei pericoli connessi da un lato al peggioramento in qualità dell'acqua invasata (come conseguenza dell'incremento di torbidità in occasione di piene estreme), dall'altro all'aumento di portata solida in ingresso agli invasi (che può avere ripercussioni sia in termini di qualità dell'acqua sia di diminuzione della capacità di accumulo degli invasi). In ogni caso, **una variazione positiva (aumento) dell'altezza di pioggia massima annuale rappresenta un aumento del pericolo per effetto del cambiamento climatico**, ed è quindi ciò da cui ci si vuole cautelare; una variazione negativa (diminuzione) rappresenta invece una diminuzione del pericolo. L'opposto può dirsi per il tempo di ritorno, la cui diminuzione comporta un aumento del pericolo; poiché però i risultati, in termini di variazione delle frequenze, confermano in linea generale le risultanze dell'analisi delle altezze di pioggia, e in più sono ottenute da una valutazione semplificata, non se ne fa menzione in questo paragrafo conclusivo. È da notare che il regime delle piogge estreme è un proxy puramente climatico, e quindi fortemente qualitativo, dei due summenzionati pericoli: nel primo caso, esso è considerato in quanto influisce direttamente sul processo di erosione, nel secondo esso è considerato in quanto influisce sulla generazione dei deflussi. Poiché le analisi dimostrano che sia i valori di partenza della pioggia sia le variazioni da attendersi in futuro sono alquanto omogenei nello spazio, è possibile che le variazioni siano più preoccupanti non tanto laddove i valori di riferimento della pioggia sono i più alti, ma soprattutto laddove i bacini sono più estesi, poiché, a parità di pioggia di riferimento e di variazione attesa, sia la produzione di sedimenti sia il volume dei deflussi saranno maggiori.

Dalle analisi effettuate risulta che la variazione attesa sia nella pioggia estrema sia nella sua frequenza aumenta all'aumentare del tempo di ritorno; l'approccio utilizzato si basa sull'ipotesi che tutte le variazioni individuate siano applicabili a piogge estreme di qualsiasi durata.

In media sull'intero territorio analizzato, e in media su tutti i tempi di ritorno considerati, tutti gli scenari RCP forniscono un aumento atteso dell'altezza di pioggia massima annuale. **Non esistono cioè scenari che comportino una diminuzione dei pericoli, sebbene tale informazione sia associata ad un livello di incertezza non trascurabile. Lo scenario che, in media, comporta il maggiore aumento del pericolo è RCP 2.6:** ciò suggerisce più che mai il ricorso a strategie e azioni di adattamento, per gestire quegli impatti negativi che, anche sotto lo scenario più ottimistico, non possono essere evitati. Lo scenario meno gravoso è invece RCP 8.5, a testimonianza del fatto che non sempre uno scenario di concentrazione critico in termini di riscaldamento lo sia anche in termini di precipitazione.

In media sull'intero territorio analizzato, è da attendersi un notevole aumento dei percentili di pioggia (ovvero, un aumento del pericolo) soprattutto sotto RCP 2.6 (variazione media attesa del +6.8% per $T = 5$ anni, di +20.9% per $T = 100$ anni), seguito da RCP 4.5 (+2.9% e +22.9% rispettivamente) e infine da RCP 8.5

(+3.3% e +10.7% rispettivamente). Tali valori, medi spaziali, presentano comunque una bassa variabilità territoriale e perciò possono essere ritenuti rappresentativi di tutti i bacini soprattutto sotto RCP 2.6.

Tra i bacini più estesi, le maggiori variazioni attese si verificano: per il bacino del Fortore soprattutto sotto RCP 4.5 (+8.9% per T = 5 anni, +58.0% per T = 100 anni; importanti aumenti si hanno anche per gli altri scenari); **per il bacino di Monte Cotugno soprattutto sotto RCP 2.6** (+14.1% per T = 5 anni, +27.6% per T = 100 anni; le variazioni attese per gli altri scenari sono irrisorie e addirittura negative per alti tempi di ritorno); **per il bacino del Pertusillo soprattutto sotto RCP 2.6** (+10.8% per T = 5 anni, +13.1% per T = 100 anni; le variazioni attese per gli altri scenari sono irrisorie); **per il bacino di Traversa Santa Venere soprattutto sotto RCP 4.5** (+5.3% per T = 5 anni, +26.8% per T = 100 anni; importanti aumenti si hanno anche per gli altri scenari).

Tutte le valutazioni appena riportate sono associate ad incertezze, in termini di coefficiente di variazione, molto alte. Il motivo delle incertezze elevate va ricercato, tra i vari aspetti, nell'utilizzo di un ensemble non esaustivo di proiezioni e nella decisione di rappresentare i risultati come variazioni. Le motivazioni, le assunzioni e le limitazioni associate ai risultati qui presentati sono ampiamente descritte nella Nota metodologica e nella Discussione. Mediamente tra i tempi di ritorno, **appaiono più robuste (meno incerte) le stime effettuate sotto lo scenario RCP 2.6, che sono anche le maggiori cioè quelle che determinano il maggiore incremento del pericolo.**

Bibliografia

- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Copertino, V. A., & M. Fiorentino (a cura di) (1994). Valutazione delle Piene in Puglia, CNR-GNDCI, Pubbl. n. 1437, La Modernissima, Lamezia Terme (CZ).
- Dell'Aera, M. (1991). Analisi della variabilità spaziale degli L-moments. Un'applicazione alla Calabria, Rapp. Int. n. 335, IRPI-CNR, Cosenza.
- Gabriele, S. & G., Iiritano (1994). Alcuni aspetti teorici ed applicativi nella regionalizzazione delle piogge con il modello TCEV, in F. Rossi (a cura di), Previsione e Prevenzione degli Eventi Idrologici Estremi e Loro Controllo, Rapporto 1992/93, L1, GNDCI-CNR, Roma.
- Padulano, R., Reder, A., & Rianna, G. (2019). An ensemble approach for the analysis of extreme rainfall under climate change in Naples (Italy). *Hydrological Processes*, 33(14), 2020-2036.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13449>
- Rossi, F., & P. Villani (a cura di) (1995). Valutazione delle Piene in Campania, CNR-GNDCI, Pubbl. n. 1472, Grafica Metelliana & C., Cava de' Tirreni (SA).