

Valutazione dei Rischi Climatici e della Vulnerabilità del Sistema AQP

Convenzione Operativa n° 2
Report finale dell'attività CG01.49.2.13

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



Autori

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

Giuliana Barbato
Paola Mercogliano
Roberta Padulano
Matteo Pesce
Mario Raffa

Acquedotto Pugliese S.p.A.

Vincenzo Patruno
Antonio Brescia
Gianluigi Fiori
Davide Ritossa
Luciano Venditti
Gerardo Ventafridda
Girolamo Vitucci

Sommario

Premessa	4
1. Nota metodologica: modello idrologico.....	4
1.1 Il modello E-HYPE	5
1.2 Input e output del modello E-HYPE	5
1.3 Inquadramento territorio	7
1.4 Criticità e opportunità relative all'utilizzo del dataset nella Convenzione.....	8
2. Nota metodologica: analisi e restituzione dei risultati.....	9
2.1 Analisi delle incertezze	9
2.2 Analisi delle portate giornaliere massime annuali	11
2.2.1 Distribuzione di Gumbel	12
2.2.2 Distribuzione GEV	13
2.3 Rappresentazione dei risultati.....	14
3. Risultati	15
3.1 Variazione attesa delle portate estreme	15
3.2 Variazione attesa delle frequenze.....	18
3.3 Sintesi dei risultati per bacino e per tempo di ritorno	21
4. Discussione	23
5. Conclusioni e messaggi chiave.....	25
Appendice I: Analisi degli estremi	27
Appendice II: Dettaglio delle realizzazioni.....	39
Appendice III: Analisi grafica delle variazioni attese	47
Bibliografia.....	52

Premessa

Il presente Report è riferito all'attività CG01.49.2.13 – Percentili di portata giornaliera massima annuale per prefissati tempi di ritorno o livelli di probabilità risultanti dall'applicazione di modelli di trasformazione afflussi-deflussi a scala paneuropea (SMHI) (target “Invasi superficiali – qualità”). L'attività consiste nell'analisi dei valori di portata giornaliera massima annuale per i bacini individuati da Acquedotto Pugliese S.p.A. (AQP) in corrispondenza di sbarramenti (dighe e traverse) per uso idropotabile, nel periodo di riferimento (1981-2010) e in un periodo futuro (2021-2050), con lo scopo di determinare la variazione attesa dei percentili di portata giornaliera massima annuale per fissati periodi di ritorno (2, 5, 10, 50, 100 anni). La stima di tali anomalie permetterà di inferire sulla maggiore o minore frequenza e/o intensità dei fenomeni estremi di piena da attendersi in futuro sui bacini di interesse. L'attività è inquadrata nel target “Invasi superficiali – qualità” perché l'inasprimento dei fenomeni di piena potrebbe avere conseguenze negative sulla qualità delle acque invasate, per effetto del trasporto di materiale solido durante tali eventi, che potrebbe comportare un'eccessiva torbidità dell'acqua (soprattutto se in abbinamento a livelli di invaso particolarmente bassi), difficilmente gestibile in fase di potabilizzazione. Più marginalmente, l'aumento di frequenza e severità degli eventi estremi, combinato a caratteristiche geo-bio-fisico-chimiche dei suoli componenti i bacini di interesse, potrebbe avere degli effetti anche sui processi di interramento degli invasi e dunque una possibile riduzione della capacità di accumulo. I percentili di portata estrema sono quindi da ritenersi utili indicatori (*proxy*) per effettuare valutazioni preliminari, e qualitative, circa i potenziali effetti del cambiamento climatico su tali pericoli.

Si rimanda alla definizione di portata con periodo di ritorno T come il valore di portata che è egualato o superato mediamente una volta ogni T anni. Per l'analisi è stato utilizzato l'indicatore di impatto “River discharge” fornito dall'Istituto Meteorologico e Idrologico Svedese (SMHI). Questo indicatore è consultabile e scaricabile, come dato grezzo, dall'applicazione SMHI¹ oppure come parte del dataset “Hydrology-related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections” distribuito dalla piattaforma Copernicus Climate Change Service (C3S)². In entrambi i casi, gli indicatori presenti all'interno del dataset sono calcolati utilizzando forzanti da modelli climatici regionali EURO-CORDEX accoppiati a modelli di impatto idrologico (tra cui E-HYPEcatch, E-HYPEgrid e VIC-WUR). Essi sono generalmente calcolati come medie annuali o stagionali sul periodo di riferimento e come variazioni su tre periodi futuri, per tre Representative Concentration Pathways (RCPs) ossia RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, nonché per tre scenari di aumento della temperatura media globale rispetto alle condizioni preindustriali, ossia 1.5, 2.0, 3.0 °C. Gli indicatori sono molteplici e descrivono diverse quantità, tra cui runoff, portata fluviale, umidità del suolo, aridità e qualità dell'acqua (temperatura dell'acqua, azoto e fosforo). Durante l'ultima parte dell'anno 2022, i contenuti della piattaforma SMHI sono stati progressivamente travasati all'interno della piattaforma C3S. Di conseguenza, si è deciso di considerare il dataset C3S come quello più aggiornato e definitivo.

1. Nota metodologica: modello idrologico

Questa sezione contiene le informazioni più rilevanti per comprendere la genesi dei dati di portata prodotti da SMHI, messi a disposizione da C3S e utilizzati in questa attività. In particolare, viene sommariamente

¹ <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/climate-change-data/europe-climate-change/>

² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=doc>

descritto il modello idrologico di riferimento E-HYPE, con particolare enfasi sulle tipologie di dati di input richiesti e sulle caratteristiche degli output.

1.1 Il modello E-HYPE

Il modello E-HYPE (Donnelly et al. 2016) si basa sul modello idrologico continuo HYPE (HYdrological Predictions for the Environment; Lindstrom et al. 2010), che simula le componenti del ciclo idrologico e di qualità dell’acqua. Il modello consente di simulare i principali processi idrologici superficiali e sub-superficiali (es. accumulo e scioglimento nevoso, evapotraspirazione, flusso superficiale e poroso, umidità del suolo, generazione di runoff, fluttuazione di falda, routing attraverso fiumi e laghi), gestione del suolo (irrigazione, astrazione d’acqua), e turnover dei nutrienti (rilascio di fonti diffusi e puntuali, pozzi sotterranei di materiale solido e disciolto, assorbimento delle piante, trasporto fluviale) che sono controllati da parametri legati alla fisiografia, per tener conto della variabilità spaziale, e stimati attraverso calibrazione. Il modello è semi-distribuito, nel senso che, di tutti i parametri di controllo, alcuni vengono fissati per l’intero dominio, mentre altri possono variare da un sottobacino all’altro e all’interno di ciascun sottobacino. L’omogeneità di alcuni parametri, in particolare quelli legati al tipo di suolo e classi di uso del suolo, consente di identificare le *hydrological response units* (HRUs), entità spaziali alla base della modellazione.

Il dataset derivato da E-HYPE può essere definito un “ensemble multi-modello”, poiché i dati forniti rappresentano, in realtà, una media tra i risultati di diverse simulazioni, ottenuti considerando diversi set di parametri, ritenuti le migliori scelte possibili. La procedura per la calibrazione dei parametri, e dunque per la scelta dei migliori set di parametri con cui effettuare le simulazioni, è articolata e complessa ed è basata su una serie di strumenti tra cui: il toolbox di analisi di sensitività e incertezza SAFE (Pianosi et al. 2015); l’approccio di identificazione dei parametri GLUE (Beven & Binley 1992); la ben nota metrica di performance Nash-Sutcliffe Efficiency.

Per le simulazioni alla base del dataset qui analizzato, il modello è stato settato per il dominio pan-Europeo, coprendo un’area di 8.8 milioni di km² suddivisa in 35'408 sottobacini con una dimensione media di 248 km². I dati qui utilizzati sono i risultati del modello E-HYPEcatch, una declinazione del modello E-HYPE che fornisce risultati, in termini di portate fluviali, alla scala di bacino. I bacini considerati sono delineati da poligoni irregolari liberamente consultabili³, la cui identificazione è necessaria in questa sede per assicurare la consistenza fisica tra il dominio di interesse e il dominio per cui è fornito un risultato.

1.2 Input e output del modello E-HYPE

L’applicazione del modello E-HYPE oggetto di studio vede in input serie temporali e spazialmente distribuite di precipitazione e temperatura media dell’aria. Nelle analisi in oggetto, le forzanti climatiche utilizzate come input di E-HYPE sono costituite da un ensemble di modelli climatici regionali, facenti parte dell’iniziativa EURO-CORDEX (Jacob et al. 2020) e bias-corrette utilizzando il dataset EFAS-Meteo (Ntegeka et al. 2013). In particolare, per ciascuna delle catene di simulazione climatica disponibili (costitute da un accoppiamento tra modello di circolazione globale, GCM e modello climatico regionale, RCM) e per ogni scenario, viene effettuata una simulazione (intendendo, con questo termine, l’ensemble multi-modello come spiegato nella precedente sezione) e vengono forniti i risultati in termini di portate. È demandata quindi all’utente finale la possibilità di valutare la media (ensemble mean) e l’incertezza (deviazione standard) dei risultati derivanti

³ <https://doi.org/10.5281/zenodo.581451>

dall'utilizzo delle varie catene di simulazione climatica disponibili. La Tabella 1 mostra le catene di simulazione climatica con cui il dataset in oggetto è stato ottenuto. Come si evince, vengono utilizzati 3 GCM e 4 RCM, per un totale di 8 catene modellistiche per ciascuna delle quali è fornito un risultato a scala di bacino in termini di portata. La scelta effettuata da SMHI delle specifiche catene modellistiche mostrate in Tabella 1 è semplice: si trattava infatti delle sole catene modellistiche esistenti nel programma EURO-CORDEX che, al 2019, soddisfassero il criterio di avere una simulazione per ciascuno dei tre scenari (infatti, per un notevole numero di catene modellistiche lo scenario RCP 2.6 non era, e non è, disponibile).

Per la bias correction, SMHI ha utilizzato il dataset EFAS (*European Flood Awareness System*) – Meteo distribuito dal Copernicus Emergency Monitoring Service (CEMS)⁴. Si tratta di un dataset di diverse variabili meteorologiche, tra cui precipitazione e temperatura (oltre che vento, radiazione, evapotraspirazione tra le altre) con risoluzione temporale giornaliera e orizzontale pari a 5 km, con copertura paneuropea sull'arco temporale 1990-2018. Tale dataset è ottenuto attraverso l'interpolazione di serie temporali di dati meteorologici osservate presso un elevato numero di stazioni di misura afferenti alle due reti EU-FLOOD-GIS e JRC-MARS (Ntegeka et al., 2013). La data di inizio del dataset osservativo utilizzato (1990) è posteriore di circa vent'anni rispetto alla data di inizio delle simulazioni climatiche (1971). Ciò non costituisce un problema per l'operazione di bias correction, che nel caso in esame è stata effettuata mediante “Empirical Quantile Mapping at two timescales”. Infatti, la procedura prevede una calibrazione della funzione di trasferimento sulla finestra temporale in cui si abbiano osservazioni, e la sua successiva applicazione ad una finestra temporale target, che può quindi essere anche diversa da quella di calibrazione. Una piccola criticità è legata al fatto che, per costruire la funzione di calibrazione, i dati osservati devono essere confrontati con i dati simulati sullo stesso periodo: poiché però le simulazioni sul periodo storico si fermano al 2005, mentre dal 2006 partono quelle di scenario, per il confronto i dati climatici simulati sono stati organizzati in una serie temporale che dal 1990 al 2005 è relativa all'esperimento storico, mentre dal 2006 al 2018 è relativa all'esperimento sotto lo scenario RCP 4.5, scelto perché intermedio. Secondo la documentazione fornita⁵, comunque, le differenze nelle variabili climatiche sul periodo 2006-2018 per i tre scenari sono minime.

Tabella 1: Lista delle simulazioni climatiche utilizzate.

Global Climate Model (Institution)	Regional Climate Model (Institution)	Realizzazione*	Historical period (1971-2005)	Future horizon (2006-2100) RCP 2.6, 4.5, 8.5
EC-EARTH (ICHEC, Ireland)	CCLM4-8-17 (CLM Community, EU)	r12i1p1	x	x
	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	r12i1p1	x	x
	RCA4 (SMHI, Sweden)	r12i1p1	x	x
HadGEM2-ES (UK Met Office UK)	RCA4 (SMHI, Sweden)	r1i1p1	x	x
	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	r1i1p1	x	x
MPI-ESM-LR (MPI, Germany)	RCA4 (SMHI, Sweden)	r1i1p1	x	x
	CSC-REMO2009 (MPI, Germany)	r2i1p1	x	x
	CSC-REMO2009 (MPI, Germany)	r1i1p1	x	x

* 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.

⁴ <https://www.efas.eu/en>

⁵ <https://shorturl.at/rDO27>

Per ciascun bacino, concettualmente l'output grezzo del modello è costituito da una serie temporale (una per ogni catena di simulazione climatica e per ogni scenario) di portate fluviali giornaliere (*Essential Climate Variable*, ECV). Si noti inoltre che, per ciascuno scenario e ciascuna catena di simulazione climatica, la ECV è disponibile separatamente per ciascuno dei run del modello idrologico E-HYPE catch (otto, corrispondenti a otto parametrizzazioni diverse per i sotto-processi). Ai fini della presente attività, gli otto run del modello idrologico, caratterizzati da diversi valori dei parametri, sono stati tra loro mediati (i risultati dei singoli run non sono oggetto di questo documento). Di conseguenza, per ogni catena di simulazione climatica, ciascun bacino viene ad essere caratterizzato da due serie temporali:

- La prima, relativa al periodo di riferimento, si estende dal 1981 al 2010. Tuttavia, dal 1981 al 2005 i valori sono quelli forniti dall'esperimento storico (1971-2005), mentre dal 2006 al 2010 i valori sono ottenuti dalla media di quelli forniti dai tre scenari di concentrazione. Un'alternativa altrettanto efficace sarebbe stata scegliere i valori forniti dall'esperimento relativo allo scenario RCP 4.5 (scegliendo cioè un approccio simile a quello adottato da SMHI per la bias correction).
- La seconda, relativa all'orizzonte futuro 2021-2050, è triplice, poiché corrisponde ai valori forniti dalla simulazione per ciascuno dei tre scenari RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

Il dataset “Hydrology-related indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections”, da cui è possibile scaricare le serie di portate giornaliere, presenta anche la possibilità di scaricare direttamente alcune elaborazioni statistiche, ed in particolare i percentili di portata giornaliera massima annuale per una selezione di tempi di ritorno, che sono appunto l'oggetto della presente attività. Tuttavia, le finestre temporali di riferimento del dataset, sulla base delle quali sono forniti tali percentili, non sono compatibili con quelle della Convenzione: viene usato infatti il trentennio 1971-2000 come riferimento, e l'orizzonte a breve termine è 2011-2040. Di conseguenza, si è preferito partire dalla ECV e ripetere analisi statistiche ad hoc per ottenere i percentili futuri relativi alle finestre temporali di interesse. Ciò ha quindi implicato, per questa attività, il ricorso ad approcci statistici, ed in particolare quelli legati alla *Extreme Value Theory*.

1.3 Inquadramento del territorio

I bacini superficiali di interesse per la Convenzione sono i seguenti (Figura 1):

- 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).

I bacini risultano dislocati nei territori di Campania, Puglia e Basilicata. Per ciascuno di essi è stata svolta un'analisi di consistenza con i bacini e sottobacini forniti da SMHI. In particolare, in 8 casi su 10 la corrispondenza è stata individuata e le serie di portata fornite da SMHI sono state considerate rappresentative dei deflussi alle sezioni di chiusura degli invasi di interesse AQP. I bacini forniti da SMHI ritenuti rappresentativi dei bacini AQP sono rappresentati in Figura 2, mentre la Tabella 2 riassume l'esito dell'analisi di consistenza per tutti i bacini.

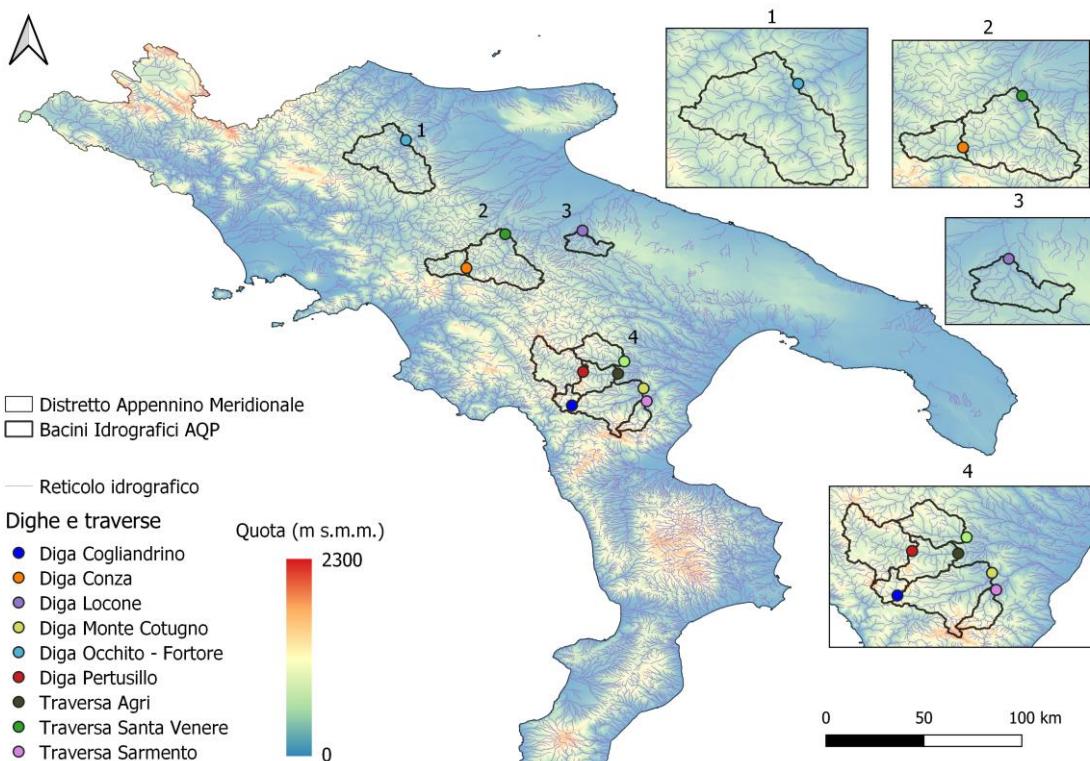


Figura 1. Mappa dei bacini individuati da AQP in corrispondenza di sbarramenti per uso idropotabile.

Figura 2. Mappa dei bacini forniti da SMHI rappresentativi degli invasi AQP.

Tabella 2: Esito analisi di consistenza tra i bacini forniti AQP e quelli forniti da SMHI.

Bacino AQP	Consistenza
Cogliandrino	NO
Conza	SI
Locone	SI
Monte Cotugno	SI
Fortore	SI
Pertusillo	SI
Traversa Agri	SI
Traversa Santa Venere	SI
Traversa Sarmento	SI
Traversa Sauro	NO

1.4 Criticità e opportunità relative all'utilizzo del dataset nella Convenzione

L'utilizzo del dataset in oggetto come base per estrarre gli indicatori rappresentativi dei bacini di interesse AQP per questa attività presenta le seguenti criticità:

- Il numero di catene di simulazione climatica (8) è inferiore a quello di default scelto per la convenzione (14). Ciò implica che la valutazione delle incertezze legate all'utilizzo di un ensemble di catene è meno robusta, sebbene il numero sia comunque, per gli standard vigenti, elevato. Tuttavia, si noti che tutte le catene modellistiche utilizzate da SMHI e proposte in Tabella 1 sono presenti

nell'ensemble più ampio considerato nelle attività della Convenzione (ne costituiscono, cioè, un sottoinsieme).

- Fissato lo scenario e il membro dell'ensemble, per ogni bacino il dataset oggetto di studio fornisce una serie temporale di portate giornaliere. Come detto in precedenza, il modello idrologico E-HYPE ha subito una procedura di calibrazione ampia e articolata, e la validazione effettuata da SMHI confrontando i risultati relativi al periodo di riferimento con osservazioni di portata sui principali bacini europei ha dato esito soddisfacente. Tuttavia, l'esito di tale validazione per i bacini di interesse non è noto, poiché essi non sono monitorati (almeno non nelle sezioni di chiusura corrispondenti agli invasi di interesse). Un altro elemento riguardante la modellazione idrologica è il perimetro del bacino, che è stato ottenuto da SMHI sulla base del dataset di quote EU-DEM, avente risoluzione orizzontale pari a 25 metri. Tale risoluzione potrebbe non permettere l'individuazione precisa dei confini dei bacini più piccoli oggetto di studio.
- Il dataset di precipitazione e temperatura utilizzato da SMHI per la bias correction (EFAS – Meteo) non è quello di riferimento della Convenzione (E-OBS). Il motivo è che il dataset E-OBS riesce a coprire il periodo di riferimento scelto per la Convenzione (1981-2010), mentre i dati EFAS partono dal 1990. Sebbene ciò non costituisca un problema per la bias correction in sé, sarebbe stato invece un problema utilizzare il dataset EFAS per le attività della Convenzione dove invece era necessario fornire valori assoluti di riferimento (ad esempio, per gli indicatori climatici) necessari per interpretare le variazioni attese in futuro.

L'opportunità scaturisce invece dalla considerazione che i trentenni considerati dal dataset SMHI non sono consistenti con quelli identificati in fase di proposta (1971-2000 vs. 1981-2010, 2011-2040 vs. 2021-2050). Pertanto, invece di utilizzare i valori di percentile direttamente distribuiti per i bacini in Figura 2, si è deciso di utilizzare il dataset di portate giornaliere, ovvero ECV, che copre l'arco temporale 1971-2100, e da lì estrarre, per i periodi di interesse della Convenzione, i massimi annuali, conducendo dunque un'analisi statistica e ricavando nuovi valori di percentile più rappresentativi. Tale procedura ha necessitato di un impegno superiore a quanto inizialmente stimato, a causa sia dell'applicazione di procedure statistiche, come di seguito illustrato, sia a causa della necessità di effettuare *download* e *storage* di una amplissima quantità di dati. Infatti, dal dataset disponibile in C3S non è possibile estrarre, secondo la procedura standard di download, i dati relativi a specifici bacini, ma è necessario scaricare i dati relativi all'intero dominio paneuropeo ed estrarre poi i dati di interesse in modalità *off-line*.

A valle di tali valutazioni, si ritiene che il contenuto informativo del dataset sia rilevante. Si fa inoltre notare che si tratta dell'unico prodotto del servizio C3S, messo quindi a disposizione dalla Comunità Europea, che includa proiezioni di portata a scala di bacino.

2. 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.

2.1 Analisi delle incertezze

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

- I. Incertezze legate all'utilizzo di un modello idrologico al posto di osservazioni di portata. La fonte di tale incertezza è da ricercarsi nell'utilizzo di un qualsivoglia strumento di modellistica, che, per sua natura, non può che costituire un'approssimazione della realtà, ad esempio attraverso dei parametri

da calibrare che semplificano i processi, e risoluzioni spaziali e temporali più o meno limitate a seconda delle risorse computazionali allocate e dei dati a disposizione. In questa analisi tali incertezze non possono essere quantificate, poiché non si hanno a disposizione dati ufficiali di portata osservati sui vari bacini per il periodo di riferimento. Un ulteriore approfondimento su questa tematica è riportato nella sezione di Discussione.

- II. Incertezze legate alla scelta di un modello di distribuzione di probabilità cumulata come rappresentativo dei campioni di portata giornaliera massima annuale. In questa attività, la scelta è ricaduta arbitrariamente su uno specifico modello di probabilità, ritenuto quello più flessibile, per il quale comunque è stata condotta una verifica di *goodness of fit*. I risultati di questa analisi, o per meglio dire la loro controparte grafica, sono riportati in Appendice I. Si nota che il modello qui scelto (GEV) non è quello invece utilizzato da SMHI (Gumbel): è noto infatti che il modello GEV, caratterizzato da tre parametri (contro i due di Gumbel) fornisce risultati migliori e, in ogni caso, presenta una formulazione generale che comprende anche il modello di Gumbel. In ogni caso, la quantificazione dell'incertezza legata all'uso di GEV non può che passare, come previsto nelle analisi statistiche, che per il confronto con altre distribuzioni, finalità che non è stata perseguita in questa attività. Pertanto, questa tipologia di incertezza non è stata quantificata, se non a mezzo di un confronto grafico con i risultati del modello Gumbel presentati in Appendice I.
- III. Incertezze legate all'utilizzo di un ensemble di modelli climatici (Tabella 1). Tali incertezze consistono nella variabilità dei risultati in termini di portata allorquando il modello idrologico vede in input 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 portata 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, ai fini di questa attività si ritiene che la procedura di validazione cui il dataset in oggetto è stato sottoposto sia sufficiente per ritenere il dato affidabile, come testimoniato dall'inclusione di questo prodotto all'interno del servizio Copernicus Climate Change Service (C3S). Per quanto riguarda invece la seconda fonte, un'analisi esplorativa di tipo grafico ha dimostrato che il modello GEV presenta livelli di performance maggiori o uguali a quelli del modello Gumbel. Per quanto riguarda infine la terza sorgente, 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 8 elementi (tanti quante sono le catene di simulazione climatica considerate) è

estremamente ridotto (solitamente si fa riferimento ad un'ampiezza pari a 10 come quella minima per analisi statistiche) e foriero di valutazioni poco robuste: in altre parole, l'aggiunta di anche solo un elemento potrebbe cambiare significativamente la stima, soprattutto di DS. È quindi atteso che le presenti analisi forniscano incertezze elevate associate alla stima della "verità", poiché dato il numero esiguo di elementi (ma un'ampiezza pari a 14, quante sono le catene di simulazione climatica adottate in altre attività della Convenzione, sarebbe comunque da considerarsi ridotta) sarebbe irrealistico pretendere un'incertezza più contenuta.

2.2 Analisi delle portate giornaliere massime annuali

Per ciascuna catena di simulazione climatica, per ciascun bacino, per ciascuno scenario di concentrazione e per ciascuna finestra temporale di interesse (periodo di riferimento 1981-2010 e orizzonte futuro 2021-2050), i valori massimi annuali sono stati estratti dalle serie di portata giornaliera e su questi sono state fittate due distribuzioni: Gumbel e Generalized Extreme Value (GEV). Sono stati quindi calcolati i percentili per i diversi periodi di ritorno, mentre la variabile su cui si sono concentrate le analisi è la variazione percentuale tra i percentili futuri e quelli presenti, per le diverse catene modellistiche.

In linea di principio, le analisi possono essere condotte con due approcci:

1. Analizzando separatamente i valori dei percentili sul periodo di riferimento e i valori futuri degli stessi percentili, 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 percentile" 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, al variare della catena climatica usata come input, le serie temporali di portata sul periodo di riferimento non sono coincidenti, se non in presenza di un'operazione di bias correction con un'efficienza del 100%. Tuttavia, ci si attende che la variabilità delle portate sul periodo di riferimento sia bassa; se fossero stati disponibili dati di portata per i bacini oggetto di studio, il riferimento sarebbe stato addirittura certo. Invece, per l'orizzonte futuro, ci si attende che la variabilità delle portate 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 al contorno.

Dal punto di vista delle azioni di adattamento, è chiaro che il valore assoluto di percentile 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. Ci sono però ulteriori considerazioni che possono far convergere verso l'uno o l'altro approccio. Ad esempio, utilizzare in input precipitazioni e temperature provenienti da proiezioni climatiche permette appunto di tenere conto dell'effetto del cambiamento climatico sui valori di percentili di portata; tuttavia, estendere le analisi a orizzonti temporali futuri, anche lontani, senza tenere conto di altri cambiamenti, ad esempio legati al *land cover*, alle proprietà dei suoli, o a interventi antropici di regimazione del bacino, possono fornire risultati, in termini di portate future, non attendibili. La valutazione della "variazione" permette invece di isolare l'effetto del cambiamento climatico, e la variazione può essere applicata a qualsivoglia riferimento: portate osservate che possano rendersi disponibili, oppure, in mancanza di osservazioni, i risultati di un modello idrologico. Ai fini di queste analisi, si considererà come riferimento il valore "vero" (EM) delle simulazioni idrologiche sul periodo di riferimento 1981-2010, ma potenzialmente si

potrebbe utilizzare anche il risultato di un modello idrologico calibrato ad hoc per i bacini di interesse, e dunque probabilmente più attendibile rispetto a quello qui considerato, calibrato a livello pan-europeo.

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 portata (ad esempio, un percentile di portata giornaliera massima annuale corrispondente ad un certo tempo di ritorno) 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 $DS_1 = 0$ e $CV_1 = 0$), 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 più grande della media rispetto al caso precedente. 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).

Quando invece vi è una variabilità anche per il valore presente, DS_3 è una funzione più articolata di DS_1 e DS_2 , che deve tenere anche conto della eventuale covarianza tra i due campioni: in ogni caso, il suo valore deve essere paragonato con un valore di EM_3 : quanto più esso è piccolo, tanto più grande sarà CV_3 . L'aggiunta poi della divisione per il valore di riferimento per ottenere la variazione percentuale rende la combinazione delle due incertezze ulteriormente più complessa, ma il ragionamento può essere comunque applicato. In definitiva, nell'ambito delle valutazioni relative al cambiamento climatico, l'incertezza associata alla stima della variazione futura è da attendersi sia più alta della stima associata ai valori assoluti sia presenti, sia soprattutto futuri. Tuttavia, quanto accennato nel paragrafo precedente rende comunque preferibile presentare i risultati in termini di variazione da attendersi in futuro: tali variazioni saranno però sempre accompagnate dall'informazione relativa al valore di riferimento per facilitarne l'interpretazione.

Quale che sia la distribuzione utilizzata, la variazione attesa è calcolata con la seguente formula:

$$\Delta Q_T = 100 \cdot \left(\frac{x_{T,F} - x_{T,R}}{x_{T,R}} \right) \quad (1)$$

dove $x_{T,R}$ è il percentile di portata giornaliera massima annuale corrispondente a un tempo di ritorno T per il periodo di riferimento, mentre $x_{T,F}$ è il suo analogo per il periodo futuro. Appare infine utile, a completamento, ricordare la relazione che lega il livello di probabilità cumulata al tempo di ritorno:

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (2)$$

2.2.1 Distribuzione di Gumbel

La distribuzione di Gumbel presenta le seguenti funzioni di densità di probabilità e cumulativa:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha}(x-\mu)-e^{-\frac{1}{\alpha}(x-\mu)}} \quad (3)$$

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\alpha}(x-\mu)}} \quad (4)$$

La funzione ha quindi due parametri: α e μ . Applicando il metodo dei momenti per la stima dei parametri si ha che:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} \sigma}{\pi} \quad (5a)$$

$$\mu = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (5b)$$

dove \bar{x} e σ sono, rispettivamente, la media e la deviazione standard del campione. Le funzioni possono essere espresse utilizzando la variabile ridotta $w = (x - \mu)/\alpha$. Risulta quindi:

$$F(x) = e^{-e^{-w}} \rightarrow w = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad (6)$$

Poiché è:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= P(X \geq x_T) = 1 - P(X \leq x_T) = 1 - F(x_T) \rightarrow \\ F(x_T) &= \frac{T-1}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

Ne consegue che è possibile determinare percentili di portata per un fissato tempo di ritorno con le seguenti formule:

$$w_T = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (8a)$$

$$x_T = \mu + \alpha \cdot w_T \quad (8b)$$

Per verificare l'ammissibilità della funzione di probabilità scelta, è stata utilizzata la carta probabilistica di Gumbel (Fig. A1-A8). A monte della stima dei parametri, se questa distribuzione è adatta a rappresentare il campione, i punti devono distribuirsi attorno ad una retta. Per riportare i valori nella carta probabilistica è necessario conoscere il valore stesso e la probabilità di superamento $P(X \geq x_T)$. Viene quindi calcolata una probabilità di superamento empirica, detta plotting position, così definita:

$$P(X \geq x) = \frac{m}{N+1} \quad (9)$$

dove m è la posizione del dato nella serie ordinata in senso decrescente e N è la numerosità del campione. Successivamente, i parametri sono determinati in modo analitico con il metodo dei momenti e la retta risultante viene riportata sul grafico della carta probabilistica. La retta ha espressione:

$$x = y\alpha + \mu \quad (10)$$

dove y è la variabile ridotta e x la variabile analizzata.

2.2.2 Distribuzione GEV

Secondo la teoria del valore estremo, la distribuzione generalizzata del valore estremo (GEV) rappresenta la distribuzione limite di massimi normalizzati di una sequenza di variabili casuali indipendenti e identicamente distribuite. GEV è una famiglia di distribuzioni di probabilità sviluppata per combinare Gumbel, Fréchet e Weibull (distribuzioni del valore estremo di tipo I, II, III). Essa è parametrizzata secondo un parametro di

forma, un parametro di posizione e un parametro di scala. In particolare, quando il parametro di forma è uguale a 0, GEV è equivalente alla distribuzione di Gumbel. La funzione di densità di probabilità è la seguente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} t(x)^{\xi+1} e^{-t(x)} \quad (11)$$

$$t(x) = \begin{cases} (1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}} & \text{if } \xi \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/\sigma} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (12)$$

La funzione di distribuzione cumulativa, per $\xi \neq 0$, è la seguente:

$$F(x, \mu, \sigma, \xi) = e^{-[1+\xi(\frac{x-\mu}{\sigma})]^{-1/\xi}} \quad (13)$$

Il modello GEV è stato fissato ai campioni di dati utilizzando il metodo della massima verosimiglianza (MLE). Per mettere a confronto Gumbel e GEV nella rappresentazione dei massimi annuali di portata giornaliera, sono utilizzati dei *quantile-quantile* (qq) plot (Fig. A9-A24) separatamente per il periodo di riferimento e il periodo futuro nei diversi scenari, per una singola catena modellistica.

2.3 Rappresentazione dei risultati

La teoria del valore estremo, applicata all'idrologia, viene utilizzata per associare frequenza e magnitudo di un evento estremo, che può essere di piena, di pioggia, e in generale di qualunque variabile fisica. Nel caso in esame, la magnitudo è rappresentata dal valore (cioè percentile) di portata giornaliera massima annuale, e la frequenza è rappresentata dal tempo di ritorno (cioè dal livello di probabilità di non superamento del percentile). In un contesto di cambiamento climatico quale quello in esame, ci si può interrogare sulla questione ponendosi una duplice domanda:

- Quale sarà, in futuro, la magnitudo di un evento che ha una certa frequenza? In altre parole, se oggi, per un tempo di ritorno assegnato, la portata estrema assume un certo valore, quale sarà in futuro tale valore per lo stesso tempo di ritorno?
- Quale sarà, in futuro, la frequenza di un evento di assegnata magnitudo? In altre parole, se oggi una portata di assegnato valore viene superata, in media, con una certa frequenza, con quale nuova frequenza la stessa portata sarà superata in media in futuro?

Le due domande sono intimamente connesse, e per rispondere a entrambe è richiesto lo stesso tipo di analisi: in altre parole, è necessario determinare la relazione che lega la portata estrema e il tempo di ritorno sia nel presente che nel futuro, che è appunto l'oggetto dell'analisi statistica presentata in questo documento. Le due curve sono genericamente rappresentate in Figura 3, mediante una linea verde, rappresentativa della condizione climatica presente, e una linea rossa, rappresentativa della condizione climatica da attendersi in futuro. Rispondere alla prima domanda significa, data una condizione corrente caratterizzata da una portata estrema Q_1 superata, in media, una volta ogni T_1 anni, chiedersi quanto varrà in futuro la portata Q_2 . Rispondere alla seconda domanda significa, per le stesse condizioni correnti, chiedersi quanto varrà in futuro il tempo di ritorno T_2 . Nella Figura 3, è rappresentata una condizione in cui il cambiamento climatico determina un aggravamento del regime delle portate estreme: infatti, è da attendersi un futuro in cui, da un lato, portate estreme elevate si verifichino con le stesse frequenze che oggi sono associate a portate più piccole ($Q_2 > Q_1$); dall'altro, le stesse portate verranno superate, in futuro, con un tempo di ritorno più basso, ovvero più spesso ($T_2 < T_1$).

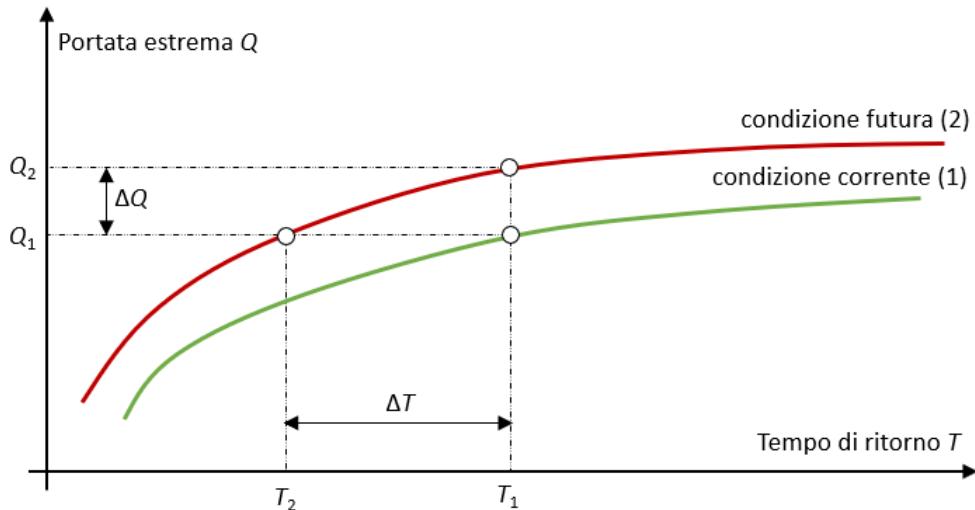


Figura 3. Tipologie di valutazione degli effetti del cambiamento climatico sul regime delle portate estreme.

L’andamento presentato in Figura 3 non è, naturalmente, l’unico possibile. Ciò che accade tipicamente, anzi, è che le curve siano molto più vicine tra di loro, o che possano intersecarsi: in generale, però, ad un aumento (variazione positiva) di portata estrema a parità di T deve corrispondere una diminuzione (variazione negativa) di tempo di ritorno a parità di Q . Se le curve si intersecano, vi sarà una regione con un peggioramento, ed una con un miglioramento del regime degli estremi: dove la curva “corrente” si trova al di sotto della curva “futura” (come in Figura 3) vi sarà un inasprimento della criticità, dove invece accade l’opposto vi sarà un alleviamento. L’andamento asintotico pseudo-orizzontale, caratteristico delle curve di probabilità (che, nel piano variabile-probabilità, hanno una ben nota forma “ad S”), rende le stime di variazione di T molto incerte per valori di T elevati, come sono di solito quelli di interesse per il regime delle piene (si ricorda infatti che un periodo di ritorno di 20 anni corrisponde ad una probabilità di non superamento del 95%, quindi già abbondantemente sulla coda destra della distribuzione).

3. Risultati

Nella seguente sezione sono presentati i risultati delle analisi in termini di variazione attesa dei percentili di portata giornaliera massima annuale corrispondenti a prefissati periodi (o tempi) di ritorno ritenuti di interesse: 2, 5, 10, 50 e 100 anni. In particolare, vengono presentati i risultati in termini di ensemble mean EM, e le incertezze in termini di DS e CV, avendo cura di riportare, accanto a queste informazioni, anche il valore di riferimento, che è l’ensemble mean EM dei valori di percentile per lo stesso tempo di ritorno sul periodo di riferimento. La deviazione standard e il coefficiente di variazione associati alla stima del valore di riferimento non sono riportati in questa sezione, ma possono essere desunti dall’insieme delle singole realizzazioni di portata riportate in Appendice II.

3.1 Variazione attesa delle portate estreme

Per ciascun bacino in Figura 2, per ciascuna delle catene di simulazione climatica, per ciascuno scenario di concentrazione, per ciascuno dei periodi di interesse, si è estratto un campione di 30 valori di portata giornaliera massima annuale (un dato per ogni anno) e il campione è stato fittato mediante la distribuzione Gumbel e la distribuzione GEV, per stabilire quale fosse la migliore in termini di performance. Il confronto tra le distribuzioni è stato effettuato analizzando graficamente i qq-plot e valutando per quale distribuzione i punti sperimentali (ovvero le frequenze empiriche calcolate mediante l’Eq. 9) fossero meglio interpretati dai modelli (Eq. 4 e Eq. 13 rispettivamente per Gumbel e GEV). Tali confronti non sono riportati nel testo per non appesantire il documento, ma tutti i qq-plot, nonché le carte di probabilità di Gumbel, sono riportate in

Appendice I. In sintesi, dalle carte probabilistiche di Gumbel, si nota che la distribuzione non è per nulla adatta a rappresentare il campione di dati per i bacini Locone e Fortore, come testimoniato dal fatto che i punti non si dispongono lungo una retta. Negli altri bacini invece, Gumbel si rivela adeguato. Tuttavia, il confronto dei qq-plot mostra che GEV opera meglio della distribuzione di Gumbel, anche se non in maniera ottimale in quei bacini in cui quest'ultima opera male (Locone e Fortore) e in generale il fitting è migliore anche in quei bacini in cui Gumbel opera bene. Per l'analisi la scelta è dunque ricaduta su questa distribuzione.

Le Tabelle da 3 a 7 (rispettivamente riferite ai cinque tempi di ritorno considerati di 2, 5, 10, 50 e 100 anni) mostrano le variazioni attese sui percentili nei bacini di interesse sull'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010 per ciascuna catena di simulazione climatica. I valori di ensemble mean sono ottenuti calcolando, per ciascuno dei periodi di ritorno T considerati (2, 5, 10, 50 e 100 anni), i percentili di portata corrente e futura considerando il modello probabilistico GEV, opportunamente fissato alle serie dei massimi annuali di portata giornaliera per il periodo di riferimento e il periodo futuro; quindi, viene valutata la variazione attraverso l'Eq. 1 e ne viene effettuata la media (o la deviazione standard nel caso dell'incertezza). Le tabelle in particolare riportano, per ciascun bacino: l'ensemble mean del percentile sul periodo di riferimento (campitura in verde, dove il massimo riempito corrisponde ad una portata arbitraria di 100 mc/s); l'ensemble mean EM della variazione percentuale del percentile (campitura dal rosso al blu, dove il colore rosso pieno corrisponde ad una variazione negativa $< -20\%$, e il blu pieno corrisponde ad una variazione positiva $\geq +100\%$), associata deviazione standard DS e coefficiente di variazione CV (campitura in giallo, dove il massimo riempimento corrisponde a un valore di 1.5) Tutte le soglie sono state stabilite arbitrariamente, sulla base dell'insieme delle realizzazioni ottenute. Le stesse informazioni sono riportate, in modalità grafica, in Appendice III.

Tabella 3: Per un tempo di ritorno di 2 anni, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; ensemble mean EM della variazione di percentile, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	T = 2 anni								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	\pm DS (%)	CV	EM (%)	\pm DS (%)	CV	EM (%)	\pm DS (%)	CV
Conza	16.1	23.9	23.9	1.0	18.8	14.8	0.8	29.3	28.9	1.0
Locone	1.4	23.0	40.6	1.8	64.9	72.9	1.1	46.3	100.2	2.2
Monte Cotugno	67.0	20.9	21.1	1.0	19.2	24.3	1.3	16.2	16.3	1.0
Fortore	11.8	15.7	43.8	2.8	24.5	45.9	1.9	11.5	35.7	3.1
Pertusillo	16.9	13.9	22.5	1.6	16.4	6.4	0.4	15.7	31.4	2.0
Traversa Agri	57.4	19.2	15.6	0.8	18.2	17.3	0.9	8.2	12.3	1.5
Traversa Santa	43.4	33.0	30.7	0.9	25.8	12.5	0.5	26.0	20.3	0.8
Traversa Sarmento	28.9	7.3	13.7	1.9	6.0	18.5	3.1	1.4	14.3	10.1

Tabella 4: Per un tempo di ritorno di 5 anni, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; ensemble mean EM della variazione di percentile, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	T = 5 anni								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	\pm DS (%)	CV	EM (%)	\pm DS (%)	CV	EM (%)	\pm DS (%)	CV
Conza	27.9	30.3	37.2	1.2	24.3	21.2	0.9	29.8	37.4	1.3
Locone	5.9	58.4	91.3	1.6	86.8	76.4	0.9	54.9	77.8	1.4
Monte Cotugno	105.7	25.9	26.6	1.0	25.8	21.1	0.8	20.7	15.0	0.7
Fortore	27.4	14.3	31.9	2.2	17.7	40.4	2.3	4.5	25.3	5.6
Pertusillo	27.8	15.6	33.0	2.1	12.3	18.8	1.5	17.4	36.5	2.1
Traversa Agri	88.6	25.0	24.3	1.0	23.5	20.7	0.9	15.0	17.8	1.2
Traversa Santa	71.5	41.0	46.5	1.1	27.9	21.3	0.8	29.7	22.3	0.8
Traversa Sarmento	46.8	12.0	22.7	1.9	19.3	22.5	1.2	14.3	14.0	1.0

Tabella 5: Per un tempo di ritorno di 10 anni, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; ensemble mean EM della variazione di percentile, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	T = 10 anni								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	39.5	34.8	46.4	1.3	32.8	42.8	1.3	30.8	51.3	1.7
Locone	15.3	115.6	227.0	2.0	108.9	89.9	0.8	93.7	167.8	1.8
Monte Cotugno	137.6	33.1	42.9	1.3	33.1	25.0	0.8	25.5	25.0	1.0
Fortore	46.0	20.6	44.1	2.1	16.2	46.3	2.9	2.5	24.9	10.1
Pertusillo	38.1	18.4	46.4	2.5	8.8	29.7	3.4	15.3	40.8	2.7
Traversa Agri	113.5	32.3	42.3	1.3	28.0	25.3	0.9	23.0	30.1	1.3
Traversa Santa	98.1	45.1	57.8	1.3	29.5	35.0	1.2	33.0	26.7	0.8
Traversa Sarmento	60.5	19.1	36.6	1.9	32.5	31.4	1.0	25.5	17.9	0.7

Tabella 6: Per un tempo di ritorno di 50 anni, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; ensemble mean EM della variazione di percentile, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	T = 50 anni								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	83.1	48.2	70.0	1.5	82.0	176.1	2.1	40.9	103.7	2.5
Locone	136.4	594.0	1493.7	2.5	219.6	268.8	1.2	448.7	969.3	2.2
Monte Cotugno	235.3	68.4	122.3	1.8	68.4	101.0	1.5	48.0	80.6	1.7
Fortore	150.7	56.9	106.8	1.9	22.3	75.1	3.4	10.8	68.1	6.3
Pertusillo	77.3	36.8	105.2	2.9	4.2	54.8	13.2	9.0	54.4	6.1
Traversa Agri	186.7	65.8	133.0	2.0	42.3	47.5	1.1	55.6	86.4	1.6
Traversa Santa	195.4	53.9	88.5	1.6	38.5	73.1	1.9	47.1	55.6	1.2
Traversa Sarmento	98.3	48.3	92.7	1.9	78.1	78.4	1.0	58.7	39.5	0.7

Tabella 7: Per un tempo di ritorno di 100 anni, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; ensemble mean EM della variazione di percentile, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	T = 100 anni								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	113.7	56.0	81.7	1.5	128.0	299.4	2.3	50.2	135.1	2.7
Locone	358.5	1227.6	3229.2	2.6	321.1	486.8	1.5	871.7	1932.9	2.2
Monte Cotugno	293.5	96.3	181.4	1.9	98.5	173.0	1.8	66.0	120.4	1.8
Fortore	262.0	84.8	154.2	1.8	29.2	94.5	3.2	22.9	110.6	4.8
Pertusillo	106.0	52.7	146.9	2.8	4.0	65.8	16.5	6.8	61.8	9.1
Traversa Agri	228.5	92.6	205.8	2.2	50.9	61.6	1.2	79.0	127.1	1.6
Traversa Santa	263.2	58.6	104.6	1.8	45.7	92.4	2.0	57.7	75.4	1.3
Traversa Sarmento	118.7	68.6	132.3	1.9	107.1	113.6	1.1	77.3	55.0	0.7

L'informazione più evidente che emerge dalle Tabelle da 3 a 7 è che non esistono casi (bacini, tempi di ritorno, scenari) in cui sia prevista una diminuzione di portata estrema, ovvero valori negativi di EM. Inoltre, in media, gli aumenti attesi si incrementano spostandosi dal tempo di ritorno più basso (Tabella 3) a quello più alto (Tabella 7), come mostrato dai colori sempre più scuri. L'unica eccezione è costituita dal bacino del Pertusillo, che invece, sotto RCP 4.5 e 8.5, presenta una variazione (sempre positiva) che però decresce dal tempo di ritorno più basso a quello più alto. Infine, non sembra esserci un effetto preponderante dello scenario: si nota però che sullo scenario RCP 2.6 i valori sono in media leggermente più alti degli altri scenari. Il bacino che presenta il maggiore aumento atteso è sistematicamente il Locone: tuttavia, tali variazioni non risultano particolarmente gravose per i tempi di ritorno più bassi, dove tale bacino è associato ad una portata estrema di riferimento tra le più basse sul territorio considerato. Al contrario, lo stesso bacino presenta invece un percentile di riferimento molto elevato (il massimo) per $T = 100$ anni, per il quale l'incremento atteso del 1227.6% risulta quindi estremamente gravoso.

Per avere un'idea di quelli che possono essere i valori futuri da attendersi sulle portate estreme, la Tabella 8 presenta un "esercizio" in cui le variazioni percentuali attese sono applicate direttamente ai valori di percentile sul periodo di riferimento. Si può appunto notare come, per i periodi di ritorno più bassi, l'aumento sia modesto, mentre per quelli più alti non soltanto tutte le variazioni attese sono molto ingenti, ma anche i valori di riferimento subiscono un forte aumento e, soprattutto, sembrano perdere la loro relazione con la superficie stessa del bacino. Ad esempio, il bacino del Locone è tra i più ridotti in termini di superficie, ed infatti presenta i valori minimi di portata estrema fino a $T = 10$ anni, per poi incrementare notevolmente il suo valore. La spiegazione di tale inconsistenza va presumibilmente ricercata nella *goodness of fit* del modello GEV, che, per questo bacino, non è molto alta (sebbene comunque migliore del modello Gumbel): ciò si unisce al fatto che indagare su tempi di ritorno elevati significa andare a concentrarsi sulla coda della distribuzione, che solitamente è quella che presenta i maggiori errori di stima quando il modello di probabilità non fitta i dati in modo adeguato.

Tabella 8: Per lo scenario RCP 2.6, per ciascun bacino, ensemble mean del percentile di portata, in [mc/s], sul periodo di riferimento; percentile da attendersi sull'orizzonte futuro, in [mc/s].

Invaso	T = 2 anni		T = 5 anni		T = 10 anni		T = 50 anni		T = 100 anni	
	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
Conza	16.1	19.9	27.9	36.4	39.5	53.2	83.1	123.1	113.7	177.4
Locone	1.4	1.8	5.9	9.4	15.3	32.9	136.4	946.3	358.5	4760.0
Monte Cotugno	67.0	81.0	105.7	133.0	137.6	183.1	235.3	396.2	293.5	576.0
Fortore	11.8	13.6	27.4	31.3	46.0	55.5	150.7	236.4	262.0	484.4
Pertusillo	16.9	19.2	27.8	32.2	38.1	45.2	77.3	105.8	106.0	161.9
Traversa Agri	57.4	68.4	88.6	110.8	113.5	150.2	186.7	309.5	228.5	440.1
Traversa Santa	43.4	57.7	71.5	100.9	98.1	142.2	195.4	300.7	263.2	417.5
Traversa Sarmento	28.9	31.1	46.8	52.4	60.5	72.0	98.3	145.8	118.7	200.2

Per quanto attiene l'incertezza, come mostrato dai valori di CV nelle Tabelle da 3 a 7, essa in media cresce al crescere del tempo di ritorno: in altre parole, le stime fatte sui percentili sono sempre meno robuste man mano che ci si sposta verso i tempi di ritorno più alti. Localmente, il valore più alto è raggiunto in corrispondenza della variazione attesa più prossima allo zero: Pertusillo sotto RCP 4.5 per $T = 100$ anni, 50 anni, Fortore sotto RCP 8.5 per $T = 10$ anni e Traversa Sarmento sotto RCP 8.5 per $T = 2$ anni. Tuttavia, se è sistematicamente vero che i valori di più elevati di CV si riscontrano per i valori di ensemble mean più bassi (cioè più prossimi allo zero), non è sempre vero che i CV più bassi si riscontrano per le variazioni più alte. Si consideri ad esempio lo scenario RCP 8.5 per $T = 50$ anni: i bacini che hanno CV maggiore sono Fortore e Pertusillo, per cui la variazione attesa è quasi nulla, tuttavia il CV minimo si ha per Traversa Sarmento che però presenta una variazione attesa che non è tra le più alte per quella condizione. Si noti che non è mostrata alcuna informazione riguardo l'incertezza nella stima della portata estrema di riferimento nonché quella futura. Tuttavia, tali dati sono desumibili dall'Appendice II, dove sono riportate tutte le realizzazioni di portata estrema per tutti i bacini, tutti gli scenari, tutti i tempi di ritorno e soprattutto tutte le catene di simulazione climatica.

3.2 Variazione attesa delle frequenze

Le Tabelle da 9 a 13 mostrano l'ensemble mean EM della variazione percentuale attesa sul tempo di ritorno per i valori di portata corrispondenti, nel periodo di riferimento, ai tempi di ritorno di 2, 5, 10, 50 e 100 anni. I valori nelle tabelle sono ottenuti mediante il seguente procedimento. Fissato il tempo di ritorno di riferimento e lo scenario di concentrazione, per ogni catena modellistica viene letto il percentile (cioè il valore di portata estrema) corrispondente al periodo di riferimento sulla curva di probabilità opportunamente fittata (i percentili per ogni catena modellistica sono gli stessi valori riportati nell'Appendice II, Tabella A1); a parità di percentile, viene letto poi un nuovo valore di probabilità (cioè di tempo di ritorno) corrispondente all'orizzonte futuro sulla relativa curva di probabilità, opportunamente fittata. Tali singole realizzazioni del

tempo di ritorno futuro sono contenute nell'Appendice II (Tabelle A5, A6 e A7) per i tre scenari. Per ciascuna realizzazione è a questo punto possibile calcolare la variazione, in termini percentuali, tra il tempo di ritorno atteso in futuro e quello di riferimento (che ha un valore fisso, pari cioè a 2, 5, 10, 50 e 100 anni). L'ensemble mean della variazione percentuale è riportata nelle Tabelle 13, 14 e 15 per i tre scenari di concentrazione: si noti che l'intestazione delle colonne ha il significato di indicare la portata estrema sul periodo di riferimento corrispondente a un prefissato tempo di ritorno, che è diversa da bacino a bacino (per ciascun bacino, la sua ensemble mean è quella riportata nelle Tabelle da 3 a 7). Le campiture delle celle, per quanto riguarda l'ensemble mean della variazione del periodo di ritorno, seguono una paletta dal rosso al blu, dove il colore rosso pieno corrisponde ad una variazione negativa < -50%, e il blu pieno corrisponde ad una variazione positiva ≥ +20%. Tali soglie, insieme al valore di 1.5 per CV, sono state stabilite arbitrariamente, sulla base dell'insieme delle realizzazioni ottenute.

Tabella 9: Per la portata estrema corrispondente, nel periodo di riferimento, a un tempo di ritorno di 2 anni, per ciascun bacino, ensemble mean EM della variazione del tempo di ritorno, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Q(T = 2 anni)								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	2	-18.57	11.40	0.6	-17.11	11.7	0.7	-24.60	13.2	0.5
Locone	2	-3.10	23.81	7.7	-14.15	18.3	1.3	-2.13	30.4	14.3
Monte Cotugno	2	-15.61	23.87	1.5	-13.02	23.1	1.8	-12.30	17.6	1.4
Fortore	2	2.36	25.23	10.7	-10.76	15.1	1.4	2.22	34.7	15.6
Pertusillo	2	-14.32	18.09	1.3	-20.73	3.5	0.2	-17.46	20.3	1.2
Traversa Agri	2	-17.28	16.52	1.0	-16.28	14.2	0.9	-7.12	18.5	2.6
Traversa Santa	2	-21.96	15.00	0.7	-22.72	10.7	0.5	-23.55	15.0	0.6
Traversa Sarmento	2	-3.10	17.23	5.6	-0.59	21.1	35.6	2.08	19.9	9.6

Tabella 10: Per la portata estrema corrispondente, nel periodo di riferimento, a un tempo di ritorno di 5 anni, per ciascun bacino, ensemble mean EM della variazione del tempo di ritorno, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Q(T = 5 anni)								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	5	-32.05	20.53	0.6	-26.72	19.6	0.7	-35.04	27.7	0.8
Locone	5	-8.85	40.22	4.5	-28.05	17.5	0.6	-16.41	25.7	1.6
Monte Cotugno	5	-28.91	28.67	1.0	-29.65	29.0	1.0	-27.33	23.8	0.9
Fortore	5	-5.64	33.32	5.9	-26.52	15.3	0.6	-6.98	26.2	3.7
Pertusillo	5	-25.43	34.72	1.4	-32.25	6.8	0.2	-32.56	33.3	1.0
Traversa Agri	5	-29.45	27.38	0.9	-28.70	25.9	0.9	-16.96	30.3	1.8
Traversa Santa	5	-33.70	25.12	0.7	-37.00	12.6	0.3	-39.21	16.8	0.4
Traversa Sarmento	5	-7.80	38.58	4.9	-15.94	35.9	2.3	-16.45	23.8	1.4

Tabella 11: Per la portata estrema corrispondente, nel periodo di riferimento, a un tempo di ritorno di 10 anni, per ciascun bacino, ensemble mean EM della variazione del tempo di ritorno, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Q(T = 10 anni)								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	10	-37.85	25.92	0.7	-28.77	29.7	1.0	-34.68	38.1	1.1
Locone	10	-10.43	51.79	5.0	-33.83	18.8	0.6	-19.40	24.5	1.3
Monte Cotugno	10	-33.86	29.43	0.9	-38.29	31.8	0.8	-36.84	24.8	0.7
Fortore	10	-11.56	45.02	3.9	-34.21	14.9	0.4	-9.11	25.5	2.8
Pertusillo	10	-30.89	47.71	1.5	-35.10	11.1	0.3	-38.93	38.3	1.0
Traversa Agri	10	-34.31	33.59	1.0	-34.71	33.6	1.0	-22.03	38.4	1.7
Traversa Santa	10	-35.77	31.28	0.9	-40.93	18.8	0.5	-47.31	12.8	0.3
Traversa Sarmento	10	-11.72	55.49	4.7	-29.57	38.3	1.3	-32.18	21.0	0.7

Tabella 12: Per la portata estrema corrispondente, nel periodo di riferimento, a un tempo di ritorno di 50 anni, per ciascun bacino, ensemble mean EM della variazione del tempo di ritorno, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Q(T = 50 anni)								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	50	-25.10	93.66	3.7	-17.25	65.8	3.8	9.47	101.8	10.8
Locone	50	-7.96	78.13	9.8	-39.22	28.7	0.7	9.36	96.0	10.3
Monte Cotugno	50	-10.64	74.77	7.0	-24.75	116.2	4.7	-50.74	24.6	0.5
Fortore	50	-19.25	71.35	3.7	-38.43	37.5	1.0	7.35	68.5	9.3
Pertusillo	50	-30.60	76.07	2.5	-19.43	45.0	2.3	-43.47	42.4	1.0
Traversa Agri	50	-31.28	58.64	1.9	-35.66	60.6	1.7	-10.55	101.5	9.6
Traversa Santa	50	-20.42	68.45	3.4	-23.95	74.6	3.1	-50.62	34.6	0.7
Traversa Sarmento	50	-9.47	118.57	12.5	-53.66	39.3	0.7	-61.26	14.3	0.2

Tabella 13: Per la portata estrema corrispondente, nel periodo di riferimento, a un tempo di ritorno di 100 anni, per ciascun bacino, ensemble mean EM della variazione del tempo di ritorno, in [%], deviazione standard DS associata, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Q(T = 100 anni)								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	100	13.85	208.62	15.1	-4.61	88.4	19.2	94.53	258.0	2.7
Locone	100	-5.00	90.12	18.0	-39.46	33.7	0.9	46.97	176.1	3.7
Monte Cotugno	100	33.19	136.12	4.1	13.60	230.5	17.0	-53.53	25.5	0.5
Fortore	100	-19.86	81.01	4.1	-33.31	59.7	1.8	27.07	106.5	3.9
Pertusillo	100	-24.09	88.20	3.7	10.92	90.2	8.3	-40.93	44.2	1.1
Traversa Agri	100	-22.70	76.99	3.4	-28.60	82.7	2.9	16.15	183.4	11.4
Traversa Santa	100	1.56	116.55	74.7	7.50	149.2	19.9	-41.59	65.0	1.6
Traversa Sarmento	100	0.76	166.41	218.8	-59.73	42.3	0.7	-69.88	13.3	0.2

Per facilitare la lettura delle Tabelle da 9 a 13, si riportano sinteticamente alcuni valori di riferimento per le variazioni di frequenza (Tabella 14). Si nota perciò che, ad esempio, un tempo di ritorno di 2 anni che subisca una variazione di +20% passa ad un valore di 2.4 anni, che sale a 6 anni per un incremento del 200%. Dall'altro estremo, un tempo di ritorno di 100 anni assume un valore di 120 anni in conseguenza di una variazione di +20%, che sale a 300 anni quando la variazione attesa è pari a +200%. In caso di variazione negativa, le variazioni ipotizzate in Tabella 16 sono ovviamente inferiori, in valore assoluto, al 100%, non potendo la probabilità attingere un valore pari a 0. In questo caso, per un tempo di ritorno di 2 anni, il valore scende a 1.6 per un decremento del 20%, a 0.4 per un decremento dell'80%; un tempo di ritorno di 100 anni scende invece a 80 per un decremento del 20%, a 20 per un decremento dell'80%.

Tabella 14: Valori del tempo di ritorno (anni) corrispondenti a prefissati incrementi e decrementi rispetto ai valori di riferimento.

T \ ΔT	20%	40%	60%	80%	100%	150%	200%
2	2.4	2.8	3.2	3.6	4	5	6
5	6	7	8	9	10	12.5	15
10	12	14	16	18	20	25	30
50	60	70	80	90	100	125	150
100	120	140	160	180	200	250	300
T \ ΔT	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%
2	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4
5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
10	8	7	6	5	4	3	2
50	40	35	30	25	20	15	10
100	80	70	60	50	40	30	20

Riprendendo quanto già discusso in precedenza, la stima della variazione percentuale di T presenta alcune problematiche, laddove per alcune catene modellistiche le curve di probabilità schematizzate in Figura 3 presentano un andamento così tendente all'orizzontale che il tempo di ritorno può assumere, a parità di

portata, valori elevatissimi, anche tendenti a infinito. Ciò si verifica, nel caso in esame, soltanto per alcuni bacini, soltanto per alcune catene modellistiche e soltanto per $T = 50$ e $T = 100$ anni. Il bacino più affetto risulta quello del Pertusillo, per il quale, sotto RCP 8.5, ben 3 catene su 8 presentano tale problematica. Di conseguenza, per una stima più attendibile della variazione di T , si è preferito escludere dal calcolo tali valori anomali, con l'accorgimento che, laddove un'anomalia fosse presente per uno specifico bacino e una specifica catena modellistica, la catena fosse esclusa del tutto per quello scenario anche in riferimento ai tempi di ritorno più bassi. La “pulizia” così eseguita è stata, naturalmente, limitata ai casi più estremi (si noti che l'identificazione degli *outlier*, ovvero delle anomalie, presenta sempre un margine di soggettività qualunque sia il criterio adottato; Padulano & Del Giudice 2020).

Per quanto detto, il minore grado di affidabilità nella stima di ΔT rispetto a quella di ΔQ , a causa della particolare forma delle curve di probabilità, ha anche come conseguenza che si verifichino occasionalmente dei bias nella stima dell'ensemble mean. È possibile, infatti, che in una particolare condizione (specifici scenario, catena modellistica, tempo di ritorno, bacino) si abbia, ad esempio, una variazione negativa (caso isolato) ΔQ piccola, associata ad una variazione giustamente positiva ΔT molto elevata a causa di una “anomalia” come quella descritta. Si supponga che per quello stesso bacino, scenario e tempo di ritorno le altre catene modellistiche forniscano ΔQ positive (caso tipico) e variazioni ΔT negative: nell'effettuare l'ensemble mean inter-modello, è possibile che la media della variazione di portata rimanga positiva, mentre la media della variazione di frequenza risulti positiva anch'essa (non coerente dunque con la variazione di portata), “trascinata” dal singolo valore positivo molto grande. È quanto accade, ad esempio, per il bacino di Monte Cotugno sotto RCP 2.6 e RCP 4.5 ($T = 100$ anni), oppure per il Locone sotto RCP 8.5 ($T = 50$ e 100 anni).

Ricordando dalla Nota metodologica che ad una variazione positiva di portata estrema deve corrispondere una variazione negativa del tempo di ritorno, gli incrementi localmente attesi per alcuni bacini per i tempi di ritorno più alti si possono appunto spiegare con tale considerazione. Fatto dunque salvo per queste eccezioni, ciò che si nota è un pattern piuttosto erratico della variazione in frequenza, con i valori più alti associati, comunque, ai tempi di ritorno più alti e allo scenario RCP 8.5. Le variazioni attese sotto RCP 2.6 risultano invece essere, in media, le minime. Le incertezze associate alla stima della variazione in frequenza sono confrontabili con quelle associate alla stima della variazione di portata estrema, se non più basse: ciò è coerente con l'osservazione che in questo caso la variabilità della differenza percentuale è dovuta alla sola variabilità del valore futuro di frequenza, poiché il riferimento è fisso (2, 5, 10, 50 o 100 anni). Tuttavia, si attingono localmente valori estremamente elevati (più elevati dei massimi nelle Tabelle da 3 a 7), non del tutto spiegabili con variazioni attese prossime allo zero (che è il solo caso di Traversa Sarmento sotto RCP 2.6 per $T = 100$ anni).

3.3 Sintesi dei risultati per bacino e per tempo di ritorno

Per facilitare l'interpretazione dei risultati, e soprattutto per esplicitare il ruolo dello scenario di concentrazione, appare utile mediare i risultati, in termini di ensemble mean delle variazioni attese sia di portata sia di frequenza, per singolo bacino ovvero per singolo tempo di ritorno. A tale scopo, le Tabelle 15 e 16 presentano una sintesi dell'ensemble mean della variazione percentuale di portata ΔQ da attendersi in futuro per ogni bacino (media tra i tempi di ritorno) e per ogni tempo di ritorno (media tra i bacini). Dalla Tabella 15 si evince che il bacino su cui, in media, si attendono le maggiori variazioni è il Locone, per tutti gli scenari, seguito da Monte Cotugno sotto lo scenario RCP 4.5, da Conza sotto lo scenario RCP 4.5, da Traversa Santa Venere sotto lo scenario RCP 2.6. Tutte queste variazioni sono significative se si considera il valore di riferimento medio, sebbene quest'ultimo nasconde una forte variabilità con il tempo di ritorno (Tabelle da 3 a 7). Il bacino in cui le variazioni attese sono in media minori è il Pertusillo sotto gli scenari RCP 4.5 e 8.5,

Fortore sotto RCP 8.5. Dalla Tabella 16 si evince come invece, in media sul territorio, la variazione (sempre positiva) aumenti all'aumentare di T , raggiungendo i valori massimi sotto lo scenario RCP 2.6.

Tabella 15: Mediamente in frequenza (tra i tempi di ritorno), ensemble mean del percentile di portata giornaliera massima annuale sul periodo di riferimento, in [mc/s], ensemble mean ΔQ della variazione percentuale attesa e coefficiente di variazione CV associato, per i vari bacini e per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		ΔQ (%)	CV (-)	ΔQ (%)	CV (-)	ΔQ (%)	CV (-)
Conza	56.1	38.6	1.3	57.2	1.5	36.2	1.8
Locone	103.5	403.7	2.1	160.3	1.1	303.1	2.0
Monte Cotugno	167.8	48.9	1.4	49.0	1.2	35.3	1.2
Fortore	99.6	38.5	2.2	22.0	2.7	10.4	6.0
Pertusillo	53.2	27.5	2.4	9.1	7.0	12.8	4.4
Traversa Agri	134.9	47.0	1.5	32.6	1.0	36.2	1.4
Traversa Santa Venere	134.3	46.3	1.4	33.5	1.3	38.7	1.0
Traversa Sarmento	70.6	31.1	1.9	48.6	1.5	35.4	2.6

Tabella 16: Mediamente sul territorio (tra i bacini), ensemble mean del percentile di portata giornaliera massima annuale sul periodo di riferimento, in [mc/s], ensemble mean ΔQ della variazione percentuale attesa e coefficiente di variazione CV associato, per i vari tempi di ritorno e per i tre scenari di concentrazione.

T anni	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		ΔQ (%)	CV (-)	ΔQ (%)	CV (-)	ΔQ (%)	CV (-)
2	30.4	19.6	1.5	24.3	1.2	19.3	2.7
5	50.2	27.8	1.5	29.7	1.2	23.3	1.7
10	68.6	39.9	1.7	36.2	1.5	31.2	2.5
50	145.4	121.5	2.0	69.4	3.2	89.9	2.8
100	218.0	217.1	2.1	98.1	3.7	153.9	3.0

Per quanto riguarda l'incertezza, come detto i valori medi di CV risultano piuttosto alti, sebbene non drammatici. In particolare, a scala di bacino il Pertusillo è quello associato al valore maggiore di incertezza (mediamente tra i tre scenari), seguito dal Fortore; a scala di tempo di ritorno, i valori medi di CV crescono all'aumentare di T e sono quindi massimi per $T = 100$ anni. Dall'osservazione simultanea delle Tabelle 15 e 16 si può desumere che, in media tra i bacini e i tempi di ritorno, lo scenario RCP 2.6 è quello associato alle variazioni attese maggiori, seguito da RCP 8.5 e infine da RCP 4.5. Parallelamente, lo scenario RCP 2.6 è quello associato alla minore incertezza, in media, seguito però da RCP 4.5 e infine da RCP 8.5.

Allo stesso modo, le Tabelle 17 e 18 presentano una sintesi dell'ensemble mean della variazione percentuale di tempo di ritorno ΔT da attendersi in futuro per ogni bacino (media tra le portate di riferimento) e per ogni portata di riferimento (media tra i bacini). Si evince come, in media, la variazione (sempre negativa) sia massima (in valore assoluto) per quelle portate associate oggi a tempi di ritorno intermedi (in particolare $T = 10$ anni), raggiungendo i valori massimi (sempre in valore assoluto) sotto lo scenario RCP 4.5. Il bacino su cui, in media, si attendono le maggiori variazioni è Agri sotto RCP 4.5, Traversa Sarmento sotto RCP 8.5 e Traversa Santa Venere sotto RCP 8.5. I bacini in cui le variazioni attese sono in media minori sono Conza, Locone e Fortore, tutti sotto RCP 8.5.

Per quanto attiene l'incertezza, il valore massimo di CV (mediamente sui tempi di ritorno) si ha per Traversa Sarmento sotto RCP 2.6, seguito da Locone sotto lo stesso scenario; mediamente tra i vari scenari, è Traversa Sarmento ad essere il bacino caratterizzato dalla maggiore incertezza, seguito da Traversa Santa Venere. A scala di tempo di ritorno, l'incertezza è minima per quei tempi di ritorno intermedi per i quali si hanno le maggiori variazioni attese, per tutti gli scenari; l'incertezza maggiore è invece associata al tempo di ritorno di 100 anni sotto RCP 2.6 e 4.5, al tempo di ritorno di 2 anni sotto RCP 8.5. Dall'osservazione simultanea delle

Tabelle 17 e 18 si può desumere che, in media tra i bacini e i tempi di ritorno, lo scenario RCP 4.5 è quello associato alle maggiori variazioni, seguito da RCP 8.5 e infine RCP 2.6. Parallelamente, lo scenario RCP 4.5 è quello associato a un'incertezza tra le minori (appena più alta dello scenario RCP 8.5), in media, seguito da RCP 8.5 e infine da RCP 2.6. Si noti che in Tabella 17 il valore di riferimento medio (pari a 33 anni) è la media dei cinque tempi di ritorno considerati.

Tabella 17: Mediamente in frequenza (tra i tempi di ritorno), tempo di ritorno di riferimento, in [anni], ensemble mean ΔT della variazione percentuale attesa e coefficiente di variazione CV associato, per i vari bacini e per i tre scenari di concentrazione.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		ΔT (%)	CV (-)	ΔT (%)	CV (-)	ΔT (%)	CV (-)
Conza	33	-19.9	4.1	-18.9	5.1	1.9	3.2
Locone	33	-7.1	9.0	-30.9	0.8	3.7	6.2
Monte Cotugno	33	-11.2	2.9	-18.4	5.0	-36.1	0.8
Fortore	33	-10.8	5.7	-28.6	1.0	4.1	7.1
Pertusillo	33	-25.1	2.1	-19.3	2.3	-34.7	1.0
Traversa Agri	33	-27.0	1.6	-28.8	1.5	-8.1	5.4
Traversa Santa	33	-22.1	16.1	-23.4	4.9	-40.5	0.7
Traversa Sarmento	33	-6.3	49.3	-31.9	8.1	-35.5	2.4

Tabella 18: Mediamente sul territorio (tra i bacini), tempo di ritorno di riferimento, in [anni], ensemble mean ΔT della variazione percentuale attesa e coefficiente di variazione CV associato, per i vari bacini e per i tre scenari di concentrazione.

Q [mc/s]	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		ΔT (%)	CV (-)	ΔT (%)	CV (-)	ΔT (%)	CV (-)
Q(T = 2 anni)	2	-11.4	3.6	-14.4	5.3	-10.4	5.7
Q(T = 5 anni)	5	-21.5	2.5	-28.1	0.8	-23.9	1.5
Q(T = 10 anni)	10	-25.8	2.3	-34.4	0.7	-30.1	1.2
Q(T = 50 anni)	50	-19.3	5.6	-31.5	2.3	-23.8	5.3
Q(T = 100 anni)	100	-2.8	42.7	-16.7	8.8	-2.7	3.1

4. Discussione

Le analisi riportate nel presente documento sono caratterizzate da una serie di criticità che devono essere ben comprese per poter utilizzare i risultati in modo efficace e consapevole.

Un elemento che contribuisce non poco alla difficoltà nell'interpretazione dei risultati è l'incertezza associata alla stima delle due tipologie di variazione. Sicuramente, per la stima della variazione di portata, appare un chiaro pattern di crescita dell'incertezza (espressa dal coefficiente di variazione) al crescere della severità dello scenario e del tempo di ritorno. Per quanto riguarda la stima della variazione di frequenza, invece, il ruolo dello scenario è opposto, e il ruolo del tempo di ritorno è più erratico. Dal punto di vista spaziale, si può dire che a valori alti di CV relativo a ΔQ corrispondono – quasi sempre – valori alti di CV relativo a ΔT ; tuttavia, in alcune condizioni il primo è maggiore del secondo, in altre accade l'opposto, senza un pattern preciso. È da notare però che le due tipologie di incertezza non sono completamente confrontabili, poiché, per le frequenze, si è deciso di rimuovere quei casi in cui la stima di ΔT è stata ritenuta completamente inattendibile. Di contro, per le stesse condizioni (bacino, scenario, catena modellistica, tempo di ritorno) la corrispondente stima di ΔQ è stata mantenuta. Di conseguenza, il numero di dati per il calcolo dell'ensemble mean e della deviazione standard (e quindi del coefficiente di variazione) è diverso per le due variabili. Inoltre, nel caso delle frequenze il valore di riferimento è certo. Sempre a proposito dell'incertezza, si noti che in media tra i bacini e i tempi di ritorno il coefficiente di variazione relativo alla variazione di portata risulta alquanto analogo rispetto al valore associato alla stima della variazione di tempo di ritorno. Tuttavia, per quest'ultimo, tale media è il frutto della combinazione di valori di CV localmente molto bassi e molto alti, mentre i singoli valori di CV per la variazione di portata estrema sono più omogenei.

Una fonte importante di incertezza è quella legata alla scelta del modello probabilistico GEV. I risultati dell’analisi probabilistica presentati in Appendice I dimostrano che il modello GEV è da preferirsi al modello Gumbel in tutti i casi, apportando dunque un notevole miglioramento al dataset di portate estreme fornito dalla piattaforma Copernicus C3S (per quanto il modello Gumbel si sia dimostrato del tutto inadatto solo in pochi casi). Non è però scopo di questo lavoro dimostrare se e fino a che punto GEV sia il modello migliore possibile, e, in alcuni casi, come il bacino del Locone e del Fortore, anche il modello GEV presenta una discrepanza con i dati sperimentali. Il diverso valore di *goodness of fit* associato a ciascuna combinazione bacino-scenario-catena modellistica impatta sulle singole stime di portata e tempo di ritorno, contribuendo alla disomogeneità nella distribuzione dell’incertezza. È inoltre possibile che proprio nei casi in cui il *fitting* sia stato meno soddisfacente la stima di ΔT sia risultata così anomala da essere esclusa dall’analisi. A rigore, ciò comporta anche un’anomalia nella stima di ΔQ per la stessa combinazione: tuttavia, non essendo state rilevate in tal senso anomalie particolarmente apprezzabili, si è scelto di conservare, per la stima di ΔQ , il maggior numero di dati possibili.

Il dataset investigato è il frutto dell’applicazione di modelli idrologici che vedono, in input, proiezioni bias-corrette di precipitazione e temperatura. Pertanto, i risultati sono a rigore analizzabili in valore assoluto, ovvero in termini di portate medie sul periodo di riferimento e sul periodo futuro. Tuttavia, nel presente documento si è scelto di rappresentare i risultati in termini di variazione climatica (ovvero come differenza percentuale dei valori tra il periodo futuro e quello di riferimento), ritenendo tale informazione più credibile a causa delle elevate semplificazioni nel settaggio del modello idrologico, che è stato applicato alla scala pan-europea e non è dunque customizzato sui bacini di interesse. I singoli valori di portata estrema sono comunque riportati in Appendice II. Un altro importante motivo alla base della rappresentazione dei risultati è costituito dalla necessità di “isolare” il solo effetto del cambiamento climatico, giacché l’evoluzione futura di elementi quali le coperture, gli usi del suolo, le regolazioni antropiche, non è inclusa nella modellazione, rendendo i valori futuri di portata poco realistici in valore assoluto. Per i bacini oggetto di studio manca una raccolta sistematica e ufficiale dei dati di portata giornaliera che consenta un’ampia validazione del modello idrologico, e dunque non è possibile verificare in modo completo l’affidabilità dei risultati. Per quanto discusso, l’assenza di un riferimento esatto con cui confrontare i valori di portata attesi in futuro determina un’ulteriore fonte di incertezza, consistente nella variabilità della stima della portata media sul periodo presente, che, in generale, contribuisce all’elevata incertezza delle stime presentate in questa analisi. Tuttavia, il Progetto Ô⁶ (finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del programma Horizon 2020, e che vede AQP tra i partner) ha messo a disposizione della Convenzione serie di portate giornaliere per i bacini Conza, Locone, Monte Cotugno, Occhito e Pertusillo, che si intende adoperare a scopo di validazione sia per la presente attività, sia per l’attività CG01.49.1.15 relativa al target “Invasi – quantità”. La validazione sarà comunque parziale, sia perché non riguarda tutti i bacini, sia perché tali dati si riferiscono all’intervallo temporale 2010-2019, che dunque non si sovrappone con il periodo di riferimento. Sarà dunque necessario, per tale verifica, confrontare i dati osservati con serie di dati di portata giornaliera estranei ai campioni analizzati nel presente report.

La rappresentatività della variabile “portata giornaliera massima annuale” rispetto ai fenomeni di alluvioni estreme può essere legittimamente messa in discussione. A rigore, un proxy molto più rappresentativo di

⁶ <https://www.eu-project-o.eu/>

tale fenomeno è la portata al colmo di piena, ovvero il valore di portata più elevato raggiunto durante un evento alluvionale, che dunque può essere associato a eventi di pioggia estrema di valore e durata che però non sono noti a priori. In particolare, solitamente si considera che il massimo valore di portata al colmo di piena si abbia per un evento di pioggia di durata pari al tempo di corrievazione del bacino. Per i bacini in esame, è presumibile un valore del tempo di corrievazione certamente sub-giornaliero, e probabilmente sub-orario. Scale temporali così ridotte, però, mal si conciliano con la valutazione degli effetti del tempo di ritorno, che verrebbe considerata, dati gli strumenti modellistici utilizzati (modelli EURO-CORDEX), poco attendibile. Inoltre, il database di valori di portata fornito da C3S/SMHI e impiegato in questa attività non presenta analoghi a scale temporali più ridotte.

Nel presente documento la stima della variazione attesa in futuro sui percentili di portata giornaliera massima annuale per diversi tempi di ritorno è stata ritenuta utile ai fini di una valutazione del possibile aumento in frequenza e intensità dei fenomeni di dilavamento e trasporto solido, che potrebbero comportare un aumento dei pericoli di intorbidimento dell'acqua invasata, con conseguente aumento degli oneri di potabilizzazione, soprattutto in abbinamento a bassi di livelli di invaso, nonché di interramento dell'invaso. La rappresentatività di questo ultimo fenomeno da parte dell'indicatore considerato è estremamente qualitativa: cionondimeno, l'analisi può fornire risultati interessanti in abbinamento a ulteriori considerazioni legate, ad esempio, al possibile aumento nei volumi di materiale potenzialmente mobilitabile. Rispondendo ad una specifica esigenza, i risultati sono stati rappresentati anche in termini di variazione attesa nel tempo di ritorno, a parità di portata estrema. Tale rappresentazione è, in effetti, molto efficace, anche dal punto di vista comunicativo, per quantificare l'effetto del cambiamento climatico, dando un'idea immediata rispetto a quanto più spesso determinati eventi critici si troveranno ad accadere in futuro rispetto al presente. Tuttavia, a causa di motivi ampiamente discussi, le valutazioni riguardanti la variazione in frequenza risultano meno robuste rispetto a quelle riguardanti la variazione in intensità.

5. Conclusioni e messaggi chiave

La portata giornaliera massima annuale, riferita ai bacini aventi come sezioni di chiusura gli invasi oggetto di interesse, è considerata in questa attività come rappresentativa (“proxy”) dei pericoli connessi direttamente all'intorbidimento dell'acqua invasata, e meno direttamente all'interramento degli invasi. In altre parole, **una variazione positiva (aumento) di questa variabile rappresenta un aumento del pericolo di intorbidimento (ovvero di interramento) per effetto del cambiamento climatico**, ed è quindi ciò da cui ci si vuole cautelare; una variazione negativa (diminuzione) implica invece una diminuzione di questi pericoli per effetto del cambiamento climatico.

I risultati delle analisi presentate dipingono un quadro di difficile interpretazione, soprattutto volendo trarre conclusioni dall'interpretazione simultanea delle variazioni attese in futuro sui percentili di portata e sulle frequenze medie di superamento. Ad ogni modo, un messaggio che traspare chiaramente è che le variazioni stimate sulle due variabili puntano, mediamente, nella direzione di un aumento nella frequenza ed intensità degli eventi estremi di portata, come testimoniato dai valori quasi sempre negativi di ΔT e sempre positivi di ΔQ , rispettivamente. Facendo in particolare riferimento, per quanto già argomentato, alle variazioni di portata estrema, su tutto il territorio e per tutti i tempi di ritorno, tutti gli scenari comportano un aumento nella frequenza ed intensità degli eventi estremi di portata. **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.

In media sull'intero territorio analizzato, è da attendersi un notevole aumento dei percentili di portata (ovvero, un aumento del pericolo) soprattutto sotto RCP 2.6 (variazione media attesa dei +19.6% per $T = 2$ anni, di +217.1% per $T = 100$ anni), seguito da RCP 8.5 (+19.3% e +153.9% rispettivamente) e infine da RCP 4.5 (+24.3% e +98.1% rispettivamente). Tali aumenti sono rilevanti non soltanto in valore assoluto, ma anche perché sono associati a valori medi di riferimento piuttosto alti, che crescono all'aumentare del tempo di ritorno (ma che sono valori non trascurabili anche per $T = 2$ anni).

Analizzando invece il comportamento dei singoli bacini, il bacino che sperimenta (mediamente sui vari tempi di ritorno) il più grande aumento di portata estrema è Locone sotto tutti gli scenari e in particolare RCP 2.6. Tuttavia, esso presenta un valore di riferimento tra i più bassi tra tutti i bacini soprattutto se si guardano i tempi di ritorno inferiori (per tali tempi di ritorno, infatti, sussiste la naturale relazione diretta tra portate estreme e area del bacino, che invece viene a cadere per i tempi di ritorno più alti probabilmente a causa del fitting non perfetto dei modelli di probabilità). Invece, i due bacini che presentano il maggiore valore di riferimento per i tempi di ritorno bassi sono Monte Cotugno e Traversa Agri. Il primo invaso vede il maggiore aumento (+20.9% per $T = 2$ anni, +96.3% per $T = 100$ anni) sotto RCP 2.6, e anche il secondo (+19.2% e +92.6% rispettivamente).

Le variazioni (sempre positive) più modeste si verificano per Traversa Sarmento sotto RCP 8.5 (+1.4% per $T = 2$ anni), per Pertusillo sotto RCP 4.5 (+4% per $T = 100$ anni). Entrambi i bacini presentano comunque variazioni modeste rispetto agli altri per tutti gli altri scenari e tempi di ritorno.

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 di proiezioni, nella decisione di rappresentare i risultati come variazioni, e nel ridotto numero di catene di simulazione climatica utilizzate. Le motivazioni, le assunzioni e le limitazioni associate ai risultati qui presentati sono ampiamente descritte nella Nota metodologica e nella Discussione. Mediamente tra i bacini, a parità di scenario, risultano più robuste le stime riguardanti i tempi di ritorno più bassi; è però importante notare che le stime risultano più robuste sotto lo scenario RCP 2.6, per il quale sono previsti i maggiori aumenti del pericolo. È infine interessante notare che, in media tra i tempi di ritorno e gli scenari, i bacini per i quali le stime sono più robuste sono proprio Monte Cotugno e Traversa Agri, che vedono l'aumento più gravoso del pericolo.

Appendice I: Analisi degli estremi

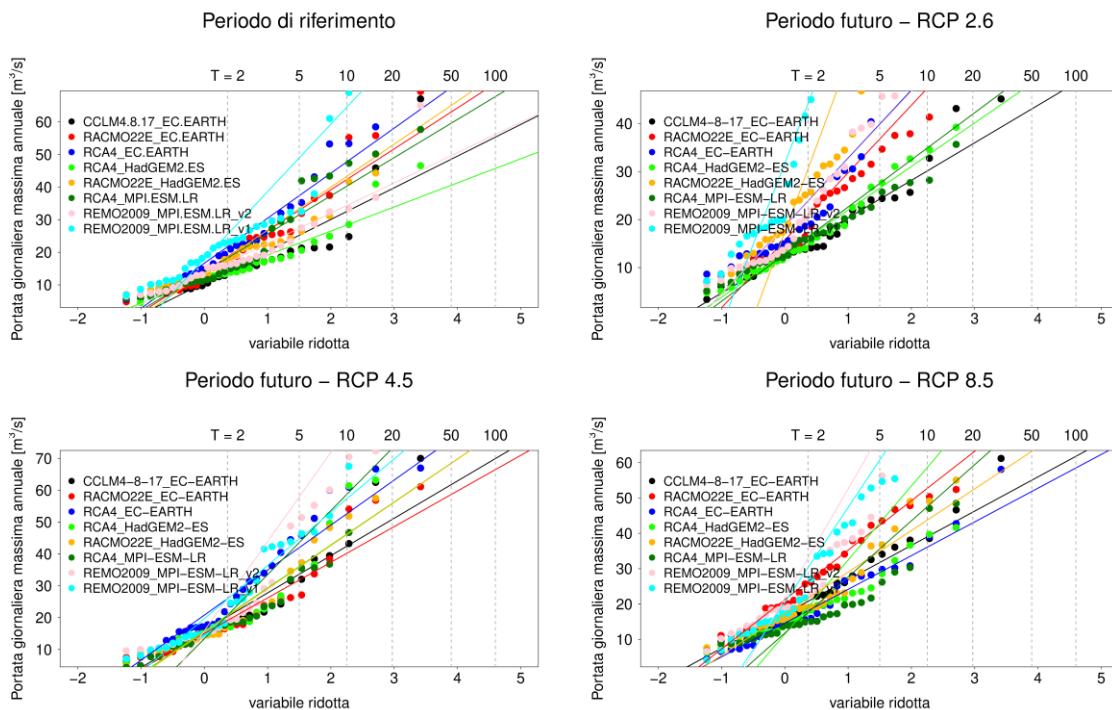
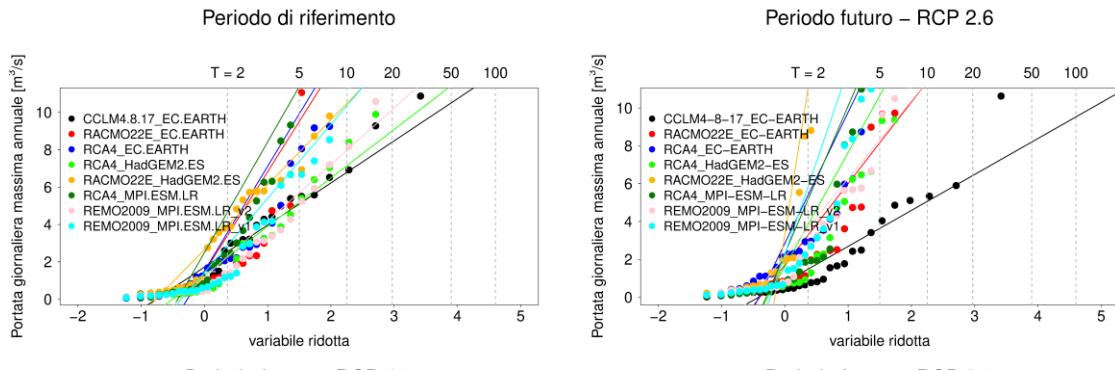


Figura A1. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Conza, per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.



Periodo futuro – RCP 4.5

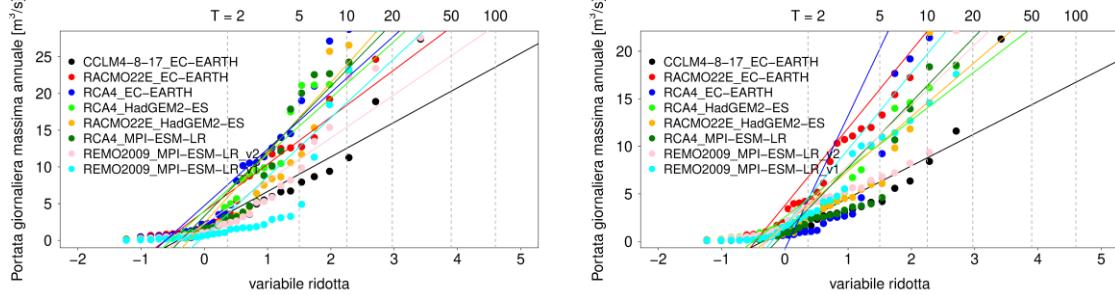


Figura A2. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Locone, per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

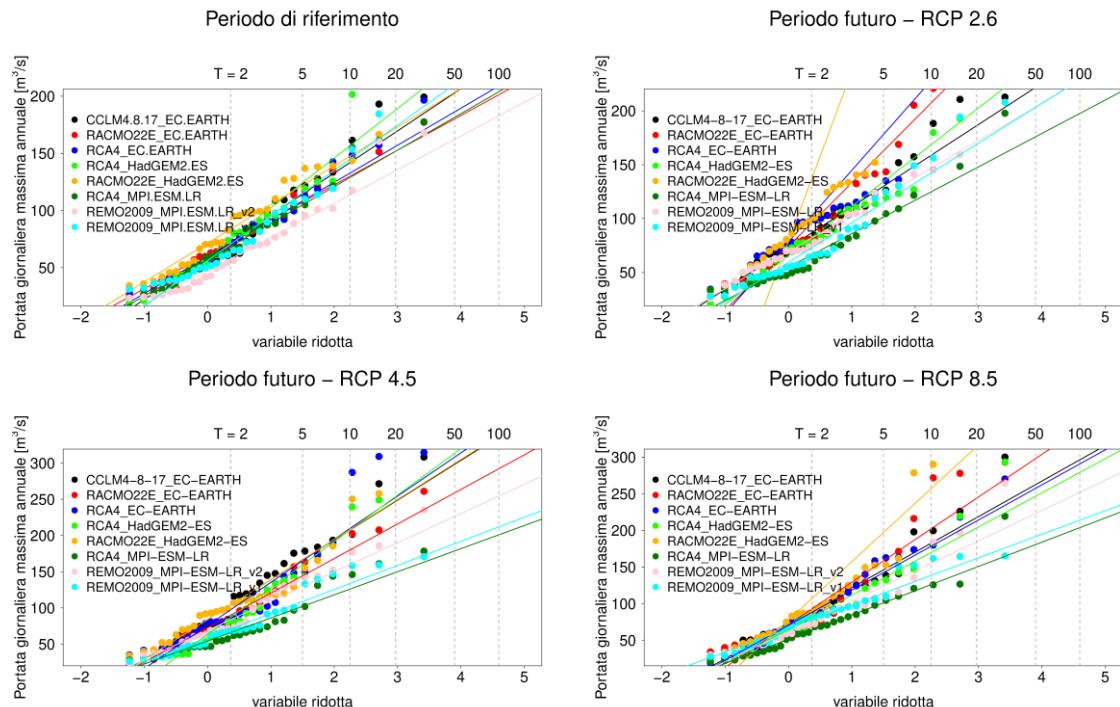
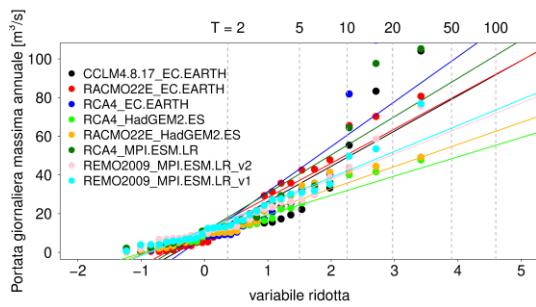
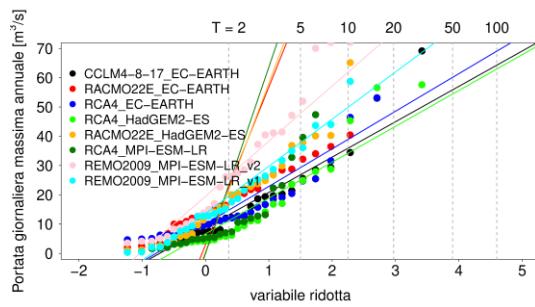


Figura A3. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Monte Cotugno per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

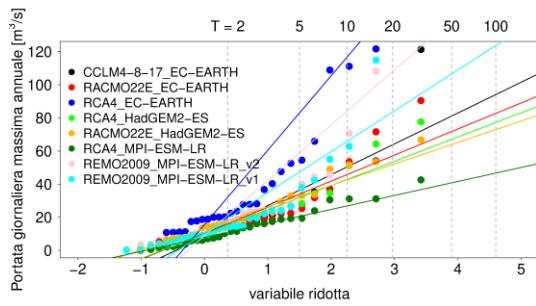
Periodo di riferimento



Periodo futuro – RCP 2.6



Periodo futuro – RCP 4.5



Periodo futuro – RCP 8.5

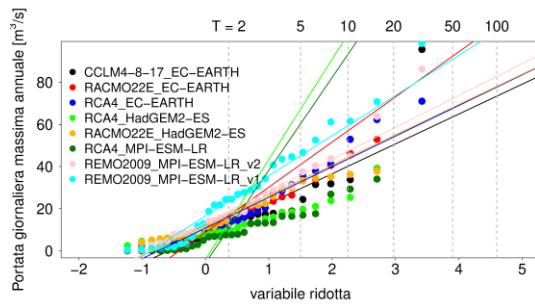
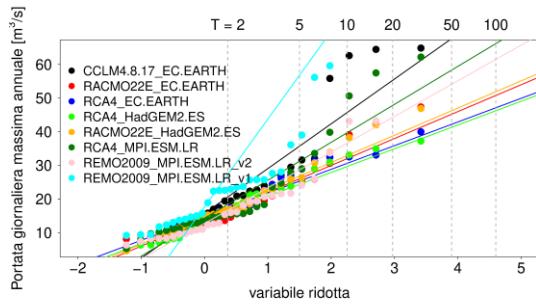
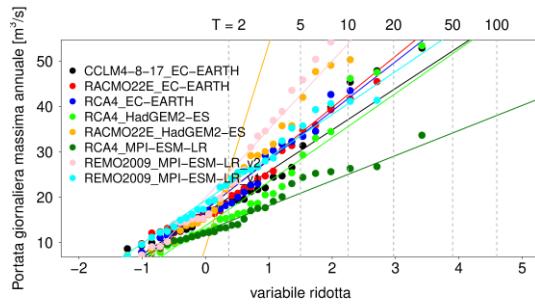


Figura A4. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Fortore per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

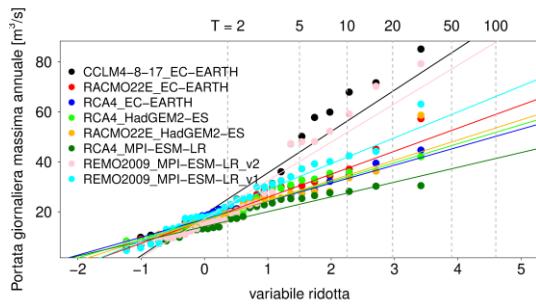
Periodo di riferimento



Periodo futuro – RCP 2.6



Periodo futuro – RCP 4.5



Periodo futuro – RCP 8.5

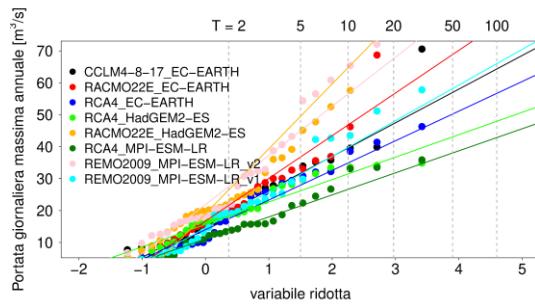


Figura A5. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Pertusillo per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

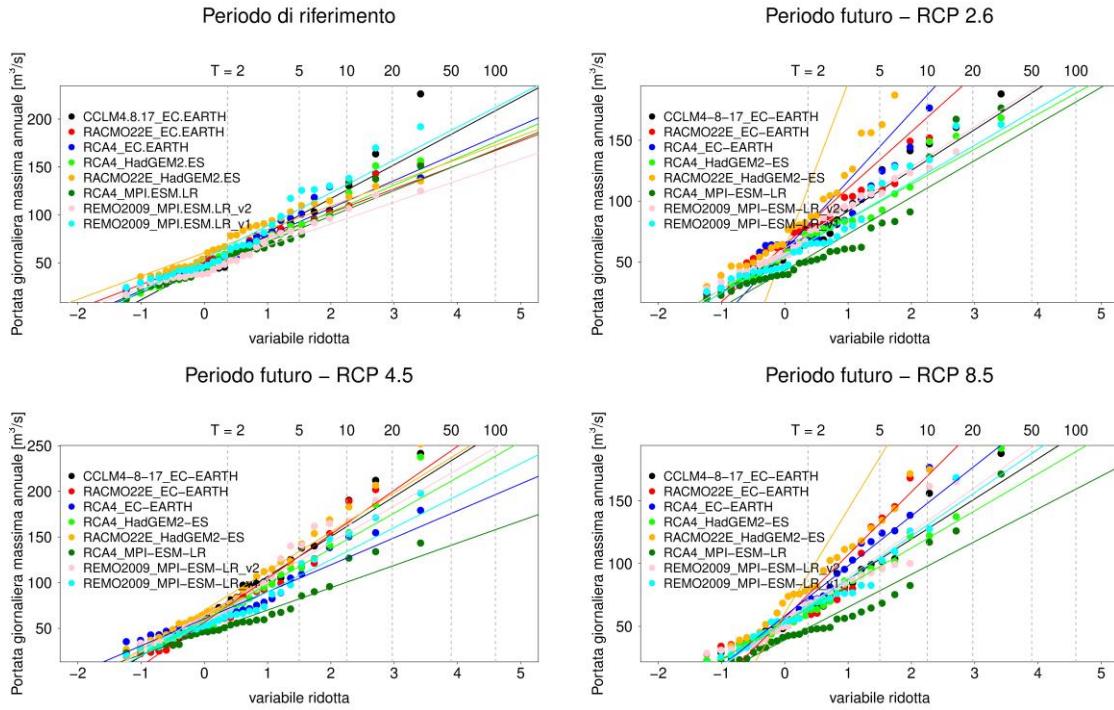


Figura A6. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Traversa Agri per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

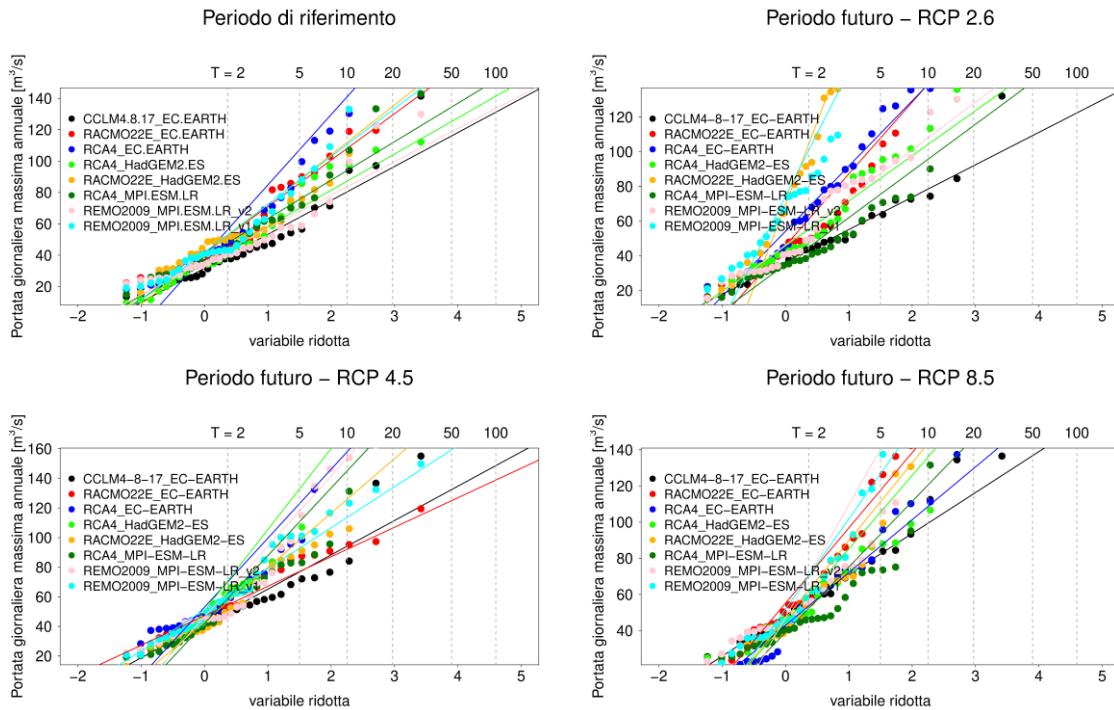


Figura A7. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Traversa Santa Venere per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

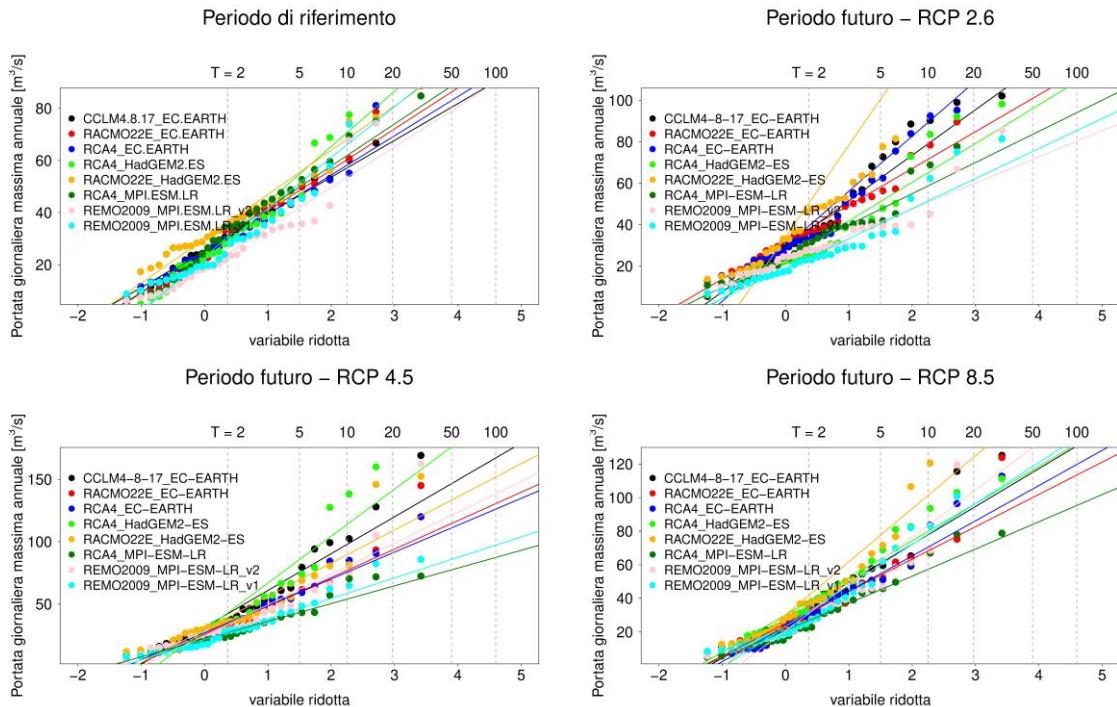


Figura A8. Carte probabilistiche di Gumbel per il bacino Traversa Sarmento per le diverse catene modellistiche, riferite al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

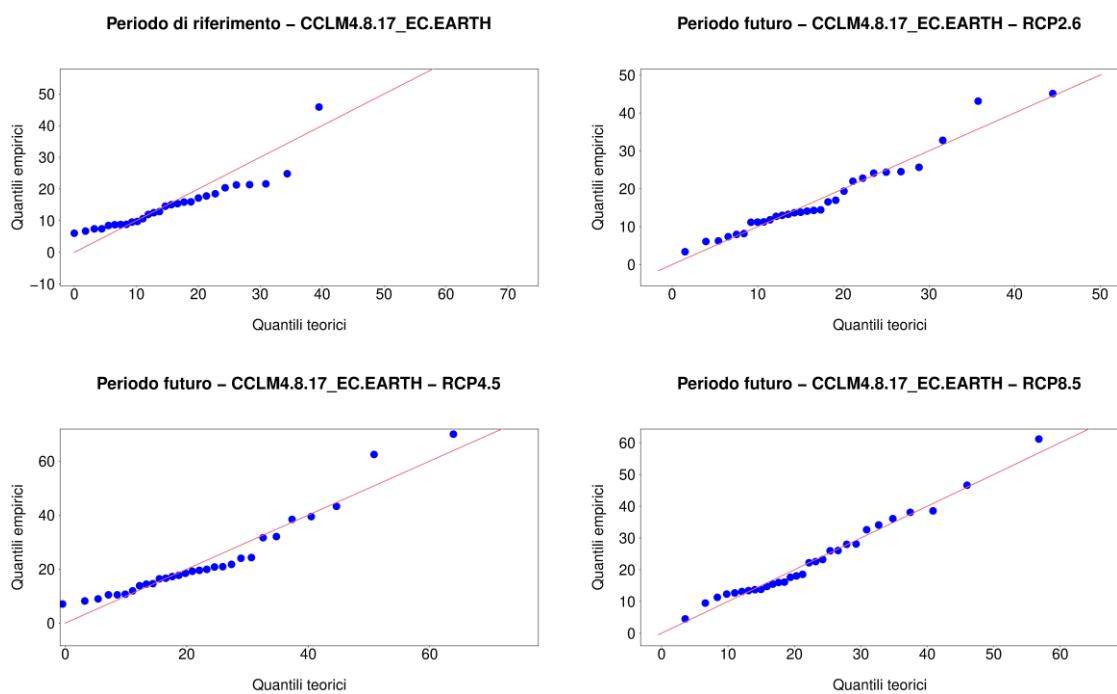


Figura A9. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Conza, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

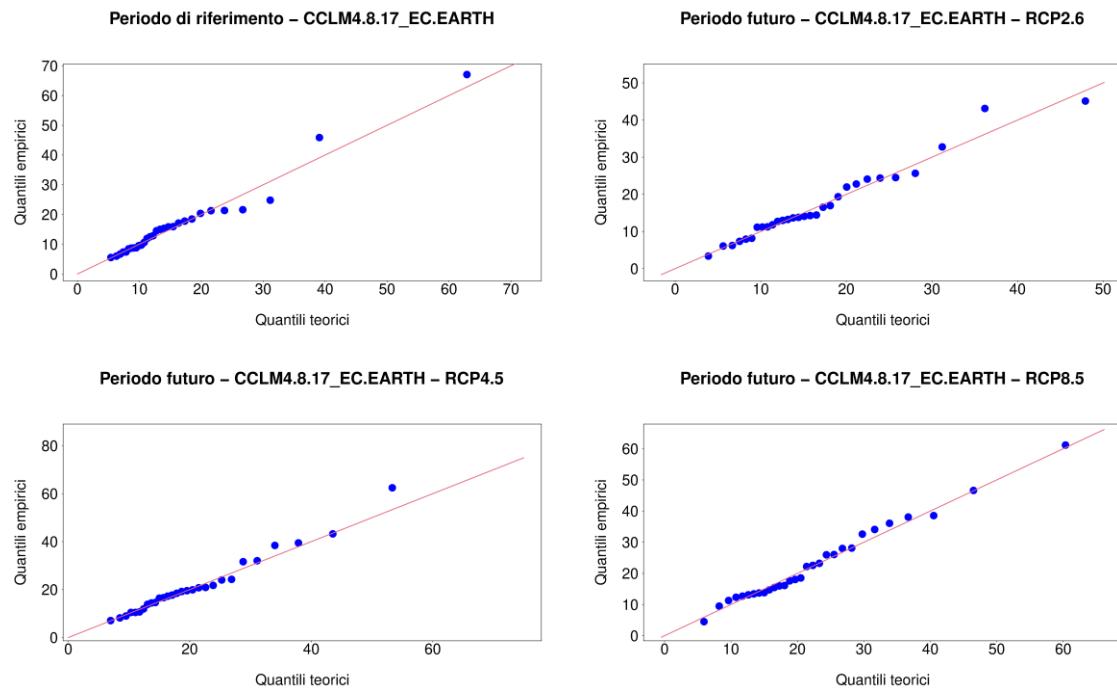


Figura A10. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Conza, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

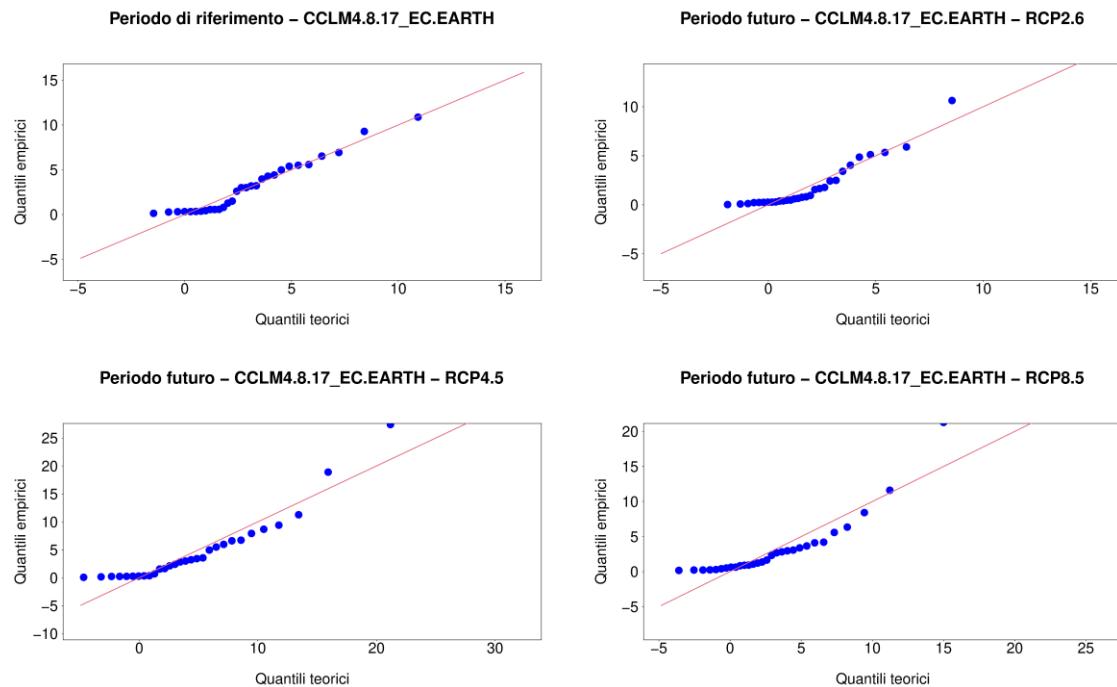


Figura A11. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Locone, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

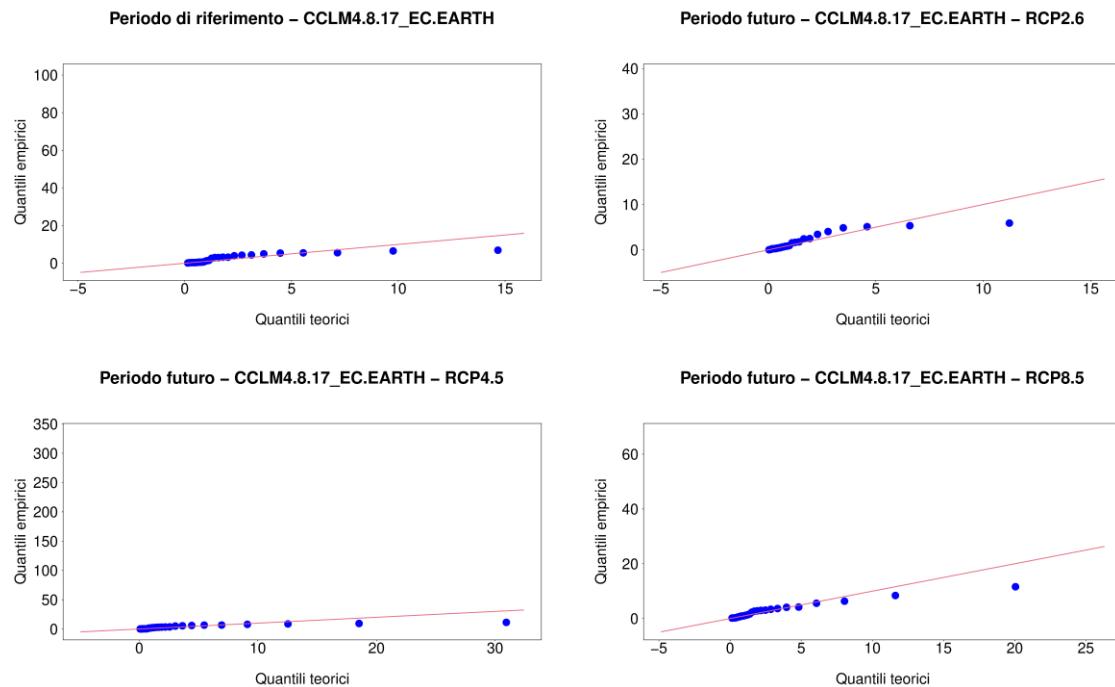


Figura A12. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Locone, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

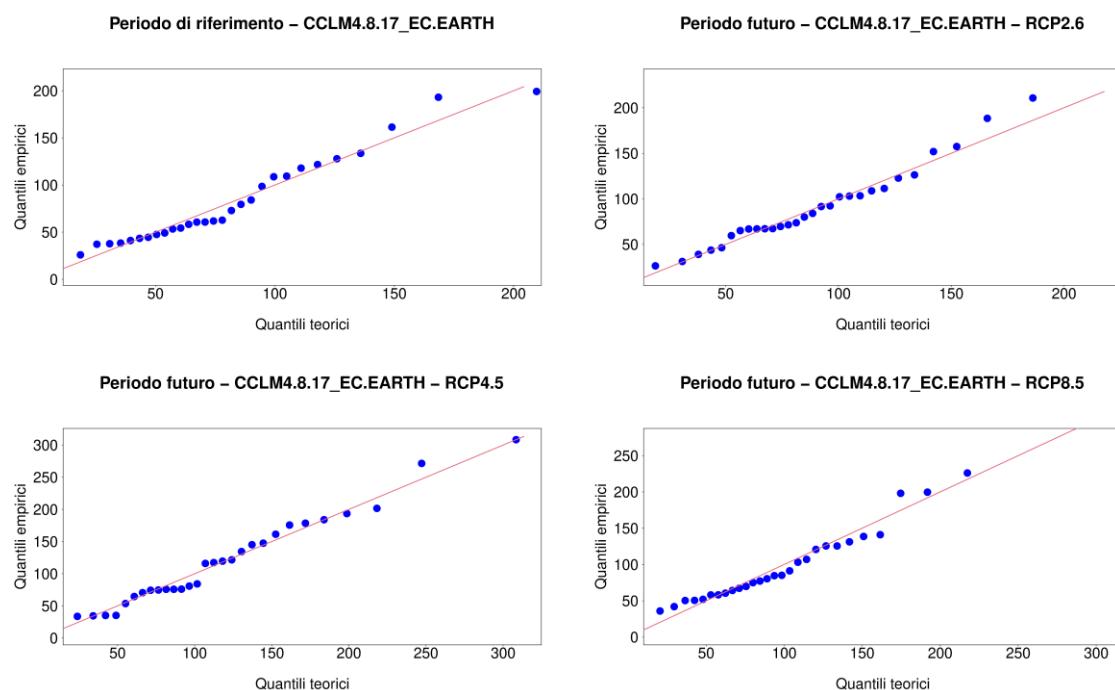


Figura A13. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Monte Cotugno, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

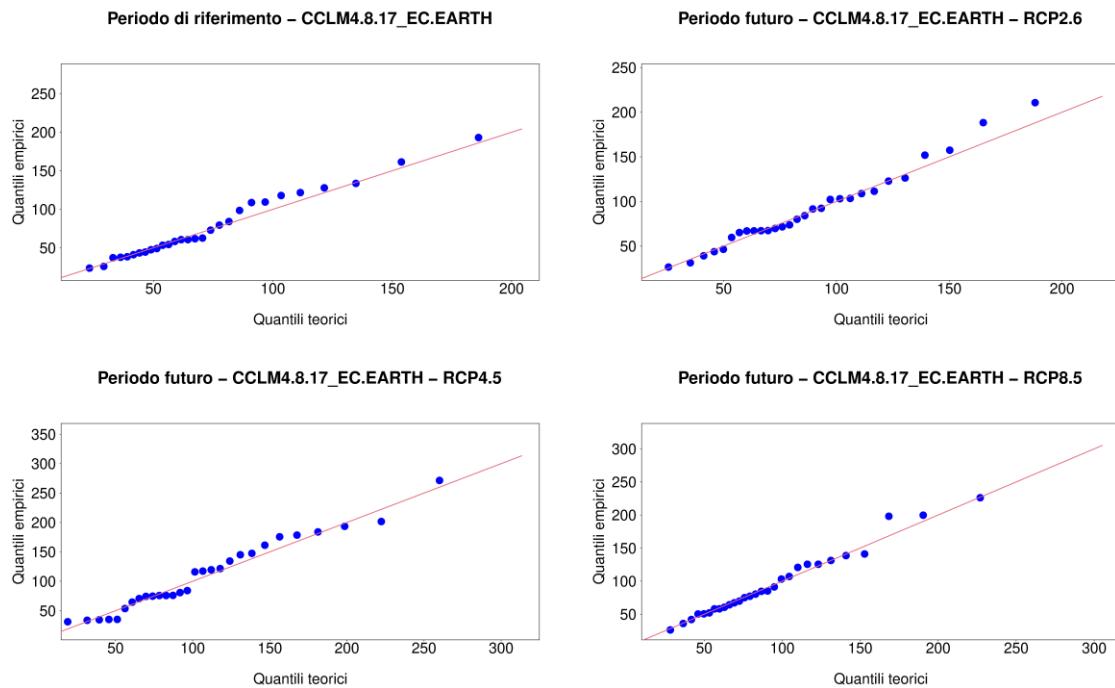


Figura A14. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Monte Cotugno, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

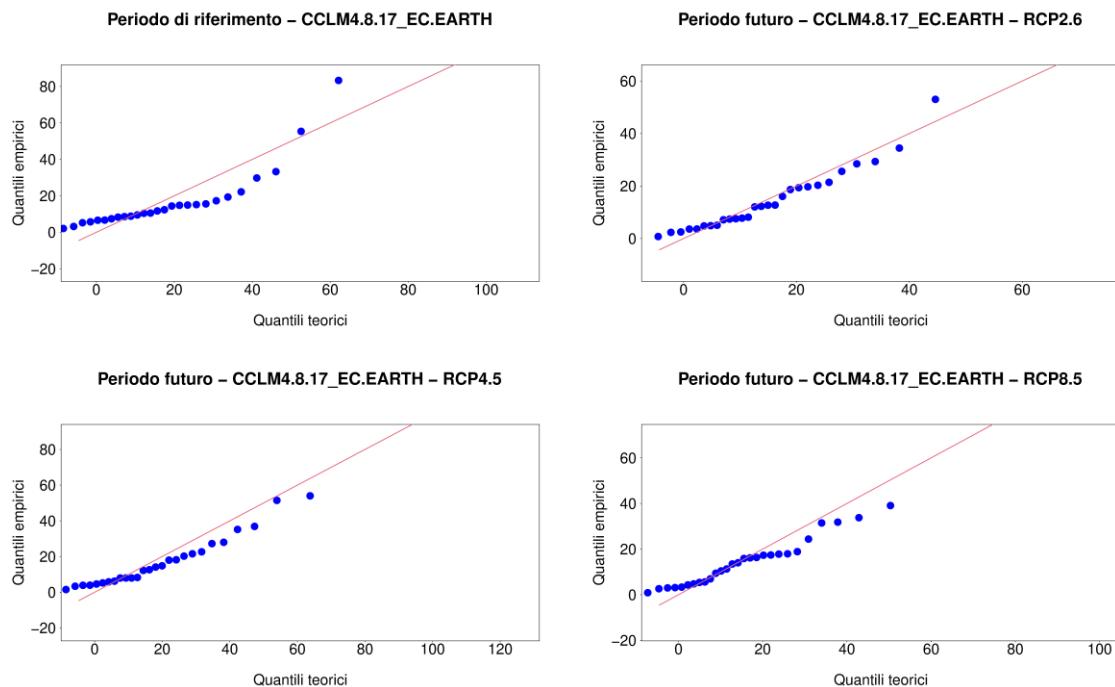


Figura A15. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Fortore, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

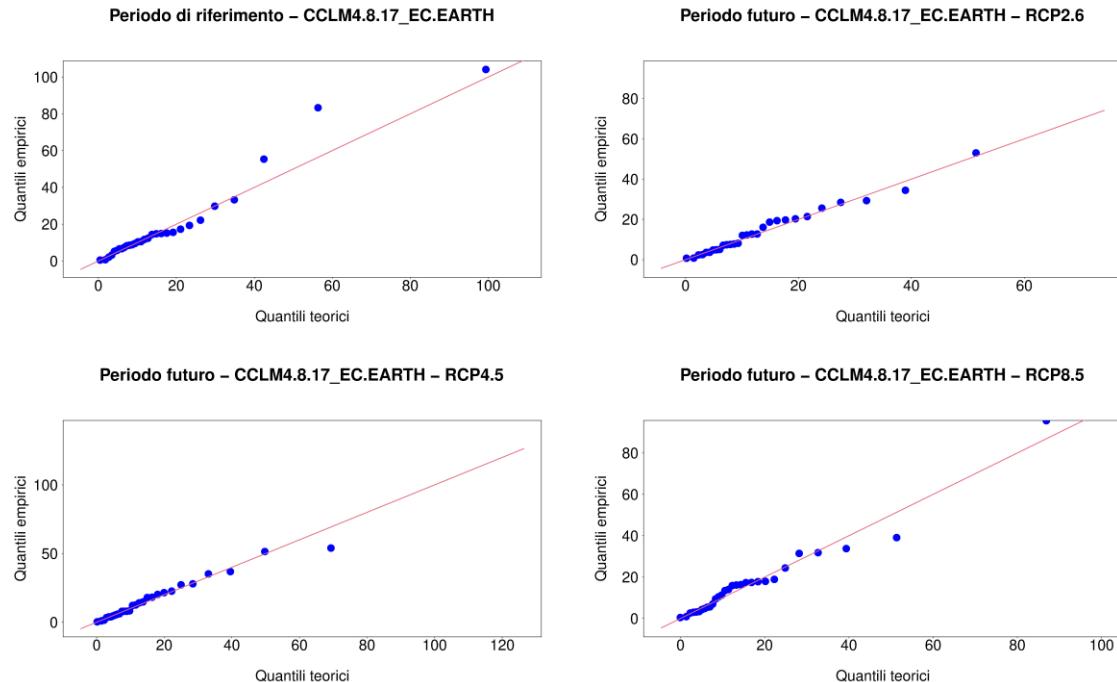


Figura A16. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Fortore, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

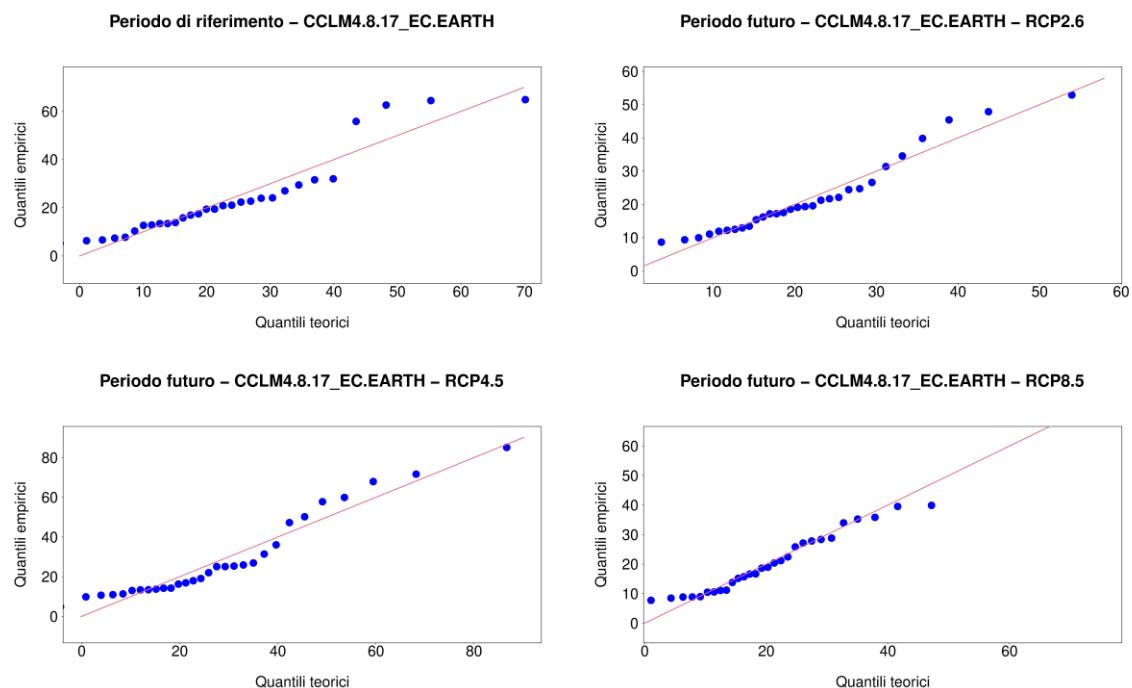


Figura A17. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Pertusillo, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

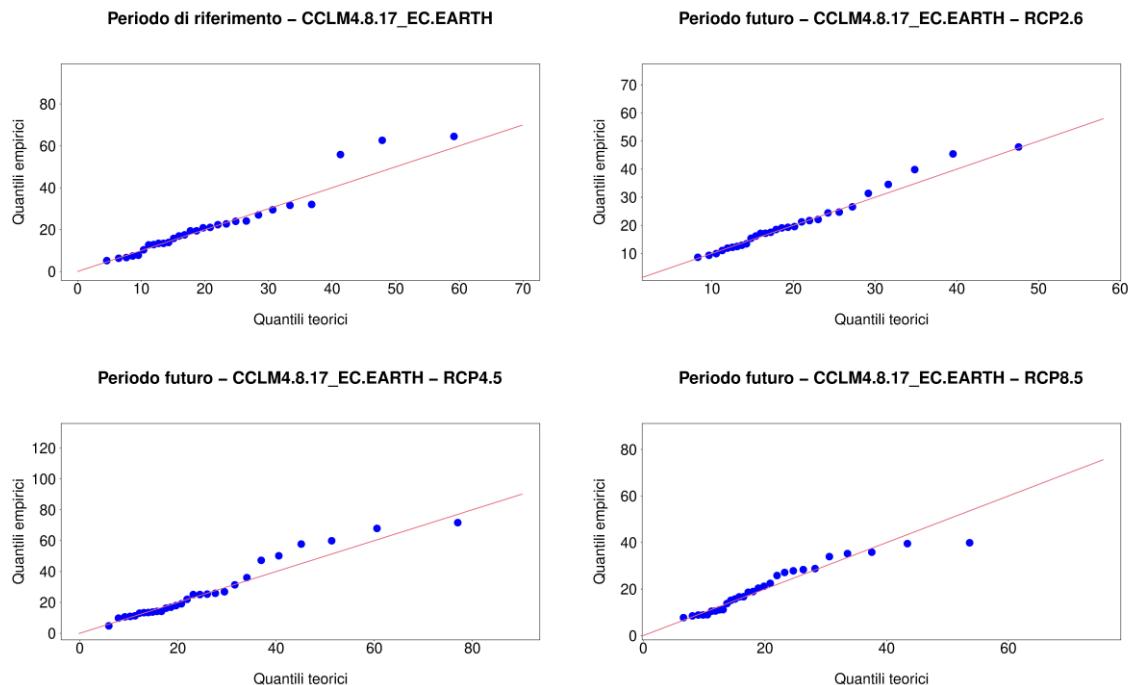


Figura A18. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Pertusillo, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

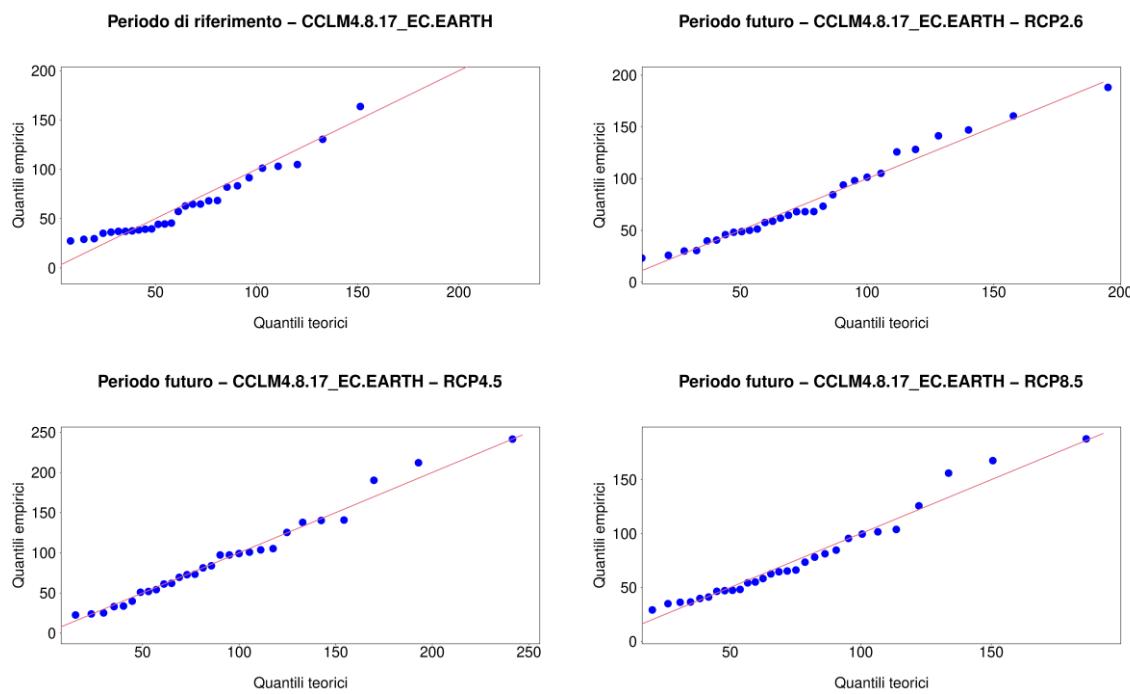


Figura A19. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Traversa Agri, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

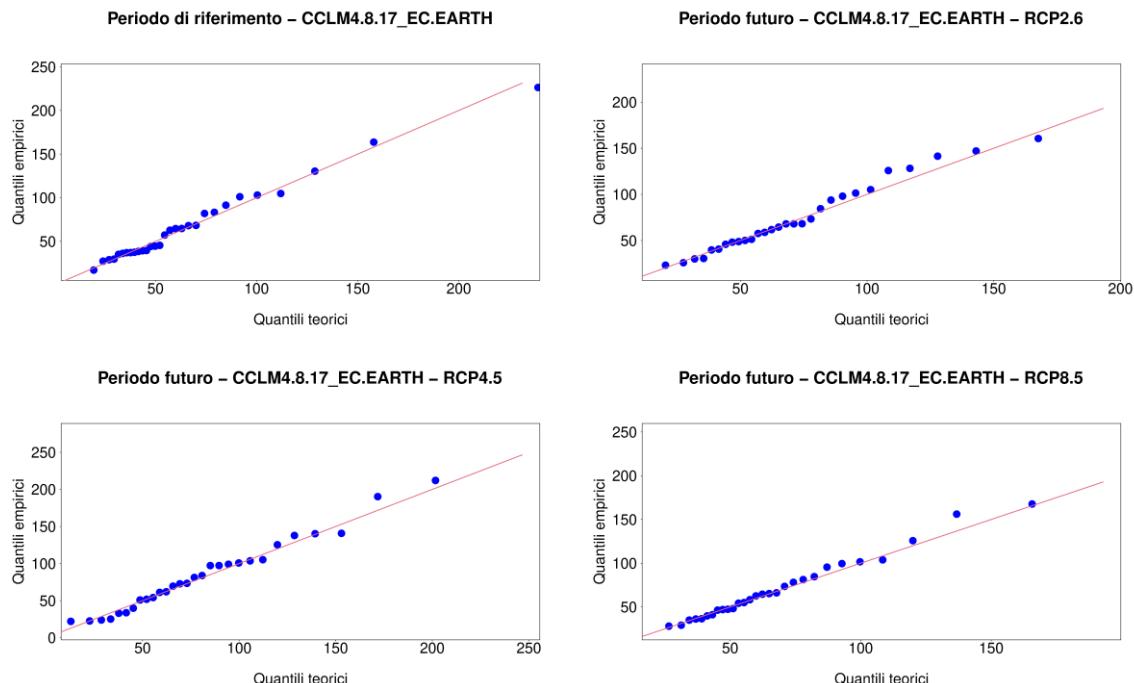


Figura A20. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Traversa Agri, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

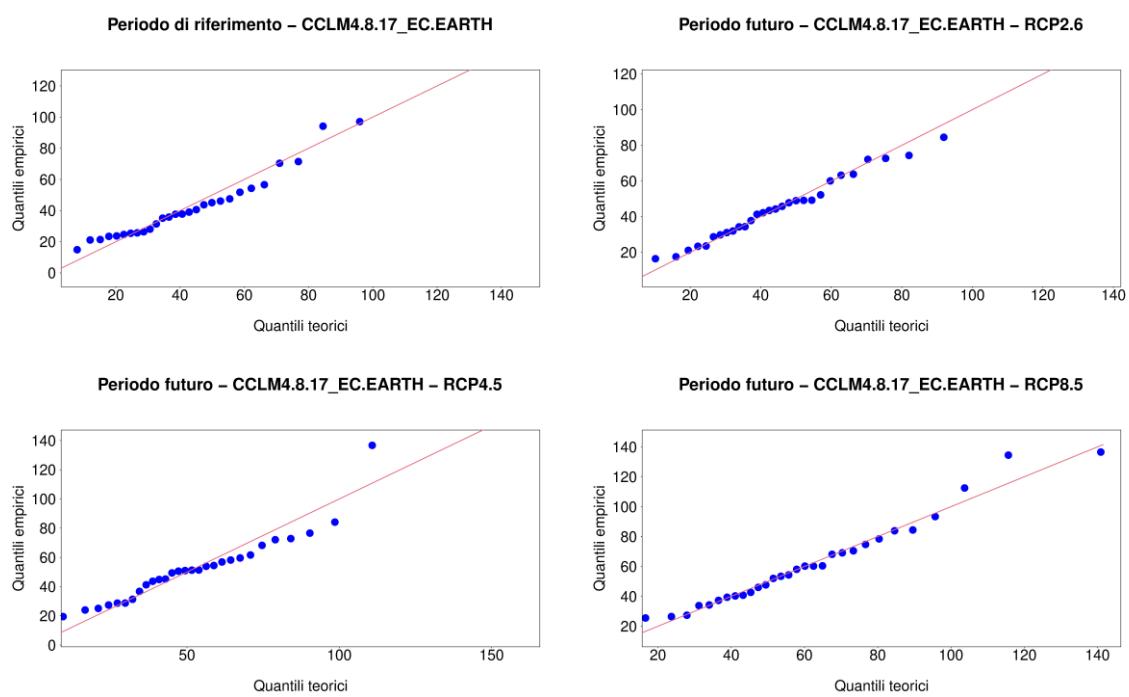


Figura A21. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Traversa Santa Venere, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

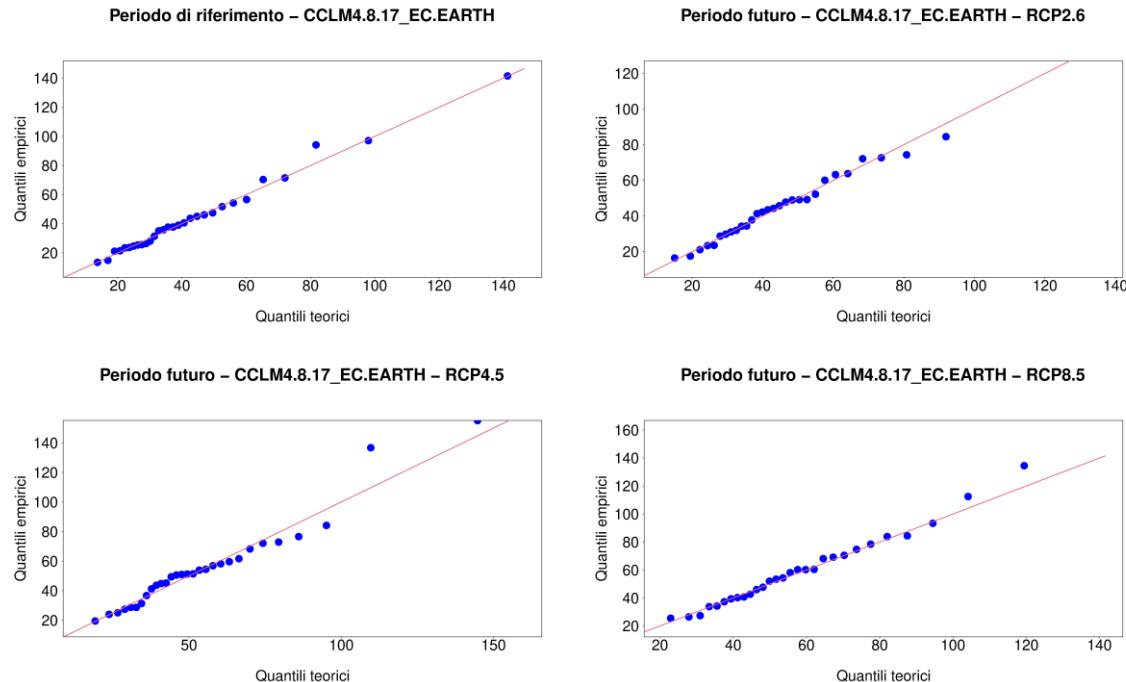


Figura A22. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Traversa Santa Venere, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

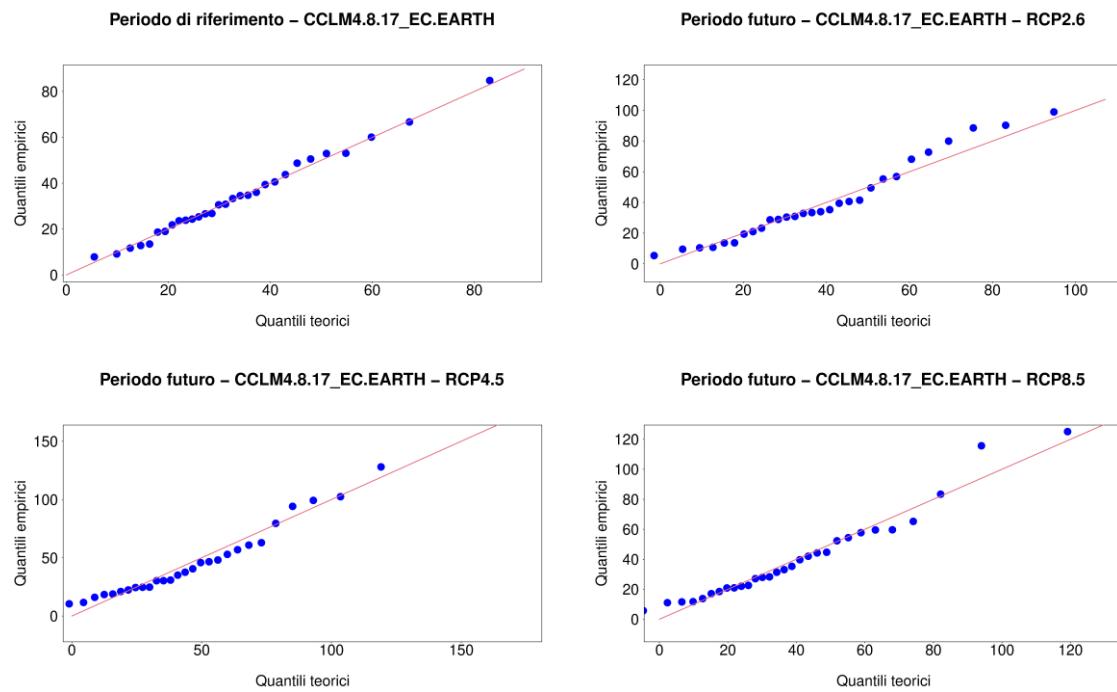


Figura A23. QQ plot ottenuti applicando GUMBEL per il bacino Traversa Sarmento, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

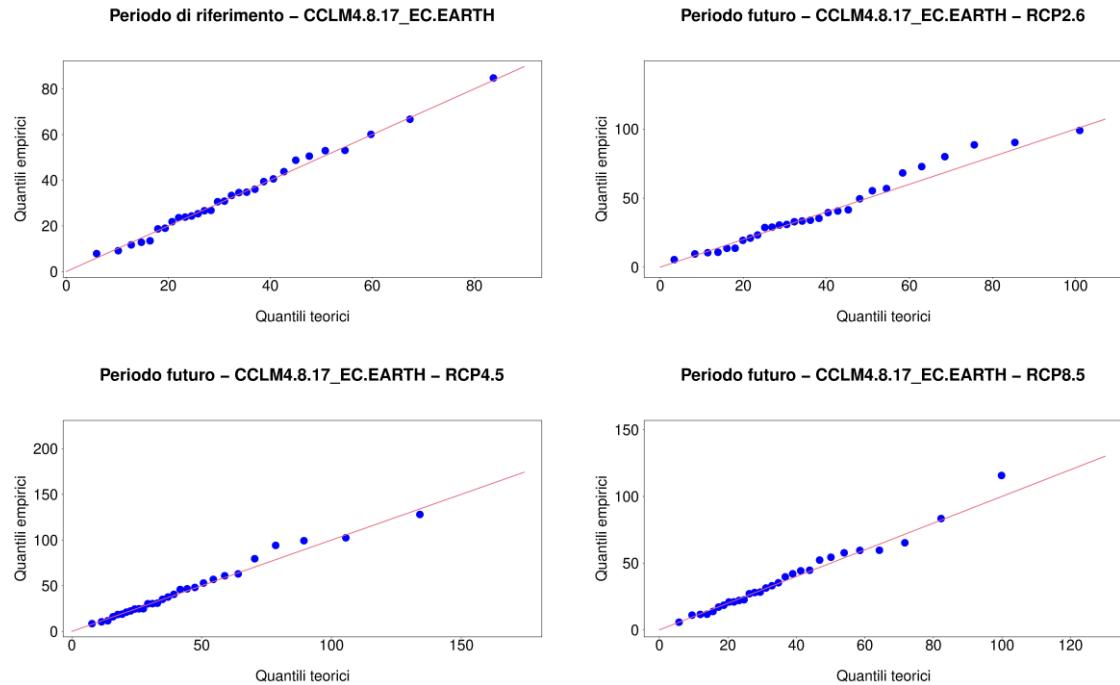


Figura A24. QQ plot ottenuti applicando GEV per il bacino Traversa Sarmento, per una singola catena modellistica, riferiti al periodo di riferimento e al periodo futuro, per i diversi scenari RCP.

Appendice II: Dettaglio delle realizzazioni

Tabella A1: Percentili di portata massima annuale [m³/s] associati alle diverse catene modellistiche corrispondenti ai periodi di ritorno 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo di riferimento.

Bacino AQP	Modello	T = 2 anni	T = 5 anni	T = 10 anni	T = 50 anni	T = 100 anni
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	12.5	20.7	28.7	58.2	78.2
	RACMO22E_EC.EARTH	15.2	28.9	43.8	106.8	155.0
	RCA4_EC.EARTH	18.9	33.8	47.5	94.4	124.2
	RCA4_HadGEM2.ES	14.2	21.9	27.3	40.3	46.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	16.3	27.2	37.7	75.8	101.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	14.5	27.5	42.3	110.4	166.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	15.5	24.7	32.6	57.1	71.4
Locone	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	21.5	38.7	55.9	121.5	167.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.3	5.0	11.8	78.3	174.2
	RACMO22E_EC.EARTH	1.4	5.6	13.5	91.8	206.1
	RCA4_EC.EARTH	1.8	6.2	13.4	69.5	138.1
	RCA4_HadGEM2.ES	0.9	4.3	13.0	146.8	409.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	2.5	7.5	14.3	55.5	97.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.6	9.4	30.5	407.3	1,218.6
Monte Cotugno	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	0.9	4.2	11.9	117.7	310.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.1	5.1	13.8	124.1	313.9
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	65.9	107.3	143.3	256.9	324.0
	RACMO22E_EC.EARTH	71.9	106.4	130.2	185.5	210.1
	RCA4_EC.EARTH	66.3	103.1	134.3	229.1	283.5
	RCA4_HadGEM2.ES	69.8	116.2	153.4	259.0	315.6
	RACMO22E_HadGEM2.ES	82.3	121.2	148.2	211.3	239.7
Fortore	RCA4_MPI.ESM.LR	67.9	104.0	128.7	185.7	210.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	51.7	85.9	117.6	226.6	296.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	60.6	101.1	144.7	328.4	468.1
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	11.4	24.7	38.2	90.7	128.0
	RACMO22E_EC.EARTH	8.6	33.9	79.3	494.4	1,066.2
	RCA4_EC.EARTH	10.7	27.9	48.7	154.8	248.6
	RCA4_HadGEM2.ES	10.8	22.3	33.2	72.2	97.9
Pertusillo	RACMO22E_HadGEM2.ES	11.6	25.1	38.0	84.0	114.4
	RCA4_MPI.ESM.LR	13.0	30.3	50.3	144.5	222.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	14.0	27.0	38.4	75.1	97.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	13.9	28.2	41.7	89.7	121.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	18.2	32.0	44.2	84.4	108.8
	RACMO22E_EC.EARTH	14.9	23.8	32.7	67.1	91.4
	RCA4_EC.EARTH	17.1	25.2	30.6	43.0	48.4
Agri	RCA4_HadGEM2.ES	16.6	24.6	29.6	39.8	43.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	17.0	25.8	32.5	49.8	58.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	16.3	26.9	36.5	68.9	89.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	14.2	24.3	34.9	78.2	110.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	20.6	40.1	64.1	187.6	298.1
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	53.3	88.1	119.5	223.6	288.1
	RACMO22E_EC.EARTH	60.7	88.6	107.6	151.4	170.7
Santa Venere	RCA4_EC.EARTH	53.5	88.4	121.1	235.5	309.7
	RCA4_HadGEM2.ES	55.1	86.5	109.5	167.1	194.6
	RACMO22E_HadGEM2.ES	72.2	99.2	114.2	141.1	150.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	53.6	82.9	104.2	156.7	181.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	51.5	77.4	97.0	148.2	173.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	59.1	97.7	134.9	269.5	359.4
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	36.4	57.9	76.3	133.2	166.2
Sarmento	RACMO22E_EC.EARTH	42.9	74.9	113.4	303.8	468.9
	RCA4_EC.EARTH	47.0	85.7	126.2	290.4	411.3
	RCA4_HadGEM2.ES	41.9	68.2	87.7	136.7	160.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	49.7	77.6	99.6	160.1	191.9
	RCA4_MPI.ESM.LR	43.9	69.2	91.0	158.7	198.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	38.9	59.9	81.0	162.6	220.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	46.6	78.8	109.3	217.6	288.6
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	30.3	46.3	57.0	81.0	91.4
	RACMO22E_EC.EARTH	30.2	48.1	60.2	87.9	99.9
	RCA4_EC.EARTH	28.8	44.8	56.7	87.1	101.9
	RCA4_HadGEM2.ES	28.2	50.2	67.9	117.6	144.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	35.8	53.3	65.6	94.6	107.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	31.4	49.9	62.0	88.2	99.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	21.8	37.9	51.8	95.5	121.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	24.8	43.7	62.6	134.4	184.4

Tabella A2: Percentili di portata massima annuale [m³/s] corrispondenti ai periodi di ritorno 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 2.6.

Bacino AQP	Modello	T = 2 anni	T = 5 anni	T = 10 anni	T = 50 anni	T = 100 anni
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	14.7	23.2	29.5	45.9	54.0
	RACMO22E_EC.EARTH	17.2	31.4	46.9	114.3	166.7
	RCA4_EC.EARTH	19.4	35.2	52.9	132.5	196.2
	RCA4_HadGEM2.ES	14.9	24.7	32.9	57.6	71.5
	RACMO22E_HadGEM2.ES	24.6	49.1	75.1	183.2	264.5
	RCA4_MPI.ESM.LR	15.5	24.3	31.5	52.0	63.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	19.7	36.9	54.7	126.4	178.8
Locone	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	36.1	72.5	109.2	250.9	350.9
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	0.7	2.5	5.4	28.5	57.2
	RACMO22E_EC.EARTH	1.3	5.7	14.8	119.1	287.1
	RCA4_EC.EARTH	2.8	9.3	19.5	95.6	186.2
	RCA4_HadGEM2.ES	1.3	6.1	16.6	151.6	386.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	3.2	26.4	108.3	2,429.6	9,054.9
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.3	9.7	37.2	728.5	2,562.0
Monte Cotugno	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.6	6.8	17.8	147.0	358.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.7	10.7	37.0	575.6	1,837.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	84.2	126.6	157.0	231.2	265.9
	RACMO22E_EC.EARTH	84.5	145.2	201.5	394.3	517.2
	RCA4_EC.EARTH	92.5	151.9	204.7	375.1	478.3
	RCA4_HadGEM2.ES	78.6	124.1	158.9	250.8	297.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	100.7	206.3	331.8	945.1	1,471.4
Fortore	RCA4_MPI.ESM.LR	57.1	91.7	130.7	306.7	448.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	79.9	116.9	143.7	209.9	241.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	65.8	105.3	140.9	258.4	330.9
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	10.5	22.8	35.1	82.1	114.9
	RACMO22E_EC.EARTH	16.8	37.3	59.4	153.7	226.1
	RCA4_EC.EARTH	11.5	22.3	34.9	94.9	145.3
	RCA4_HadGEM2.ES	7.3	18.6	32.7	106.7	174.2
Pertusillo	RACMO22E_HadGEM2.ES	14.5	38.7	69.0	230.0	377.4
	RCA4_MPI.ESM.LR	8.4	32.0	75.5	486.4	1,066.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	21.5	45.1	68.2	153.6	211.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	16.7	34.3	49.7	98.4	127.4
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	18.2	28.1	36.9	65.4	82.6
	RACMO22E_EC.EARTH	19.7	30.6	39.9	68.0	84.1
	RCA4_EC.EARTH	19.6	31.4	41.3	70.6	87.1
Agri	RCA4_HadGEM2.ES	15.3	25.5	34.9	66.5	86.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	19.8	40.3	64.5	181.8	281.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	14.5	20.8	25.0	34.5	38.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	22.3	39.6	55.3	108.2	141.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	22.4	33.1	40.5	57.8	65.5
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	66.6	104.8	134.7	217.0	259.9
	RACMO22E_EC.EARTH	76.5	121.3	156.8	255.6	307.7
Santa Venere	RCA4_EC.EARTH	72.9	121.6	164.0	297.3	376.0
	RCA4_HadGEM2.ES	65.9	98.2	120.5	172.3	195.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	85.7	165.5	257.6	688.2	1,044.9
	RCA4_MPI.ESM.LR	48.8	77.5	103.1	186.4	237.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	69.6	105.5	133.8	212.1	253.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	60.3	94.4	124.3	219.5	276.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	42.2	62.3	76.9	113.1	130.4
Sarmento	RACMO22E_EC.EARTH	49.8	90.7	136.8	346.1	515.0
	RCA4_EC.EARTH	59.5	103.5	145.3	294.2	392.4
	RCA4_HadGEM2.ES	49.9	80.0	106.9	195.1	249.0
	RACMO22E_HadGEM2.ES	88.2	172.9	253.5	540.6	729.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	41.2	66.1	87.5	153.9	192.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	52.0	83.9	110.3	187.6	230.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	84.0	159.9	235.1	518.7	714.9
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	35.2	60.6	80.1	131.9	158.2
	RACMO22E_EC.EARTH	36.4	55.6	70.4	109.4	129.1
	RCA4_EC.EARTH	33.7	58.8	83.9	179.6	246.5
	RCA4_HadGEM2.ES	27.0	46.0	62.3	112.8	142.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	39.1	78.0	122.5	328.6	497.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	28.6	45.7	59.0	95.3	114.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	26.6	39.9	49.3	72.0	82.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	21.8	36.5	49.2	89.0	112.3

Tabella A3: Percentili di portata massima annuale [m³/s] corrispondenti ai periodi di ritorno 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 4.5.

Bacino AQP	Modello	T = 2 anni	T = 5 anni	T = 10 anni	T = 50 anni	T = 100 anni
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	18.3	29.9	40.4	75.5	97.2
	RACMO22E_EC.EARTH	16.8	28.2	39.1	78.3	104.2
	RCA4_EC.EARTH	23.6	40.1	54.0	95.5	119.0
	RCA4_HadGEM2.ES	18.0	30.9	43.0	86.2	114.6
	RACMO22E_HadGEM2.ES	17.7	31.0	43.5	87.9	116.9
	RCA4_MPI.ESM.LR	17.7	32.3	46.4	96.7	130.0
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	17.9	39.0	73.5	345.7	682.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	20.8	40.1	61.7	157.1	232.7
Locone	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.5	7.9	23.5	254.8	698.0
	RACMO22E_EC.EARTH	3.4	11.5	24.9	131.5	264.3
	RCA4_EC.EARTH	3.5	14.5	35.3	246.2	557.8
	RCA4_HadGEM2.ES	2.4	14.9	50.2	722.1	2,228.0
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	10.5	34.9	491.8	1,507.2
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.1	12.7	42.2	595.0	1,821.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.9	7.6	18.9	134.9	309.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.0	4.9	13.3	117.7	294.9
Monte Cotugno	CCLM4.8.17_EC.EARTH	98.9	161.7	209.3	334.0	396.2
	RACMO22E_EC.EARTH	84.8	139.3	181.5	295.2	353.4
	RCA4_EC.EARTH	84.2	143.6	202.5	424.5	578.1
	RCA4_HadGEM2.ES	63.2	139.6	254.2	1,045.4	1,933.7
	RACMO22E_HadGEM2.ES	98.5	154.1	198.1	320.8	385.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	58.6	92.7	125.7	246.2	327.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	79.0	125.1	161.3	260.3	311.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	66.1	104.6	136.2	228.1	278.7
Fortore	CCLM4.8.17_EC.EARTH	11.1	26.6	44.0	122.0	184.4
	RACMO22E_EC.EARTH	13.3	26.7	39.5	85.0	114.9
	RCA4_EC.EARTH	23.6	55.7	89.8	231.3	337.5
	RCA4_HadGEM2.ES	11.7	26.8	42.1	101.3	143.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	16.3	30.6	42.3	76.4	95.1
	RCA4_MPI.ESM.LR	9.7	19.5	27.4	50.4	62.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	14.3	35.6	61.4	190.6	303.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	13.9	32.8	53.4	141.5	209.5
Pertusillo	CCLM4.8.17_EC.EARTH	21.3	38.7	55.4	116.1	156.7
	RACMO22E_EC.EARTH	18.6	29.2	37.9	63.4	77.5
	RCA4_EC.EARTH	20.5	28.7	33.3	42.0	45.0
	RCA4_HadGEM2.ES	19.2	28.1	34.3	48.5	54.9
	RACMO22E_HadGEM2.ES	19.2	28.0	34.0	48.3	54.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	17.4	23.7	26.9	32.1	33.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	17.6	34.9	56.0	162.3	256.0
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	22.7	34.5	41.9	57.1	63.2
Agri	CCLM4.8.17_EC.EARTH	74.9	124.0	161.5	260.5	310.4
	RACMO22E_EC.EARTH	66.4	116.5	160.2	298.6	380.8
	RCA4_EC.EARTH	65.3	96.9	125.8	223.1	284.1
	RCA4_HadGEM2.ES	65.0	109.0	150.4	295.7	390.0
	RACMO22E_HadGEM2.ES	79.1	126.9	166.3	281.9	346.0
	RCA4_MPI.ESM.LR	50.9	77.1	99.0	164.4	201.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	75.0	120.8	155.2	244.2	288.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	62.6	100.4	131.8	224.9	277.0
Santa Venere	CCLM4.8.17_EC.EARTH	48.5	72.0	90.2	138.5	163.2
	RACMO22E_EC.EARTH	55.0	77.6	92.0	121.7	133.6
	RCA4_EC.EARTH	60.7	103.1	143.5	287.6	382.5
	RCA4_HadGEM2.ES	58.3	110.9	163.1	360.9	498.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	50.9	85.4	115.6	212.1	269.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	49.2	89.7	131.5	298.4	419.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	53.0	94.1	138.0	322.5	462.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	58.5	91.0	115.5	179.4	211.1
Sarmento	CCLM4.8.17_EC.EARTH	36.0	67.1	96.6	200.9	269.3
	RACMO22E_EC.EARTH	29.9	54.1	76.0	148.8	194.0
	RCA4_EC.EARTH	30.1	54.6	77.8	159.4	212.7
	RCA4_HadGEM2.ES	31.0	70.6	120.6	386.3	630.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	34.8	60.1	83.2	160.7	209.2
	RCA4_MPI.ESM.LR	25.2	41.0	53.8	90.6	110.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	31.1	53.7	72.2	125.5	154.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	24.0	42.9	60.7	123.4	164.3

Tabella A4: Percentili di portata massima annuale [m³/s] corrispondenti ai periodi di ritorno 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 8.5.

Bacino AQP	Modello	T = 2 anni	T = 5 anni	T = 10 anni	T = 50 anni	T = 100 anni
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	20.1	30.7	38.4	57.9	67.3
	RACMO22E_EC.EARTH	25.0	39.9	51.4	82.2	98.0
	RCA4_EC.EARTH	17.1	27.7	36.0	58.4	70.0
	RCA4_HadGEM2.ES	16.8	28.7	40.4	84.0	113.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	19.3	31.8	43.2	81.3	105.0
	RCA4_MPI.ESM.LR	15.0	25.0	35.4	77.2	107.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	25.0	50.3	79.1	211.5	319.5
Locone	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	25.2	49.4	73.2	162.2	223.3
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.3	4.4	9.5	52.4	107.4
	RACMO22E_EC.EARTH	3.4	13.1	30.8	194.2	421.1
	RCA4_EC.EARTH	1.0	6.4	23.3	407.7	1,369.6
	RCA4_HadGEM2.ES	2.4	7.8	16.2	77.1	148.2
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.4	7.0	20.5	219.5	598.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.0	7.3	27.9	540.7	1,894.3
Monte Cotugno	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	2.6	7.3	13.7	50.9	87.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.2	14.7	81.7	3,598.3	17,829.7
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	84.8	135.8	178.3	304.0	374.3
	RACMO22E_EC.EARTH	74.4	134.4	205.1	545.5	834.4
	RCA4_EC.EARTH	83.6	137.9	178.9	285.7	338.8
	RCA4_HadGEM2.ES	75.6	123.9	164.4	286.2	355.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	89.4	163.1	238.1	531.7	741.3
Fortore	RCA4_MPI.ESM.LR	60.3	96.5	124.6	200.4	239.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	70.6	113.3	150.7	269.7	340.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	78.0	114.6	138.6	190.9	212.8
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	11.0	23.5	35.6	79.8	109.6
	RACMO22E_EC.EARTH	12.4	29.2	47.8	130.3	195.4
	RCA4_EC.EARTH	12.7	28.8	44.5	103.1	143.1
	RCA4_HadGEM2.ES	10.3	20.6	31.9	82.4	122.3
Pertusillo	RACMO22E_HadGEM2.ES	15.5	28.9	40.3	74.7	94.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	4.9	21.4	53.0	374.6	851.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	16.6	32.6	46.2	87.3	110.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	20.7	43.1	61.4	114.0	142.8
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	17.6	29.3	40.2	77.1	100.6
	RACMO22E_EC.EARTH	19.8	33.3	44.6	78.7	98.0
	RCA4_EC.EARTH	16.7	27.7	35.7	55.4	64.7
Agri	RCA4_HadGEM2.ES	19.7	27.2	30.9	36.5	38.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	23.7	41.3	56.6	105.6	134.8
	RCA4_MPI.ESM.LR	13.6	21.4	26.5	37.9	42.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	24.5	41.9	57.4	108.3	139.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	17.2	30.1	40.3	69.3	84.8
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	61.1	96.1	127.5	230.4	293.4
	RACMO22E_EC.EARTH	60.1	108.2	165.0	440.9	676.3
Santa Venere	RCA4_EC.EARTH	67.0	112.3	149.5	257.7	317.3
	RCA4_HadGEM2.ES	61.4	93.9	118.7	184.3	217.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	78.9	141.1	199.4	403.0	534.9
	RCA4_MPI.ESM.LR	45.3	71.0	92.3	155.8	191.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	59.7	97.1	132.2	254.7	333.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	62.4	97.6	125.0	200.1	239.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	54.6	79.7	98.9	149.7	175.3
Sarmento	RACMO22E_EC.EARTH	62.3	107.0	147.5	282.2	365.7
	RCA4_EC.EARTH	50.3	84.4	110.7	181.4	217.4
	RCA4_HadGEM2.ES	51.7	86.7	121.9	257.2	352.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	51.3	91.7	137.0	339.6	501.5
	RCA4_MPI.ESM.LR	44.5	73.6	105.0	239.0	341.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	57.3	100.8	147.8	347.1	499.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	60.6	109.4	155.2	315.4	419.3
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	32.0	56.1	76.4	137.4	172.0
	RACMO22E_EC.EARTH	29.6	49.9	66.3	113.0	138.3
	RCA4_EC.EARTH	27.5	51.2	71.5	133.6	169.4
	RCA4_HadGEM2.ES	34.7	60.1	81.1	143.5	178.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	34.2	66.4	99.2	228.4	321.0
	RCA4_MPI.ESM.LR	23.9	42.6	58.7	108.1	136.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	25.4	49.2	73.5	169.3	238.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	25.3	50.7	79.3	208.2	311.8

Tabella A5: Periodi di ritorno [anni] associati a percentili di portata massima annuale, calcolati per il periodo di riferimento, corrispondenti a T = 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 2.6.

Bacino AQP	Modello	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.6	3.8	9.2	140.0	583.5
	RACMO22E_EC.EARTH	1.7	4.4	8.9	44.2	87.5
	RCA4_EC.EARTH	1.9	4.7	8.3	27.5	44.6
	RCA4_HadGEM2.ES	1.9	3.9	6.3	17.3	25.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.4	2.2	3.4	10.2	16.9
	RCA4_MPI.ESM.LR					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.5	2.7	4.1	10.8	16.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.3	2.2	3.4	12.1	22.2
Locone	CCLM4.8.17_EC.EARTH	3.0	9.2	21.0	136.9	305.2
	RACMO22E_EC.EARTH	2.1	4.9	9.3	40.7	77.0
	RCA4_EC.EARTH	1.6	3.6	7.0	35.9	73.2
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	4.0	8.4	48.8	104.5
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	2.8	3.8	7.2	9.5
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.2	4.9	9.0	36.3	66.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.6	3.6	7.4	42.1	89.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.7	3.4	5.8	20.2	34.9
Monte Cotugno	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.4	3.2	7.3	83.8	294.9
	RACMO22E_EC.EARTH	1.6	2.8	4.0	8.3	11.0
	RCA4_EC.EARTH	1.4	2.4	3.9	13.3	23.2
	RCA4_HadGEM2.ES	1.7	4.2	9.0	56.7	129.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	2.5	3.2	5.2	6.2
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.8	6.4	9.7	19.6	24.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.2	2.3	5.1	72.7	306.0
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.8	4.6	10.7	97.9	270.2
Fortore	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.2	5.6	11.6	61.3	125.4
	RACMO22E_EC.EARTH					
	RCA4_EC.EARTH	1.8	7.0	17.0	110.9	240.1
	RCA4_HadGEM2.ES	2.8	6.2	10.2	29.0	44.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.7	3.2	4.9	12.9	19.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.6	4.8	7.2	17.4	25.2
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.5	2.5	3.9	11.9	19.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.7	3.7	7.1	39.4	87.1
Pertusillo	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.0	6.9	16.3	106.3	229.7
	RACMO22E_EC.EARTH	1.4	2.8	5.9	47.9	131.7
	RCA4_EC.EARTH	1.7	3.1	4.7	11.2	15.7
	RCA4_HadGEM2.ES	2.3	4.6	6.9	13.7	17.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.7	2.7	3.7	6.8	8.6
	RCA4_MPI.ESM.LR					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	2.2	4.0	22.3	52.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1					
Agri	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.5	3.3	7.1	56.0	151.2
	RACMO22E_EC.EARTH	1.5	2.5	3.8	9.0	12.9
	RCA4_EC.EARTH	1.4	2.7	5.0	25.9	56.3
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.5	7.1	42.7	97.9
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	2.4	2.9	3.9	4.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.3	5.8	10.3	30.7	46.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	2.4	4.0	13.9	24.0
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.9	5.4	12.4	92.8	225.3
Santa Venere	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.6	4.1	9.7	111.7	370.8
	RACMO22E_EC.EARTH	1.7	3.7	7.3	39.8	84.9
	RCA4_EC.EARTH	1.5	3.5	7.4	48.5	112.1
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.5	6.2	18.9	29.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.3	1.8	2.3	4.4	6.0
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.2	5.6	11.1	54.9	109.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.4	2.5	4.6	31.5	85.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.2	1.9	2.8	8.6	14.9
Sarmento	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.7	3.0	4.4	10.3	14.7
	RACMO22E_EC.EARTH	1.5	3.5	6.2	21.5	34.9
	RCA4_EC.EARTH	1.6	3.1	4.7	10.8	14.9
	RCA4_HadGEM2.ES	2.1	6.0	12.4	56.5	104.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	2.9	3.9	6.7	8.2
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.3	6.3	11.6	37.6	57.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.4	7.5	18.7	173.5	470.4

Tabella A6: Periodi di ritorno [anni] associati a percentili di portata massima annuale, calcolati per il periodo di riferimento, corrispondenti a T = 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 4.5.

Bacino AQP	Modello	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.3	2.4	4.6	25.0	55.1
	RACMO22E_EC.EARTH	1.7	5.3	12.8	106.3	266.2
	RCA4_EC.EARTH	1.6	3.5	7.3	48.2	114.7
	RCA4_HadGEM2.ES	1.5	2.7	4.0	8.7	11.7
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	3.9	7.4	35.2	70.5
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.6	3.8	8.3	68.1	179.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.7	3.0	4.1	7.6	9.7
Locone	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.1	4.7	8.5	31.9	55.8
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.9	3.8	6.4	22.4	38.5
	RACMO22E_EC.EARTH	1.3	2.8	5.7	35.1	78.1
	RCA4_EC.EARTH	1.5	2.8	4.7	17.3	30.7
	RCA4_HadGEM2.ES	1.4	2.6	4.6	18.9	35.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	2.3	4.1	5.9	13.2	18.5
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.8	4.2	8.3	39.6	77.9
Monte Cotugno	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.5	3.3	7.0	44.6	100.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.1	5.1	10.3	52.0	104.8
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.3	2.2	3.8	19.2	44.5
	RACMO22E_EC.EARTH	1.6	2.9	4.3	10.6	15.5
	RCA4_EC.EARTH	1.5	2.7	4.4	13.0	20.5
	RCA4_HadGEM2.ES	2.2	4.0	5.6	10.2	12.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	2.9	4.5	12.2	18.2
Fortore	RCA4_MPI.ESM.LR	2.6	6.5	10.6	25.3	34.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	2.3	4.3	30.3	81.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.8	4.6	11.9	180.3	681.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.0	4.6	8.2	30.7	54.1
	RACMO22E_EC.EARTH					
	RCA4_EC.EARTH	1.3	2.3	4.2	24.6	57.0
	RCA4_HadGEM2.ES	1.9	3.9	6.8	26.0	46.7
Pertusillo	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.5	3.5	7.8	67.2	185.2
	RCA4_MPI.ESM.LR					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	2.0	3.6	5.5	13.2	18.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.0	4.1	6.9	23.0	38.2
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.7	3.6	6.4	24.4	43.2
	RACMO22E_EC.EARTH	1.5	3.1	6.7	60.7	179.9
	RCA4_EC.EARTH	1.5	3.2	6.6	62.9	239.6
Agri	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.4	5.9	18.8	29.5
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	3.9	8.4	58.5	145.5
	RCA4_MPI.ESM.LR					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.6	3.0	5.0	16.5	27.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1					
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.4	2.5	4.6	28.5	74.0
	RACMO22E_EC.EARTH	1.8	3.0	4.3	8.8	11.6
Santa Venere	RCA4_EC.EARTH	1.4	4.0	9.0	58.4	128.1
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.2	5.0	12.7	18.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	2.9	3.9	6.5	7.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.2	6.1	11.6	42.6	70.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.4	2.1	3.1	8.7	14.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.8	4.7	10.7	91.1	247.3
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.3	2.9	5.9	42.6	108.4
Sarmento	RACMO22E_EC.EARTH					
	RCA4_EC.EARTH	1.5	3.5	7.6	51.2	119.5
	RCA4_HadGEM2.ES	1.5	2.4	3.4	7.2	9.7
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.9	4.1	7.0	23.0	37.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.7	3.3	5.1	14.3	22.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.4	2.4	3.9	13.6	24.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.5	3.5	8.4	114.3	431.0
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.7	2.8	3.8	7.1	9.0
	RACMO22E_EC.EARTH	2.0	4.0	6.2	13.8	18.7
	RCA4_EC.EARTH	1.9	3.5	5.4	12.7	17.8
	RCA4_HadGEM2.ES	1.8	3.3	4.8	9.7	12.7
	RACMO22E_HadGEM2.ES	2.1	4.0	6.0	13.4	18.3
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.9	8.2	15.0	45.7	68.0
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.4	2.6	4.6	21.6	44.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.1	5.2	10.7	61.3	132.8

Tabella A7: Periodi di ritorno [anni] associati a percentili di portata massima annuale, calcolati per il periodo di riferimento, corrispondenti a T = 2, 5, 10, 50, 100 anni per i bacini considerati nel periodo futuro – scenario RCP 8.5.

Bacino AQP	Modello	Q₂	Q₅	Q₁₀	Q₅₀	Q₁₀₀
Conza	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.2	2.1	4.2	50.8	210.8
	RACMO22E_EC.EARTH	1.2	2.5	6.4	142.6	741.0
	RCA4_EC.EARTH					
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.0	4.5	9.9	13.3
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	3.6	7.3	41.6	90.7
	RCA4_MPI.ESM.LR	1.9	6.0	14.4	104.9	243.9
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	2.0	2.8	6.1	8.5
Locone	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.7	3.4	6.2	27.3	53.4
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.0	5.6	12.2	73.6	159.7
	RACMO22E_EC.EARTH	1.4	2.7	5.1	25.7	52.7
	RCA4_EC.EARTH	2.6	4.9	7.4	18.3	27.0
	RCA4_HadGEM2.ES	1.3	3.0	8.0	99.0	296.4
	RACMO22E_HadGEM2.ES	2.7	5.2	7.9	19.5	28.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.4	5.7	10.5	42.8	78.3
Monte Cotugno	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	3.0	8.5	146.6	515.5
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.0	3.3	4.9	11.9	17.6
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.5	3.0	5.7	29.2	61.6
	RACMO22E_EC.EARTH	1.9	3.4	4.7	8.5	10.4
	RCA4_EC.EARTH	1.5	2.8	4.7	22.2	48.5
	RCA4_HadGEM2.ES	1.8	4.3	8.4	36.7	68.1
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	3.1	4.2	8.0	10.1
Fortore	RCA4_MPI.ESM.LR	2.4	6.0	11.0	37.6	60.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.4	2.8	5.4	30.3	65.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1					
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.1	5.4	11.4	65.9	141.8
	RACMO22E_EC.EARTH					
	RCA4_EC.EARTH	1.8	4.8	11.7	118.5	337.5
	RCA4_HadGEM2.ES	2.1	5.7	10.7	39.7	67.6
Pertusillo	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.6	3.9	8.8	70.6	182.4
	RCA4_MPI.ESM.LR	3.5	6.5	9.6	22.6	32.4
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.7	3.7	6.8	33.0	67.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.5	2.7	4.7	25.4	60.0
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	2.1	6.0	12.6	63.1	123.2
	RACMO22E_EC.EARTH	1.5	2.6	4.8	30.9	79.8
	RCA4_EC.EARTH	2.1	4.0	6.5	18.6	29.0
Agri	RCA4_HadGEM2.ES					
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.4	2.2	3.2	7.4	10.7
	RCA4_MPI.ESM.LR					
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.2	2.0	3.5	21.3	52.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1					
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.6	4.1	8.5	46.0	94.8
	RACMO22E_EC.EARTH	2.0	3.6	5.0	8.7	10.6
Santa Venere	RCA4_EC.EARTH	1.5	3.1	5.9	37.5	92.1
	RCA4_HadGEM2.ES	1.7	4.0	7.8	33.8	62.5
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.8	2.7	3.4	5.0	5.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.7	7.4	14.2	51.0	83.6
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.6	3.1	5.0	13.1	19.3
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.8	5.0	12.7	162.7	560.7
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.2	2.2	4.4	30.8	78.9
Sarmento	RACMO22E_EC.EARTH	1.3	2.6	5.6	60.7	197.6
	RCA4_EC.EARTH					
	RCA4_HadGEM2.ES	1.5	3.2	5.1	12.7	17.9
	RACMO22E_HadGEM2.ES	1.9	3.8	5.7	13.2	18.1
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.0	4.5	7.6	22.5	34.7
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.3	2.1	3.4	11.9	21.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	1.5	2.9	5.0	21.0	40.5
	CCLM4.8.17_EC.EARTH	1.9	3.5	5.2	11.6	15.8
	RACMO22E_EC.EARTH	2.1	4.6	7.8	22.4	33.5
	RCA4_EC.EARTH	2.1	3.9	6.1	16.0	23.9
	RCA4_HadGEM2.ES	1.6	3.5	6.5	27.5	50.8
	RACMO22E_HadGEM2.ES	2.1	3.6	4.9	9.2	11.6
	RCA4_MPI.ESM.LR	2.9	6.9	11.4	28.3	39.1
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v2	1.7	3.3	5.4	16.3	25.8
	REMO2009_MPI.ESM.LR_v1	2.0	4.0	6.9	23.8	40.7

Appendice III: Analisi grafica delle variazioni attese

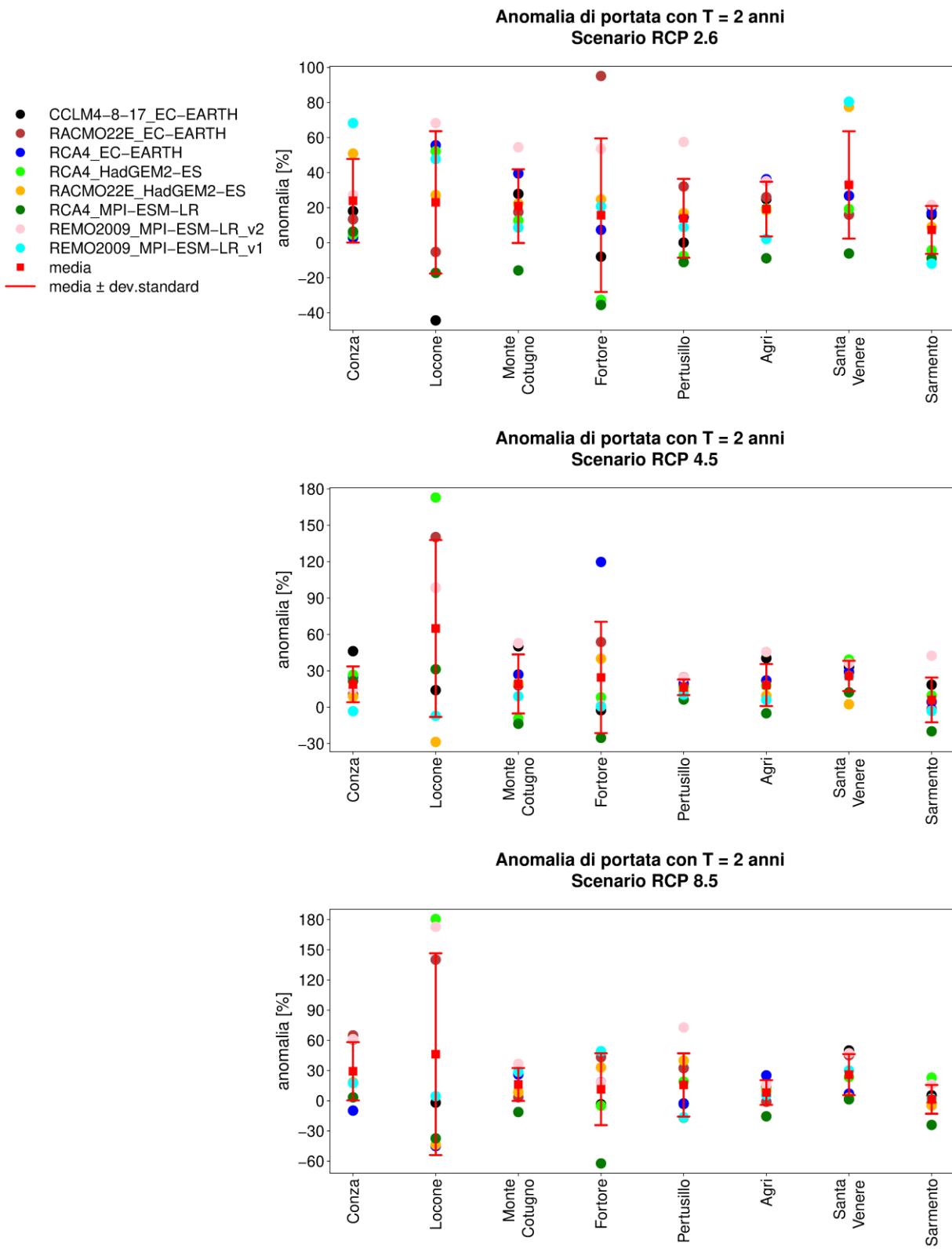


Figura 4. Anomalie di portata con periodo di ritorno $T = 2$ anni per i bacini SMHI (Figura 2), per i diversi scenari RCP, ottenute con GEV.

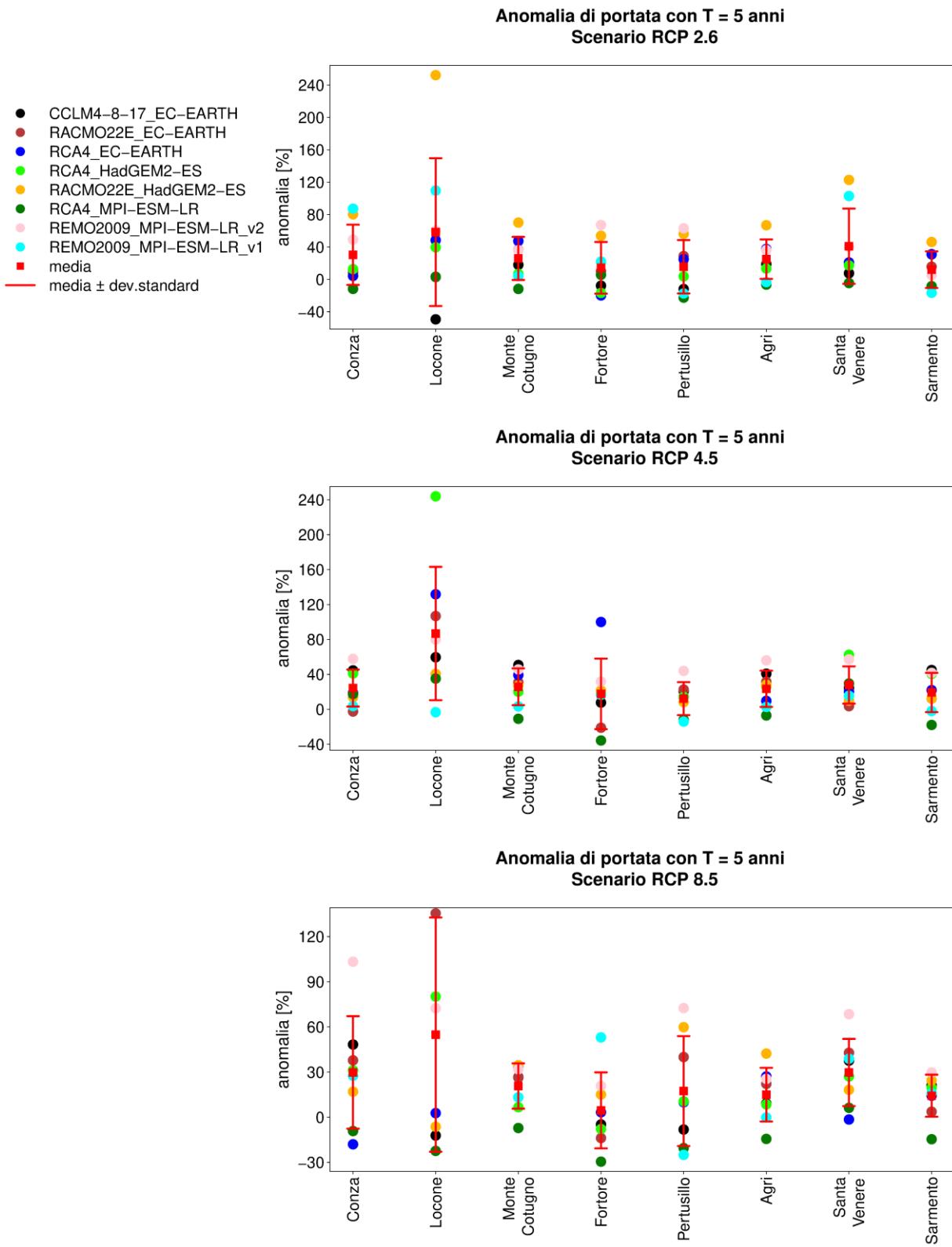


Figura 5. Anomalie di portata con periodo di ritorno T = 5 anni per i bacini SMHI (Figura 2), per i diversi scenari RCP, ottenute con GEV.

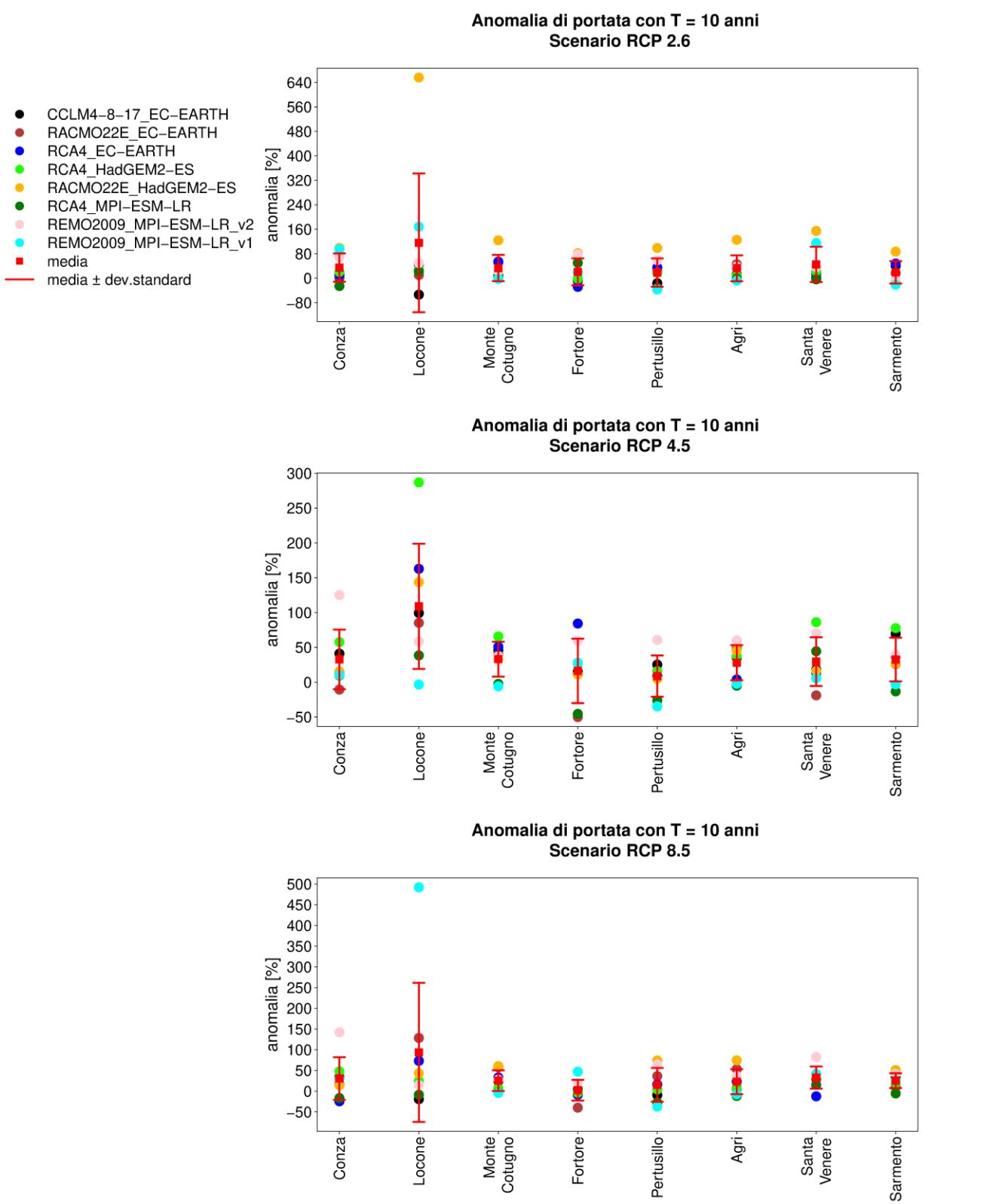


Figura 6. Anomalie di portata con periodo di ritorno $T = 10$ anni per i bacini SMHI (Figura 2), per i diversi scenari RCP, ottenute con GEV.

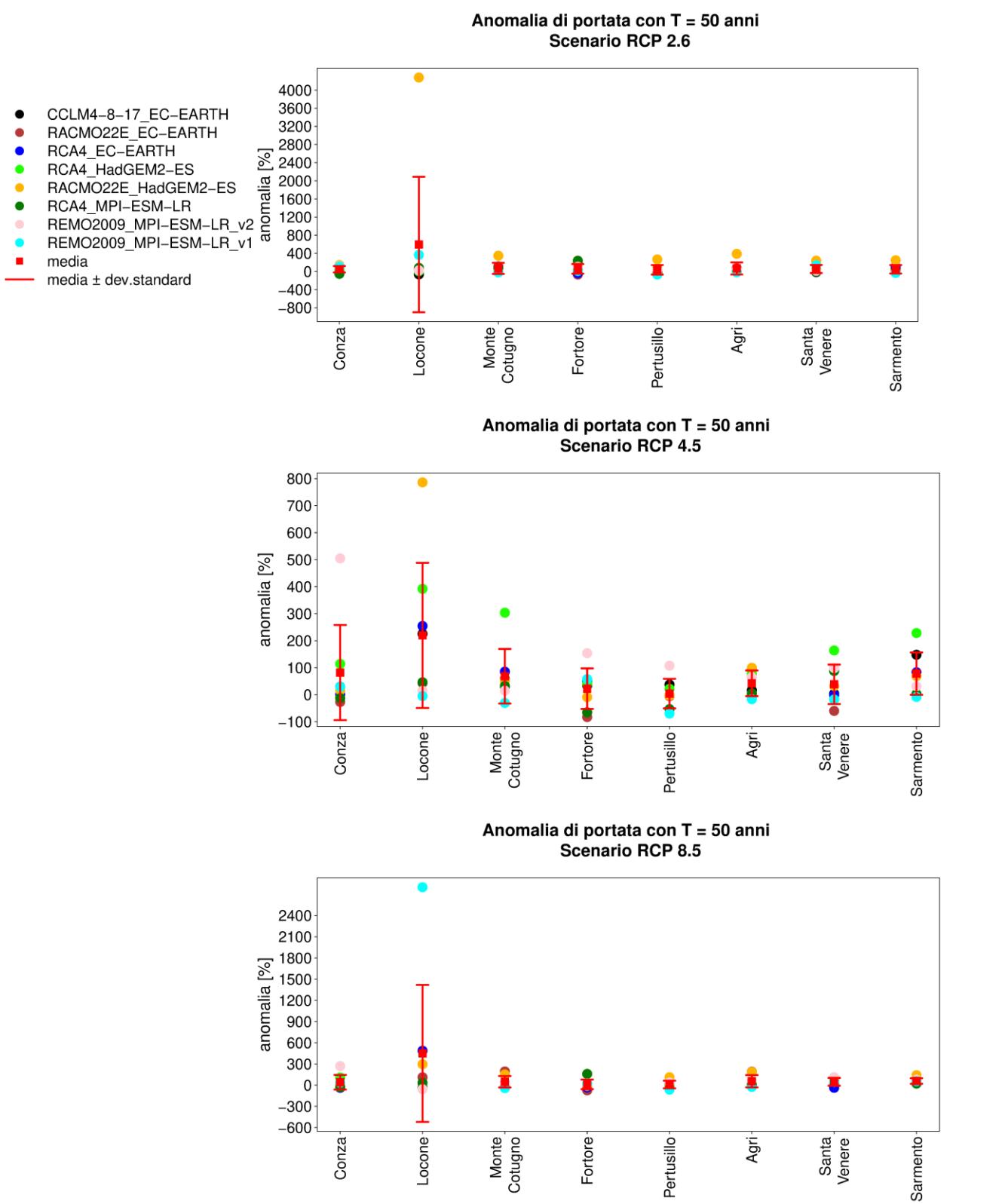


Figura 7. Anomalie di portata con periodo di ritorno $T = 50$ anni per i bacini SMHI (Figura 2), per i diversi scenari RCP, ottenute con GEV.

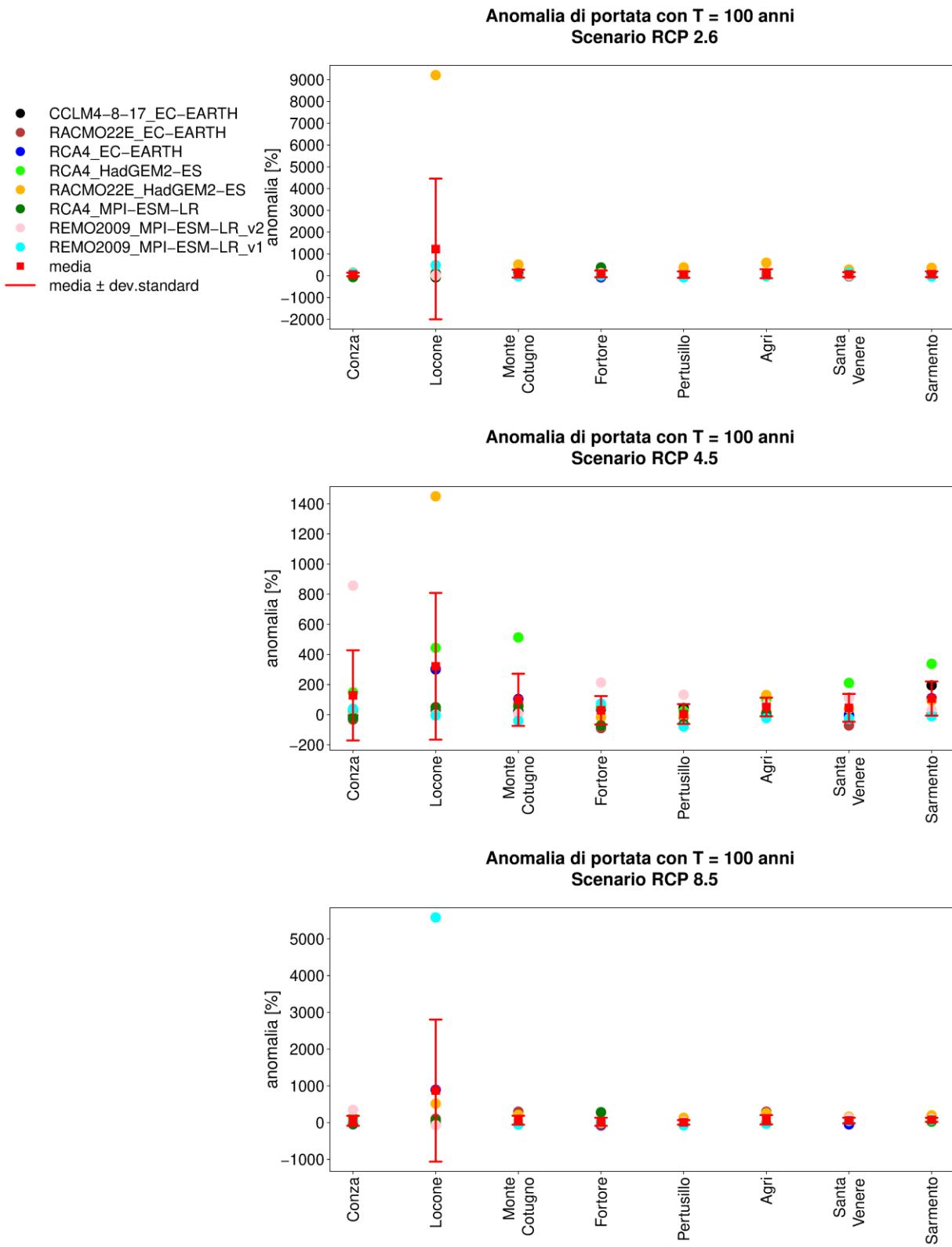


Figura 8. Anomalie di portata con periodo di ritorno T = 100 anni per i bacini SMHI (Figura 2), per i diversi scenari RCP, ottenute con GEV.

Bibliografia

- Beven, K., Binley, A., 1992. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrol. Process.*, 6(3), 279-98.
- Donnelly, C., Andersson, J. C. M., & Arheimer, B., 2016. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrol. Sci. J.* 61(2), 255-273. doi:10.1080/02626667.2015.1027710
- Hundecha, Y., Arheimer, B., Berg, P., Capell, R., Musuza, J., Pechlivanidis, I., & Photiadou, C., 2020. Effect of model calibration strategy on climate projections of hydrological indicators at a continental scale. *Climatic Change*, 163(3), 1287-1306.
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., Arheimer, B., 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrol Res* 41(3-4):295-319. doi:10.2166/nh.2010.007
- Ntegeka, V., Salamon, P., Gomes, G. et al., 2013. EFAS-Meteo: A European daily high-resolution gridded meteorological data set for 1990-2011. Report EUR, 26408.
- Padulano, R., & Del Giudice, G., 2020. A nonparametric framework for water consumption data cleansing: an application to a smart water network in Naples (Italy). *J Hydroinf* 22(4), 666-680.
- Pianosi, F., Fanny, S., Wagener, T., 2015. A Matlab Toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environ Modell Softw* 70, 80-85.