



Valutazione dei Rischi Climatici e della Vulnerabilità del Sistema AQP

Convenzione Operativa n° 2 Report finale dell'attività CG01.40.4

SORGENTI – Analisi della correlazione tra indici di Sicchezza climatica (SPI/SPEI) e minimi e massimi di portata sorgentizia per la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sulla disponibilità di risorsa idrica da sorgente

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



Autori

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui
Cambiamenti Climatici

Paola Mercogliano
Roberta Padulano
Matteo Pesce

Acquedotto Pugliese S.p.A.

Gianluigi Fiori
Vincenzo Patruno
Davide Ritossa
Luciano Venditti
Gerardo Ventafridda

Sommario

Premessa	4
1. Inquadramento territoriale e dati utilizzati	5
1.1 Inquadramento territoriale	5
1.2 Dati	5
2. Nota metodologica: analisi della siccità	7
2.1 Indicatori di siccità.....	7
2.2 Lo Spring Anomaly Index (SAI).....	8
2.3 Altre informazioni.....	9
3. Nota metodologica: analisi e restituzione dei risultati.....	10
3.1 Analisi delle incertezze	10
3.2 Analisi della portata minima sorgentizia	11
3.3 Analisi complementari.....	13
4. Risultati.....	13
4.1 Correlazione tra SPI, SPEI e minimo di portata sorgentizia	15
4.2 Correlazione tra SPI, SPEI e massimo di portata sorgentizia.....	17
4.3 Variazione attesa in futuro della portata minima e massima sorgentizia.....	19
4.4 Catena delle incertezze	20
5. Discussione	21
6. Conclusioni e messaggi chiave.....	24
Appendice.....	26
Ringraziamenti.....	27
Bibliografia.....	27

Premessa

Il presente Report è riferito all'attività CG01.40.4: Correlazione tra eventi di siccità meteorologica e agricola e minimo di portata sorgentizia (target “Sorgenti – quantità”). L'attività segue le linee guida ISPRA (Mariani et al., 2018), e consiste nella ricerca della spiegazione deterministica della variabilità osservata nei minimi di anni di portata sorgentizia mensile attraverso la precipitazione cumulata in un numero specifico di mesi, che si estendono su una specifica finestra temporale dell'anno idrologico. Una volta calibrata tale relazione sul periodo di riferimento, utilizzando osservazioni di precipitazione, temperatura e portata, lo scopo finale dell'analisi è quello di inferire circa i minimi di portata sorgentizia da attendersi in futuro. Ciò, a sua volta, permette di meglio comprendere quelle che saranno le disponibilità minime annue da attendersi sugli scenari futuri con riferimento alle portate prelevabili dalle sorgenti di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. (AQP).

Come per le altre attività della Convenzione, l'orizzonte futuro considerato è il trentennio 2021-2050, sotto gli scenari RCP 2.6, 4.5 e 8.5, da confrontarsi con il periodo di riferimento 1981-2010. Per il periodo di riferimento viene utilizzato il dataset E-OBS, che include le variabili precipitazione e temperatura alla risoluzione nativa temporale giornaliera, e orizzontale pari a circa 10 km. Le proiezioni future di precipitazione sono invece estratte dalle 14 catene di simulazione climatica scelte di default per la Convenzione, bias-corrette utilizzando E-OBS mediante l'approccio dell'Empirical Quantile Mapping.

I risultati delle analisi sono fortemente influenzati dalla *goodness of fit* delle correlazioni ricercate; pertanto, la robustezza dei risultati è subordinata alla significatività statistica di tali correlazioni, che non può essere garantita a priori. Si anticipa in questa Premessa che lo sviluppo della procedura secondo quanto proposto da Mariani et al. (2018) non ha dato risultati particolarmente incoraggianti, riuscendo a spiegare, attraverso i cumulati di precipitazione e bilancio idro-climatico, soltanto circa il 40% della variabilità della portata minima sorgentizia per entrambi gli asset di interesse di AQP. Di conseguenza, è stato effettuato un ulteriore approfondimento, che estende le considerazioni ai massimi annuali di portata sorgentizia mensile, per la quale le correlazioni con la precipitazione sono risultate solo leggermente più significative. Tuttavia, i risultati ottenuti in entrambi i casi presentano comunque una utilità pratica, in quanto consentono, almeno, di verificare quale sia quella catena di simulazione climatica che fornisce gli impatti più gravi in termini di siccità climatica (rigorosamente) e sorgentizia (in via tanto più approssimata quanto minore è la significatività delle correlazioni ricercate).

1. Inquadramento territoriale e dati utilizzati

1.1 Inquadramento territoriale

La Figura 1 mostra gli acquiferi di riferimento delle sorgenti captate da AQP (nel seguito identificate come “sorgenti AQP”):

- 1) “Caposele” (complesso carbonatico del Monte Cervialto);
- 2) “Cassano Irpino” (complesso carbonatico Monte Terminio – Tuoro, in abbinamento al complesso alluvionale della Piana di Montella; le portate erogate sono somma dei due contributi della Sorgente Peschiera e della Sorgente Prete);

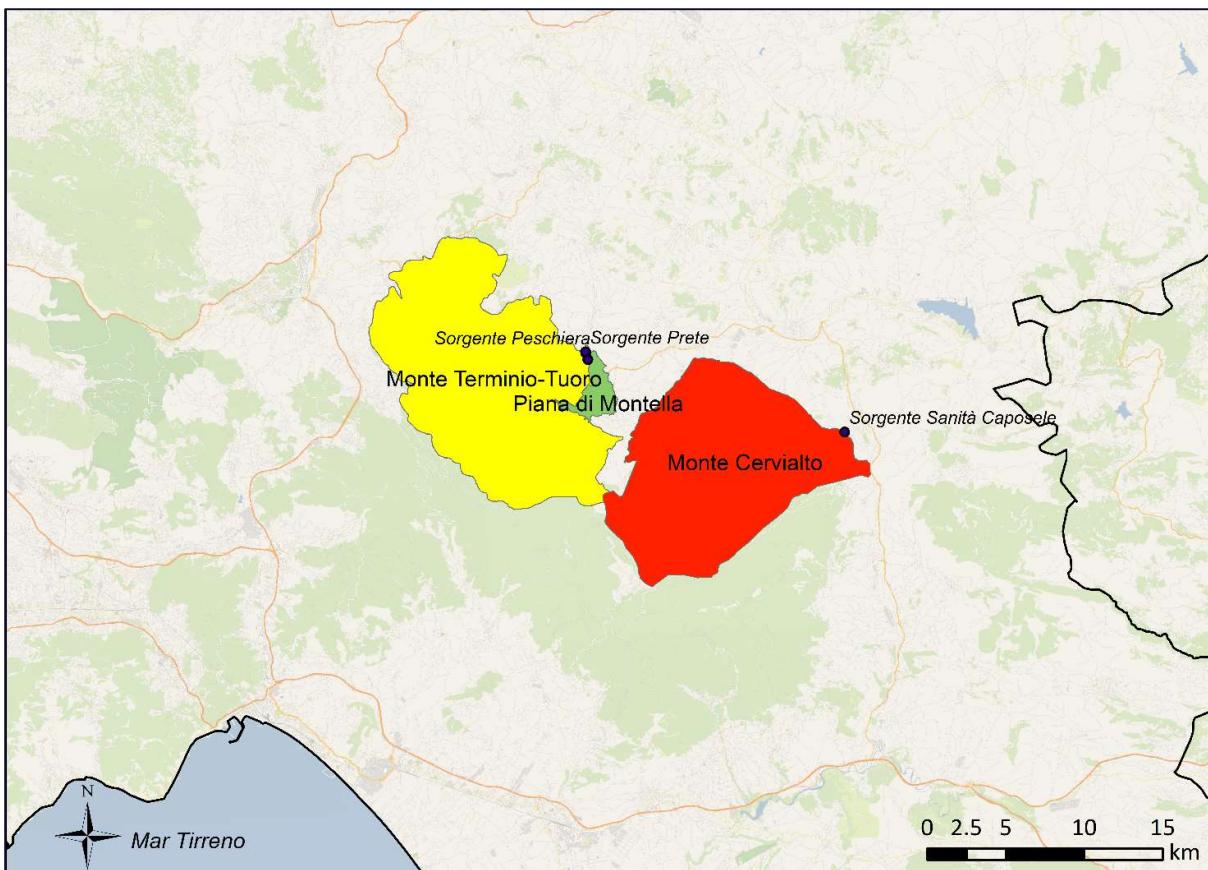


Figura 1. Ubicazione delle sorgenti e dei relativi acquiferi di interesse AQP.

1.2 Dati

Nella presente attività sono essenzialmente utilizzate tre tipologie di dati:

- Dataset di osservazioni climatiche (precipitazione e temperatura) sul periodo di riferimento 1981-2010. Si sceglie in particolare di utilizzare E-OBS, avente risoluzione orizzontale di circa 10 km e temporale giornaliera. Tale dataset è frutto di un ensemble di esperimenti di interpolazione di osservazioni raccolte in corrispondenza delle stazioni termo-pluviometriche monitorate dai singoli stati europei e appartenenti ad alcuni network (Cornes et al., 2018). Ai fini dell’analisi i valori giornalieri E-OBS sono spazialmente aggregati in modo da ottenere un’unica serie riferita a ciascuna delle due sorgenti, poi cumulata (per la precipitazione) o mediata (per la temperatura) a scala mensile.

- Dataset di variabili climatiche (precipitazione e temperatura) restituite da catene di simulazione climatica sul periodo presente (1981-2010) e sull’orizzonte futuro 2021-2050. Si sceglie in particolare di utilizzare le 14 catene modellistiche EURO-CORDEX illustrate in Tabella 1, sotto gli scenari di concentrazione RCP 2.6, 4.5 e 8.5. Tutti i risultati sono bias-corretti mediante Empirical Quantile Mapping utilizzando come riferimento proprio E-OBS, e presentano quindi la stessa griglia spaziale di E-OBS (mentre la loro griglia nativa era appunto quella EURO-CORDEX). Essi coincidono, a meno di scostamenti casuali, proprio con E-OBS sul periodo di riferimento, mentre sul periodo futuro possono essere considerati come validi in valore assoluto, e non soltanto in termini di variazione attesa. Questo punto sarà approfondito nei capitoli successivi. Anche in questo caso non si tiene conto della variabilità spaziale, andando a mediare le serie di valori giornalieri su ciascuno dei due acqiferi di riferimento e poi cumulando o mediando su base mensile.
- Osservazioni di portata sorgentizia sul periodo di riferimento 1981-2010. AQP ha messo a disposizione lunghe serie di portata sorgentizia giornaliera, in [l/s], per le due sorgenti in oggetto. È stato quindi possibile aggregare i valori giornalieri su base mensile, e, per ogni anno, estrarre il valore minimo, che, come verrà chiarito più avanti, è l’oggetto della presente attività. È però da segnalare che, secondo *expert judgment* AQP, gli anni 1981 e 1982 potrebbero ancora risentire degli effetti del terremoto verificatosi in Campania nel 1980 (ciò è confermato in Leone et al., 2021): pertanto, in fase operativa, tutte le analisi sono state effettuate considerando il periodo di riferimento 1983-2010. Si noti che le osservazioni (costituite da due serie giornaliere prive di dati mancanti) sono state soggette ad un controllo di qualità, che ha permesso di identificare un ridottissimo numero di isolati *outlier*, ovvero valori eccessivamente lontani dalla mediana. Successivamente alla rimozione di tali *outlier*, si è proceduto con l’aggregazione su base mensile.

Tabella 1: Lista delle simulazioni climatiche adottate in questo studio.

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

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

2. Nota metodologica: analisi della siccità

2.1 Indicatori di siccità

Quando l'obiettivo è quello di fare valutazioni circa la disponibilità – o indisponibilità – di risorse idriche, è utile distinguere il concetto di “siccità” da quello di “scarsità idrica”. Il primo rappresenta una condizione in cui una quantità correlata al bilancio idrico differisce da valori “usuali” che si verificano in condizioni “normali”, o medie. Il secondo rappresenta invece una condizione in cui la disponibilità idrica non riesce più a soddisfare i fabbisogni, per esempio quelli idropotabili, o quelli irrigui, o una combinazione di questi. È quindi evidente che la siccità è funzione delle caratteristiche climatiche/ambientali, ma non dei comportamenti sociali o economici. Se, ad esempio, si ipotizzasse un futuro caratterizzato da un regime di siccità più severo rispetto a quello attuale, la scarsità idrica potrebbe comunque non aver necessariamente luogo se, ad esempio, il territorio servito viene abbandonato, e dunque i fabbisogni diminuiscono. È comunque utile sottolineare che il cambiamento climatico potrebbe avere effetto, in linea di principio, su entrambi i termini di paragone, dunque non soltanto sulla siccità ma anche sui fabbisogni, che potrebbero aumentare per effetto dell'aumento delle temperature.

Limitando il focus sulla siccità, a seconda della variabile considerata possono essere distinti tre tipi di siccità (Fleig et al., 2006):

- Siccità meteorologica, consistente in un deficit di precipitazione;
- Siccità agricola, consistente in un deficit di bilancio idro-climatico (differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione potenziale);
- Siccità idrologica, consistente in un deficit di deflusso (superficiale o profondo).

È possibile raggruppare i primi due tipi sotto l'etichetta comune di “siccità climatica”, enfatizzando il ruolo diretto delle condizioni climatiche. La scarsità idrica è talvolta definita come “siccità socio-economica” (Fleig et al., 2006) sebbene in modo improprio, giacché le sue cause sono anche antropogeniche (Van Loon & Van Lanen, 2013). È infine da notare che, nel framework IPCC, è menzionata la “siccità ecologica” per evidenziare lo stress vegetativo dovuto alle condizioni di umidità del suolo (IPCC, 2021).

L'analisi del regime di siccità è tipicamente effettuata a mezzo di specifici indicatori detti “indici standard” (SI), che, per definizione, rappresentano la deviazione dalle condizioni normali che è, a sua volta, l'elemento distintivo di un evento siccioso (si prenda ad esempio un regime climatico in cui solitamente nella stagione estiva vi siano precipitazioni modeste: in questo caso, tali condizioni non rappresentano un evento di siccità, poiché sono quelle “usuali” per quella stagione). Ciascuna tipologia di siccità è rappresentata da uno specifico indice standard, il cui calcolo è identico tranne che per la variabile utilizzata come input per il calcolo: la precipitazione mensile per la siccità meteorologica (l'indice risultante è lo Standardized Precipitation Index, SPI), il bilancio idro-climatico per la siccità agricola (l'indice risultante è lo Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI), la portata idrica per la siccità idrologica. Per quest'ultima, frequenti sono i casi in cui viene utilizzata la portata fluviale, e il relativo indicatore prende il nome di Standardized Streamflow Index,SSI, o Standardized Runoff Index, SRI. Meno comuni sono i casi in cui viene utilizzato il livello di falda (Standardized Groundwater Index, SG) o la portata sorgentizia (Standardized Discharge Index, SDI) (McKey et al., 1993; Shukla & Wood, 2008; Vicente - Serrano et al., 2010; Shamshirband et al., 2020; Leone et al., 2021).

Generalmente, tutti gli indici standard vengono calcolati su base mensile, per tener adeguatamente conto della variabilità intra-annuale. Per ciascun mese del periodo di osservazione, che copre N_y anni, si estrae un campione statistico della variabile X (ad esempio, la precipitazione mensile) accumulata su un periodo scelto formato da k mesi (con k che solitamente va da 1 a 12 mesi). Si ottengono quindi 12 campioni di N_y osservazioni per ciascuna finestra di accumulazione. Per ciascuno di questi campioni viene calibrata una distribuzione di probabilità, mediante la quale è possibile conoscere la probabilità cumulata associata a ciascuna osservazione. Quindi, invertendo la distribuzione normale standard per tali valori di probabilità si ottiene il valore dell'indice standard desiderato (McKee et al., 1993; Guttman, 1999; WMO, 2012).

Quando la variabile non può assumere valori negativi (ad esempio la precipitazione e la portata) il modello di probabilità solitamente adottato è Gamma; negli altri casi (ad esempio per il bilancio idro-climatico, che è in genere negativo in estate) si può utilizzare la distribuzione Log-logistica tri-parametrica o la Generalized Extreme Value (GEV) (Vicente Serrano et al., 2010; Stagge et al., 2015).

L'operazione di standardizzazione trasforma la variabile originaria in una nuova quantità che segue una distribuzione normale standard di media nulla e varianza unitaria. Valori negativi dell'indice rappresentano condizioni in cui la quantità è inferiore alla media (un periodo di siccità), mentre valori positivi indicano condizioni in cui la quantità è superiore alla media (un periodo umido). Un valore nullo rappresenta le condizioni medie. La potenza dell'indice è che, indipendentemente dalla variabile di partenza, può essere costruita una classificazione che rende immediatamente identificabili gli eventi di interesse, e rende confrontabili i vari tipi di siccità (come anche regimi di deflusso elevato). Secondo Edossa et al. (2010) possibili classi sono: ≤ -2 (estremamente asciutto); $-2 < SI \leq -1.5$ (severamente asciutto); $-1.5 < SI \leq -1$ (moderatamente asciutto); $-1 < SI < 1$ (quasi normale); $1 \leq SI < 1.5$ (moderatamente umido); $1.5 \leq SI < 2$ (severamente umido); $SI \geq 2$ (estremamente umido). Per definizione, un evento di siccità inizia quando il valore dell'indice standard scende sotto la soglia riferita alla classe di interesse, e finisce quando il valore risale sopra la soglia.

Soltanamente, gli indici standard sono utilizzati per caratterizzare il regime di siccità, in altre parole per identificare, all'interno di un arco temporale sufficientemente lungo, il numero di eventi di siccità, la loro durata, la loro severità. In questa attività, invece, essi saranno utilizzati per ricercare correlazioni tra variabili climatiche e idrologiche. Infatti, è ben noto che i modelli climatici, come ad esempio quelli in Tabella 1, forniscono risultati solo in termini di variabili climatiche, mentre per conoscere le variabili idrologiche corrispondenti è necessario utilizzare modelli ad hoc. Per bypassare l'utilizzo di modelli idrologici, l'individuazione di correlazioni, nel tempo presente, tra variabili climatiche e idrologiche (nel caso in cui per queste ultime siano disponibili osservazioni), permette di stabilire una relazione più diretta tra clima e idrologia (ad esempio, tra precipitazioni e portate), che può essere rapidamente applicata alle proiezioni disponibili per diversi scenari di concentrazione.

2.2 Lo Spring Anomaly Index (SAI)

Secondo le linee guida ISPRA per il monitoraggio della siccità (Mariani et al., 2018), lo Spring Anomaly Index, o "SAI", è un utile strumento per il monitoraggio della scarsità idrica relativa alla risorsa idrica captata da sorgente, poiché esso confronta una variabile idrologica (considerata come proxy della disponibilità idrica) con una variabile rappresentativa dei fabbisogni. In particolare, la disponibilità (o meglio la capacità di soddisfacimento della domanda) è rappresentata, nelle sue condizioni più gravose, dal minimo di portata sorgentizia Q_{min} , calcolata come valore minimo mensile, anno per anno, delle portate sorgentizie aggregate, appunto, alla scala mensile. Invece, per la rappresentazione della domanda D è possibile utilizzare valori di riferimento stimati dalla pianificazione locale o da altre fonti. Attraverso una metodologia illustrata nel

successivo capoverso, è possibile correlare Q_{min} alla precipitazione relativa alla prima parte dell'anno idrologico, quindi avente luogo prima del mese di realizzazione del minimo di portata. A questo punto, ogni anno, nota la precipitazione, è possibile inferire sul valore di Q_{min} da attendersi: lo scarto percentuale della portata minima prevista dalla domanda D è appunto l'indice SAI.

In generale, il regime di portata sorgentizia è caratterizzato da un periodo di ricarica, durante il quale le portate aumentano, fino a un massimo a cui segue una fase di recessione, in cui invece le portate diminuiscono fino a raggiungere un minimo, tipicamente alla fine dell'autunno (Mariani et al., 2018). Il regime delle portate è essenzialmente regolato dai meccanismi di ricarica, ed è alimentato dalle precipitazioni che cadono, appunto, nell'area di ricarica dell'acquifero. Il regime di precipitazione può essere ben rappresentato dal valore di SPI (o anche da SPEI, qualora sia necessario tenere in debito conto le sottrazioni determinate dall'evapotraspirazione). Dunque, la procedura in oggetto consiste nel comprendere, attraverso analisi di correlazione, quali siano (ovvero, a quali mesi dell'anno sono riferite) le precipitazioni che spiegano la variabilità della portata minima sorgentizia.

La procedura di ricerca della correlazione consiste nei seguenti step:

1. Per l'area di ricarica della falda, si determina una serie temporale rappresentativa delle precipitazioni cumulate mensili (o anche delle temperature medie mensili qualora si voglia calcolare SPEI). Per tale serie temporale si calcola SPI (e/o SPEI) per diverse finestre di accumulazione. Nel presente lavoro si sono considerate finestre da 1 a 12 mesi con passo di 1 mese.
2. Per ogni finestra di accumulazione della precipitazione e per ogni mese dell'anno, si cerca una correlazione tra la serie dei valori di Q_{min} (formata da tanti valori quanti sono gli anni monitorati) e la serie dei valori di SPI (o SPEI) campionata per il mese in oggetto (la serie sarà quindi formata anch'essa da tanti valori quanti sono gli anni monitorati). Il valore rappresentativo della significatività della correlazione è il coefficiente di correlazione ρ , il cui quadrato è il meglio noto coefficiente di determinazione R^2 . Tale coefficiente rappresenta proprio la percentuale di varianza della variabile output (Q_{min}) spiegata dalla variabile input (SPI o SPEI): quanto più il valore è vicino al 100%, tanto più la regressione è significativa ed eventuali correlazioni con altre variabili non sono rilevanti.
3. Si seleziona il mese e la scala di aggregazione per cui la correlazione è più significativa, ovvero presenta il valore di R^2 più alto. Mediante tale relazione è possibile conoscere quindi il valore Q_{min} per qualsiasi valore di SPI/SPEI.

Secondo Mariani et al. (2018) la procedura, come accennato, prosegue con il calcolo del SAI, che però non è oggetto della presente attività. In linea di principio, invece, l'attività prosegue con i seguenti step:

4. Per ciascuna catena modellistica futura si calcola SPI (o SPEI) riferito alla finestra di accumulazione e al mese individuati allo step 3; si noti che sia SPI sia SPEI vengono calcolati prendendo come riferimento, per le distribuzioni di probabilità interne (rispettivamente Gamma e GEV) e per la probabilità di occorrenza di valori nulli, i valori calibrati sul periodo di riferimento.
5. Per ciascun anno del trentennio futuro, noto SPI (o SPEI) si calcola il valore atteso di Q_{min} attraverso la relazione calibrata allo step 3.

2.3 Altre informazioni

La sorgente di Caposele presenta una serie di dati osservativi estremamente lunga (nell'ordine del centinaio di anni), e, nel tempo, è stata oggetto di interessanti studi scientifici che hanno gettato luce sulle sue dinamiche. In particolare, un lavoro molto recente (Leone et al., 2021) ha descritto l'evoluzione degli eventi di siccità (intesi come periodi prolungati in cui la portata sorgentizia è particolarmente inferiore alle

condizioni statisticamente “usuali”) attraverso l’utilizzo di un indice standard del tutto analogo a SPI e SPEI, definito “Standardized Discharge Index” (SDI), ottenuto attraverso la standardizzazione su base mensile delle portate sorgentizie. Scopo principale del lavoro è quello di individuare quale sia la distribuzione di probabilità che meglio interpreta le osservazioni di portata per ciascun mese, che risulta essere il modello Weibull (sebbene non sia testato il modello Gamma, che è invece quello solitamente utilizzato per SPI, e che è usato anche in questa attività). Quindi, il lavoro chiarisce come sia identificabile una relazione tra il trend osservato sulle portate sorgentizie medie annue, che risulta essere di diminuzione, e quelli osservati su precipitazione annua e temperatura annua, di cui solo il secondo risulta statisticamente significativo e di aumento. In ogni caso, gli autori mettono in luce l’esistenza di una dipendenza con entrambe le variabili climatiche, sebbene parzialmente mascherata da un importante grado di autocorrelazione.

3. Nota metodologica: analisi e restituzione dei risultati

In questa sezione viene presentato un approfondimento sull’approccio e le modalità utilizzate per analizzare i risultati della presente attività in un modo che sia rigoroso ma, allo stesso tempo, di immediata interpretazione e che garantisca flessibilità.

3.1 Analisi delle incertezze

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

- I. Incertezze legate alla tecnica di bias correction di precipitazione e temperatura. Questo tipo di incertezza può essere quantificato solo confrontando i risultati ottenuti utilizzando un insieme di metodi di bias correction, il che non è l’oggetto di questa attività e costituirebbe un forte aggravio dal punto di vista computazionale.
- II. Incertezze legate alla *goodness of fit* della correlazione. Per quanto sia intuitivo pensare che le portate sorgentizie siano influenzate dalle precipitazioni verificatesi in fase di ricarica, eventualmente sottratte dell’evapotraspirazione, non vi è modo di sapere a priori se tale considerazione si possa trasformare in una correlazione statisticamente significativa. La robustezza della valutazione di portate minime sorgentizie da attendersi in futuro potrebbe essere compromessa dall’utilizzo di correlazioni scarsamente significative.
- III. Incertezze legate all’utilizzo di un ensemble di modelli climatici (Tabella 1). Tali incertezze consistono nella variabilità dei risultati in termini di precipitazione e temperatura allorquando si utilizzano diverse catene di simulazione climatica. Tale variabilità può essere facilmente quantificata confrontando tra loro i diversi output disponibili. L’approccio con cui tale fonte di incertezza può essere analizzata non è univoco: tuttavia, lo stato dell’arte solitamente fa riferimento ad un approccio di tipo statistico, in cui il valore più vicino alla “verità” è il valore medio, lo scostamento medio dalla “verità” è la deviazione standard. In altre parole, l’insieme delle realizzazioni ottenute utilizzando in input al modello idrologico diverse simulazioni climatiche viene trattato come un vero e proprio campione statistico.

Per quanto riguarda la prima fonte di incertezza, come già menzionato non è oggetto di questa attività indagare circa l’effetto della scelta di una specifica tecnica di bias correction, e non è dunque possibile in questa sede quantificarne la relativa incertezza. Per quanto riguarda la seconda fonte, la sua rilevanza potrà essere chiarita solo quando l’attività sia completata: ad ogni modo, questa incertezza può essere quantificata proprio indicando il valore del coefficiente di determinazione R^2 delle correlazioni presentate, che è proprio definito come percentuale di varianza della variabile target spiegata dalla variabile input. Per quanto riguarda infine la terza fonte di incertezza, essa verrà quantificata come segue.

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

3.2 Analisi della portata minima sorgentizia

Per le due sorgenti oggetto di studio, l’output dell’analisi è costituito dal valore medio (ovvero mediato all’interno del trentennio di riferimento e del trentennio futuro) di portata minima mensile Q_{min} , per ogni catena modellistica e per ogni scenario di concentrazione. Il valore medio inter-annuale di Q_{min} (o “portata minima sorgentizia media annua”) verrà nel seguito indicato come $Q_{min,m}$. In linea di principio, le analisi possono essere condotte con due approcci:

1. Analizzando separatamente i valori di $Q_{min,m}$ sul periodo di riferimento e i valori di $Q_{min,m}$ futuri, in altre parole fornendo, per ciascuno dei due periodi, un valore “vero” (EM) e l’incertezza (DS e/o CV).
2. Analizzando la variabile “variazione di portata minima sorgentizia media annua” 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 la differenza tra i due approcci presenta un risvolto per quanto concerne l’interpretazione dei parametri di incertezza. Si supponga di avere un campione di valori di portata x_R sul periodo di riferimento (di media EM_1 , deviazione standard DS_1 e $CV_1 = DS_1/EM_1$) e un campione x_F sull’orizzonte futuro (di media EM_2 , deviazione standard DS_2 e $CV_2 = DS_2/EM_2$). Si definisca inoltre la variabile differenza $x_d = x_F - x_R$, associata a EM_3 , DS_3 e $CV_3 = DS_3/EM_3$. Nel caso migliore, in cui il valore di riferimento sia certo (tutte le simulazioni sul periodo presente danno lo stesso risultato, dunque $DS_1 = CV_1 = 0$), allora la variabilità della differenza è dovuta unicamente alla variabilità dei valori futuri, ovvero $DS_3 = DS_2$. Tuttavia, EM_3 sarà uguale a EM_2 sottratta del valore di riferimento (unico), e dunque $EM_3 \leq EM_2$. Di conseguenza, $CV_3 \geq CV_2$: in altre parole, per il solo effetto di aver effettuato un’operazione di sottrazione, il coefficiente di variazione è aumentato, poiché la deviazione standard si è trovata ad essere molto più grande della media. È inoltre da notare che, quando EM_3 tende a zero (quando cioè la media della variazione attesa è nulla o comunque molto piccola), CV_3 tende rapidamente a infinito. Non è sorprendente quindi ottenere localmente valori di CV_3 “stranamente” elevati, ovvero di svariati ordini di grandezza superiori rispetto agli altri (altri bacini, altri scenari, altri mesi).

Dal punto di vista delle azioni di adattamento, è chiaro che il valore assoluto di portata minima sorgentizia da attendersi in futuro è più utile della variazione, poiché esso può fungere, ad esempio, da valore di

riferimento per la pianificazione di interventi. L'informazione della variazione è invece sufficiente quando si voglia più che altro individuare e descrivere eventuali pericoli che possano insorgere o inasprirsi per effetto del cambiamento climatico. Nel caso in esame, dal punto di vista climatico, si ha pieno possesso del dataset climatico utilizzato come riferimento (E-OBS), e pieno controllo dell'esito della bias correction, che è stata condotta ad hoc per la Convenzione. Di conseguenza, in linea di principio, le variabili climatiche future possono essere considerate valide anche in valore assoluto. Per quanto riguarda invece l'output idrologico, i valori assoluti sono da considerarsi meno affidabili, poiché non tengono conto di possibili cambiamenti in altri elementi non climatici, quali gli usi del suolo, o i prelievi dall'acquifero. Inoltre, l'affidabilità potrebbe essere inficiata dalla cattiva qualità delle correlazioni ritrovate nell'analisi. Di conseguenza, si preferisce, come per tutte le altre attività della Convenzione, fornire i risultati in termini di variazione, in modo tale da isolare il solo effetto del cambiamento climatico. Verranno comunque sempre forniti i valori idrologici di riferimento, che sono certi, poiché dati da osservazioni.

Per quanto riguarda l'incertezza, a rigore, per effetto dell'utilizzo di un ensemble di catene di simulazione climatica esisterà una variabilità nella stima di $Q_{min,m}$ sul periodo di riferimento, una variabilità nella stima di $Q_{min,m}$ sul periodo futuro, e una variabilità della variazione percentuale. La prima variabilità è ridotta, poiché, dopo la bias correction, precipitazione e temperatura da modello sul periodo di riferimento coincideranno proprio con E-OBS a meno di scarti casuali. L'entità della seconda variabilità è da stimarsi a seguito delle analisi, con esito non prevedibile a priori. La terza variabilità viene di conseguenza, ma sarà certamente maggiormente dovuta alla variabilità dei valori futuri. Tuttavia, se si analizza il coefficiente di variazione CV, il valore nel terzo caso sarà certamente maggiore del secondo, poiché, anche considerando il riferimento certo, esso sarà dato dal rapporto tra la stessa deviazione standard dei valori futuri e il valore medio della differenza, dunque più piccolo. Esiste inoltre una stima "esatta" di $Q_{min,m}$ ottenuta mediando le osservazioni misurate sul periodo di riferimento. Nella presente attività, verranno forniti, per ciascuna sorgente, i seguenti risultati:

- $Q_{min,m}$ sul periodo di riferimento 1983-2010 determinato dalle osservazioni: esso costituisce il riferimento certo, dunque privo di variabilità.
- EM, DS e CV della variazione percentuale di $Q_{min,m}$ attesa sull'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per ciascuno scenario.
- EM, DS e CV dei valori assoluti di $Q_{min,m}$ sul periodo di riferimento 1983-2010 e sull'orizzonte futuro 2021-2050, per ciascuno scenario (in Appendice).

Si noti che il confronto (ad esempio, la variazione percentuale) tra la stima ottenuta per $Q_{min,m}$ a partire dalle osservazioni e la stima ottenuta da ciascuna catena di simulazione climatica sul periodo di riferimento rappresenta il "bias B", ovvero l'errore medio commesso dal modello climatico nel rappresentare la realtà. Riassumendo, è possibile utilizzare alcuni parametri per ricostruire la catena delle incertezze:

1. L'incertezza insita nel modello empirico è rappresentata dal coefficiente di determinazione R^2 descritto nei paragrafi precedenti. Esso rappresenta la porzione di varianza di Q_{min} spiegata attraverso SPI o SPEI. Più è basso il valore, più incerta è la stima di Q_{min} .
2. La differenza percentuale tra la stima di $Q_{min,m}$ ottenuta a partire da E-OBS e quella ottenuta a partire dalle simulazioni climatiche, per ogni catena, sul periodo 1983-2010, è rappresentativa del bias del modello climatico. Essa può essere considerata scevra dall'incertezza legata al modello empirico (nonostante questo sia necessario per passare dalla precipitazione alla portata sorgenzia), poiché entrambi i termini del confronto sono ricavati dal modello empirico e dunque differiscono soltanto per l'input di precipitazione.

-
3. I valori di EM, DS e CV di questa differenza percentuale connotano la variabilità del bias. È lecito attendersi che il valore di DS sia molto piccolo, poiché le precipitazioni simulate sono bias-corrette, dunque molto simili tra loro.
 4. La differenza percentuale tra la stima di $Q_{min,m}$ ottenuta a partire dalle simulazione climatiche, per ogni catena, sul periodo 2021-2050 e sul periodo 1983-2010 rappresenta il segnale climatico medio, cioè la misura dell'effetto medio del cambiamento climatico sulla portata sorgentizia per ciascuna catena di simulazione climatica. Come al punto 2, questa differenza percentuale non contiene in sé l'incertezza legata al modello empirico, applicato su entrambi i termini del confronto.
 5. I valori di EM, DS e CV di questa differenza percentuale connotano la variabilità dell'effetto del cambiamento climatico sul minimo di portata sorgentizia.

3.3 Analisi complementari

Come anticipato in Premessa, la significatività delle correlazioni ritrovate in questa attività tra precipitazione e minimo di portata sorgentizia non è alta. Si è deciso dunque di estendere l'oggetto delle indagini ad altre variabili più promettenti.

Secondo la definizione dello Spring Anomaly Index, la portata minima sorgentizia risulta di interesse poiché essa consente di valutare la possibilità di soddisfare la domanda nelle condizioni più gravose, quando cioè le portate erogate dalla sorgente sono minime. La necessità di stimare la portata minima sorgentizia a partire da SPI o SPEI è funzionale al calcolo di SAI, e può essere soddisfatta solo se la correlazione tra tali elementi è significativa. Tuttavia, il calcolo di SAI non è lo scopo di questa attività, che è invece finalizzata, in senso lato, a comprendere quali possano essere gli effetti del cambiamento climatico sulla disponibilità di risorsa idrica da sorgente.

Nell'ipotesi che la stima di Q_{min} da attendersi in futuro non sia una soluzione perseguitabile, si è deciso di ricercare correlazioni di indici di siccità climatica con il massimo di portata sorgentizia, che si suppone possano essere più significative. In linea di principio, infatti, la ricarica dell'acquifero è strettamente dovuta alle precipitazioni nella zona di alimentazione, ed è lecito ipotizzare che quanto maggiori sono tali precipitazioni, tanto maggiori saranno le portate massime. A rigore ciò è valido anche per le portate minime: tuttavia, i meccanismi di svuotamento dell'acquifero non sono legati alle condizioni climatiche, quanto piuttosto alle caratteristiche fisiche e idrogeologiche dell'acquifero stesso. La connessione tra portate minime e precipitazioni potrebbe essere attenuata da tali caratteristiche, mentre la connessione tra portate massime (da qui in avanti indicate come Q_{max}) e precipitazioni potrebbe risultare più diretta.

Le stesse valutazioni, in termini di rappresentazione dei risultati, presentate per il minimo di portata sorgentizia verranno dunque effettuate anche per il massimo di portata sorgentizia.

4. Risultati

Le Figure 2, 3 e 4 mostrano, per le due sorgenti, il pattern medio annuo e la variabilità di portata sorgentizia mensile, precipitazione cumulata mensile ed evapotraspirazione potenziale cumulata mensile, calcolata mediante la formula di Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). Per quanto riguarda le portate (Figura 2), si evince come le due sorgenti abbiano un comportamento differente: la sorgente di Caposele presenta portate molto più omogenee sull'anno, con un minimo e un massimo poco pronunciati e molto simili tra loro, che si verificano rispettivamente in dicembre-gennaio e maggio-giugno; la sorgente di Cassano Irpino, invece, presenta dei picchi molto più netti, con valori massimi e minimi leggermente anticipati rispetto a Caposele,

che si verificano rispettivamente in marzo-aprile-maggio e ottobre-novembre. In entrambi i casi, comunque, sussiste un'elevata variabilità.

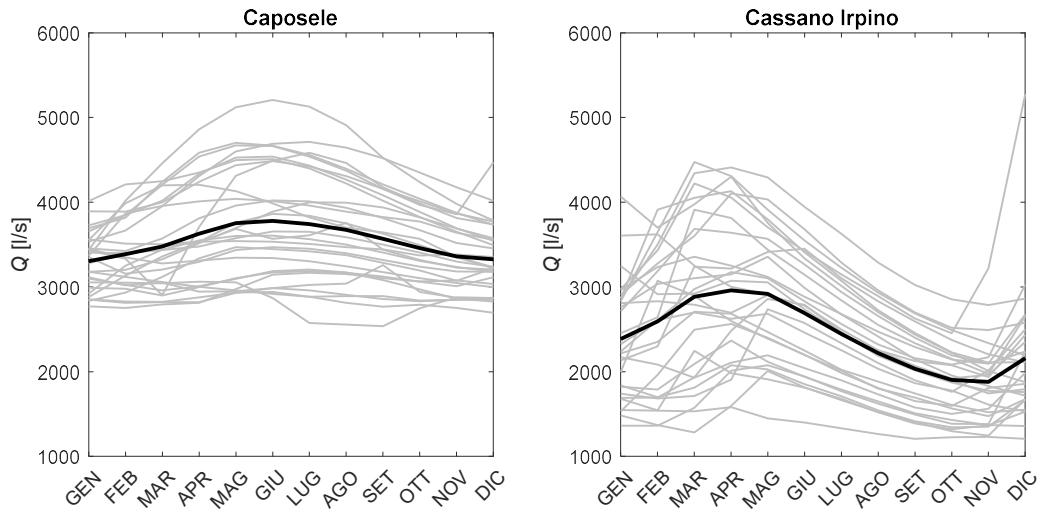


Figura 2: Pattern medio annuo di portata sorgentizia media mensile (valori basati su osservazioni per il periodo 1983-2010).

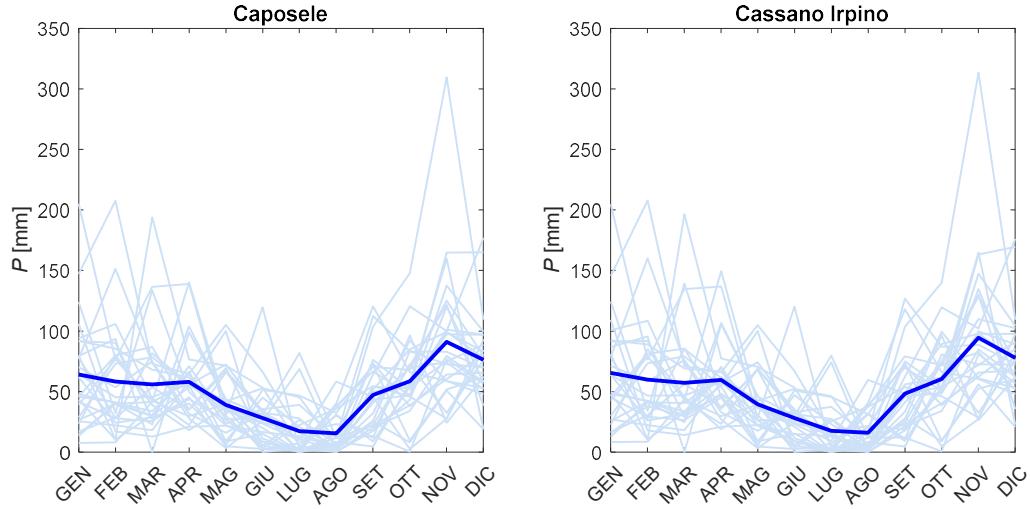


Figura 3: Pattern medio annuo di precipitazione cumulata mensile (valori basati su E-OBS, media spaziale, per il periodo 1983-2010).

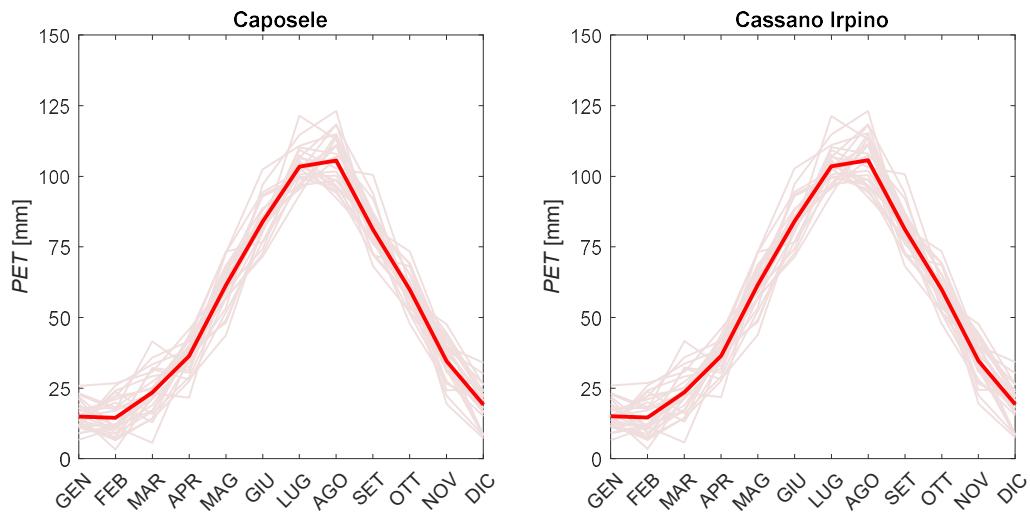
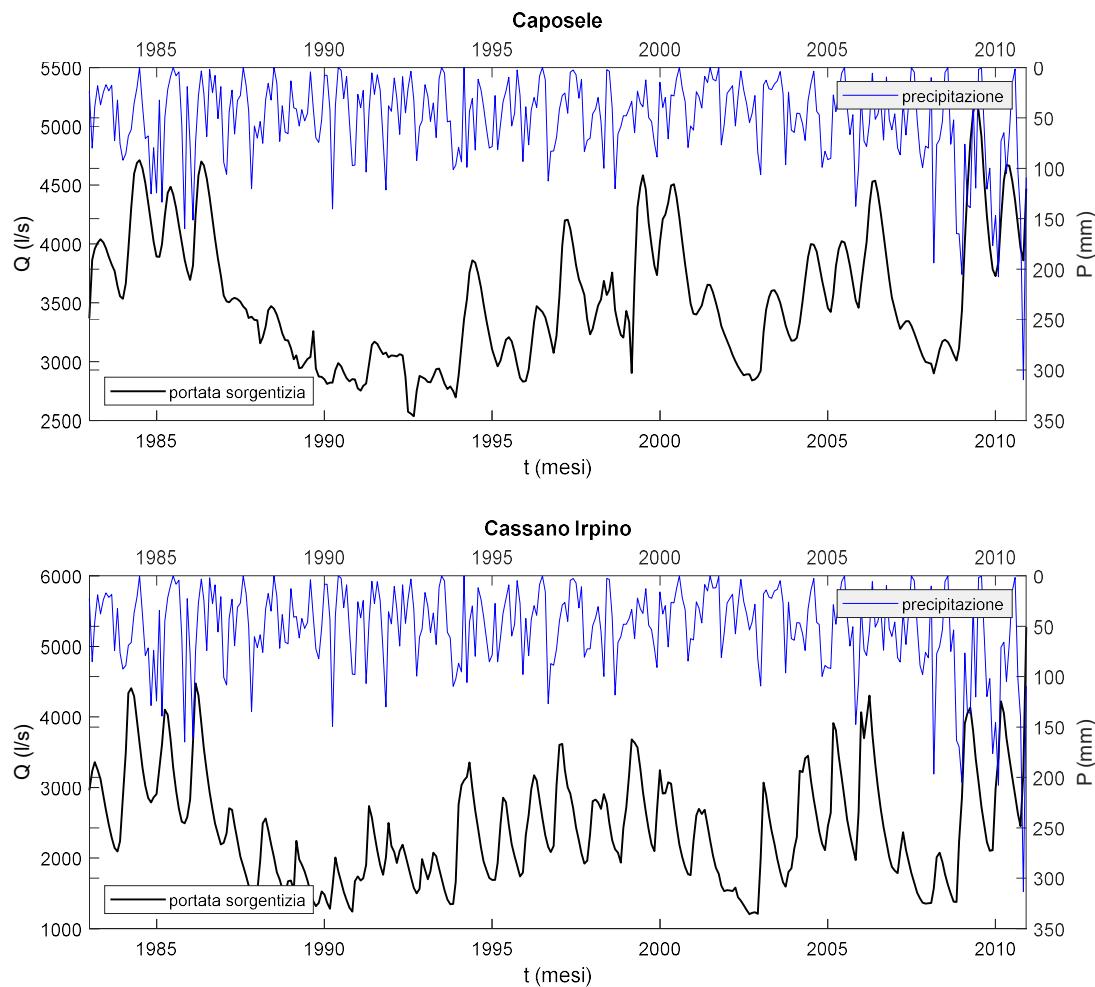


Figura 4: Pattern medio annuo di evapotraspirazione potenziale cumulata mensile (valori basati su E-OBS, media spaziale, per il periodo 1983-2010).

Le Figure 3 e 4 mettono invece in evidenza come le caratteristiche climatiche insistenti sui due acquiferi di riferimento delle sorgenti siano estremamente simili, coerentemente con la loro contiguità geografica. In entrambi i casi, il massimo delle precipitazioni si verifica mediamente nel mese di novembre-dicembre, mentre il minimo si ha in luglio-agosto. Le temperature massime si verificano, similmente, in luglio-agosto, e a queste corrisponde il massimo dell'evapotraspirazione potenziale. Confrontando le Figure 3 e 4, si nota che il bilancio idro-climatico, ovvero la differenza, su base mensile, tra precipitazione ed evapotraspirazione potenziale, risulta in media certamente negativo in estate, dove l'evapotraspirazione è di un ordine di grandezza maggiore della precipitazione. Si nota inoltre, come accade usualmente, che la variabilità tra anno e anno per la precipitazione mensile è molto più alta rispetto a quella relativa alla temperatura, e dunque all'evapotraspirazione potenziale.

Le Figure 5 e 6 mostrano invece l'intera serie temporale di valori, mettendo a confronto, per ciascun mese del periodo di riferimento, le portate sorgentizie con le precipitazioni cumulate.



4.1 Correlazione tra SPI, SPEI e minimo di portata sorgentizia

Le Tabelle 2 e 3 mostrano i valori del coefficiente di determinazione R^2 rappresentativi del grado di correlazione tra l'indice di siccità meteorologica SPI, campionato su ciascun mese, e il minimo di portata sorgentizia Q_{min} . In tali tabelle, k indica l'ampiezza della finestra di accumulazione delle precipitazioni per il calcolo dell'indice SPI, mentre m indica il mese di campionamento di SPI. Nelle Tabelle, una campitura rossa

indica un valore di R^2 compreso tra 0.4 e 0.5, una campitura gialla indica un valore di R^2 compreso tra 0.5 e 0.6, una campitura verde indica un valore di R^2 maggiore di 0.6. Tali soglie sono state stabilite arbitrariamente, sulla base dell'insieme delle realizzazioni ottenute in questa attività.

Tabella 2. Per la sorgente di Caposele, correlazione (R^2) tra SPI, campionato mensilmente, e Q_{min} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.209	0.387	0.119	0.029	0.024	0.038	0.001	0.005	0.003	0.008	0.117	0.049
2	0.248	0.412	0.376	0.017	0.039	0.000	0.010	0.001	0.004	0.006	0.035	0.033
3	0.296	0.413	0.388	0.219	0.007	0.008	0.000	0.016	0.006	0.011	0.028	0.006
4	0.273	0.429	0.399	0.293	0.146	0.014	0.004	0.001	0.001	0.006	0.024	0.005
5	0.245	0.419	0.406	0.313	0.225	0.133	0.013	0.004	0.000	0.000	0.036	0.004
6	0.234	0.393	0.399	0.325	0.251	0.206	0.116	0.015	0.006	0.002	0.049	0.008
7	0.236	0.382	0.379	0.316	0.288	0.229	0.192	0.125	0.009	0.010	0.024	0.015
8	0.238	0.382	0.370	0.302	0.280	0.264	0.221	0.204	0.089	0.002	0.008	0.006
9	0.177	0.371	0.365	0.297	0.273	0.260	0.250	0.228	0.161	0.061	0.031	0.001
10	0.117	0.302	0.355	0.292	0.268	0.254	0.249	0.257	0.190	0.120	0.103	0.014
11	0.158	0.225	0.300	0.286	0.259	0.250	0.244	0.255	0.225	0.141	0.149	0.067
12	0.211	0.245	0.237	0.240	0.254	0.240	0.241	0.250	0.227	0.180	0.175	0.108

Tabella 3. Per la sorgente di Cassano Irpino, correlazione (R^2) tra SPI, campionato mensilmente, e Q_{min} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.246	0.317	0.045	0.005	0.004	0.014	0.002	0.006	0.023	0.022	0.100	0.021
2	0.317	0.391	0.240	0.009	0.008	0.000	0.002	0.003	0.027	0.050	0.083	0.041
3	0.203	0.411	0.303	0.152	0.005	0.003	0.000	0.010	0.021	0.049	0.110	0.041
4	0.257	0.307	0.344	0.236	0.109	0.007	0.002	0.002	0.029	0.066	0.121	0.059
5	0.258	0.366	0.266	0.290	0.192	0.093	0.006	0.000	0.015	0.064	0.159	0.063
6	0.311	0.371	0.314	0.222	0.243	0.165	0.081	0.010	0.004	0.036	0.149	0.084
7	0.271	0.422	0.323	0.262	0.204	0.212	0.154	0.095	0.027	0.016	0.100	0.079
8	0.224	0.385	0.364	0.274	0.239	0.180	0.205	0.171	0.106	0.040	0.063	0.055
9	0.218	0.327	0.329	0.313	0.257	0.212	0.170	0.220	0.180	0.121	0.079	0.034
10	0.176	0.319	0.283	0.281	0.294	0.228	0.202	0.182	0.229	0.187	0.152	0.050
11	0.186	0.275	0.283	0.243	0.262	0.261	0.217	0.215	0.203	0.225	0.201	0.111
12	0.178	0.258	0.252	0.243	0.225	0.231	0.250	0.231	0.238	0.207	0.246	0.155

La prima osservazione, immediata, è che non esistono correlazioni particolarmente significative, intese come correlazioni caratterizzate da valori di R^2 che superino il 50%. Per entrambe le sorgenti, comunque, il periodo di accumulazione di SPI che spiega meglio la variabilità delle portate minime è pari a due mesi. Per la sorgente di Caposele, Q_{min} , che si verifica mediamente alla fine dell'anno, è meglio spiegata dalle precipitazioni cumulate sui mesi da novembre a febbraio (cioè da SPI a 4 mesi campionato nel mese di febbraio) dello stesso anno idrologico, mentre per la sorgente di Cassano Irpino Q_{min} è meglio spiegata dalle precipitazioni cumulate da agosto a febbraio (cioè da SPI a 7 mesi campionato sempre a febbraio). In altre parole, la sorgente di Cassano Irpino “ricorda”, rispetto a Caposele, le piogge più lontane nel tempo. In ogni caso, comunque, la miglior correlazione non riesce a spiegare nemmeno la metà della variabilità di Q_{min} , con valori di R^2 pari a 42.9% e 42.2% rispettivamente.

Si noti che, a differenza di quanto proposto da Mariani et al. (2018), per quanto concerne le scale di accumulazione di SPI ci si è fermati ai soli 12 mesi (contro i 24 proposti) poiché si evince, dalle Tabelle 2 e 3, come in realtà i valori di significatività siano modesti per scale di ampiezza molto piccola e molto grande.

Appare quindi superfluo estendere l'indagine a periodi di accumulazione più ampi. Si noti inoltre che le correlazioni sono molto poco significative per i mesi autunnali e invernali: ciò è facilmente spiegato se si considera che, ad esempio, SPI campionato a dicembre comprende le precipitazioni di fine autunno e inizio inverno, dunque contemporanee (e per la sorgente di Cassano Irpino in alcuni anni anche posteriori) alle portate minime sorgentizie.

Le Tabelle 4 e 5 mostrano analoghi risultati ottenuti utilizzando SPEI in luogo di SPI. Anche in questo caso le regressioni sono molto poco significative, con un valore massimo di R^2 pari a 41.3% e 47.5% per Caposele e Cassano Irpino rispettivamente. Per la prima sorgente, la correlazione massima si ha tra Q_{min} e il bilancio idro-climatico cumulato sui mesi di gennaio-febbraio; in questo caso, il risultato ottenuto utilizzando SPEI è peggiore rispetto a quello ottenuto utilizzando SPI. Per la seconda sorgente, la correlazione massima si ha tra Q_{min} e il bilancio idro-climatico cumulato sui mesi di agosto-febbraio, e in questo caso il risultato ottenuto utilizzando SPEI è migliore rispetto a quello ottenuto utilizzando SPI.

Tabella 4. Per la sorgente di Caposele, correlazione (R^2) tra SPEI, campionato mensilmente, e Q_{min} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.211	0.364	0.141	0.038	0.031	0.037	0.020	0.000	0.003	0.001	0.110	0.068
2	0.218	0.413	0.376	0.020	0.047	0.000	0.004	0.006	0.001	0.009	0.024	0.015
3	0.248	0.395	0.379	0.236	0.003	0.012	0.000	0.008	0.002	0.003	0.006	0.000
4	0.220	0.382	0.376	0.273	0.141	0.010	0.010	0.003	0.007	0.004	0.006	0.001
5	0.179	0.368	0.352	0.292	0.184	0.123	0.007	0.006	0.000	0.000	0.007	0.000
6	0.154	0.347	0.357	0.270	0.198	0.171	0.100	0.010	0.003	0.004	0.017	0.004
7	0.169	0.316	0.343	0.273	0.225	0.175	0.146	0.115	0.004	0.018	0.004	0.001
8	0.164	0.325	0.318	0.261	0.226	0.203	0.154	0.157	0.079	0.000	0.000	0.002
9	0.109	0.309	0.321	0.241	0.222	0.208	0.178	0.157	0.123	0.044	0.014	0.007
10	0.061	0.230	0.305	0.244	0.207	0.207	0.185	0.185	0.123	0.084	0.074	0.001
11	0.108	0.160	0.244	0.234	0.203	0.195	0.185	0.186	0.152	0.080	0.103	0.039
12	0.175	0.191	0.184	0.185	0.196	0.190	0.177	0.184	0.153	0.108	0.105	0.063

Tabella 5. Per la sorgente di Cassano Irpino, correlazione (R^2) tra SPEI, campionato mensilmente, e Q_{min} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.261	0.354	0.075	0.001	0.001	0.023	0.002	0.006	0.018	0.040	0.091	0.038
2	0.363	0.442	0.295	0.032	0.003	0.007	0.006	0.003	0.020	0.039	0.076	0.026
3	0.196	0.467	0.354	0.228	0.016	0.000	0.007	0.018	0.032	0.054	0.071	0.026
4	0.264	0.338	0.397	0.309	0.164	0.021	0.000	0.020	0.058	0.071	0.074	0.026
5	0.275	0.425	0.313	0.374	0.241	0.138	0.019	0.003	0.040	0.071	0.118	0.033
6	0.340	0.432	0.374	0.259	0.286	0.211	0.125	0.025	0.026	0.045	0.127	0.041
7	0.283	0.475	0.385	0.316	0.235	0.251	0.199	0.145	0.039	0.024	0.081	0.047
8	0.208	0.423	0.422	0.336	0.285	0.207	0.243	0.213	0.145	0.052	0.052	0.033
9	0.204	0.336	0.370	0.375	0.318	0.251	0.194	0.248	0.210	0.147	0.083	0.020
10	0.167	0.320	0.302	0.327	0.355	0.282	0.238	0.200	0.239	0.212	0.165	0.048
11	0.189	0.282	0.298	0.269	0.308	0.319	0.268	0.242	0.211	0.230	0.216	0.117
12	0.190	0.272	0.273	0.264	0.256	0.277	0.306	0.274	0.260	0.211	0.244	0.167

4.2 Correlazione tra SPI, SPEI e massimo di portata sorgentizia

Le Tabelle 6 e 7 mostrano i valori di R^2 rappresentativi della correlazione tra Q_{max} e SPI, per diverse finestre di accumulazione, campionato su base mensile. Rispetto alle Tabelle 2 e 3, si nota come le correlazioni siano più significative, con valori che superano in alcuni i casi il 50%. Per la sorgente di Caposele Q_{max} risulta

particolarmente correlata con le precipitazioni cumulate sui mesi di agosto-febbraio ($R^2 = 56.8\%$), e lo stesso vale per la sorgente di Cassano Irpino Q_{max} ($R^2 = 69.5\%$).

Tabella 6. Per la sorgente di Caposele, correlazione (R^2) tra SPI, campionato mensilmente, e Q_{max} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.252	0.341	0.057	0.006	0.058	0.142	0.017	0.012	0.002	0.004	0.049	0.001
2	0.332	0.414	0.252	0.036	0.009	0.004	0.110	0.000	0.000	0.006	0.033	0.030
3	0.353	0.448	0.327	0.209	0.007	0.005	0.021	0.128	0.004	0.001	0.031	0.019
4	0.363	0.448	0.372	0.303	0.113	0.029	0.020	0.023	0.054	0.018	0.023	0.019
5	0.432	0.474	0.376	0.347	0.206	0.140	0.046	0.020	0.012	0.062	0.056	0.014
6	0.456	0.546	0.401	0.348	0.253	0.223	0.152	0.047	0.012	0.018	0.102	0.038
7	0.416	0.568	0.465	0.365	0.283	0.264	0.239	0.156	0.037	0.016	0.046	0.067
8	0.361	0.527	0.483	0.424	0.300	0.289	0.285	0.247	0.122	0.038	0.039	0.032
9	0.344	0.464	0.443	0.444	0.361	0.306	0.302	0.289	0.206	0.120	0.056	0.027
10	0.255	0.451	0.394	0.408	0.379	0.360	0.319	0.305	0.250	0.192	0.125	0.044
11	0.291	0.360	0.393	0.364	0.341	0.377	0.371	0.322	0.277	0.224	0.180	0.104
12	0.286	0.366	0.328	0.361	0.303	0.342	0.389	0.376	0.296	0.258	0.213	0.153

Tabella 7. Per la sorgente di Cassano Irpino, correlazione (R^2) tra SPI, campionato mensilmente, e Q_{max} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.309	0.476	0.046	0.001	0.032	0.084	0.017	0.001	0.018	0.002	0.117	0.006
2	0.432	0.549	0.342	0.013	0.017	0.002	0.063	0.010	0.012	0.020	0.066	0.062
3	0.396	0.609	0.431	0.242	0.003	0.000	0.016	0.091	0.033	0.015	0.083	0.038
4	0.436	0.558	0.500	0.367	0.152	0.013	0.005	0.026	0.071	0.056	0.083	0.050
5	0.473	0.613	0.463	0.435	0.271	0.156	0.025	0.007	0.030	0.086	0.156	0.048
6	0.512	0.655	0.509	0.399	0.340	0.263	0.167	0.028	0.014	0.038	0.183	0.095
7	0.480	0.695	0.551	0.434	0.347	0.325	0.277	0.179	0.038	0.020	0.106	0.113
8	0.433	0.666	0.583	0.478	0.379	0.329	0.345	0.293	0.164	0.043	0.073	0.068
9	0.408	0.601	0.549	0.511	0.430	0.361	0.339	0.357	0.270	0.165	0.090	0.047
10	0.343	0.577	0.500	0.480	0.461	0.405	0.371	0.349	0.330	0.255	0.199	0.064
11	0.369	0.511	0.492	0.438	0.426	0.434	0.415	0.381	0.340	0.302	0.268	0.158
12	0.367	0.489	0.449	0.430	0.386	0.401	0.444	0.427	0.376	0.324	0.315	0.220

Tabella 8. Per la sorgente di Caposele, correlazione (R^2) tra SPEI, campionato mensilmente, e Q_{max} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.245	0.366	0.065	0.003	0.080	0.113	0.009	0.024	0.000	0.015	0.036	0.006
2	0.312	0.434	0.276	0.038	0.017	0.002	0.093	0.000	0.002	0.003	0.021	0.009
3	0.305	0.466	0.331	0.239	0.002	0.001	0.019	0.087	0.002	0.001	0.008	0.004
4	0.330	0.430	0.369	0.280	0.114	0.019	0.012	0.016	0.066	0.013	0.002	0.001
5	0.392	0.464	0.343	0.323	0.163	0.131	0.037	0.015	0.008	0.049	0.020	0.000
6	0.395	0.554	0.387	0.281	0.196	0.176	0.147	0.034	0.013	0.007	0.052	0.002
7	0.357	0.543	0.469	0.334	0.210	0.197	0.191	0.150	0.022	0.006	0.012	0.012
8	0.278	0.503	0.463	0.408	0.252	0.212	0.217	0.186	0.110	0.021	0.009	0.002
9	0.257	0.414	0.421	0.409	0.329	0.251	0.223	0.205	0.153	0.093	0.027	0.002
10	0.183	0.382	0.351	0.373	0.332	0.320	0.258	0.220	0.169	0.140	0.089	0.012
11	0.231	0.299	0.341	0.313	0.295	0.327	0.324	0.247	0.191	0.152	0.124	0.062
12	0.251	0.315	0.280	0.303	0.246	0.293	0.334	0.310	0.215	0.175	0.140	0.090

Tabella 9. Per la sorgente di Cassano Irpino, correlazione (R^2) tra SPEI, campionato mensilmente, e Q_{max} .

k \ m	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1	0.313	0.496	0.061	0.001	0.031	0.082	0.009	0.001	0.008	0.020	0.097	0.017
2	0.422	0.575	0.383	0.027	0.016	0.005	0.065	0.009	0.004	0.012	0.050	0.027
3	0.347	0.624	0.452	0.310	0.003	0.000	0.028	0.085	0.028	0.017	0.030	0.014
4	0.398	0.527	0.514	0.407	0.183	0.016	0.006	0.046	0.108	0.051	0.028	0.008
5	0.444	0.611	0.454	0.478	0.266	0.176	0.029	0.014	0.044	0.083	0.084	0.012
6	0.477	0.670	0.523	0.373	0.317	0.257	0.190	0.031	0.034	0.034	0.117	0.026
7	0.439	0.683	0.576	0.439	0.298	0.300	0.264	0.210	0.035	0.018	0.054	0.043
8	0.363	0.651	0.590	0.499	0.360	0.283	0.308	0.271	0.180	0.037	0.035	0.021
9	0.336	0.557	0.545	0.520	0.430	0.337	0.282	0.304	0.244	0.157	0.063	0.013
10	0.274	0.517	0.473	0.478	0.452	0.401	0.336	0.286	0.265	0.226	0.168	0.034
11	0.323	0.452	0.456	0.417	0.410	0.427	0.400	0.331	0.268	0.244	0.222	0.121
12	0.335	0.448	0.415	0.400	0.355	0.388	0.428	0.394	0.313	0.254	0.245	0.171

Le Tabelle 8 e 9 mostrano le stesse correlazioni, valutate però tra Q_{max} e SPEI, per diverse finestre di accumulazione, campionato su base mensile. Rispetto alle Tabelle 4 e 5, si nota come anche in questo caso le correlazioni siano più significative rispetto a quelle relative a Q_{min} , con valori che superano spesso il 50%. Per entrambe le sorgenti, Q_{max} risulta particolarmente correlata con il bilancio idro-climatico cumulato sui mesi di agosto-febbraio ($R^2 = 55.4\%$ e 68.3% per Caposele e Cassano Irpino rispettivamente). Confrontando con le Tabelle 6 e 7, invece, si evince che le correlazioni con SPEI risultano per entrambe leggermente meno soddisfacenti di quelle ottenute con SPI.

Sulla base dei risultati, sia il massimo sia il minimo di portata sorgentizia possono essere stimati sulla base della conoscenza di SPI, riferito a un preciso mese dell'anno e a una precisa finestra di accumulazione delle precipitazioni, il primo in modo un po' più soddisfacente del secondo. Le migliori correlazioni sono riportate nell'Eq. 1 per la sorgente di Caposele, nell'Eq. 2 per la sorgente di Cassano Irpino:

$$Q_{min} = 3134 + 224.3 \cdot SPI(k = 4, m = 2) \quad (1a)$$

$$Q_{max} = 3833 + 480.2 \cdot SPI(k = 7, m = 2) \quad (1b)$$

$$Q_{min} = 1791 + 261.0 \cdot SPI(k = 7, m = 2) \quad (2a)$$

$$Q_{max} = 3164 + 742.9 \cdot SPI(k = 7, m = 2) \quad (2b)$$

dove k indica l'ampiezza della finestra di accumulazione, e m indica il mese di campionamento.

4.3 Variazione attesa in futuro della portata minima e massima sorgentizia

Utilizzando le Eq. 1 e 2, è possibile stimare il valore di Q_{min} e Q_{max} sulla base della conoscenza di SPI. Seguendo tale logica, è possibile inferire circa le portate sorgentizie che si verificheranno, in media, in futuro, utilizzando le proiezioni di precipitazione fornite dall'ensemble EURO-CORDEX bias-corretto in Tabella 1. La Tabella 10 mostra, per le due sorgenti, l'ensemble mean EM delle variazioni percentuali di portata minima sorgentizia media $Q_{min,m}$, con, inoltre, i valori di riferimento ricavati dalle osservazioni. L'informazione di EM è corredata dalla deviazione standard DS, e dal loro rapporto rappresentato dal coefficiente di variazione CV. Analogamente, la Tabella 11 mostra le stesse informazioni, riguardanti però la stima della portata massima

sorgenzia media $Q_{max,m}$. Nelle Tabelle 10 e 11, sono usate diverse campiture per facilitare la lettura dei risultati: per il valore di riferimento, il verde pieno corrisponde a una portata pari a 3000 l/s; per l'ensemble mean delle variazioni, il blu pieno corrisponde a un valore inferiore a -2%, mentre il rosso pieno corrisponde a un valore superiore a +2%; per il coefficiente di variazione, il massimo riempimento si ha per valori maggiori o uguali a 1.5.

Tabella 10. Per ciascuna sorgente, valore di riferimento della portata minima sorgenzia ricavato da osservazioni, in [l/s]; ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per la media del minimo di portata sorgenzia per diversi scenari.

Sorgente	Riferimento (1983-2010)	RCP2.6 (2021-2050)			RCP4.5 (2021-2050)			RCP8.5 (2021-2050)		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Caposele	3147.2	1.1	1.2	1.1	1.0	1.7	1.7	0.2	2.4	15.2
Cassano Irpino	1801.5	1.9	3.9	2.0	0.7	3.9	6.0	-1.2	4.5	3.7

Tabella 11. Per ciascuna sorgente, valore di riferimento della portata massima sorgenzia ricavato da osservazioni, in [l/s]; ensemble mean EM, in [%], deviazione standard DS, in [%], e coefficiente di variazione CV, adimensionale, della variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per la media del massimo di portata sorgenzia per diversi scenari.

Sorgente	Riferimento (1983-2010)	RCP2.6 (2021-2050)			RCP4.5 (2021-2050)			RCP8.5 (2021-2050)		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Caposele	3839.2	1.7	3.5	2.1	0.4	3.5	9.9	-0.9	3.8	4.1
Cassano Irpino	3169.5	6.8	4.5	0.7	5.3	5.0	1.0	-2.0	7.3	3.7

È immediato notare come le due sorgenti rispondano in modo alquanto analogo ai diversi scenari di concentrazione considerati, ed in modo coerente paragonando i massimi e i minimi sorgenzizi. Si evidenzia, in particolare, un aumento sotto lo scenario RCP 2.6, un aumento molto lieve sotto lo scenario RCP 4.5, e una diminuzione (eccettuata la sorgente di Caposele per $Q_{min,m}$) sotto RCP 8.5, che dunque si dimostra lo scenario più gravoso. Le incertezze associate alle stime di variazione media futura sono non trascurabili, con valori del coefficiente di variazione quasi sempre maggiori di 1 e in taluni casi (in particolare quando il valore di EM è prossimo allo zero) molto alti. Ad ogni modo, anche considerando il range di incertezza, le variazioni da attendersi sono piuttosto contenute. Il valore più alto è raggiunto da Cassano Irpino sotto RCP 2.6 per $Q_{max,m}$, con un aumento medio atteso pari a +6.8%. la diminuzione più gravosa (-2.0%) si verifica per per $Q_{max,m}$ nella sorgente di Cassano Irpino sotto RCP 8.5.

Si noti che nelle Tabelle 10 e 11 il valore di riferimento è desunto dalle osservazioni. Invece, le variazioni di portata sorgenzia sono ottenute confrontando valori di portata ottenuti utilizzando il modello empirico alle Eq. 1 e 2, che vedono in input le proiezioni bias-corrette di precipitazione riferite all'ensemble di modelli climatici in Tabella 1. Le variazioni, dunque, sono stimate necessariamente utilizzando il modello empirico, ma, poiché tale modello viene utilizzato per stimare entrambi i termini del confronto, la variazione percentuale può essere considerata rappresentativa del solo effetto del cambiamento climatico.

4.4 Catena delle incertezze

Le Tabelle 12 e 13 sintetizzano, per entrambe le sorgenti, per i valori medi di portata minima e massima sorgenzia, gli esiti della propagazione delle diverse fonti di incertezza, mostrando: il valore di riferimento ottenuto mediando le osservazioni sul periodo 1983-2010; il valore di riferimento ottenuto mediando gli output del modello empirico (Eq. 1 e 2) che vede in input il dataset osservativo E-OBS sul periodo 1983-2010; l'ensemble mean del valore di riferimento ottenuto mediando gli output del modello empirico (Eq. 1 e 2) che vede in input la precipitazione sul periodo 1983-2010 fornita da ciascuna catana di simulazione climatica;

l'ensemble mean della variazione percentuale futura ottenuta confrontando output del modello empirico (Eq. 1 e 2) che vede in input la precipitazione sul periodo 2021-2050 e quella sul periodo 1983-2010, fornita da ciascuna catena di simulazione climatica.

Tabella 12. Sintesi della propagazione delle incertezze per il valore medio sul trentennio del minimo di portata sorgentizia: valore osservato (OBS); valore stimato mediante modello empirico usando la precipitazione E-OBS (E-OBS); R² della correlazione; ensemble mean del valore stimato sul periodo di riferimento (1983-2010), ± la deviazione standard; ensemble mean della variazione attesa (ΔQ) in futuro rispetto al periodo di riferimento, ± la deviazione standard, per i tre scenari; ensemble mean del bias, ± la deviazione standard.

valori per $Q_{min,m}$		u.m.	Caposele	Cassano Irpino
Q (OBS)		l/s	3147	1802
Q (E-OBS)		l/s	3139	1791
R^2		%	42.9	42.2
Q (1983-2010)	EM	l/s	3173	1840
	± DS	l/s	9.6	11.7
ΔQ (RCP 2.6)	EM	%	1.1	1.9
	± DS	%	1.2	3.9
ΔQ (RCP 4.5)	EM	%	1.0	0.7
	± DS	%	1.7	3.9
ΔQ (RCP 8.5)	EM	%	0.2	-1.2
	± DS	%	2.4	4.5
B	EM	%	0.03	0.04
	± DS	%	0.01	0.01

Tabella 13. Sintesi della propagazione delle incertezze per il valore medio sul trentennio del massimo di portata sorgentizia: valore osservato (OBS); valore stimato mediante modello empirico usando la precipitazione E-OBS (E-OBS); R² della correlazione; ensemble mean del valore stimato sul periodo di riferimento (1983-2010), ± la deviazione standard; ensemble mean della variazione attesa (ΔQ) in futuro rispetto al periodo di riferimento, ± la deviazione standard, per i tre scenari; ensemble mean del bias, ± la deviazione standard.

valori per $Q_{max,m}$		u.m.	Caposele	Cassano Irpino
Q (OBS)		l/s	3839	3170
Q (E-OBS)		l/s	3832	3163
R^2		%	56.8	69.5
Q (1983-2010)	EM	l/s	3928	3303
	± DS	l/s	21.7	33.4
ΔQ (RCP 2.6)	EM	%	1.7	6.8
	± DS	%	3.5	4.5
ΔQ (RCP 4.5)	EM	%	0.4	5.3
	± DS	%	3.5	5.0
ΔQ (RCP 8.5)	EM	%	-0.9	-2.0
	± DS	%	3.8	7.3
B	EM	%	0.03	0.06
	± DS	%	0.01	0.02

5. Discussione

I risultati delle analisi presentate lasciano intuire che non vi sia un significativo impatto del cambiamento climatico sulla portata sorgentizia, sia massima che minima. Tuttavia, tali risultati sono da ritenersi fortemente influenzati dalla natura e dalle caratteristiche del modello empirico calibrato per correlare le portate sorgentizie ai cumuli di precipitazione. Nel caso in esame, la portata sorgentizia (tanto la massima quanto la minima, seppure in modo diverso) è risultata “debolmente” funzione della precipitazione: ad esempio (Eq. 1a), per la sorgente di Caposele, ad un incremento unitario (cioè del 100%) di SPI corrisponde un aumento dell’8% della portata minima sorgentizia. Ciò significa che, anche se le catene di simulazione

climatica fornissero importanti variazioni di precipitazione, il cambiamento atteso nella portata risulterebbe in ogni caso modesto. Ciò spiega i valori di ensemble mean molto bassi in Tabella 10 e 11. Inoltre, tale “scarsa” dipendenza si connota come fortemente incerta, con un valore del coefficiente di determinazione molto basso, accettabile soltanto per la sorgente di Cassano Irpino nel caso della portata massima sorgentizia, dove comunque esso non arriva neanche al 70%. Presumibilmente è questo il motivo per cui in questo caso i valori di variazione (sia EM sia DS) sono i più alti ritrovati. Ad ogni modo, anche in questo caso, le variazioni attese sono molto piccole: è quindi evidente che le portate sorgentizie risentono meno dei cambiamenti attesi nella precipitazione, rispetto, ad esempio, ai deflussi superficiali.

Le correlazioni sono risultate di entità analoga sia considerando SPI, sia considerando SPEI. In questa attività, sono state scelte quelle correlazioni che fornissero il massimo valore del coefficiente di determinazione, il che accade considerando SPI. Tuttavia, è noto che i cambiamenti attesi nella precipitazione sono più aleatori, e meno statisticamente significativi, rispetto a quelli attesi nella temperatura. Probabilmente, quindi, gli effetti del cambiamento climatico sulla portata sorgentizia potrebbero essere più evidenti qualora si scegliesse di utilizzare le correlazioni con SPEI, sebbene affette da un’incertezza ancora maggiore.

Le linee guida proposte da Mariani et al. (2018) sembrano dare per scontata, ai fini del calcolo di SAI, una dipendenza stretta tra il minimo di portata sorgentizia e le precipitazioni cumulate su specifiche finestre temporali. In questa attività, i risultati sono stati quindi presentati tal quali, sebbene la loro robustezza sia inficiata dal basso grado di correlazione ritrovato, soprattutto per la sorgente di Caposele. Collateralmente, si è perseguito un altro ragionamento, non riportato in questo documento, che segue un’applicazione proposta dal progetto HIGHLANDER¹, dove però essa riguardava la ricerca di correlazioni tra indici di siccità e deflussi superficiali. Sulla base del già menzionato indice di siccità idrologica SDI, si sono ricercate correlazioni tra SDI (per qualunque finestra di accumulazione compresa tra 1 e 12 mesi e per qualunque mese di campionamento) e una combinazione lineare di indici SPI a diverse finestre di accumulazione e diversi mesi di campionamento. Questo lavoro, caratterizzato da un notevole sforzo computazionale, è stato in grado di fornire un coefficiente di determinazione solo di pochissimi punti percentuali maggiore, senza dunque un vero miglioramento. Come già menzionato in Leone et al. (2021) per la sorgente di Caposele, il grado di autocorrelazione è per le sorgenti molto alto: in altre parole, i valori di portata in ogni momento sono più che altro funzione non tanto di variabili esogene, ovvero esterne (ad esempio climatiche) quanto piuttosto dei valori di portata verificatisi nei momenti precedenti. Si noti che, nell’applicazione HIGHLANDER, i coefficienti di determinazione raggiunti si aggiravano intorno al 70% (soddisfacenti, dunque, ma non altissimi), e riguardavano i deflussi superficiali, per loro natura molto più sensibili al clima rispetto ai deflussi profondi.

Le Tabelle 12 e 13 mostrano il confronto tra la media delle osservazioni e la media dei risultati ottenuti utilizzando le precipitazioni E-OBS come input del modello empirico. Lo scarto percentuale per la portata minima [massima] risulta pari a -0.26% [-0.58%] per Caposele, -0.19% [-0.20%] per Cassano Irpino. Questi valori così bassi non devono stupire: infatti, la calibrazione della retta di regressione fa sì che almeno essa passi per il baricentro della nuvola dei punti che hanno come coordinate i predittori (SPI) e i predittandi (Q), e dunque la media è un valore stimato abbastanza bene dal modello empirico. Invece, il coefficiente di determinazione tiene conto dell’errore nella stima di tutti i valori osservati, non solo del valore medio.

¹ <https://highlanderproject.eu/project/water-cycle-and-sustainability-of-competing-uses/>

Confrontando i valori osservati e quelli derivanti da E-OBS, si nota come il modello empirico sottostimi leggermente il valore medio del minimo e del massimo di portata sorgentizia.

Le Tabelle 12 e 13 mostrano l'ensemble mean del bias B, dato dal confronto tra l'output del modello empirico ottenuto utilizzando E-OBS e la precipitazione simulata sul periodo di riferimento. Un bias basso indica che il modello, sul periodo di riferimento, riproduce bene la realtà, rappresentata dal modello empirico. In realtà, tale definizione è leggermente impropria, poiché a rigore il bias va valutato sull'output del modello stesso, che è la precipitazione, e non su una sua manipolazione, che è la portata. Poiché i modelli climatici utilizzati sono stati bias-corretti, è da attendersi un bias estremamente piccolo (sia come ensemble mean sia come incertezza), cosa che infatti accade: esso non è comunque nullo poiché la precipitazione risultante dalla bias correction si scosta dal dataset di riferimento (E-OBS) per scarti casuali.

Il calcolo degli indici di siccità necessita della calibrazione di un modello di probabilità, su base mensile, per le precipitazioni cumulate su ciascuna delle finestre di accumulazione utilizzate. Nella presente attività, è stata utilizzata per SPI la distribuzione Gamma, che è quella usualmente adottata quando la variabile di partenza è la precipitazione, poiché essa non è definita per valori negativi. Invece, quando la variabile è il bilancio idro-climatico, come nel caso di SPEI, a rigore la distribuzione più adatta è la Log-logistica tri-parametrica, che però risulta molto onerosa da gestire. Si è invece preferito utilizzare il modello Generalized Extreme Value (GEV). Si è comunque verificato (non mostrato in questo documento) che i campioni risultano ben interpretati dalle distribuzioni scelte.

L'estensione del calcolo degli indici di siccità a periodi futuri presenta alcune criticità. Ad esempio, nell'applicazione HIGHLANDER gli indici standard sono calcolati separatamente sul presente e sul futuro, in altre parole calibrando le necessarie distribuzioni di probabilità su campioni diversi. Tale decisione mantiene un rigore statistico, ma può rendere difficoltosa l'interpretazione dei risultati, poiché le condizioni climatiche future diventano la "nuova normalità" rispetto alla quale valutare le deviazioni nei cumuli di precipitazione: se, paradossalmente, il futuro si ritrovasse ad essere caratterizzato da assenza di piogge, non vi sarebbe più alcun evento di siccità, poiché non vi sarebbe deviazione da questa nuova normalità. Nella presente attività, invece, le distribuzioni di probabilità sono calibrate, per ciascuna catena di simulazione climatica, sul periodo di riferimento, e i parametri così trovati sono utilizzati tal quali per calcolare i valori di SPI sull'orizzonte futuro.

Si nota, infine, che tanto il massimo quanto il minimo di portata sorgentizia non bastano, da soli, a dare indicazioni circa il regime delle portate sorgentizie *in toto*, poiché essi per definizione permangono per un tempo limitato, e nulla dice la presente analisi riguardo la distribuzione e il pattern stagionale delle portate mensili. Inoltre, si trascura un elemento importante, soprattutto in un contesto di cambiamento climatico, rappresentato dalle caratteristiche di ricarica della falda. Nello specifico, le precipitazioni che determinano una ricarica efficace dell'acquifero sono quelle che si sviluppano su un tempo esteso, con intensità non eccessive; al contrario, piogge particolarmente intense saturano immediatamente gli strati più superficiali del suolo e non sono utili ai fini della ricarica. Se il cambiamento climatico determina, come sembra accadere per le aree mediterranee, una diversa distribuzione degli eventi di pioggia ed in particolare un aumento della frequenza e intensità degli eventi estremi, ciò potrebbe tradursi in una minore possibilità di ricarica da parte dell'acquifero. Tali dinamiche non sono naturalmente tenute in debito conto da un modello semplificato come quello considerato nella presente attività.

6. Conclusioni e messaggi chiave

La portata sorgentizia è la variabile rappresentativa, per definizione, della disponibilità di risorsa idrica da sorgente, ed è quindi un utile proxy del pericolo di indisponibilità di risorsa idrica. In altre parole, una variazione positiva (aumento) della portata comporta una diminuzione del pericolo di indisponibilità per effetto del cambiamento climatico, mentre **una variazione negativa (diminuzione) della portata rappresenta un aumento del pericolo, per effetto del cambiamento climatico**. In questa attività, in particolare, le variabili di cui si esaminano le variazioni sono il massimo annuale e il minimo annuale di portata sorgentizia mensile, mediati su trent'anni. Entrambe le portate possono essere utili a definire scenari di rischio: se il fabbisogno idrico è maggiore della portata massima, la domanda non potrà mai essere soddisfatta durante l'anno; se il fabbisogno idrico è minore della portata minima, la domanda sarà sempre soddisfatta durante l'anno. Non è, comunque, scopo della presente attività confrontare le portate con i fabbisogni, bensì l'obiettivo è quello di comprendere se, per effetto del cambiamento climatico, le portate sorgentizie massima e minima subiranno variazioni significative.

Dalle analisi effettuate risulta che la variazione attesa sia nella portata massima, sia nella portata minima, nell'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1983-2010, è molto ridotta, e statisticamente poco significativa, per entrambe le sorgenti di Caposele e Cassano Irpino. In ogni caso, i risultati sono molto coerenti per le due sorgenti, che a causa della loro contiguità territoriale risultano esposte a condizioni climatiche similari.

Guardando i risultati nel dettaglio, **mediamente sul territorio è lo scenario RCP 8.5 a fornire il maggiore aumento del pericolo**, con una diminuzione media del -0.5% per la portata minima, del -1.4% per la portata massima. **La sorgente che sperimenta il maggiore aumento del pericolo è Cassano Irpino sotto RCP 8.5 (-2.0%)**; tuttavia, la maggiore variazione causata dal cambiamento climatico è positiva e si verifica ancora per Cassano Irpino, ma sotto RCP 2.6 (+6.8%).

Tutte le variazioni indicate sono affette da una notevole incertezza, causata soprattutto dall'esiguità dei valori di variazione ottenuti, che sono spesso prossimi allo zero. Non è un caso che la minore incertezza ($CV = 0.7$) sia proprio associata alla variazione di entità maggiore, che però non comporta un aumento del pericolo, bensì una sua diminuzione.

La fonte di maggiore incertezza nei risultati è però non l'utilizzo di un ensemble di modelli climatici, bensì la correlazione tra la portata sorgentizia massima e minima e le precipitazioni cumulate. Tale correlazione, alla base di tutte le valutazioni fatte, risulta poco significativa per la portata minima, e lievemente significativa per la portata massima. **Il maggior coefficiente di determinazione, comunque non alto (69.5%) si verifica per la sorgente di Cassano Irpino e per la portata massima: per questa condizione i risultati sono da considerarsi i più affidabili.** Dal momento che le precipitazioni, per quanto espresso dalle correlazioni, influenzano solo parzialmente le portate sorgentizie, si giustifica il motivo per cui le variazioni causate dal cambiamento climatico siano così poco rilevanti.

Data la poca robustezza causata dall'aver basato le analisi su correlazioni poco significative, **i risultati di questo documento sono da considerarsi puramente indicativi dei potenziali effetti del cambiamento climatico.** Prendendo a riferimento la condizione più soddisfacente (Cassano Irpino, portata sorgentizia massima), comunque, **è interessante rilevare come il regime sorgentizio sia poco rispondente a cambiamenti nella precipitazione, rispetto, ad esempio, ai deflussi superficiali**, e che, addirittura, le

variazioni più robuste vadano nella direzione di un aumento della portata sorgentizia. Si nota a questo proposito che tali risultati non prendono in considerazione l'eventuale effetto del cambiamento climatico sugli eventi estremi, e le conseguenze sulle dinamiche di ricarica degli acquiferi.

Appendice

Tabella A1. Ensemble mean, in [l/s], deviazione standard, in [l/s] e coefficiente di variazione, adimensionale, della media trentennale del minimo di portata sorgentizia $Q_{min,m}$ sul periodo di riferimento e per i tre scenari di concentrazione.

Sorgente	Riferimento (1983-2010)			RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM	DS	CV	EM	±DS	CV	EM	±DS	CV	EM	±DS	CV
Caposele	3140	0.2	0.0	3173	37.3	0.01	3171	52.5	0.02	3145	75.7	0.02
Cassano Irpino	1791	0.2	0.0	1826	70.2	0.04	1803	70.9	0.04	1770	81.2	0.05

Tabella A2. Ensemble mean, in [l/s], deviazione standard, in [l/s] e coefficiente di variazione, adimensionale, della media trentennale del massimo di portata sorgentizia $Q_{max,m}$ sul periodo di riferimento e per i tre scenari di concentrazione.

Sorgente	Riferimento (1983-2010)			RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	EM	DS	CV	EM	±DS	CV	EM	±DS	CV	EM	±DS	CV
Caposele	3833	0.4	0.0	3897	132.7	0.03	3847	135.5	0.04	3797	146.5	0.04
Cassano Irpino	3164	0.6	0.0	3379	141.5	0.0	3331	158.9	0.0	3102	231.1	0.1

Ringraziamenti

Si ringrazia la Dott.ssa Giusy Fedele (CMCC) per aver messo a disposizione dei colleghi gli strumenti e le competenze, consentendo di svolgere al meglio le attività previste.

Bibliografia

- Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M. & Jones, P.D., 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(17), 9391-9409.
- Edossa, D.C., Babel, M.S. & Das Gupta, A., 2010. Drought analysis in the Awash river basin, Ethiopia. *Water Resources Management* 24(7), 1441-1460.
- Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H. & Demuth, S., 2006. A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences* 10(4), 535-552.
- Guttman, N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35(2), 311-322.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- Leone, G., Pagnozzi, M., Catani, V., Ventafridda, G., Esposito, L., & Fiorillo, F. 2021. A hundred years of Caposele spring discharge measurements: trends and statistics for understanding water resource availability under climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35, 345-370.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17-22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179-184.
- Shamshirband, S., Hashemi, S., Salimi, H., Samadianfard, S., Asadi, E., Shadkani, S., et al., 2020. Predicting standardized streamflow index for hydrological drought using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 14(1), 339-350.
- Shukla, S. & Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35(2).
- Stagge, J.A., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F., Stahle, K., 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35(13), 4027-4040.
- Van Loon, A.F. & Van Lanen, H.A., 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49(3), 1483-1502.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. & López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23, 1696–1718.
- World Meteorological Organization, 2012. Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.