

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per L'ambiente e il Territorio A.A. 2022/2023 Sessione di Laurea Marzo/2023

Studio delle siccità in Piemonte mediante l'applicazione di indici meteoclimatici

Relatori:

Candidato:

Roberto Revelli

Emanuele Mombrini

Stefania Tamea

Alberto Viglione

Abstract

The study aims at characterizing meteorological drought trends in the Piedmont region, north-western Italy, and to evaluate their relation to precipitation decrease and temperature increase. To this end, as a first analysis, the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) are calculated at different time scales (1, 3, 6, 9, and 12 months) from precipitation and temperature data from the period 1993-2021 obtained from a single meteorological station in the city of Bra. Drought run analysis is performed on the data, both in its usual formulation and by also considering the event onset, and the characteristics of the events are assessed; trend analysis on the index series is performed, taking into account the effects of autocorrelation, via the modified Mann-Kendall test and pre-whitening procedures. The comparison of the results obtained from the two indices shows significantly worse conditions in the SPEI series, indicating the important role of temperature in determining drought conditions. As a second analysis, data from 1957 to 2022 and with 0.125 degrees resolution from the Arpa Piemonte's NWIO dataset is analyzed by calculating SPI-12 and SPEI-12. The spatial distribution of the trends – again taking autocorrelation into account – is examined, and drought events are identified and discussed. The results are consistent with those obtained at the local scale for the meteorological station in the city of Bra. The gridded data shows a significant worsening of meteorological drought in the flat part of the region, that, given the overall worse conditions over time attested by SPEI compared to SPI, seems to be caused mainly by the effects of temperature increase. Furthermore, the event analysis shows a higher susceptibility to temperaturerelated events, with more numerous, slightly less intense events in the SPEI data.

Lo studio mira a caratterizzare le tendenze della siccità meteorologica nella Regione Piemonte e a valutare la loro relazione alla diminuzione di precipitazione e all'aumento di temperatura. Come prima analisi vengono perciò calcolati lo Standardized Precipitation Index (SPI) e lo Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) con diverse scale temporali (1, 3, 6, 9 e 12 mesi) da dati di precipitazione e temperatura relativi al periodo 1993-2021 ottenuti da una singola stazione metereologica nella città di Bra. Viene effettuata una run analysis sui dati, sia nella formulazione classica sia tenendo conto dell'onset degli eventi, e si valutano le caratteristiche degli eventi stessi; viene effettuata un'analisi di tendenze sulle serie degli indici, considerando gli effetti dell'autocorrelazione tramite test Mann-Kendall modificato (modified MK) e procedure di pre-whitening. Il confronto tra i risultati dei due indici mostra condizioni significativamente peggiori per la serie SPEI, indicando il ruolo importante della temperatura nel determinare condizioni di siccità. Come seconda analisi, dati in griglia con risoluzione di 0.125 gradi e riferiti al periodo 1957-2022 ottenuti dal dataset NWIO di Arpa Piemonte sono usati per calcolare SPI-12 e SPEI-12. La distribuzione areale di tendenze è esaminata - di nuovo tenendo conto dell'autocorrelazione - e gli eventi di siccità sono identificati e discussi. I risultati sono coerenti con quelli ottenuti a scala locale per la stazione metereologica di Bra. I dati in griglia mostrano un significativo peggioramento delle condizioni di siccità meteorologica nella zona pianeggiante della regione che, date le peggiori condizioni generali con l'andare del tempo secondo l'indice SPEI rispetto allo SPI, sembra essere determinato principalmente dagli effetti di un aumento di temperatura. L'analisi degli eventi mostra inoltre una maggiore suscettibilità agli eventi legati alla temperatura, con eventi più numerosi ma leggermente meno intesi nei dati SPEI.

Sommario

1	Intro	oduzione	4
	1.1	La siccità in Piemonte 2021-2022	4
	1.2	Definizione di siccità	6
	1.3	L'evoluzione della siccità in Piemonte	9
2	Indi	ci di siccità	15
	2.1	Standardized Precipitation Index	15
	2.1.1	Introduzione	15
	2.1.2	2 Metodologia	17
	2.1.3	3 Interpretazione	21
	2.2	Standardized Precipitation Evapotraspiration Index	24
	2.2.1	Introduzione	24
	2.2.2	2 Metodologia	25
	2.2.3	3 Interpretazione	29
3	Ana	lisi statistica e di trend dei dati di precipitazione e temperatura	30
		Dati puntuali	
	3.1.1	Fonte dei dati	30
	3.1.2	2 Analisi dei dati	31
	3.1.3	B Climatologia della zona	31
	3.2	Dati areali	36
	3.2.1	Fonte dei dati	36
	3.2.2	2 Analisi dei dati	37
	3.2.3	B Climatologia della zona	40
4	Ana	lisi statistica, di evento e di trend degli indici di siccità	46
		L'autocorrelazione nell'analisi di tendenze	
	4.2	Dati puntuali	48
	4.2.1	SPI	48
	4.2.2	2 SPEI	54
	4.2.3	S Confronto tra SPI e SPEI	62
	4.3	Dati areali	68
	4.3.1		
	4.3.2	2 Analisi delle tendenze	78
	4.3.3	8 Analisi degli eventi	84
5	Con	clusioni	
6		grafia	
7		orafia	96

1 Introduzione

Lo scopo del seguente elaborato è di caratterizzare, attraverso l'applicazione di indici meteoclimatici, i fenomeni siccitosi e il loro evolversi nella regione Piemonte. La tematica della siccità e dei rischi a essa collegati ha infatti assunto particolare rilievo negli ultimi anni, specialmente dopo una serie di gravi periodi di deficit idrico che hanno colpito il territorio piemontese a partire dal 2017. Partendo dal descrivere la siccità 2021-22 e gli effetti che ha determinato, il primo capitolo affronta il problema di definire la siccità. Vengono introdotte sia le definizioni basate su una visione driver-impatto sia quelle basate su una visione sistemica, esplicitandone le divergenze, ma anche i modi in cui possono integrarsi a vicenda. Contestualizzata la siccità a livello concettuale, viene caratterizzato l'evolversi dei fenomeni siccitosi nell'Italia nordoccidentale attraverso un'analisi bibliografica. Nello studio viene quindi valutata l'applicabilità di questi risultati nel contesto specifico piemontese tramite il calcolo e il confronto di due indici meteoclimatici, lo Standardized Precipitation Index (SPI) e lo Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Nel secondo capitolo vengono descritti in dettaglio le basi teoriche e i metodi di calcolo e interpretazione dei due indici. Nel terzo capitolo vengono poi presentati i dati di precipitazione e temperatura studiati. I set di dati, sia ottenuti da una singola stazione metereologica sia da un dataset in griglia, sono analizzati statisticamente al fine di descriverne le caratteristiche, specialmente rispetto alla presenza di trend, e confrontati tra loro. Il quarto capitolo riporta i risultati ottenuti dall'applicazione degli indici meteoclimatici. Per i dati puntuali viene riportata in dettaglio l'analisi dei periodi di siccità riscontrati, e sono analizzate sia le singole serie degli indici SPI e SPEI sia quanto emerge dal loro confronto. I dati areali sono invece utilizzati per valutare in maggiore dettaglio la presenza di tendenze verso condizioni più secche, riportando la distribuzione di trend a livello regionale; allo stesso tempo, vengono valutate le differenze, legate all'inclusione di valori di temperatura, nelle dinamiche degli eventi di siccità. Infine, nel quinto capitolo sono riportate sinteticamente le conclusioni emerse dallo studio, e sono descritti possibili sviluppi dell'approccio utilizzato.

1.1 La siccità in Piemonte 2021-2022

Il 4 luglio 2022 viene accolta dal Consiglio dei Ministri la richiesta di riconoscimento dello stato di emergenza idrico per Emilia-Romagna, Friuli-Venezia Giulia, Lombardia, Piemonte e Veneto, con lo stanziamento di più di 36 milioni di euro, di cui quasi 8 alla Regione Piemonte [S1]. Dal punto di vista amministrativo, questa è la conferma di una situazione estremamente critica sviluppatasi a partire dall'inverno 2021-22: un'anomalia di temperatura di +2,1 °C, un deficit di precipitazione medio del 65% (confronto Figura 1-1) rispetto alla norma 1991-2020 e condizioni molto ventose, hanno determinato una stagione eccezionalmente mite e secca [S2]. Anche la primavera seguente è stata povera di precipitazioni, e, specialmente nel mese di maggio, caratterizzata da temperature molto più alte della media; così anche l'estate, per quanto alcuni fenomeni principalmente temporaleschi abbiano diminuito il deficit di precipitazione a circa il 18% rispetto agli ultimi trent'anni (Arpa Piemonte, 2022).

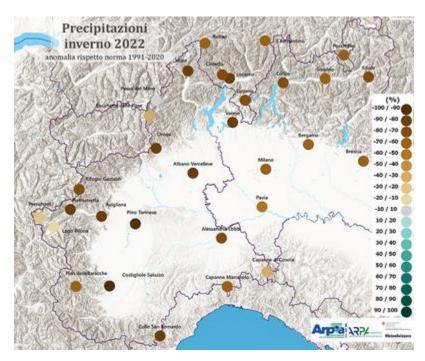


Figura 1-1: Deficit di precipitazione in Piemonte nell'inverno '21-22. Fonte: Arpa Piemonte.

Le condizioni a marzo erano così critiche da portare il Global Drought Observatory ad affermare, in un report tecnico, che erano già presenti effetti sulle risorse idriche - che avrebbero portato a maggiore competizione tra diversi settori all'inizio del periodo di irrigazione e a una diminuzione delle riserve per produzione idroelettrica - ed effetti sulla presenza di neve, diminuendo sensibilmente le portate dei fiumi nei mesi primaverili. Purtroppo, le previsioni si sono avverate, con ingenti danni a produzioni agricole (per oltre un miliardo di euro a fine giugno secondo Confagricoltura [S3]), interruzioni notturne dei servizi idrici e necessità di interventi con autobotti in diversi comuni [S4], diminuzione significativa dei livelli degli acquiferi e portate intorno ai minimi storici: a settembre più dell'80% delle stazioni Arpa misurava valori inferiori alla magra ordinaria. Arpa Piemonte afferma, a inizio ottobre [S5]:

"Sulle scale temporali più lunghe la siccità registrata non è più soltanto di tipo meteo-idrologico o agricolo ma ha inciso anche sugli aspetti socio-economici, in particolare durante l'estate, andando a interessare il comparto idro-potabile, le ricariche delle falde e degli invasi, la conservazione degli ecosistemi terrestri e acquatici e, in generale, tutte quelle attività in qualche modo connesse con l'uso dell'acqua."

La citazione riportata è di particolare interesse perché rappresenta bene sia la dimensione del problema normalmente detto siccità – ovvero una situazione generale che ha ricadute su tutti i comparti economici e ambientali – sia le diverse caratteristiche che questo può avere, ovvero i diversi tipi di siccità e le loro specificità. Data questa natura altamente multiforme, è utile contestualizzare il fenomeno presentandone le definizioni più affermate e i tipi di visione che sottendono.

1.2 Definizione di siccità

Una prima divisione nella definizione della siccità viene fatta tra definizioni concettuali e operazionali (Kchouk e al., 2021): le definizioni concettuali sono descrittive e sottolineano i rischi naturali determinati dall'evento; le definizioni operazionali, invece, sottolineano implicazioni pratiche per definire inizio, severità e fine di un periodo siccitoso.

Un esempio del primo tipo di definizione è dato dall'European Drought Observatory (EDO) [S6]:

"La siccità è una caratteristica ricorrente del clima che risulta da una diminuzione di precipitazione per un lungo periodo di tempo, da un tempismo inadeguato rispetto alle necessità della vegetazione o da un bilancio negativo causato da un'accresciuta evapotraspirazione data da alte temperature."

Un esempio del secondo è invece quello che porta a definire indici, generalmente basati su soglie di deficit rispetto a grandezze fisiche, di cui si discuterà nel Capitolo 2.

Questa differenza di base nel tipo di definizione non rappresenta neanche parzialmente il numero e la varietà di definizioni di siccità: se è vero che agli inizi degli anni '80 sono riportate più di 150 definizioni diverse [S7], il problema persiste tutt'oggi, senza una definizione unica e precisa – anche se definizioni quali quella dell'EDO sono generalmente citate in letteratura. È però largamente accettata una divisione in quattro categorie, presentata di seguito (Eslamian et al., 2017):

Siccità meteorologica:

Avviene quando la precipitazione è al di sotto del normale, ed è caratterizzata da modifiche nelle caratteristiche del clima. Ecosistemi e società abituati a una certa disponibilità d'acqua sono posti a rischio dalle condizioni secche date dal deficit di precipitazione; conseguentemente questo tipo di evento è monitorato con parametri meteorologici.

Siccità idrologica:

Avviene quando il livello delle acque superficiali e degli acquiferi è inferiore alla media a lungo termine. Oltre al clima, questo tipo di siccità va messo in relazione con l'uso del territorio, che può influire sulle caratteristiche dei bacini. Il monitoraggio avviene attraverso misurazioni di livello e di portata.

Siccità agriculturale:

Avviene quando l'umidità nel suolo è meno di quella richiesta dalle piante. Conseguentemente allo stress, che varia in base alle richieste delle singole specie, si hanno danni all'ambiente e all'agricoltura. Questo tipo di siccità solitamente avviene dopo quella meteorologica e prima di quella idrologica, ed è monitorato tramite l'umidità dei terreni.

Siccità socioeconomica:

Avviene quando la richiesta di acqua per usi industriali e agriculturali, oltre che per il consumo domestico, eccede la disponibilità, sia essa per cause ambientali o economiche.

Per meglio comprendere le diverse dimensioni rappresentate da queste definizioni, è utile inserirle in un modello driver-impatto (Zucaro et al., 2017): la siccità meteorologica rappresenta il driver principale che genera le siccità agriculturale e idrologica (pressioni); lo stato risultante di scarsità d'acqua determina poi degli impatti, generalmente considerabili come siccità socioeconomica e impatti sull'ambiente. In Figura 1-2 è presente una rappresentazione schematica di questo modello.

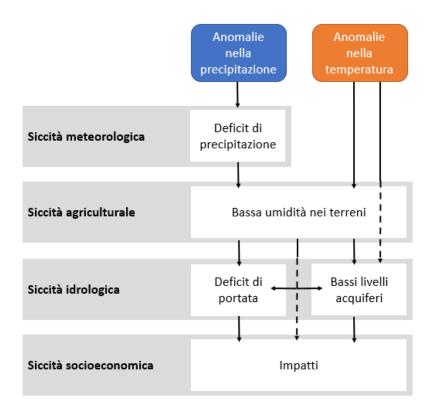


Figura 1-2: Rappresentazione schematica del modello driver-impatto della siccità. Fonte: Van Loon, 2015.

Con questo non si vuole ridurre la siccità a un problema esclusivamente economico, né con un'importanza principalmente umana; per quanto sia utile porre in una serie ordinata certe categorie con cui può essere concepito il fenomeno siccitoso, permettendo anche alcune utili semplificazioni causali ben rappresentate dagli approcci operazionali, non bisogna trarre da questo ordine un parallelo ordine di importanza. È utile interrogarsi sulla rappresentatività di una concettualizzazione basata sulla catena di effetti driver-impatti per un fenomeno estremamente complesso che, riprendendo la citazione presentata nel paragrafo precedente, ha effetti su "tutte quelle attività [umane e non umane] in qualche modo connesse con l'uso dell'acqua". Questa prospettiva è ben rappresentata Kchouk et al. (2022), i quali criticano la scelta di focalizzarsi in modo sproporzionato sui driver della siccità e non anche sui suoi impatti. Le conseguenze, secondo gli autori, sono di offuscare sia le conseguenze del fenomeno, portando a considerare la sicurezza idrica come diretta conseguenza delle condizioni meteorologiche tralasciandone le cause economiche, sociali e tecniche, sia i metodi per studiarlo, costringendo a visioni parziali ed esclusivamente "fisiche" o sociali. Dunque, pur riconoscendo gli enormi vantaggi forniti dai metodi di monitoraggio delle siccità (Drough Early Warning Systems, o DEWS, in letteratura), raccomandano di considerare le relazioni reciproche tra driver e recettori e come questi ruoli non siano fissi, di ampliare i monitoraggi includendo sia caratteristiche quantitative che impatti umani, e in generale di adottare una visione sistemica.

La definizione di siccità precedentemente presentata può essere integrata, in quest'ottica, aggiungendo che la siccità è definita dal deficit idrico, sia esso per scarsità assoluta che relativa, ma anche dagli effetti che questo causa in un sistema suscettibile – effetti che possono reinserirsi a loro volta nel più ampio fenomeno siccitoso.

D'altro canto, quel sistema deve comprendere sia le componenti umane che non umane nel contesto di una più ampia comunità ecologica. Questa visione è presentata da Crausbay et al. (2017) tramite l'idea di siccità ecologica, definita come:

"Un deficit episodico nella disponibilità d'acqua che porta gli ecosistemi oltre la soglia di vulnerabilità, ha impatti sui servizi ecosistemici e causa feedback in sistemi naturali e/o umani."

Questo stato, per quanto diverso da condizioni di aridità o desertificazione, con cui si intendono processi a lungo termine che possono a loro volta interagire con la siccità, può portare a modifiche irreversibili nelle comunità ecologiche e nelle loro caratteristiche. È importante sottolineare come anche in questa visione, gli impatti non sono legati ai driver da un semplice nesso causale: vengono infatti discusse le dimensioni connesse tra loro di esposizione (date da fenomeni come le correnti oceaniche e fenomeni emergenti come il cambiamento climatico e l'uso delle risorse idriche), sensibilità e capacità di adattamento alla siccità nel determinare la vulnerabilità di una comunità ecologica. Viene sottolineato come una partecipazione antropica è sempre presente, sia a causa delle modifiche al clima che attraverso vari tipi di impatti, sia potenzialmente attraverso una partecipazione attiva nel definire le caratteristiche degli ecosistemi.

Un esempio di queste relazioni tra ambiti umani e non umani è presentato da Crausbay et al. (2020): per quanto riguarda gli impatti sono discussi diversi tipi di siccità emergente, presentati in Tabella 1.

Tabella 1:	Tipi di siccità	emergente. Fonte:	Craushau et al	2020.

Tipo di siccità	<u>Descrizione</u>
Siccità nevosa	Deficit di precipitazione o alte temperature nel periodo invernale, che impediscono l'accumulo nevoso.
Siccità più calda	Siccità che avviene in condizioni di aumento di temperatura globale
Mega-siccità	Siccità con durata di almeno 20 o più anni.
Siccità lampo	Siccità molto severa che si determina rapidamente – nell'arco di settimane o mesi – caratterizzata da deficit di umidità nel terreno e da evapotraspirazione molto alta.
Siccità con cause umane	Siccità che avviene per cause umane senza la presenza di siccità meteorologica.
Siccità modificata dall'azione umana	Siccità alleviata o aggravata dall'azione umana.

Mentre i primi quattro tipi di siccità presentati sono legati alla condizione di cambiamento climatico in cui versa il pianeta – situazione pur sempre legata all'azione umana ma in modo più indiretto – gli ultimi due ne sono invece strettamente dipendenti, e sottolineano efficacemente l'importanza da dare all'uso dell'acqua da parte delle diverse comunità. Importanza, quindi, sia in quanto recettore che driver di danno e, in questa forma, tenendo conto delle difficoltà che possono essere presenti nel legare le pressioni antropiche agli effetti sulla siccità. Questo focus sull'uso dell'acqua appare tanto più importante, se si considera come spesso i portatori di interesse non sappiano correttamente distinguere

le principali pressioni esercitate sulla risorsa idrica, o derubrichino il deficit della stessa a semplice problema tecnologico, di sicura soluzione (La Jeunesse et al., 2016). Ad ogni modo, l'insorgere di nuovi tipi di fenomeno siccitoso in un contesto altamente variabile e incerto, quale quello definito dal cambiamento climatico, porta anche a impatti "trasformativi", conseguenze dirette e indirette del superamento delle soglie di vulnerabilità presenti nella definizione di siccità ecologica. Le trasformazioni delle comunità ecologiche, siano esse di adattamento o di crisi, positive o negative, "naturali" o antropiche, vanno considerate come dati di fatto cui adattarsi tanto quanto possibilità di mitigazione e prevenzione. L'incertezza nelle previsioni, la necessità di adattamenti rapidi e il bisogno di integrare portatori di conoscenza, di potere decisionale e di interesse sono certamente problemi di difficile soluzione, ma sono anche tasselli fondamentali per sistemi di gestione della siccità congruenti con il problema da affrontare.

In conclusione, si presentano alcuni punti sintetici che si possono trarre dalla discussione del concetto di siccità appena presentato. Innanzitutto, essa è un fenomeno ampio sia concettualmente che ecologicamente, e spesso arealmente e temporalmente: per queste ultime due caratteristiche basta menzionare, da un lato, episodi siccitosi come la *Dust Bowl* statunitense (che colpì gran parte dei *Great Plains*) e la *Millennium Drought* australiana (che interessò in modo acuto tutto il quadrante sud-ovest dell'isola), e la durata di quasi dieci anni di entrambi [S8][S9]. Inoltre, la difficolta nel definirla univocamente, sia nelle sue caratteristiche quantitative (quali l'inizio, la fine, l'intensità...) sia qualitative (comparti ecologici interessati, metodi di propagazione, relazione con usi dell'acqua...), rende sempre più necessario un approccio olistico che, attraverso le molte dimensioni del fenomeno e le incertezze ad esse legate, sia in grado di gestire con sufficiente flessibilità e rapidità un problema caratterizzato da poche certezze. In questo senso persino individuare l'inizio di un fenomeno definito dai climatologi come graduale e "strisciante" (*creeping*) nel suo iniziare, con la possibilità di prolungarsi per diversi anni [S10], appare come un problema da non sottovalutare. Si considera comunque utile tenere a mente dei punti fermi emersi dall'analisi della letteratura in tema:

- La siccità è una condizione di routine: non considerare il fenomeno come eccezionale ma come un problema di sbilancio tra una disponibilità e una richiesta idrica (Van Loon, 2015).
- La siccità è una condizione di un intero sistema (dall'uso dell'acqua alle comunità ecologiche):
 l'azione di mitigazione, prevenzione e previsione deve tenere conto di queste dimensioni, non tralasciando i possibili impatti umani, positivi e negativi.
- La siccità va monitorata sia attraverso i suoi driver che attraverso i suoi impatti.
- La siccità va studiata e pensata con più approcci: approcci lineari driver-impatto, ad esempio molto utili nel monitoraggio, vanno affiancati ad approcci sistemici, particolarmente utili nel processo decisionale.

1.3 L'evoluzione della siccità in Piemonte

Avendo descritto il contesto più ampio in cui si può considerare la siccità, si ritorna adesso a una visione più simile a quella riportata all'inizio del precedente paragrafo: rispetto alla siccità quale sistema, come detto, anche la siccità quale fenomeno lineare driver-impatto può essere un approccio valido per rispondere ad alcune necessità, particolarmente quando si tratta di monitorare e prevedere l'insorgenza di deficit di disponibilità idrica. Il contributo che si vuol dare tramite i paragrafi successivi, mantenendo i metodi classici dello studio ingegneristico del fenomeno, è quindi quello che certe applicazioni possono dare proprio in virtù del loro focalizzarsi su alcuni aspetti specifici. Se debitamente

contestualizzate e consce delle loro limitazioni, esse sono in grado di aggiungere informazione a parti di sistemi complessi senza depauperarli limitandoli forzatamente a quei soli aspetti.

Una delle prime domande che sorge nel considerare i driver che determinano la siccità, nel contesto "classico" che li rappresenta a partire dalla siccità meteorologica, è come questi siano cambiati nel tempo; o, in un altro senso, come sia variata la siccità stessa nel tempo, con un focus particolare sul Piemonte. Per rispondere a questa domanda è stata consultata una serie di pubblicazioni, in modo da creare un panorama più ampio e poter dare una risposta supportata da un ampio consenso scientifico. Di seguito vengono presentate sinteticamente le pubblicazioni studiate, indicando il periodo cui si riferiscono, gli aspetti del fenomeno considerati (in particolare se è studiata solo la variazione di precipitazione o anche di temperatura) e la valutazione proposta, per poi procedere col trarre delle conclusioni dal loro insieme.

Si sottolinea come molte di queste analisi sono basate su indici per la valutazione della siccità, tra cui lo *Standardized Precipitation Index* (SPI, che considera solo variazioni nella precipitazione - confronto Capitolo 2.1) e lo *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI, che considera variazioni di precipitazione e temperatura - confronto Capitolo 2.2).

- Bordi e Sutera, 2002

Sono analizzati dati riferiti al periodo 1948-2000 basandosi su dati di precipitazione del *National Centers* for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research analizzati tramite indice SPI. Viene valutato un aumento della siccità sul territorio italiano.

- Brunetti et al., 2002

Sono analizzati dati di sola precipitazione riferiti al periodo 1951-2000 ottenuti da stazioni meteorologiche. Viene valutato un aumento significativo nel numero di giorni senza pioggia su tutto il territorio italiano, in particolare nella zona nord-ovest, principalmente nel periodo invernale e legato a un clima più "soleggiato", probabilmente legato al rafforzarsi dell'oscillazione nordatlantica con avvezione di aria calda e umida.

- Hoerling et al., 2012

Viene analizzato il periodo 1902-2010 sulla base di vari database di valori di precipitazione in griglia. Viene valutato un aumento della siccità nella zona mediterranea con una maggiore frequenza dei fenomeni siccitosi dal 1970 in poi, legato a una diminuzione nella precipitazione invernale data probabilmente da una risposta a forzanti radiative esterne quali la temperatura della superficie marina.

Haslinger e Blöschl, 2017

Viene analizzato il periodo 1801-2010 sulla base di dati di precipitazione in griglia ottenuti dal database HISTALP (*Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region*), riferiti all'arco alpino e alle zone circostanti. Con una metodologia simile allo SPI, ma tenendo conto della variazione temporale e spaziale dei fenomeni, viene osservato un cambiamento nella stagionalità della siccità (da periodo invernale-primaverile alla fine del XIX secolo ad autunnale alla fine del XX) insieme all'area interessata (siccità principalmente nella zona nord-ovest delle Alpi e sud-ovest, rispettivamente). L'analisi non evidenzia però un aumento della frequenza della siccità (si sottolinea solo legata alla valutazione della precipitazione) e nessuna relazione con l'aumento di temperatura valutato nella stessa zona.

Hanel et al., 2018

Analisi sul periodo 1766-2015 a partire da dati ottenuti da modelli idrologici. Per quanto gli eventi più gravi nella serie non siano presenti negli ultimi anni, viene sottolineato come eventi eccezionali in termini di stagionalità (dopo gli anni 2000 sono presenti le più gravi siccità nel periodo vegetativo) e tipo di fenomeno (tutti gli eventi più gravi legati all'umidità del terreno, a parte i due più gravi negli anni '40 sono relativi agli ultimi 30 anni) siano in aumento. Il ruolo della temperatura viene definito inoltre sempre più significativo nel determinare gli eventi degli ultimi anni, e si sottolinea l'importanza di questo risultato nel contesto del cambiamento climatico.

- Pavan et al., 2019

Analisi sul periodo 1961-2015 a partire da dati giornalieri di precipitazione ottenuti da stazioni in Italia centro settentrionale. Viene valutata una diminuzione della precipitazione, in particolare nel periodo estivo, nella pianura padana nord-occidentale, con una diminuzione dei giorni piovosi e un aumento dei periodi secchi.

- Falzoi et al., 2019

Analisi sul periodo 1981-2017 sulla base di dati di precipitazione e temperatura di stazioni meteorologiche in Piemonte e Sardegna. Sono valutati gli indici SPI e SPEI: nel territorio piemontese per il primo non sono ottenuti tendenze significative (tranne in alcune stazioni che mostrano una diminuzione della siccità valutata in questo modo), mentre il secondo mostra un aumento della siccità in tutte le stazioni, con una forte correlazione con le temperature. Data la mancanza di variazioni significative nella precipitazione, appare come l'aumento sia giustificato da modifiche nell'evapotraspirazione.

- Arpa Piemonte e Regione Piemonte, 2020 [1]

Report dal titolo "Analisi del clima regionale del periodo 1981-2010 e tendenze negli ultimi 60 anni", basato sui dataset di serie storiche della rete di monitoraggio Arpa; riporta negli anni menzionati un aumento significativo di temperatura ma non un trend significativo nella precipitazione. Attraverso l'indice SPEI viene valutato un aumento di condizioni siccitose: appare quindi come il peggioramento previsto sia principalmente dato da fenomeni legati all'evapotraspirazione.

- Baronetti et al., 2020

Analisi sul periodo 1965-2017 basata su dati di precipitazione e temperatura massima e minima giornaliera del database SCIA (Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici) riferiti al bacino del Po. Viene valutato un aumento degli episodi di siccità a partire dal 2001. Fino al 2003 gli eventi siccitosi appaiono principalmente legati ad una domanda evaporativa più alta di quanto previsto; in seguito, una modifica della distribuzione delle piogge con un aumentare del numero di giorni secchi e di eventi estremi (senza però una diminuzione significativa della precipitazione) sembrano essere il principale driver della siccità.

Vogel et al., 2021

Analisi del periodo 1979-2018 sulla base di dati di temperatura, evapotraspirazione e precipitazione dal dataset ERA5 fornito dal *Copernicus Climate Change Service* e riferito alla zona mediterranea. Tramite l'uso di SPI e SPEI si nota un aumento degli eventi siccitosi e della loro coincidenza con alte temperature (evento composto o *compound event*). Visti i valori circa costanti dello SPI, legato alla sola precipitazione, e in aumento dello SPEI, legato alla precipitazione e alla temperatura, si ipotizza che l'aumento della siccità sia dovuto alla variazione di temperatura. Si nota anche una variazione del periodo secco, con un inizio sempre più verso primavera.

La letteratura presentata è utile a trarre delle conclusioni generali su diversi aspetti. Innanzitutto, si può affermare con sufficiente sicurezza che è presente un aumento dei fenomeni siccitosi sul territorio piemontese – il consenso in merito emerge da analisi su periodi dai 30 ai 240 anni circa, per la maggior parte intorno ai 50 anni, anche se si sottolinea come le analisi sui periodi più lunghi (Haslinger e Blöschl, 2017 e Hanel et al., 2018) non supportino questa conclusione. Questa affermazione relativamente unitaria sembra però essere determinata da una moltitudine di valutazioni, legate a diverse dimensioni e processi. A livello macroscopico, si possono distinguere due categorie di approcci, il primo basato sulla sola precipitazione, e il secondo basato sulla precipitazione e sulla temperatura. É significativo come le pubblicazioni che applicano il primo approccio (Bordi e Sutera, 2002, Brunetti et al., 2002, Hoerling et al., 2012, Haslinger e Blöschl, 2017, Pavan et al., 2019) ottengano risultati molto differenti tra loro, riportando diminuzioni di precipitazione alternativamente nel periodo estivo e invernale; in ogni caso si sottolinea però come sia spesso menzionata una variazione nel regime delle precipitazioni, con un aumento dei giorni senza pioggia e degli eventi eccezionali, sia esso legato a una diminuzione generale della precipitazione o meno. In realtà, alla luce dei dati che evidenziano una mancanza di tendenze significative nella precipitazione nel territorio piemontese (in questo senso il report Arpa Piemonte del 2020 è particolarmente illuminante), questo tipo di approccio appare limitato, sia che la precipitazione sia considerata in sé sia attraverso indici quali lo SPI. Il fatto che la spiegazione delle condizioni riscontrate in queste analisi venga spesso legata a fenomeni dati da aumenti di temperatura, quali l'evapotraspirazione e la temperatura della superficie marina, sembra inoltre dimostrare l'importanza del considerare anche quest'ultima. Le pubblicazioni basate sul secondo approccio (Hanel et al., 2018, Falzoi et al., 2019, Arpa Piemonte e Regione Piemonte, 2020 [1], Baronetti et al., 2020, Vogel et al., 2021) sono molto più unite nel definire un aumento della siccità legato alla forzante dell'evapotraspirazione, anche quando l'aumento della siccità non appare significativo su periodi più lunghi (Hanel et al., 2018) o determinato anche da variazioni nella distribuzione delle precipitazioni (Baronetti et al., 2020). Particolarmente utile a questo fine appare il confronto tra i due indici precedentemente menzionati, ovvero lo SPI, che rappresenta bene la dimensione esclusivamente legata alla precipitazione, e lo SPEI, che integra invece una valutazione dell'evapotraspirazione, al punto che Vogel et al. (2021) lo definiscono già di per sé indicativo nel rappresentare fenomeni composti di mancanza di precipitazione e alte temperature.

Ci si pone quindi in contraddizione con Haslinger e Blöschl (2017), dove si afferma che non si evidenzia nessuna relazione tra siccità e temperatura, e che risultati simili in altre pubblicazioni sono dovuti all'assunzione implicita di una relazione tra le due tramite indici che incorporano una valutazione dell'evapotraspirazione. Per quanto la mancanza di una relazione tra la siccità valutata con certi metodi e la temperatura sia un dato di interesse, che può indicare quale tipo di siccità (sempre vista come fenomeno driver-determinato) sia più presente in un territorio, appare eccessivamente restrittiva un'analisi che non indaghi anche questa dimensione del fenomeno tramite indici quali lo SPEI. Questo alla luce della forte relazione che è emersa dall'analisi della letteratura presentata. Si considera invece di particolare interesse un'altra conclusione, tratta nella stessa pubblicazione, circa la mancanza di analisi spaziali e temporali del fenomeno siccitoso; date le diverse dimensioni che sono state presentate nel paragrafo precedente, e non svalutando i dati che possono essere ottenuti dall'analisi di una sola stazione, è sicuramente di interesse valutare non solo l'andamento dell'intensità della siccità su un singolo punto, ma valutarne anche l'area interessata al fine di poter descrivere i singoli avvenimenti in modo più significativo – ad esempio, nella breve descrizione della siccità 2021-2022 presentata nel Capitolo 1.1, l'estensione areale a diverse regioni è certamente un dato di interesse. In questo senso, un'analisi quale quella presentata in Falzoi et al. (2019), che già considera dati distribuiti su diverse stazioni nel territorio regionale, potrebbe facilmente aumentare l'informazione trasmessa analizzando la distribuzione degli indici calcolati.

Dopo aver descritto la situazione attuale sul territorio piemontese, ovvero come essa si inserisca rispetto a tendenze generali almeno nell'ultima metà del XX secolo fino ai giorni nostri, è utile chiedersi come questa situazione possa evolvere nel futuro. Nell'analisi della siccità, basata più su dati fisici che su modelli, generalmente viene valutata la situazione fino al presente, per poi estrapolare andamenti nel futuro; per quanto, come detto, le condizioni legate alla siccità siano generalmente peggiorate, dando adito all'idea che questa sia una tendenza emergente, si intendono presentare analisi specifiche sugli scenari futuri. Partendo da dati più generali, è utile dare un'idea della situazione per la fascia mediterranea, in cui si trova il territorio di interesse: purtroppo, come indicato nella maggior parte delle pubblicazioni discusse sopra, la zona mediterranea è considerata un punto caldo (hot-spot) per quando riguarda il cambiamento climatico, e si prevede che essa ne risenta in modo molto acuto, più di altri luoghi (anche se non sono previste le conseguenze peggiori in assoluto, quantomeno a livello del solo riscaldamento). Si cita qui una valutazione presente in Lionello e Scarascia (2018), dove si afferma che non è però possibile determinare questa vulnerabilità superiore alla media con sufficiente confidenza basandosi solo su dati storici, in quanto questo comportamento diventa apprezzabile solo dagli anni '80 – si sottolinea nuovamente, quindi, l'importanza di analisi sugli andamenti futuri. Tra queste, prima fra tutti è il rapporto del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC) del 2022 che, in una sezione dedicata al mediterraneo, indica come vi sia previsto un riscaldamento del 20% superiore alla media mondiale; l'elevata vulnerabilità deriva però sia dai fenomeni legati a questo riscaldamento, sia da condizioni socio-economiche quali un'elevata densità abitativa, un'elevata richiesta di acqua, economie spesso fortemente dipendenti dal turismo e dagli ecosistemi marini e fluviali, particolarmente a rischio. Le previsioni di diminuzione della precipitazione (-4% per grado di riscaldamento), aumento degli eventi di precipitazione eccezionali, aumento di ondate di calore, aumento delle temperature della superficie marina (da +0.29 a +0.44 °C per decade con possibili riscaldamenti alla fine del secolo di circa 4°C) e aumento dell'evapotraspirazione, nel contesto dei meccanismi legati alla siccità descritti in precedenza, rende purtroppo comprensibile la previsione di peggioramento da modesto a significativo, sulla base degli scenari di emissione, delle condizioni di siccità. In una discussione del rapporto [S11], che coerentemente con quanto esposto nel paragrafo precedente caratterizza la siccità quale fenomeno con una "natura altamente multidimensionale", si afferma che:

"Nelle prospettive di un aumento della temperatura globale di 1,5°C e 2°C la scarsità idrica riguarda, rispettivamente, il 18% e il 54% della popolazione [della zona mediterranea]. Analogamente, l'aridità del suolo aumenta con l'aumentare del riscaldamento globale: in uno scenario di innalzamento della temperatura di 3°C l'aridità del suolo risulta del 40% superiore rispetto a uno scenario con innalzamento della temperatura a

Queste valutazioni vengono confermate da una serie di studi anche nel contesto specifico della regione Piemonte. Un'analisi sulla vulnerabilità degli acquiferi basata su modelli climatici ad alta risoluzione (Nistor, 2020), mostra come la disponibilità d'acqua vari dai 173-2175 mm degli anni '90 del secolo scorso, ai 98-2053 mm odierni fino a 95-1962 previsti per gli anni '50; vengono previsti aumenti di temperatura e conseguentemente di evapotraspirazione potenziale, ma diminuzioni non significative di precipitazione. Una valutazione dell'andamento dei fenomeni siccitosi nel nord Italia (Baronetti et al., 2022) basata su modelli climatici utilizzando SPI e SPEI trova una diminuzione della precipitazione sul breve e sul lungo periodo (molto più significativa in questo caso) sia per scenari RCP 4.5 che RCP 8.5¹; allo stesso modo si valuta un aumento dei fenomeni siccitosi gravi da 3-5 a 5-8 nei prossimi

⁻

¹ "Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (*Representative Concentration Pathways*, RCP) indicano un andamento rappresentativo delle concentrazioni dei gas a effetto serra e degli aerosol per un determinato obiettivo climatico (in termini di forzante radiativo nel 2100), che corrisponde a sua volta a un determinato andamento delle emissioni umane." Gli scenari

trent'anni, con aumenti ancora più significativi per la fine del secolo; si valuta anche un aumento della zona interessata solo verso la fine del secolo, passando dal 30-40% circa fino al 50-70% circa. Anche la durata massima sembra portata ad aumentare, passando dalle 13-25 settimane per gli ultimi trent'anni del XX secolo, a 15-29 per la metà e 21-32 per la fine del XXI, con variazioni più significative coerentemente con la gravità dello scenario. Anche se non con un livello molto alto di confidenza, sembra che la temperatura sia la principale forzante relativa alla siccità, con la diminuzione della precipitazione invernale quale principale fattore solo verso la fine del secolo. In ultimo, si cita il rapporto dell'Arpa e della Regione Piemonte per il periodo 2011-2100 (Arpa Piemonte e Regione Piemonte, 2020 [2]): sono riportati aumenti da 2.1 ai 4.2 °C (relativi agli scenari RCP 4.5 e 8.5) a fine secolo, e una diminuzione nella precipitazione anche se, come nella maggior parte degli studi, non statisticamente significativa. Si riscontrano però aumenti nei periodi secchi, tanto più importanti quanto gravi gli scenari, insieme a un aumento marcato dell'evapotraspirazione, con un aumento dall'8 al 15% nel corso del secolo. L'analisi dell'indice SPI evidenzia, per lo scenario RCP 4.5, un aumento nell'intensità di periodi secchi e umidi, senza particolari variazioni nelle zone interessate; lo scenario RCP 8.5 porta invece ad un marcato aumento dei periodi secchi, che sembra quindi essere legato a una diminuzione di precipitazione, e a un aumento dell'area in condizioni siccitose. L'aumento della siccità particolarmente per le scale temporali più lunghe indica inoltre come le condizioni secche andranno a diminuire gli effetti della variabilità climatica interessando le riserve d'acqua più remote.

Si può quindi affermare che emerge un consenso circa il peggiorare delle condizioni di siccità per la regione Piemonte, e di come esse siano legate, almeno per i primi due terzi del secolo, ad un significativo aumento di temperatura, maggiore rispetto alla media del pianeta. L'aumento, a livello quantitativo, interesserà intensità, frequenza, durata e area interessata dei fenomeni e avrà, date le caratteristiche della zona mediterranea in generale e del territorio piemontese in particolare, significativi effetti circa la disponibilità della risorsa idrica.

^{4.5} e 8.5 prendono il nome dai W/m^2 di forzante prevista, e si riferiscono a un arginamento parziale e nullo, rispettivamente, delle emissioni di gas serra. [S12]

2 Indici meteoclimatici

Dopo aver contestualizzato la siccità a livello teorico e averne descritto lo sviluppo passato e futuro nella zona di interesse della regione Piemonte, si è voluta analizzarla tramite un'applicazione di due dei principali metodi di valutazione del fenomeno: gli indici SPI e SPEI. La scelta di studiare entrambi gli indici è giustificata, oltre che dalla loro somiglianza, dalle diverse dimensioni che considerano – rispettivamente sola precipitazione e un bilancio idrico dato da precipitazione ed evapotraspirazione potenziale – che appaiono dalla letteratura presentata nel Capitolo 1.3 come particolarmente importanti, soprattutto nei dati che possono emergere dal loro confronto. Di nuovo si sottolinea come questo approccio è molto utile nello studiare le forzanti principali di un sistema complesso e multidimensionale, e il riferirsi alla siccità nei prossimi paragrafi, se non specificato altrimenti, va visto come la dimensione specifica driver-impatto di quanto descritto nel Capitolo 1.2.

Di seguito vengono discusse le caratteristiche dei due indici e i metodi di calcolo che sono stati utilizzati.

2.1 Standardized Precipitation Index

2.1.1 Introduzione

Uno degli indici maggiormente usati nello studio della siccità è lo *Standardized Precipitation Index* (da qui in avanti SPI) proposto inizialmente da McKee et al. nel 1993 nell'ottava conferenza sulla climatologia applicata.

Prima di descriverne le caratteristiche, è bene indicare quanto ampia sia stata la sua applicazione in seguito alla sua introduzione: per quanto riguarda il presente lavoro, tutte le pubblicazioni presentate nel Paragrafo 1.3 citano o direttamente utilizzano lo SPI. A livello più generale, due dati sono molto indicativi: un'analisi bibliografica condotta da Kchouk et al. (2022) su più di 5000 pubblicazioni scientifiche inerenti la siccità meteorologica riporta che lo SPI è menzionato in quasi metà delle pubblicazioni, e con più del doppio delle citazioni rispetto al secondo indice più citato; inoltre, lo SPI è stato fortemente raccomandato dalla *World Meteorogical Organization* quale principale indicatore di siccità da adottare da parte dei servizi meteorologici a livello mondiale (Hayes et al., 2011), e la stessa WMO ha pubblicato la *Standardized Precipitation Index User Guide* nel 2012. Infine, sono disponibili varie risorse relative allo SPI, tra cui vari database di dati internazionali² e nazionali³.

L'ampia applicazione dell'indice dipende in parte dalla sua grande flessibilità, e in parte dalla sua semplicità di calcolo. Entrambe, nel contesto della sua introduzione, sono da mettere a confronto con un altro indice, il *Palmer Drought Severity Index* (Palmer, 1965), da qui in poi PDSI; ancora in una pubblicazione del 1999, Hayes et al. lo indicano come l'indice più utilizzato negli Stati Uniti, e ne citano vari punti di debolezza rispetto all'allora "nuovo" SPI. In sintesi, i più importanti tra essi sono:

- Scala temporale implicita (dove per scala temporale si intende il periodo di tempo durante il quale si accumulano i deficit di umidità (Vicente-Serrano et al., 2005));
- Lentezza nel rispondere a condizioni siccitose e al loro alleviarsi;

15

²https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi,

https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/drought#datasets,

https://resourcewatch.org/data/explore/cli023-Standard-Precipitation-Index

³ https://www.isprambiente.gov.it/pre/meteo/siccitas/

- Incoerenza spaziale (impossibilità di confrontare le condizioni riportate dall'indice tra zone diverse; un esempio è la frequenza diversa di condizioni gravi o estreme a seconda del luogo, che denota come non abbiano natura statistica);
- Problemi nel calcolo nei mesi invernali (poiché tutte le precipitazioni sono viste come pioggia non sono considerati gli effetti della presenza di neve e ghiaccio);
- Difficoltà nel calcolo (sono richieste 68 grandezze);

Lo SPI in confronto, presenta una risposta a ognuno di questi problemi (WMO, 2012):

- Possibilità di calcolare l'indice per varie scale temporali;
- Possibilità di monitorare le condizioni siccitose in tempo reale, grazie alle diverse scale temporali;
- Rappresentatività nei mesi invernali;
- Facilità di calcolo (è richiesta una sola grandezza);

La maggior parte dei punti di forza dello SPI rispetto al PDSI si devono all'assunzione di base che la siccità sia "una condizione di umidità insufficiente causata da un deficit di precipitazione in un certo periodo" (McKee et al., 1993); visto che lo stesso PDSI, basato fisicamente sull'equazione di bilancio idrico, risulta a livello operativo come principalmente definito dal valore di precipitazione (considerazione questa non sempre condivisa in letteratura, come presentato in seguito), è conveniente basare le proprie valutazioni direttamente su questa quantità (Vicente-Serrano et al., 2005), assumendo una relazione diretta tra il deficit di precipitazione e il deficit di umidità. Il sistema-siccità è quindi ricondotto al driver principale della mancanza di pioggia. L'utilizzo di un solo valore, per di più largamente disponibile, permette di applicare metodi statistici, descritti in seguito, normalizzati e quindi rappresentativi per ogni luogo e tipo di clima, oltreché non dipendenti da grandezze fisiche che potrebbero comportare incertezze o errori a seconda della stagione. Il metodo statistico permette inoltre di rispondere molto efficacemente a domande di interesse per gli stake-holder, quali la frequenza di fenomeni siccitosi di una certa entità o l'evoluzione spazio-temporale dei fenomeni stessi. Diverse scale temporali permettono poi di rappresentare deficit di diverse risorse d'acqua (umidità del suolo, acque sotterranee, ghiacciai, corsi d'acqua, bacini) e di valutare l'evolversi del fenomeno sul breve e lungo periodo. Questa proprietà dell'indice trova dei riscontri in letteratura, indicando una maggiore correlazione tra l'indice e la portata nei fiumi per scale più brevi (1-3 mesi) e tra l'indice e i livelli negli acquiferi per scale più lunghe (7-10 mesi), anche se con alcune limitazioni date dal tipo di sistema idrologico e da variazioni stagionali nella correlazione (Vicente-Serrano et al., 2005). Si sottolinea come, nonostante sia importante tenere conto di queste relazioni, lo SPI valuta la siccità meteorologica, legata agli altri tipi di siccità in quanto driver principale.

L'assunzione generale che la siccità sia rappresentabile come un processo lineare da driver a impatto, comune a tutti gli indici che la descrivono, è stata trattata nel Paragrafo 1.2. È però importante sottolineare che lo SPI dipende esclusivamente dal valore di precipitazione, ed è quindi esclusivamente in grado di valutare questa dimensione del fenomeno. Analisi temporali basate su questo indice in contesti caratterizzati dal cambiamento climatico, dove l'aumento di temperatura è in generale una delle principali (se non la principale) cause dell'evoluzione dei fenomeni siccitosi, risultano fortemente limitate nella loro possibilità di ottenere risultati rappresentativi. Questa considerazione, insieme a studi che dimostrano come lo stesso PDSI sia determinato in modo comparabile da precipitazione e temperatura, hanno portato negli anni seguenti a sviluppare un nuovo indice, lo SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010), discusso nel prossimo capitolo.

In ultimo, si citano due svantaggi dello SPI indicati da Hayes et al. (1999):

- Come ogni indice, la qualità dei dati ottenuti dallo SPI è dipendente dalla qualità e quantità dei dati usati: le prime pubblicazioni sullo SPI indicano come necessari in genere almeno 30 anni di dati, ma studi più recenti raccomandano dai 40 fino agli 80, trovando nella lunghezza della serie il principale fattore di incertezza nel calcolo dell'indice (Laimighofer et al., 2022); la capacità di indicare per tempo incipienti condizioni siccitose dipende inoltre dalla celerità con cui si ha accesso ai dati.
- Proprio la natura normalizzata dell'indice, benché lo renda rappresentativo per ogni clima, non permette di distinguere zone con probabilità più o meno alta di siccità: fenomeni moderati o estremi, la cui entità dipende dalle caratteristiche delle singole zone, avvengono con la stessa frequenza in ogni zona analizzata.

2.1.2 Metodologia

Per descrivere la base metodologica dell'indice, è utile partire dal nome stesso. La "precipitazione standardizzata" indicata, è infatti la "differenza della precipitazione dalla media su un certo periodo di tempo diviso la deviazione standard, dove la media e la deviazione standard sono determinati dai dati precedenti" (McKee et al., 1993). In questo senso, lo SPI è basato su una procedura largamente utilizzata: data una serie di dati, viene adattata una distribuzione di probabilità, da cui si ottengono informazioni aggiuntive sulla serie iniziale (ad esempio, il tempo di ritorno di un certo valore).

La serie di dati in entrata è, come già discusso, la precipitazione: nello specifico la precipitazione mensile. È importante sottolineare come i dati vadano divisi per mese, in quanto si suppone che ogni mese sia rappresentato da una diversa distribuzione di probabilità. La distribuzione utilizzata è in generale la distribuzione gamma, considerata rappresentativa rispetto alle precipitazioni; anche se alcuni studi hanno indagato la possibilità di utilizzare altre distribuzioni quali la log-normale, la distribuzione gamma rimane la scelta migliore (Angelidis et al., 2012). Si sottolinea comunque come la scelta della distribuzione sia indicata in letteratura come la seconda più importante fonte di incertezza nel calcolo dello SPI, e come non sia generalmente possibile né indicare univocamente una distribuzione più adatta a rappresentare i dati né ottenere risultati significativamente migliori utilizzando distribuzioni empiriche (Laimighofer et al., 2022).

L'adattamento della distribuzione gamma avviene tramite la stima dei parametri di forma e scala a e b (talvolta riportati in letteratura come α e β) a ogni serie di dati mensili appartenenti ad uno stesso mese dell'anno. Poiché la funzione gamma non è definita per valori nulli, questo primo adattamento deve essere fatto su una serie – o matrice – di dati da cui questi valori sono stati rimossi, mantenendo ovviamente corrispondenza tra i dati e il mese cui appartengono. Una rappresentazione schematica del processo è rappresentata in Figura 2-1.

Ottobre	Novembre	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giuzno	Luglio	Agosto	Settembre
105.6	84.2	6.6	51	46.4	20.6	75.8	98.4	79.6	33.6	5.6	193.2
47	167	9.2	3.1	15.4	1.8	109.6	97.2	93.4	13.4	114.4	164.4
11.8	56.2	34.4	70.2	23.6	27.6	114.4	83	63.2	26.4	28	66.6
161.6	68.4	105.6	47	0	0	2.2	28	116.8	26.2	64	1.6
0.6	47	18.2	11.4	13.6	0.8	46.4	109.2	26.8	38	63.6	28.6
72	5	10.6	37.6	0	47.8	43.4	105.8	10.8	72.2	35.4	44.8
73.6	46.8	4.2	5.8	0	20.4	162.4	79.4	89.6	55.2	47.8	78
166	129.7	22	8.8	10	72.8	9.6	110	11.4	25	13.6	29
37	59.2	0	5.4	97	66.2	60.6	112.4	65	64	88.4	97.6
67.2	154.8	54.4	8.8	0	1.6	63.6	21	18.8	8.2	6	22.4
28.2	117.6	98.4	42.4	37.2	2.8	100.2	95.8	15.6	15.6	116	17.6
48.2	68.2	26.2	0.6	1.2	11.4	103.2	57.2	19.2	11.6	62.8	95.2
ţ	ŧ.	ţ	ţ	ţ	ţ	ţ	ţ	ţ	ţ	ŧ.	ţ
a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b

Figura 2-1: Rappresentazione schematica del processo di calcolo dei parametri a e b della funzione gamma.

Dati i parametri a e b, viene poi calcolata la probabilità cumulata per tutti i dati (reinserendo anche i valori nulli) come:

$$G(x_{i,j}) = \int_{0}^{x_{i,j}} g(x_{i,j}) dx = \frac{1}{b_{i}^{a_{j}} \Gamma(a_{j})} \int_{0}^{x_{i,j}} x_{i,j}^{a_{j}-1} e^{-x_{i,j}/b_{j}} dx_{i,j}$$

Dove:

$$\Gamma(a_j) = \int_0^\infty y^{a_j - 1} e^{-y} dy$$

E $x_{i,j}$ è il singolo valore di pioggia e j l'indice del mese cui appartiene.

In letteratura sono generalmente fornite approssimazioni lineari per il calcolo dei parametri a e b e della funzione gamma incompleta G; per questo lavoro sono state utilizzate invece le due funzioni gamfit e gammainc in Matlab.

Per tenere conto della probabilità di valori nulli nella distribuzione, questa probabilità è calcolata per ogni mese come rapporto tra i valori nulli e tutti i valori disponibili in quel mese. La funzione G è quindi modificata in:

$$H(x_{i,j}) = q_j + (1 - q_j)G(x_{i,j})$$

Dove q_j è la probabilità di valori nulli per il mese cui appartiene il valore $x_{i,j}$.

Infine, per quanto la distribuzione H descriva già completamente ogni mese di dati, viene effettuata una normalizzazione tramite una trasformazione della distribuzione cumulata in una distribuzione standard. Avendo media pari a zero e deviazione standard pari a uno, il valore così ottenuto è pari alla differenza di precipitazione rispetto alla media diviso la deviazione standard, ovvero lo SPI. In Matlab questo è stato ottenuto grazie alla funzione norminv.

La procedura appena descritta, se applicata direttamente sui dati mensili, permette di ottenere lo SPI riferito a un mese di accumulazione o SPI-1. Per tenere conto di diverse scale temporali si applica ai dati una media su finestra mobile che finisce nel mese di interesse, lunga quanto la scala temporale. A quest'operazione deve però seguire la rimozione dei primi n-1 valori mensili per cui non sono disponibili abbastanza dati precedenti nella serie per ottenere la media tra n dati.

Il metodo presentato è quello largamente accettato in letteratura, ad esempio in Tigkas et al. (2014), Angelidis et al. (2012), Bordi et al. (2001), Hayes et al. (1999).

Oltre all'implementazione in Matlab sono stati valutati altri tre metodi di calcolo: il software DrinC (Drought Indices Calculator, Tigkas et al., 2015), un'altra implementazione Matlab (Taesam Lee, 2022) e il pacchetto spei per linguaggio R (sviluppato da Beguería e Vicente-Serrano, [S13]). In Figura 2-2 e Figura 2-3 vengono riportati gli scatter plot ottenuti dall'analisi sugli stessi dati tramite l'implementazione Matlab, il programma DrinC e la funzione Matlab. Si nota la netta correlazione tra i risultati ottenuti, e l'errore quadratico medio molto basso, dovuto principalmente ad arrotondamenti dei risultati nel caso del software DrinC.

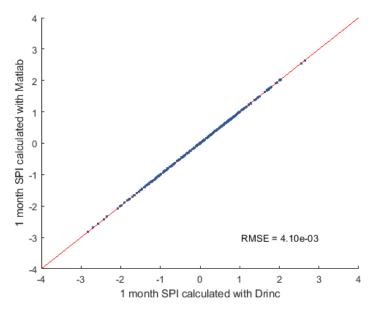


Figura 2-2: Scatter plot tra i risultati ottenuti tramite implementazione Matlab e software DrinC.

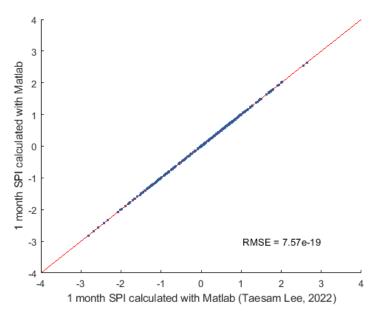


Figura 2-3: Scatter plot tra i risultati ottenuti tramite implementazione Matlab e funzione Matlab.

Il confronto con il pacchetto spei ha dato invece risultati meno soddisfacenti. In Figura 2-4 si nota infatti una correlazione meno forte tra i risultati di quella presente nei grafici precedenti: in particolare, sembra essere presente una seconda correlazione non 1:1, che si trova essere relativa ai valori di un mese specifico. Questo comportamento si è ripresentato anche partendo dall'analisi di dati casuali, ed essendo presente questo errore in tutte gli scatter plot dove sono considerati i risultati del pacchetto, si suppone essere un qualche problema nella sua implementazione.

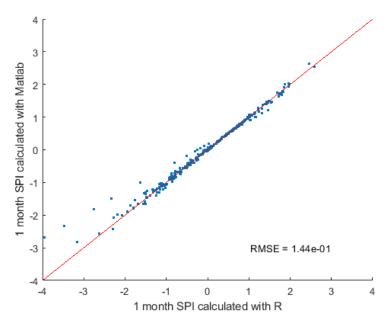


Figura 2-4: Scatter plot tra i risultati ottenuti tramite implementazione Matlab e pacchetto spei.

In conclusione, si ritiene l'implementazione del calcolo dell'indice SPI sviluppata in Matlab corretta.

2.1.3 Interpretazione

L'interpretazione dello SPI parte da una sua classificazione, dichiaratamente arbitraria, che lega la precipitazione standard a diverse classi di "umidità" o "aridità", riportata in Tabella 2.

≥2.0	Estremamente umido						
1.5÷1.99	Molto umido						
1.0÷1.49	Moderatamente umido						
-0.99÷0.99	Intorno alla norma						
-1.0÷-1.49	Moderatamente secco						
-1.5÷1.99	Molto secco						
≤-2.0	Estremamente secco						

Tabella 2: Classificazione dello SPI, adattata da World Meteorological Organization (2012).

A questa classificazione, sulla base di studi condotti da McKee at al. (1993), viene fatta corrispondere una certa frequenza o probabilità di ricorrenza, riportata in Tabella 3.

SPI	Categoria	Numero di eventi ogni 100 anni
0÷-0.99	Leggermente secco	33
-1.0÷-1.49	Moderatamente secco	10
-1.5÷-1.99	Molto secco	5
≤-2.0	Estremamente secco	2.5

Tabella 3: Probabilità di ricorrenza relativa a valori dello SPI, adattata da World Meteorological Organization (2012).

Di seguito vengono indicate le caratteristiche di queste corrispondenze (World Meteorological Organization, 2012):

- **SPI-1**

Il valore di SPI-1 è molto simile alla percentuale di precipitazione media, e riflette le condizioni a breve termine di umidità del terreno e di stress idrico delle coltivazioni. È molto legato alle caratteristiche della zona di interesse, per cui mesi con basse precipitazioni possono portare a valori di SPI molto alti o bassi anche per piccole variazioni della precipitazione.

SPI-3

Il valore di SPI-3 rappresenta condizioni leggermente più a lungo termine del precedente, mitigando le sue variazioni spesso repentine, e rimuovendo in parte errori dovuti alla scelta di una distribuzione per i dati (Laimighofer et al., 2022). Va comunque sempre confrontato con SPI con periodi di accumulazione maggiore per verificare se valori positivi o negativi si inseriscono in fenomeni siccitosi più ampi (ad esempio condizioni umide sul periodo breve inserite in una siccità più lunga) al fine di evitare falsi allarmi nell'identificare il loro inizio o fine.

- SPI-6

Il valore di SPI-6 rappresenta condizioni stagionali a medio termine e può essere molto utile

nell'indicare un deficit di pioggia in periodi normalmente umidi (ad esempio ottobre-marzo), oltre che, in alcuni casi, a indicare i primi segni di deficit nelle portate dei fiumi o nei livelli dei bacini.

SPI-9

Il valore di SPI-9 rappresenta deficit inter-stagionali che, se sufficientemente gravi, sono generalmente indicativi di condizioni di siccità con impatti sull'agricoltura. Può anche indicare i primi segni di siccità idrologica multi-annuale.

- SPI-12

Il valore di SPI-12 rappresenta variazioni a lungo termine nelle condizioni di umidità; poiché la media su un anno generalmente rimane stabile, condizione corrispondente ad uno SPI pari a zero, valori positivi o negativi indicano variazioni significative, che possono interessare le condizioni a lungo termine di portate fluviali, bacini idrici e livelli degli acquiferi.

I valori di SPI calcolati per le diverse scale temporali vengono rappresentati quindi su una linea del tempo, dando informazioni circa l'evolversi dei fenomeni ad essi legati; in questo senso viene generalmente considerato l'inizio di un evento siccitoso lo scendere del valore di SPI sotto -1, definito come valore di soglia, e il termine il risalire sopra lo 0 (rispettivamente un valore almeno una deviazione standard sotto la media e la media stessa). Questo tipo di analisi è chiamato in letteratura "run theory", e in base a questa caratterizzazione si possono poi analizzare altre dimensioni degli eventi valutati, riportate sinteticamente di seguito (Caloiero et al., 2021):

- Drought Duration (DD): Durata dell'evento di siccità.
- Average Drought Duration (ADD): Media della durata degli eventi di siccità.
- Drought Severity (DS): Somma dei valori dell'indice durante l'evento di siccità.
- Average Drought Severity (ADS): Media della severità degli eventi di siccità.
- **Drought Intensity (DI):** Rapporto tra la severità e la durata di un evento di siccità.
- Average Drought Intensity (ADI): Media dell'intensità degli eventi di siccità.

Una rappresentazione di quanto descritto è riportata in Figura 2-5. Come si nota graficamente, il metodo ottiene una definizione di eventi siccitosi che iniziano in corrispondenza del superamento di una soglia, per poi diminuire gradualmente fino al ritorno di condizioni umide. È stata considerata anche una possibile modifica, che partendo dagli stessi eventi, li amplia in modo da considerare parte della *run* anche i valori inferiori a zero precedenti al superamento della soglia – l'*onset* dell'evento. I risultati ottenuti con questo tipo di analisi sono stati poi confrontati con i risultati dell'analisi originale.

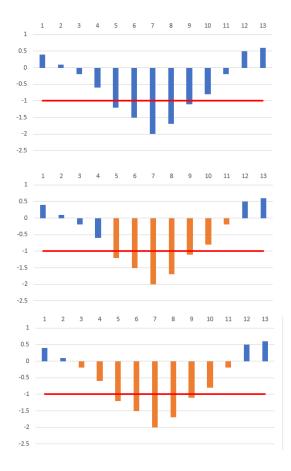


Figura 2-5: Rappresentazione grafica del metodo run analysis (secondo grafico) e della variante calcolata (terzo grafico).

Oltre alle caratteristiche degli eventi precedentemente descritte, se ne possono valutare altre (Spinoni et al., 2015):

- Mese di picco: mese col valore di SPI più basso in un periodo di siccità.
- **Area interessata:** percentuale di un'area (zona o regione predefinita) in cui si riscontrano condizioni di siccità, almeno una volta, durante un determinato evento.
- Area interessata nel mese di picco: percentuale di un'area in condizioni di siccità nel mese di picco.

Risulta chiaro come la maggior parte di questi valori siano utili nello studio della siccità legato a distribuzioni spaziali dello SPI, ottenute da dataset di valori di precipitazione a spaziatura fissa, o da dati di precipitazione delle singole stazioni opportunamente estesi a coprire tutta l'area di interesse (kriging, poligoni di Voronoi...). L'applicazione diretta della run theory appena descritta a questo tipo di dati presenterebbe però delle difficoltà, data la complessità aggiunta nel considerare un numero di serie temporali distribuite arealmente, soprattutto se si analizzassero diversi tempi di accumulo. In questo lavoro si è quindi scelto di considerare un altro metodo, basato sulle analisi condotte da González-Hidalgo et al. (2018) e Baronetti et al. (2020, 2022).

Il metodo utilizza il solo SPI-12 e mira a valutare eventi siccitosi tramite due criteri:

- Valore di soglia: definisce se un certo punto nel dominio è in condizioni di siccità. In questo caso posto a -1 per poter confrontare i risultati con i valori puntuali calcolati su una singola stazione.
- Percentuale minima del dominio in condizioni di siccità: posta al 25% dell'area totale, ristretta al solo territorio della regione Piemonte.

Gli eventi sono quindi considerati come serie, da uno a più mesi, in cui l'area in condizioni di siccità, definita secondo il primo criterio, è pari almeno alla percentuale minima, definita secondo il secondo criterio. In questo modo è possibile analizzare singoli eventi, considerati come *drought runs*, con gli stessi criteri presentati (durata, severità, intensità...).

2.2 Standardized Precipitation Evapotraspiration Index

2.2.1 Introduzione

Lo Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, introdotto nel 2010 da Vicente-Serrano et al. (2010), si richiama fin dal nome allo SPI, discusso nel precedente capitolo; si pone infatti in continuità con esso, ma tenta, alla luce di alcune evidenze scientifiche emerse da studi successivi alla sua larga adozione, di ampliarne le possibilità di applicazione partendo dallo stesso metodo di base ma considerando anche valori di evapotraspirazione potenziale.

Come per lo SPI, prima di considerare le caratteristiche specifiche dell'indice, si danno delle informazioni sulla sua adozione. Nonostante il suo sviluppo relativamente recente, l'indice ha riscosso un notevole successo a livello accademico: nella stessa ricerca bibliografica presentata nel Paragrafo 2.1.1, Kchouk et al. (2022) indicano infatti lo SPEI come il secondo indice di siccità meteorologica più citato in letteratura. Gli ideatori dell'indice hanno inoltre continuato il suo sviluppo nel tempo rispondendo a critiche e suggerimenti (Beguería et al., 2014), analizzandone e migliorandone i metodi di calcolo e fornendo un pacchetto in linguaggio R, disponibile gratuitamente, per la sua applicazione [S13]. Sono inoltre disponibili un database di dati SPEI in griglia aggiornato periodicamente e un database aggiornato mensilmente [S14].

Dal punto di vista operativo l'indice si basa su considerazioni statistiche del tutto simili allo SPI, condividendo quindi i punti di forza del precedente indice (scala temporale esplicita, monitoraggio in tempo reale, facilità di calcolo), ma, come detto, vengono portate avanti delle critiche dal punto di vista teorico. Si sottolinea infatti come la scelta di considerare la sola precipitazione, e non altri fattori quali temperatura, umidità relativa, velocità del vento ecc. è giustificata solo se la variabilità della pioggia è marcatamente maggiore di quella di altre grandezze, e se le altre variabili sono stazionarie (Vicente-Serrano et al., 2010). Appare evidente come questi assunti non siano verificati, soprattutto nel caso della temperatura, nel contesto contemporaneo dei cambiamenti climatici (confronto Paragrafo 1.3 e le analisi sui dati regionali di Paragrafo 3.1.2 e 3.2.2), e, più nello specifico, considerando l'importanza della temperatura nel determinare condizioni siccitose – risultato riportato da vari studi citati nell'articolo di introduzione dell'indice stesso. Lo SPEI si pone quindi l'obiettivo di reintegrare l'analisi della temperatura (presente nel calcolo del PDSI, già citato nel Paragrafo 2.1.1) in un indice con le caratteristiche operative dello SPI: questo attraverso il calcolo della differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET₀, in letteratura riportata come *reference evapotranspiration*), che rappresenta un bilancio idro-climatico (BIC) semplificato.

Delle due grandezze che partecipano al bilancio, la precipitazione non necessita di approfondimento; l'ET₀ invece, deve essere sia definita che giustificata nel suo utilizzo. Essa rappresenta un valore di acqua evapotraspirata (in mm) in un certo tempo da una superficie di riferimento data da una cotica erbosa di una specifica specie in condizioni ideali. Essenzialmente, vengono rimosse tutte le fonti di variabilità (specie, condizione del suolo...), mantenendo solo l'effetto delle condizioni climatiche: in questo senso, quindi, si può affermare che la ET₀ rappresenta la "domanda evapotraspirativa dell'ambiente imposta, in un dato momento o periodo, dalle condizioni meteorologiche" [S15]. È importante sottolineare la differenza tra ET₀ ed evapotraspirazione reale (ET_a), ovvero l'acqua effettivamente evapotraspirata da una superficie specifica, nel calcolo dell'indice SPEI. Se è vero che a una prima analisi l'uso dell'ET₀ appare come un'approssimazione della misura più precisa data dall'ET_a, bisogna innanzitutto indicare quale tipo di bilancio idrico si sta cercando di rappresentare. Beguería et al. (2014) sottolineano infatti come entrambe le grandezze nel BIC calcolato si riferiscano all'atmosfera, dove da un lato è presente una disponibilità climatica di acqua rappresentata dalla precipitazione, e dall'altro una richiesta massima possibile data dal valore di evapotraspirazione. Questo valore di evapotraspirazione deve quindi, tanto quanto la precipitazione, essere legato solo a fattori climatici: risulta chiaro come ETo sia la grandezza corretta per questo tipo di calcolo (soprattutto se si considera che ET_a dipende a sua volta dalla disponibilità d'acqua, che sarebbe quindi presente due volte nel bilancio). Dal punto di vista concettuale, quindi, si cerca di rappresentare il driver della siccità – qui visto come un bilancio tra una disponibilità e una richiesta d'acqua – studiandone le variazioni rispetto alla media tramite metodi statistici, al fine di definire periodi di deficit idrico, al netto degli effetti specifici che possono avere a queste condizioni, quali le risposte fisiologiche delle piante rappresentate da ETa.

Date le tre grandezze presentate (precipitazione, ET_0 ed ET_a), e alla luce di quanto affermato rispetto alle loro caratteristiche, si potrebbe decidere di rappresentare lo stesso BIC tramite una differenza o un rapporto tra ET_a ed ET_0 , dove ET_a rappresenti la disponibilità di acqua e ET_0 la richiesta. La scelta di utilizzare la differenza tra P ed ET_0 viene giustificata, sempre da Beguería et al. (2014), tramite delle considerazioni in parte teoriche e in parte pratiche:

- Necessità di definire un modello specifico per il calcolo di ET_a: diversi sistemi richiedono infatti metodi diversi per il calcolo della grandezza. Questo inficerebbe sulla possibilità di utilizzare lo SPEI come metodo generale di monitoraggio.
- Difficoltà nel calcolo di ET_a: la grandezza dipende infatti da vari fattori, spesso non stazionari nel tempo. ET₀ invece può essere calcolato tramite formule empiriche che dipendono dalla sola temperatura (confronto paragrafo successivo).
- Presenza di numerosi valori nulli nelle serie basate su ET_a: sia serie di differenze tra
 precipitazione ed ET_a che tra ET_a ed ET₀ contengono numerosi valori nulli che rendono
 difficile l'adattamento di distribuzioni di probabilità.

La descrizione relativamente dettagliata delle motivazioni che giustificano la scelta delle due grandezze usate nel BIC alla base del calcolo dell'indice SPEI risulta quindi utile sia a presentarne le basi teoriche sia a descriverne l'applicazione. Fornite queste indicazioni introduttive, e rimandando al Paragrafo 2.1.1 per gli aspetti specifici che concernono la struttura concettuale di base condivisa con lo SPI, si procede a descrivere il calcolo dell'indice stesso.

2.2.2 Metodologia

Al fine di ottenere il valore di SPEI, è necessario avere a disposizioni valori cumulati di precipitazione (in generale mensili) e valori cumulati mensili di ET₀. Quest'ultimo può essere calcolato utilizzando varie formule, che richiedono diversi dati in input (confronto Figura 2-6).

Metodo	Tempe- ratura	RH	Vento	Eliofa- nia relativa	Radia- zione globale	Radia- zione netta	Radia- zione. astron.	Evapo- rato
Thornthwaite	X							
Blaney-Criddle	x	(X)	(X)	(X)			\mathbf{x}	
Radiazione solare	x	(X)	(X)	(••)	x			
Hargreaves	x						X	
Turc	\mathbf{x}	(•)		(**)	\mathbf{x}			
Penman	x	\mathbf{x}	X	x		(X)		
Evaporimetro		(X)	(X)					x

Figura 2-6: Tabella riassuntiva delle varie formule utilizzate per il calcolo di ET₀. Fonte:[S15].

Tra queste è stata scelta la formula di Hargreaves (Hargreaves et al., 1986), in mancanza dei dati necessari per calcolare altre formule quali la FAO-56 Penman–Monteith, secondo quanto riportato dagli autori dell'indice (Beguería et al., 2014). Al fine del calcolo sono necessarie tre grandezze: latitudine del sito, temperatura media massima e temperatura media minima. La latitudine è necessaria per calcolare la radiazione extraterrestre secondo la formula:

$$R_A = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Dove G_{sc} è la costante di radiazione solare pari a $0.0820 \,\mathrm{MJ}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{min}^{-1}$, ϕ la latitudine in gradi radianti, e i restanti fattori pari a:

$$d_r = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$
$$\delta = 0.4009 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$
$$\omega_s = \arccos\left(-\tan\left(\phi\right)\tan(\delta)\right)$$

Con d_r distanza relativa inversa dalla Terra al Sole, J numero del giorno nell'anno, δ declinazione solare in radianti e ω_s angolo orario al tramonto.

Si sottolinea come siano presenti vari strumenti per il calcolo di questa grandezza; ad esempio, è disponibile la funzione **solar_radiation** nel *Climate Data Toolbox* disponibile in Matlab (Greene et al., 2019) o un'apposita funzione nel pacchetto *spei* per linguaggio R [S13]. Ottenuto il valore di radiazione solare extraterrestre, il valore di ET₀ è dato dalla formula:

$$ET_0 = 0.0023 \cdot 0.408 (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

Nella formula, T_{mean} , T_{max} e T_{min} rappresentano le medie mensili rispettivamente dei valori medi, massimi e minimi giornalieri; T_{mean} può essere dato come media delle temperature medie mensili massime e minime nel caso non sia disponibile il valore medio effettivo. Il fattore 0.0023 è un valore empirico, mentre il fattore 0.408 serve a convertire la radiazione extraterrestre da MJ·m⁻²·giorno⁻¹ a mm·giorno⁻¹.

Ottenuto il valore di ET_0 , e avendo a disposizione i dati mensili di precipitazione cumulata, si calcola il BIC sottraendo ad ogni valore di precipitazione il corrispondente valore di ET_0 :

$$D_i = P_i - ET_{0_i}$$

dove P_i è la precipitazione nell'i-esimo mese. D è quindi il valore del BIC nel singolo mese, ed è la variabile su cui si applica il metodo statistico del tutto simile a quello utilizzato nel calcolo dello SPI (aggregazione a diverse scale temporali tramite media a finestra mobile, adattamento di distribuzione e normalizzazione della variabile). La differenza sostanziale sta nella distribuzione da adattare: nel calcolo dello SPEI, invece della distribuzione gamma, viene infatti calcolata la distribuzione loglogistica, scelta come la migliore nel descrivere i valori di D (Vicente-Serrano et al., 2010). La distribuzione presenta tre parametri: α , β e γ , rispettivamente parametri di scala, forma e origine. Soprattutto il terzo fattore è importante, in quanto permette di studiare anche serie con valori minori di zero.

Al fine di adattare la distribuzione log-logistica, è necessario innanzitutto calcolare i momenti pesati in probabilità (*Probability weighted moments o PWM* in letteratura) tramite il metodo *unbiased* di Hosking (1986). Data una serie ordinata crescente di dati, il momento di ordine *s* è pari a:

$$w_{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\binom{N-i}{S} D_{i}}{\binom{N-1}{S}}$$

dove N è il numero di valori nella serie.

Calcolati i PWM, i parametri α , β e γ sono pari a:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)$$

Con $\Gamma(n)$ funzione gamma di n.

Tramite le formule presentate, è necessario calcolare i parametri della distribuzione per ogni mese dell'anno (confronto Figura 2-7); fatto ciò, la funzione di probabilità cumulata per il singolo valore mensile D_i è quindi pari a:

$$F(D_{i,j}) = \left[1 + \left(\frac{\alpha_j}{D_{i,j} - \gamma_j}\right)^{\beta_j}\right]^{-1}$$

dove il pedice j indica il mese cui appartiene il valore $D_{i,j}$.

Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set			
62.6	62.1	-11.4	30.2	21.2	-55.7	-14.2	-22.2	-71.1	-137.5	-144.4	112.0			
-1.6	142.2	-8.0	-18.1	-17.0	-60.5	15.0	-26.3	-52.9	-151.5	-16.2	83.8			
-44.4	30.6	20.2	53.6	-0.2	-21.5	25.1	-46.6	-95.7	-125.0	-99.6	-14.9			
115.1	43.8	89.8	28.5	-35.3	-80.2	-102.5	-109.6	-22.6	-135.5	-71.4	-98.0			
-55.3	23.1	1.3	-7.5	-24.8	-68.7	-40.5	-24.3	-131.2	-134.4	-84.7	-59.6			
18.6	-20.2	-5.1	15.5	-34.5	-14.5	-50.9	-16.3	-133.5	-96.3	-93.1	-44.8			
23.0	22.3	-13.4	-16.4	-37.0	-55.3	68.0	-59.5	-72.7	-116.5	-104.2	-29.3			
114.9	104.2	3.8	-10.3	-25.1	8.6	-89.9	-27.6	-167.7	-159.9	-153.2	-71.8			
	- 1			0	tt N	ov [Dic G	en	Feb N	V lar	Apr	Mag	Giu	Lug
	- 1													
				-55	.3 3	0.6 -	5.1 -	7.5 -	25.1 -		_	-27.6	-95.7	-135.5
				55 -44					25.1 - 21.2		-40.5			
				-44	.4 14	2.2 8	9.8 5		21.2	55.7 8.6	-40.5 68	-27.6	-95.7	-135.5
				-44	.4 14: 6 -20	2.2 8 0.2 -1	9.8 5 3.4 -1	3.6 8.1	21.2 -37 -	55.7 8.6 80.2 -1	-40.5 68 102.5 -	-27.6 -16.3	-95.7 -22.6	-135.5 -96.3
	Ser	ie ordi	inata	-44 -1 18	6 -20	2.2 8 0.2 -1 3.8	9.8 5 3.4 -1 1.3 1	3.6 8.1 5.5 -	21.2 -37 - 24.8 -	55.7 8.6 80.2 -1 55.3	-40.5 68 102.5 -	-27.6 -16.3 109.6	-95.7 -22.6 -167.7	-135.5 -96.3 -159.9
	Ser	ie ordi	inata •	-44 -1 18	14: 20 4: 23 2:	2.2 8 0.2 -1 3.8 2.3 -1	9.8 5 3.4 -1 1.3 1 1.4 -1	3.6 8.1 5.5 -	21.2 -37 - 24.8 - 35.3 -	55.7 8.6 80.2 -1 55.3	-40.5 68 102.5 - -14.2 -89.9	-27.6 -16.3 109.6 -26.3	-95.7 -22.6 -167.7 -72.7	-135.5 -96.3 -159.9 -134.4
	Ser	ie ordi	inata •	-44 -1 18	.4 14: 6 -20 6 4: 23 2: 6 10:	2.2 8 0.2 -1 3.8 2.3 -1	9.8 5 3.4 -1 1.3 1 1.4 -1 0.2 3	3.6 8.1 5.5 - 6.4 -	21.2 -37 - 24.8 - 35.3 - -0.2 -	55.7 8.6 80.2 -1 55.3 68.7 14.5	-40.5 68 102.5 - -14.2 -89.9 25.1	-27.6 -16.3 109.6 -26.3 -59.5	-95.7 -22.6 -167.7 -72.7 -133.5	-135.5 -96.3 -159.9 -134.4 -151.5
	Ser	ie ord	inata •	-44 -1 18	.4 14. .6 -20 .6 4: 23 2: .6 10-	2.2 8 0.2 -1 3.8 2.3 -1 4.2 2 3.1	9.8 5 3.4 -1 1.3 1 1.4 -1 0.2 3 -8 -1	3.6 8.1 5.5 - 6.4 -	21.2 -37 - 24.8 - 35.3 - -0.2 - 34.5 -	55.7 8.6 80.2 -1 55.3 68.7 14.5	-40.5 68 102.5 - -14.2 -89.9 25.1 -50.9	-27.6 -16.3 109.6 -26.3 -59.5 -22.2	-95.7 -22.6 -167.7 -72.7 -133.5 -52.9	-135.5 -96.3 -159.9 -134.4 -151.5 -116.5

Set

-44.8 112

-98

-29.3

83.8

-59.6 -14.9

 W_S

 γ_j

-99.6

-16.2 -153.2

-93.1

-144.4 -71.4

-104.2

Figura 2-7: Rappresentazione schematica del calcolo dei parametri della distribuzione log-logistica.

La distribuzione log-logistica è definita per $\gamma \leq D < \infty$ se $\beta > 0$ e per $-\infty < D \leq \gamma$ se $\beta < 0$ (in Figura 2-8 sono riportati due esempi delle due condizioni); fuori da questi limiti la funzione non è definita e non è possibile calcolare lo SPEI. Nel corso del presente lavoro, la funzione ha presentato soluzione finita in ogni applicazione studiata, indicando quindi che il metodo statistico presentato si adatta alle condizioni climatiche della regione Piemonte.

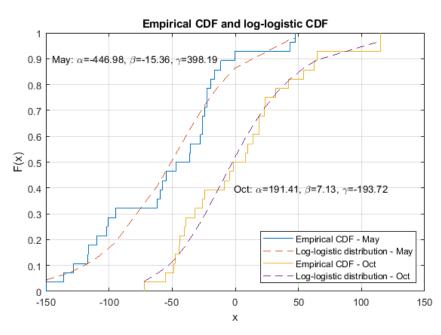


Figura 2-8: Confronto tra distribuzioni empiriche e log-logistiche per due mesi di dati della stazione BRA.

Ottenuti i valori di probabilità cumulata si normalizza la variabile riadattandola ad una distribuzione con media nulla e deviazione standard unitaria. Come per lo SPI, i valori di SPEI così ottenuti sono pari al rapporto tra la differenza di ogni dato dalla media fratto la varianza. Ripetendo il metodo su serie di dati cui è stata precedentemente applicata una media a finestra mobile di lunghezza tre, sei, nove e dodici mesi (dove la finestra termina sul valore da calcolare) e possibile ottenere lo SPEI-3, -6, -9 e -12 rispettivamente.

Il metodo descritto, implementato in Matlab, è stato poi confrontato con il pacchetto *spei*, ottenendo risultati perfettamente sovrapponibili; si considera quindi l'implementazione corretta.

2.2.3 Interpretazione

In virtù del metodo di calcolo dello SPEI, espressamente parallelo a quello dello SPI, l'interpretazione dei risultati può essere effettuata in modo del tutto simile. Si rimanda quindi al Paragrafo 2.1.3 per una descrizione del tipo di analisi e delle grandezze calcolabili a partire da una serie di dati di SPEI. Si sottolinea però, come riportato nel Paragrafo 1.3, come l'analisi degli stessi dati utilizzando i due indici sia di particolare interesse, in quanto è in grado di indentificare diverse dimensioni del fenomeno siccitoso.

3 Analisi statistica e di trend dei dati di precipitazione e temperatura

Gli indici di siccità studiati sono stati utilizzati per analizzare sia dati puntuali, riferiti ad una singola stazione nella provincia di Cuneo, sia dati in griglia relativi a tutta la regione Piemonte. Le caratteristiche dei due set di dati sono discusse di seguito, e sono descritti i risultati delle analisi statistiche e di ricerca di tendenze condotte sui dati.

3.1 Dati puntuali

3.1.1 Fonte dei dati

I dati analizzati sono stati acquisiti dalla banca dati meteorologica dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte [S16]. Nello specifico, è stata considerata la stazione BRA in località Museo Craveri, nel Comune di Bra della Provincia di Cuneo (coordinate 44°42'N 7°52'E), di cui è fornita una mappa e un'immagine in Figura 3-1 e Figura 3-2.

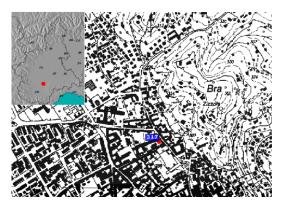


Figura 3-1: Localizzazione su mappa regionale e carta CTR della stazione BRA.



Figura 3-2: Foto della stazione BRA.

I dati si riferiscono al periodo da maggio del 1993 a giugno del 2022. La lunghezza della serie, di quasi 30 anni, è stata considerata necessaria per le analisi effettuate sui dati stessi; questi sono le precipitazioni giornaliere da mezzanotte a mezzanotte e le temperature giornaliere medie, massime e minime.

3.1.2 Analisi dei dati

Al fine di costruire una matrice di precipitazione cumulate mensili e tre matrici di medie mensili rispettivamente di temperature medie, massime e minime si è deciso di partire dai dati giornalieri. Questa decisione è giustificata dalla mancanza di dati nel caso non siano disponibili misure per più di due giorni del mese nel database mensile fornito da Arpa Piemonte.

I dati mancanti nelle precipitazioni sono stati sostituiti con la media degli altri valori dello stesso mese. Per le temperature, non trattandosi di valori cumulati, sono stati invece tralasciati i dati mancanti nel calcolo della media mensile. In entrambi i casi un mese con più di quattro dati mancanti è stato scartato. Inoltre, l'ultimo anno di dati, in questo caso il 2022, è stato scartato in quanto incompleto. Infine, per mantenere una migliore rappresentatività dei processi idrologici, è stato deciso considerare i dati relativi all'anno idrologico ottobre-settembre.

Nel presentare i dati, si sottolineano dei problemi riscontrati con i dati mensili ottenuti dal database Arpa: oltre alla mancanza di dati precedentemente discussa, si sono riscontrati degli errori nel calcolo della pioggia. Ad esempio, come riportato in Figura 3-3, nel mese di marzo 1994 il database riporta 10.8 mm di pioggia; l'analisi dei dati giornalieri porta invece al valore di 20.6 mm, facilmente verificabile come effettiva somma dei dati di pioggia del mese. Un altro caso simile si presenta nell'agosto del 1994, dove sono riportati 17.8 mm rispetto agli effettivi 5.6 mm. In entrambi i casi l'errore deriva dall'aver scartato il primo giorno del mese e incluso il primo giorno del mese successivo. Simili discrepanze nei dati sono state riscontrate frequentemente: si raccomanda quindi il procedimento descritto sopra nel calcolo dei dati mensili. Le temperature invece non riportano simili errori.

Parametro	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Set		
Precipitazione dalle 9 alle 9 (mm)	50,8	50,6	16,4	75,8	98,4	79,6	33,6	5,8	4		
Giorni piovosi pioggia dalle 9 alle 9	5	4	2	6	8	8	5	3	8		
Precipitazione dalle 0 alle 0 (mm)	50,8	56,2	10,8	75,8	98,4	79,6	33,6	17,8	100		
Giorni piovosi pioggia dalle 0 alle 0	6	5	1	6	10	8	5	4	0000		
Temperatura media (°C)	3,6	2,7	11,6	11,4	16,8	20,2	24,9	24,2	500		
Temperatura media dei massimi (°C)	7,6	6,6	18,5	17,2	21,9	26,2	31,1	30,8	0000		
Temperatura media dei minimi (°C)	0,4	-0,5	6,1	6,4	12,6	14,8	19,4	18,7	500		
Temperatura massima (°C)	14,6	16,2	23,2	27,0	27,7	33,0	34,4	36,0	000		
Temperatura minima (°C)	-2,2	-6,4	2,8	1,4	7,9	8,5	16,7	14,7	60		
Umidita' media (%)	82	87	73	67	84	74	76	73	90		
Umidita' massima (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	550		
Umidita' minima (%)	15	19	7	4	19	9	25	12	90		
Velocita' media del vento (m/s)	1,3	1,1	1,4	1,7	1,4	1,5	1,4	1,4	5500		
Velocita' massima raffica di vento (m	16,6	6,6	9,9	12,8	8,1	13,9	13,7	9,9	90		
Direzione massima raffica (°)									-		
Calma di vento (min)	1970	1570	1380	950	860	620	810	930			
Settore Prevalente	S	SSE	SSE	NW	NW	NNW	S	S	-		
4 R888888888888888888888888888888888888	36536565656565665665665665665665665666566666	36566666666666666666666666666666666666	366666666666666666666666666666666666666	\$8888888888888888888888888888888888888	8888888888888888	888888			 		
1994 🕶 🔛 🖭 🕡											

Figura 3-3: Schermata dell'applicazione Java del database Arpa Piemonte. Sono indicati i dati mensili errati discussi.

Si sottolinea come dall'analisi delle temperature, a differenza di quella della precipitazione, siano emersi dei mesi con dati mancanti: per questi sono stati sostituiti i valori riferiti alla vicina stazione di Fossano in località Madonna di Loreto.

3.1.3 Climatologia della zona

Come spiegato nei paragrafi successivi, per rappresentare le condizioni di siccità tramite il calcolo di indici è necessario avere una comprensione della climatologia della zona. Sono stati quindi calcolati dei dati di interesse dal database precedentemente de scritto, riportati in Tabella 4,

Tabella 5,

Tabella 6, Tabella 7 e Figura 3-4.

Tabella 4: Rappresentazione sintetica dei dati di precipitazione di BRA.

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Annual
Media	59.5	88.7	36.0	26.2	23.6	38.0	71.2	84.4	55.2	38.5	45.6	58.4	625.4
Mediana	56.4	71.7	24.1	19.2	14.3	24.1	61.5	90	54.1	33.1	35.4	44	639.8
Deviazione std	44.7	60.9	38.2	23.0	25.6	38.6	60.0	44.5	36.7	28.4	36.0	50.3	136.3
Coeff. di variazione	0.75	0.69	1.06	0.88	1.08	1.02	0.84	0.53	0.67	0.74	0.79	0.86	0.22
Media giorni di pioggia	5	5	6	9	11	8	6	7	7	7	9	5	85
Anni senza precipitazione	1	0	2	0	5	1	0	0	0	0	0	0	

Tabella 5: Rappresentazione sintetica dei dati di temperatura media di BRA.

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Media	13.29	7.39	3.16	2.53	4.56	9.13	12.80	17.17	21.68	24.01	23.31	18.74
Mediana	13.10	7.39	3.51	2.42	5.34	9.21	12.31	17.37	21.47	24.23	23.37	18.81
Deviazione std	1.26	1.12	1.41	1.35	1.89	1.59	1.32	1.20	1.32	1.38	1.46	1.57
Coeff. di variazione	0.095	0.151	0.446	0.532	0.415	0.174	0.103	0.070	0.061	0.057	0.063	0.084

Tabella 6: Rappresentazione sintetica dei dati di temperatura massima di BRA.

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Media	19.00	12.12	8.08	7.83	10.54	15.91	19.39	23.94	28.78	31.50	30.76	25.73
Mediana	18.90	11.85	7.82	7.79	10.87	16.05	18.51	24.04	28.71	31.33	30.66	25.94
Deviazione std	1.95	1.54	1.78	1.80	2.22	2.37	1.89	1.69	1.93	1.93	2.30	2.22
Coeff. di variazione	0.10	0.13	0.22	0.23	0.21	0.15	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.09

77 1 11 77 D			7 . 7	7			7. DD 4
Tabella 7: Rappreser	ntazione	sıntetica	dei dati	di tempei	ratura	minima	di BRA

	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Media	9.28	4.19	0.09	-0.85	0.37	3.85	7.51	11.82	16.01	18.08	17.69	13.63
Mediana	9.19	4.21	0.54	-0.73	0.94	3.76	7.22	12.02	16.00	18.14	17.69	13.94
Deviazione std	1.27	1.22	1.58	1.35	1.80	1.08	1.06	1.02	1.11	1.25	1.11	1.42
Coeff. di variazione	0.14	0.29	16.90	1.58	4.84	0.28	0.14	0.09	0.07	0.07	0.06	0.10

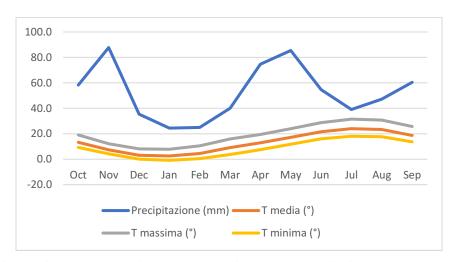


Figura 3-4: Andamento di precipitazione media, temperatura media, temperatura media dei massimi e dei minimi durante l'anno nella stazione BRA.

In Figura 3-4 è rappresentato l'andamento annuale di temperatura e di precipitazione, da cui si nota immediatamente un picco massimo di temperatura e un minimo locale di precipitazione nel mese di luglio; anche il minimo di temperatura corrisponde ad un minimo, questa volta assoluto, di precipitazione nei mesi di gennaio e febbraio. I mesi più piovosi sono invece novembre e maggio, e la precipitazione media annua è pari a poco più di 600 mm. Il valore appare relativamente basso, ma in linea con altri dati relativi a periodi precedenti⁴.

La ricerca di tendenze nella precipitazione annua non riporta risultati significativi, riportando una diminuzione con coefficiente di determinazione R² molto basso (Figura 3-5).

33

 $[\]frac{4 \text{https://web.archive.org/web/20160305202320/http://clisun.casaccia.enea.it/profili/tabelle/023\%20\%5BBra\%5D\%20}{\text{capoluogo.Txt}}$

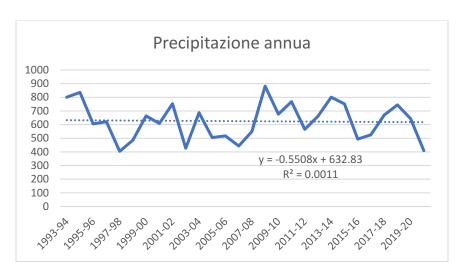


Figura 3-5: Andamento della precipitazione annua.

L'analisi delle temperature medie giornaliere invece ha riportato risultati più significativi: analizzando i dati è stato rimosso il segnale astronomico, ovvero la variazione stagionale, tramite analisi di Fourier sui dati, ottenendo i grafici di spettro di ampiezza e fase in Figura 3-6 e Figura 3-7, da cui è possibile riconoscere il segnale astronomico come quello con maggiore ampiezza. Analizzando le temperature residue dopo la rimozione del segnale astronomico dai dati stessi, si ottiene una retta di regressione con coefficiente positivo, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 8. Per quanto il coefficiente R² sia basso, la probabilità che la retta di regressione abbia pendenza nulla (*p-value*) è rigettata, indicando quindi come sia presente un aumento di temperatura statisticamente significativo.

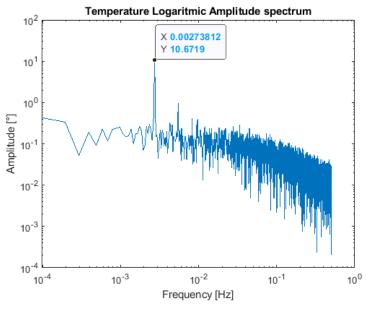


Figura 3-6: Spettro di frequenza dei valori di temperatura media della stazione di BRA.

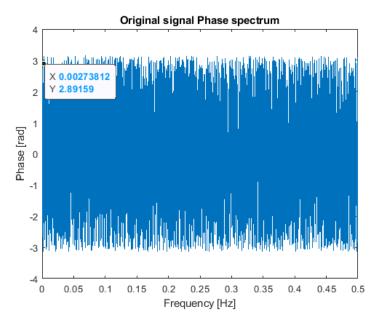


Figura 3-7: Spettro di fase dei valori di temperatura media della stazione di BRA.

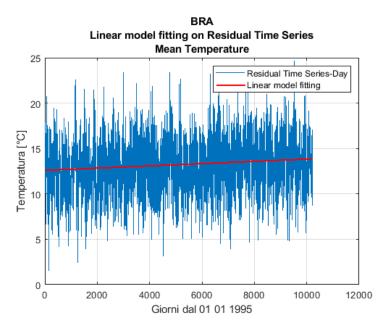


Figura 3-8: Retta di regressione sui valori di temperatura residua della stazione di BRA.

Tabella 8: Caratteristiche della retta di regressione ottenuta dai dati di temperatura media giornaliera della stazione di BRA.

Intercetta (°C)	$12.6 \pm 5.65 \cdot 10^{-2}$
Pendenza (°C/giorno)	$1.24 \cdot 10^{-4} \pm 9.57 \cdot 10^{-6}$
Tendenza annua (°C/anno)	$4.54 \cdot 10^{-2} \pm 3.50 \cdot 10^{-3}$
R ² (-)	0.0162
p value rispetto a modello costante (-)	$2.07 \cdot 10^{-38}$

Appare significativo come il dato di aumento di temperatura annua sia in linea con quanto riportato nelle analisi Arpa Piemonte per il periodo 1981-2010; lo stesso si può dire per la mancanza di variazioni significative nella precipitazione (Arpa Piemonte e Regione Piemonte, 2020 [1]).

Un ultimo dato di cui si deve tenere conto è la presenza di un numero relativamente alto di mesi con precipitazione nulla nel mese di febbraio; questo, infatti, rende più difficile adattare distribuzioni quali la distribuzione gamma (non definita per valori nulli), aumentando le incertezze nel calcolo degli indici presentati di seguito.

3.2 Dati areali

3.2.1 Fonte dei dati

I dati analizzati provengono dal dataset NWOI, mantenuto e aggiornato dal Dipartimento Sistemi Previsionali di Arpa Piemonte [S18]. La griglia di dati copre il dominio 6.5-9.5 W e 44.0-46.5 N in longitudine e latitudine, con una risoluzione di 0.125° e proiezione WGS84 latlon (confronto Figura 3-9).

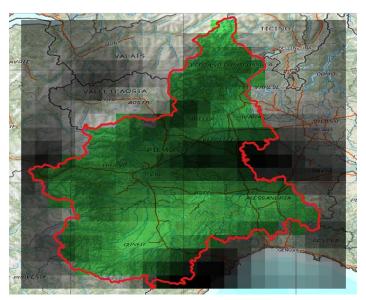


Figura 3-9: Estensione areale dei dati del dataset NWOI. Sono rappresentati in verde le celle che ricadono all'interno dei confini regionali.

L'estensione temporale dei dati va dal 1° dicembre 1957 fino al 30 settembre 2022, ma si sottolinea che i dati sono aggiornati giornalmente. La lunghezza della serie è quindi significativamente più lunga di quella relativa alla singola stazione BRA, comprendendo più di 64 anni di dati di precipitazione, temperatura massima e minima giornaliere.

La distribuzione delle stazioni da cui sono stati ottenuti i dati non è costante nel tempo, come riportato relativamente alle stazioni termometriche in Figura 3-10. Verificare la presenza di stazioni nei limiti del dominio è importante, in quanto, come si vedrà in seguito, alcuni risultati significativi sono stati ottenuti proprio in queste zone.

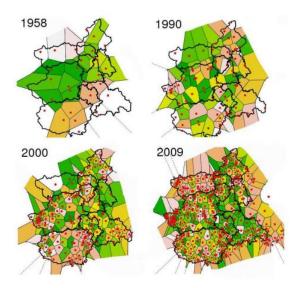


Figura 3-10: Disposizione nel tempo delle stazioni termometriche utilizzate per calcolare i valori del database NWIO. Fonte: Arpa Piemonte [S19].

3.2.2 Analisi dei dati

Diversamente dai dati puntuali, i dati areali sono forniti come database con valori già analizzati e validati. I dati usati per l'interpolazione sono stati ottenuti dalla rete di stazioni meccaniche e manuali del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale e dalla rete di telemisura di Arpa Piemonte; il metodo di interpolazione scelto è l'optimal interpolation, basato sul minimizzare la varianza dell'errore dell'analisi [S19]. Dalla serie di valori giornalieri fornita per ogni cella del dominio si sono ottenute le serie di precipitazione mensile, ovvero somma dei valori giornalieri dell'intero mese, e di temperatura media mensile massima e minima, ovvero la media rispettivamente dei massimi e dei minimi di temperatura dell'intero mese.

Si è però riscontrato un errore nell'analisi dei dati di temperatura minima e massima: in una piccola percentuale di casi (circa 10'000 dati, ovvero lo 0,09% del dataset) si è riscontrata la temperatura massima giornaliera inferiore a quella minima. Questa discrepanza è stata evitata non considerando questi valori nel calcolo delle medie mensili. I dati di temperatura sono inoltre forniti come gradi Kelvin, e per il successivo utilizzo nel calcolo dell'evapotraspirazione potenziale sono stati convertiti in gradi Celsius.

Confrontando i dati mensili di precipitazione calcolati per la stazione di Bra con lo stesso punto sulla griglia del database NWIO si nota una buona corrispondenza, con un alto valore di correlazione tra le due serie (Figura 3-11). Nonostante questo, i valori massimi di precipitazione appaiono sistematicamente maggiori nella serie ottenuta dal database: questo si può notare specialmente dal grafico di dispersione di Figura 3-12, dove la maggior parte dei punti ricadono al di sopra della retta di correlazione unitaria attesa.

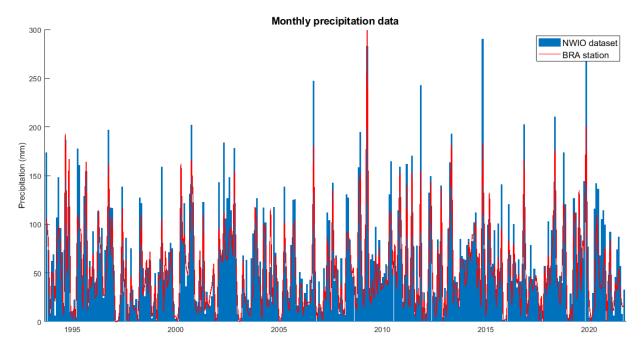


Figura 3-11: Andamento della serie di precipitazioni mensili da dati del database NWIO e della stazione BRA

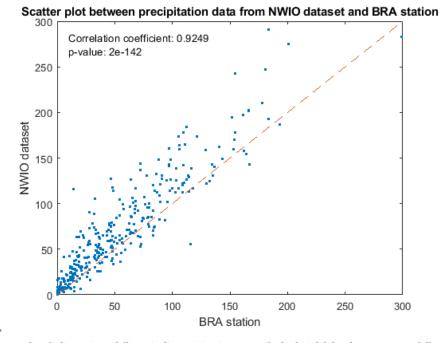


Figura 3-12: Grafico di dispersione delle serie di precipitazione mensile da dati del database NWIO e della stazione BRA

Le temperature, sia minime che massime, sono notevolmente corrispondenti tra i ottenuti dalla stazione e dal database (Figura 3-13). Si nota però come i picchi di temperatura massima siano in generale più alti nella stazione di Bra, tendenza non presente per i valori minimi (confronto con il diagramma di dispersione di Figura 3-14).

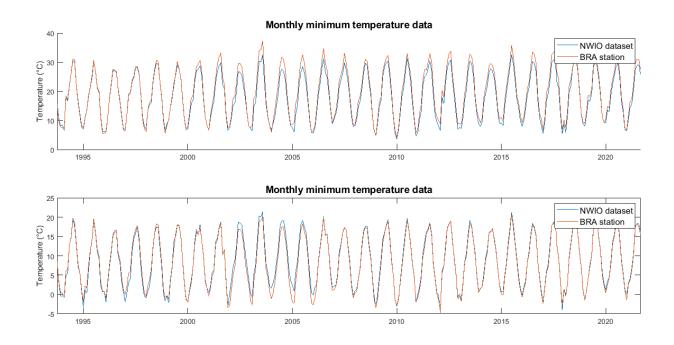


Figura 3-13: Andamento della temperatura media mensile da dati del database NWIO e dalla stazione BRA.

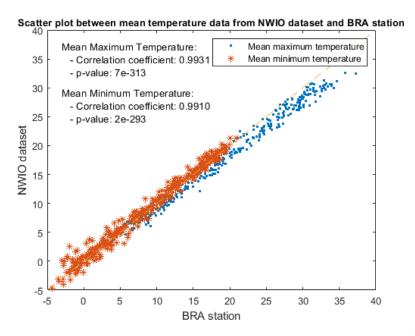


Figura 3-14: Diagramma di dispersione tra dati di temperatura media mensile del database NWIO e della stazione BRA.

Nonostante le differenze discusse nei due set di dati, si reputano quindi i valori in griglia rappresentativi per la zona analizzata anche con valori puntuali.

3.2.3 Climatologia della zona

Come per i dati puntuali, si considera utile dare una descrizione generale della climatologia della zona di interesse, in questo caso estesa a tutta la regione. Si è quindi valutata la media, per ogni mese dell'anno, dei valori di precipitazione cumulata, temperatura massima e temperatura minima. I risultati sono riportati in Figura 3-15, Figura 3-16 e Figura 3-17.

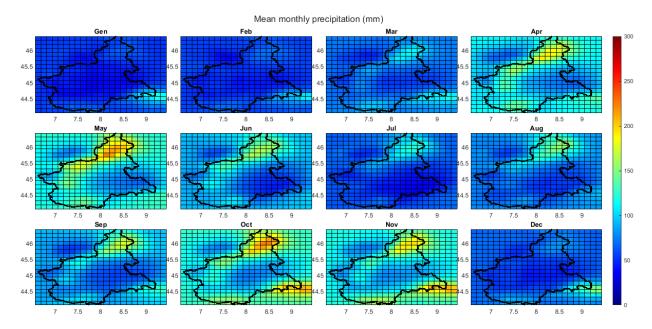


Figura 3-15: Medie della precipitazione mensile del dataset NWIO sul periodo 1957-2022.

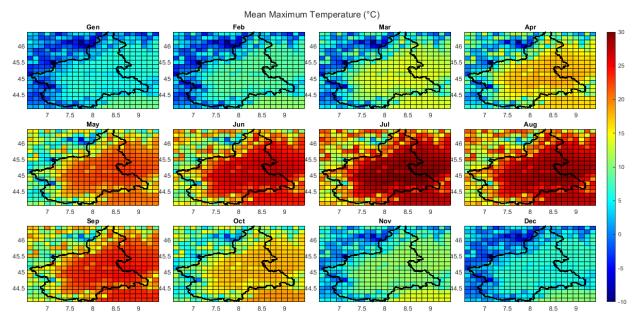


Figura 3-16:Medie della temperatura massima mensile del dataset NWIO sul periodo 1957-2022.

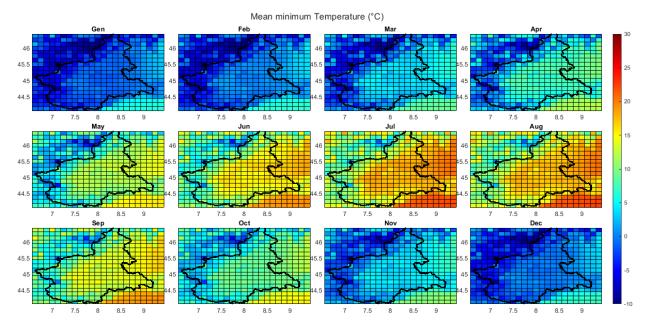


Figura 3-17: Medie della temperatura minima mensile del dataset NWIO sul periodo 1957-2022.

Coerentemente con quanto affermato nell'analisi climatologica della singola stazione di Bra, si nota come la precipitazione presenti due minimi a gennaio-febbraio e a luglio, i primi due assoluti e il secondo relativo, e corrispondenti rispettivamente ad un minimo e a un massimo di temperatura assoluti. Sono poi presenti due massimi di precipitazione, in questo caso maggio e ottobre, che interessano in modo particolare la punta nord della regione, e, nei mesi di ottobre e novembre, anche la zona più a sud-est (provincia di Alessandria). Dal punto di vista della precipitazione annua, si notano marcate differenze tra la zona nord della regione, con valori annui superiori ai 1500 mm, e la zona centro-est della regione, con valori annui tra i 700 e gli 800 mm (Figura 3-18). Il resto della regione è caratterizzato da valori di precipitazione intorno ai 1000 mm annui, con una deviazione standard di circa 260 mm. Si sottolinea come i dati ottenuti corrispondano ad altre analisi condotte sullo stesso dataset, nello specifico l'analisi del clima regionale nel periodo 1981-2010, già citata nel Paragrafo 1.3 (Arpa Piemonte e Regione Piemonte, 2020 [1]).

Per una valutazione generale delle tendenze nel territorio piemontese, si riportano anche i risultati di analisi precedentemente effettuate sul dataset da Arpa Piemonte (Ronchi et al., 2011). Non si ottengono risultati significativi rispetto a variazioni nella precipitazione, mentre si riportano aumenti di circa 0.03-0.02 °C l'anno rispettivamente per le temperature massime e minime, e un aumento della media e della deviazione standard dei massimi di temperatura invernali ed estivi (Figura 3-19).

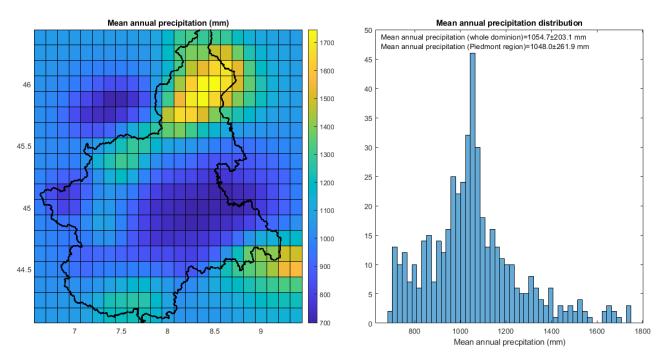


Figura 3-18: Precipitazione media annua ottenuta dal dataset NWIO sul periodo 1957-2022.

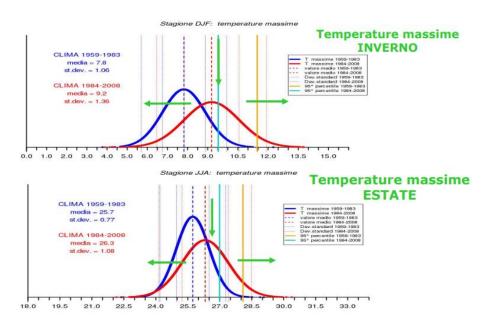


Figura 3-19: Variazione della distribuzione di massimi di temperatura invernale ed estiva nel periodo 1959-2008. Fonte: Ronchi et al., 2011.

Per quanto riguarda la distribuzione areale delle tendenze si riportano le mappe di variazione della precipitazione annuale (Figura 3-20), della temperatura media massima (Figura 3-21) e minima (Figura 3-22); quest'ultime valutate sulle serie destagionalizzate.

Partendo dalla precipitazione media annua, si nota immediatamente come poche celle siano risultate significative (con valore di significatività superiore al 95 %), dato in linea con la minore significatività riscontrata per questo tipo di dato nella quasi totalità della letteratura relativa alla regione Piemonte (confronto Paragrafo 1.3); nonostante questo, sono presenti alcune zone con una diminuzione significativa di precipitazione nel periodo studiato, e tre zone rispettivamente a nord-ovest, nord e sudest del dominio dove si segnalano aumenti di precipitazione. All'interno della regione è comunque maggioritaria la tendenza a condizioni meno piovose. Le temperature, sia massime che minime, presentano trend significativi per la quasi totalità dei punti, ma descrivono un contesto non univoco. Partendo dalle temperature massime, si ha un aumento su tutto il Piemonte, particolarmente sulla fascia alpina e nell'estremità est del territorio, dove corrispondono le variazioni annue più estreme e i coefficienti R² più elevati. La periferia nord-ovest e sud-est del dominio indicano invece una diminuzione degli estremi, anche se con R² basso. Le temperature minime hanno tendenze coincidenti a quelle discusse solo in due aree, una compresa tra la Val di Susa e il Gran Paradiso e l'altra al confine est della regione. Per quanto nella pianura sia comune alle temperature massime un generale andamento positivo nel tempo, è presente una zona in raffreddamento nel canavese; un'altra differenza sta poi a nord-ovest e sud-est del dominio, con trend nettamente opposti (riscaldamento in entrambi i casi) a quelli dei massimi. A parte alcune lievi differenze relative alle temperature, dati probabilmente dal processo di destagionalizzazione delle temperature, i dati discussi corrispondono a quanto riportano nell'analisi del clima regionale di Arpa Piemonte, condotta sullo stesso database (Arpa Piemonte e Regione Pimonte [1], 2020). I risultati appaiono inoltre in linea con le valutazioni condotte sulla singola stazione di Bra, con trend non significativo per la precipitazione e positivo per temperatura massima e minima (nonostante, per le temperature minime, la vicinanza alla zona con tendenza negativa del canavese).

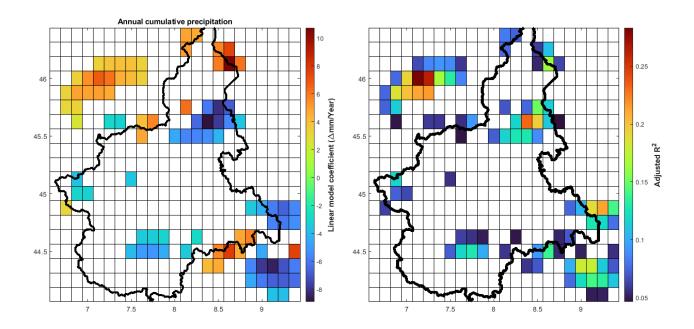


Figura 3-20: Distribuzione delle tendenze nella precipitazione media mensile. In bianco le celle con significatività minore del 95 %.

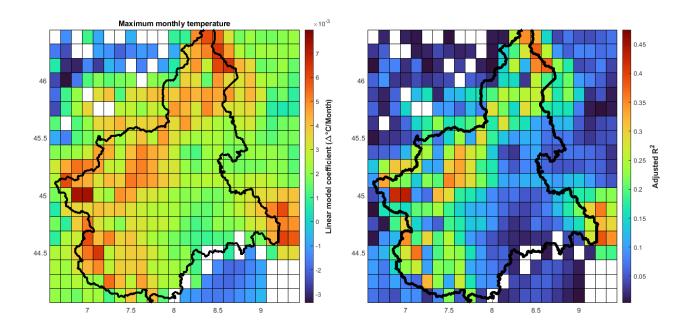


Figura 3-21: Distribuzione delle tendenze nella temperatura media massima mensile. In bianco le celle con significatività minore del 95 %.

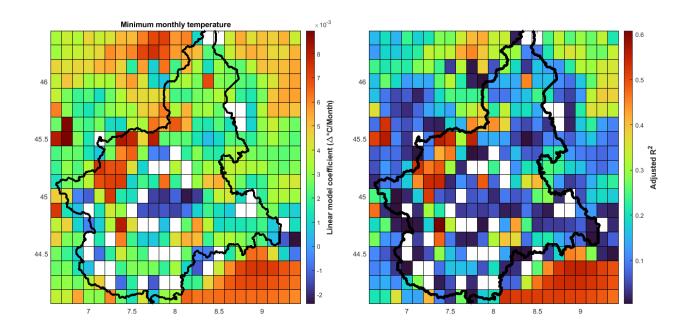


Figura 3-22: Distribuzione delle tendenze nella temperatura media minima mensile. In bianco le celle con significatività minore del 95 %.

Si è infine valutata la presenza di valori nulli nelle precipitazioni mensili. Dato il metodo di interpolazione utilizzato per la creazione del dataset, la probabilità di ottenere valori pari a zero è estremamente bassa: se ne ottengono infatti solo nove sull'intero dominio, di cui solo due relativi alla

stessa cella (Figura 3-23). Da questo punto di vista l'adattamento di distribuzioni quale la distribuzione gamma non presenta quindi particolari problemi per il dataset.

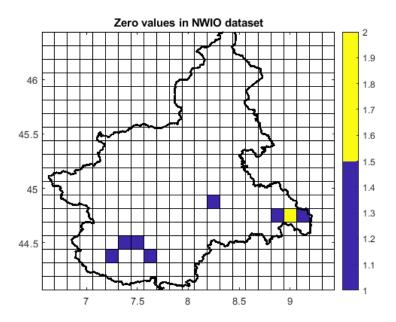


Figura 3-23: Presenza di valori di precipitazione mensile nulla nel dataset NWIO.

4 Analisi statistica, di evento e di trend degli indici di siccità

Descritti i dati, si procede quindi a presentare i risultati ottenuti dall'applicazione degli indici SPI e SPEI, sia sui soli dati puntuali o areali, sia nel confronto tra i due dataset. Prima di procedere con la descrizione dei risultati ottenuti, è necessario però specificare un aspetto importante emerso nell'analisi.

4.1 L'autocorrelazione nell'analisi di tendenze

Nel corso dei paragrafi successivi vengono anche valutate delle tendenze nelle serie di valori degli indici e ne viene valutata la significatività tramite il valore p (*p-value*), ovvero la probabilità dell'ipotesi nulla – in questo caso la presenza di un modello costante senza tendenze – di spiegare la variabilità dei dati rispetto all'ipotesi alternativa – presenza di una tendenza nei dati. Per quanto in letteratura la valutazione di trend sia spesso applicata direttamente anche agli indici con tempi di riferimento di più mesi (Koudahe et al., 2017, Güner Bacanli, 2017, Caloiero, 2018), che si ricorda derivano da analisi statistiche su serie cui è stata applicata una media mobile, si riporta come molte pubblicazioni considerino necessario tenere conto dell'autocorrelazione dei dati tramite test di Mann-Kendall modificati (Hamed e Ramachandra Rao, 1998) o procedure di *pre-whitening* (Yue et al., 2002, Khaliq et al., 2009), applicate anche nel caso specifico del calcolo dell'indice SPI (Azam et al., 2018, Achor et al., 2020). Poiché, soprattutto nell'analisi di dati areali, la valutazione delle tendenze presenta una certa rilevanza, si è ritenuto opportuno valutare alcuni di questi metodi, presentati e descritti qui di seguito.

- Test di Mann-Kendall modificato (Hamed e Ramachandra Rao, 1998)

Proposto, il test modificato di Mann-Kendall è un test non parametrico che valuta la significatività dei trend in una serie tenendo conto dei fenomeni di autocorrelazione. Nello specifico è stata usata un'implementazione in Matlab (Fatichi, 2023).

- Pre-whitening (Kulkarni e von Storch, 1995)

Il *pre-whitening* consiste nel rimuovere l'autocorrelazione con lag 1 dalla serie originale, tramite la formula:

 $X_t^{PW} = X_t - r_k X_{t-1}$

Dove:

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} [X_t - E(X_t)] [X_{t+k} - E(X_t)]}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} [X_t - E(X_t)]^2}$$

Con X_t t-esimo valore della serie, n numero dei campioni, k valore del lag del coefficiente di autocorrelazione (come detto pari a 1) e $E(X_t)$ media dei valori.

Calcolata la nuova serie, si procede a valutare i trend come sulla serie originale.

- Trend free pre-whitening (Yue et al.,2002)

Simile alla procedura appena descritta, il *trend free pre-whitening* rimuove l'autocorrelazione su dati da cui è già stato rimosso un trend tramite il calcolo della retta di regressione non parametrica con metodo Theil-Sen (*Sen's slope*), ovvero la mediana della pendenza tra tutte le coppie di dati della serie. Ottenuto questo valore si modifica la serie rimuovendo il trend come:

$$X_t' = X_t - T_t = X_t - bt$$

Con b valore della pendenza ottenuto dal metodo Theil-Sen, che modificato per ogni t dà il trend T_t . Si calcola a questo punto, come nel semplice pre-whitening, il coefficiente di autocorrelazione con lag 1 (in questo caso relativo alla serie cui è stato rimosso il trend) e si rimuove dalla serie, posto che risulti significativo (maggiore del valore di significatività, generalmente pari a 0.05), ottenendo:

$$Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1}$$

 $Y_t' = X_t' - r_1 X_{t-1}'$ Al fine di preservare la vera tendenza presente nei dati, ma mantenendo la serie non autocorrelata, si reimmette il trend T_t , ottenendo:

$$Y_t = Y_t' + T_t$$

 $Y_t = Y_t' + T_t$ A questo punto si valutano le tendenze presenti nella serie ottenuta e la loro significatività.

Esistono altri metodi, oltre a quelli presentati, di applicazione di procedure di pre-whitening, riportate sinteticamente in Tabella 9.

Tabella 9: Sintesi di vari metodi di pre-whitening. Adattato da Collaud Coen et al., 2020.

Metodo	Funzionamento	Vantaggi/svantaggi		
		– Errore di tipo I molto alto		
MK	– Applicato ai dati senza modifiche	 Potere statistico alto 		
	rippieuto ai dati ocizza inocaniere	 Pendenza aumentata da autocorrelazione 		
		– Errore di tipo I basso		
PW (Kulkarni and von Storch, 1995)	- Rimuove l'autocorrelazione	 Potere statistico basso 		
		– Pendenza assoluta più bassa		
	– Rimuove la pendenza	– Errore di tipo I molto alto		
TFPW-Y (Yue et al., 2002)	- Rimuove l'autocorrelazione	 Potere statistico alto 		
	– Aggiunge il trend	– Pendenza assoluta più alta		
TFPW-WS (Wang and Swail, 2001)	 Applica TFPW iterativamente finché il valore di autocorrelazione e la pendenza non sono costanti 1. Rimuove l'autocorrelazione 2. Calcola la pendenza 3. Rimuove il trend dai dati originali Rimuove il valore finale di autocorrelazione 	Errore di tipo I bassoPotere statistico altoPendenza simile a MK		
VCTFPW (Wang et al., 2015a)	 Rimuove il trend Rimuove l'autocorrelazione Corregge la varianza simile alla varianza iniziale Aggiunge il trend con la pendenza corretta 	Errore di tipo I medioPotere statistico medioValutazione di pendenza senza bias		

La scelta dei due metodi di *pre-whitening* descritti dipende dalle caratteristiche opposte che dimostrano, soprattutto rispetto agli errori di tipo 1 (ipotesi nulla rifiutata erroneamente); questo risulta particolarmente importante, come descritto nel Paragrafo 4.3.2, nel confronto tra molte serie dello stesso indice, per valutare in modo più o meno stringente le tendenze nei dati, mantenendo lo stesso livello di significatività.

4.2 Dati puntuali

4.2.1 SPI

I dati presentati nel Paragrafo 3.1 sono stati analizzati con il metodo descritto nel Paragrafo 2.1.2 al fine di calcolare l'indice SPI. I grafici risultanti sono presentati in Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5. Le figure riportano in rosso i valori appartenenti ad una *drought run* secondo la metodologia descritta nel Paragrafo 2.1.3.

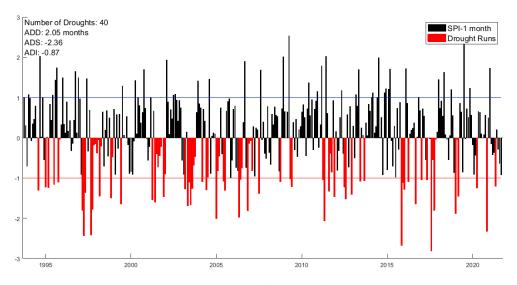


Figura 4-1: SPI-1 della stazione di BRA.

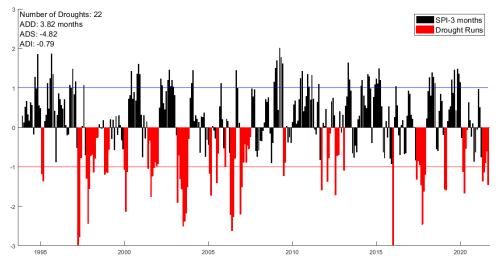


Figura 4-2: SPI-3 della stazione di BRA.

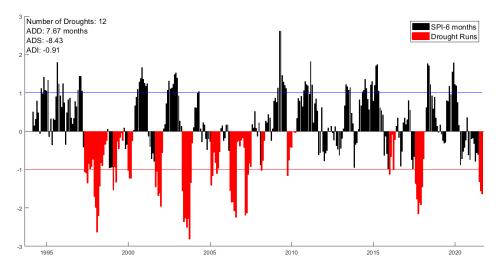


Figura 4-3: SPI-6 della stazione di BRA.

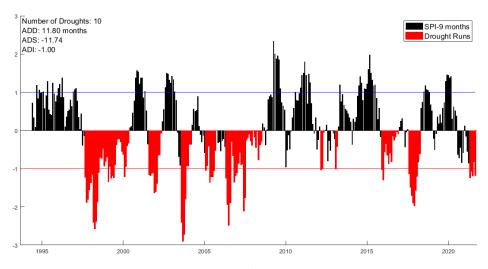


Figura 4-4: SPI-9 della stazione di BRA.

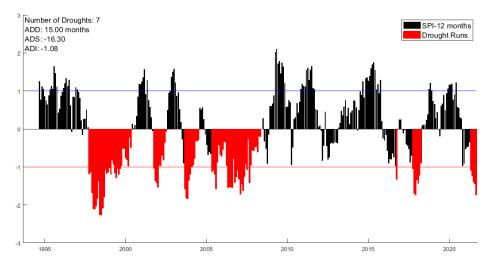


Figura 4-5: SPI-12 della stazione di BRA.

Si sottolinea innanzitutto come, per le valutazioni riportate in seguito, i dati relativi a SPI-1 siano stati tralasciati; infatti, le caratteristiche della serie descritte nel Paragrafo 3.1.3 e la presenza di molti valori nulli nel mese di febbraio nei dati analizzati rendono poco rappresentativa la serie.

Una prima analisi viene fatta a partire dalle grandezze generali ottenute dalla *drought run analysis*: si può notare come la scelta di diverse scale temporali definisca diversi eventi siccitosi, andando via via a ottenere meno eventi, più lunghi e severi (si veda Figura 4-6). Le diverse scale temporali riescono poi a rappresentare diverse caratteristiche anche dello stesso evento. Per esempio, l'evento iniziato nell'ottobre del 1997 e terminato nel maggio del 2000, appare attraverso il grafico di SPI-12 come un evento caratterizzato da un andamento generalmente decrescente; gli indici relativi ai 9, 6 e 3 mesi indicano invece la presenza di 3 picchi relativi a febbraio del 1998,1999 e 2000 – anche se nel caso del 1998 SPI-9 indica aprile come mese di picco. Da questo esempio si può quindi comprendere l'utilità delle diverse scale nell'analizzare singoli eventi, dando una descrizione più dettagliata delle variazioni a breve termine insieme agli andamenti generali.

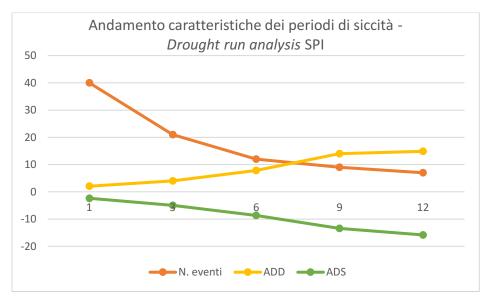


Figura 4-6: Andamento del numero di eventi (N. eventi), durata media degli eventi (ADD) e severità media (ADS) degli eventi in base alle scale temporali dello SPI.

Si è poi analizzato l'andamento delle caratteristiche di durata e severità (e non di intensità, essendo definita del rapporto delle prime due grandezze) degli eventi ottenuti tramite *run analysis*; i grafici risultanti sono riportati in Figura 4-7. Si nota per tutti i periodi di accumulazione un'apparente tendenza verso eventi meno duraturi e più intensi; nessun andamento è però risultato significativo.

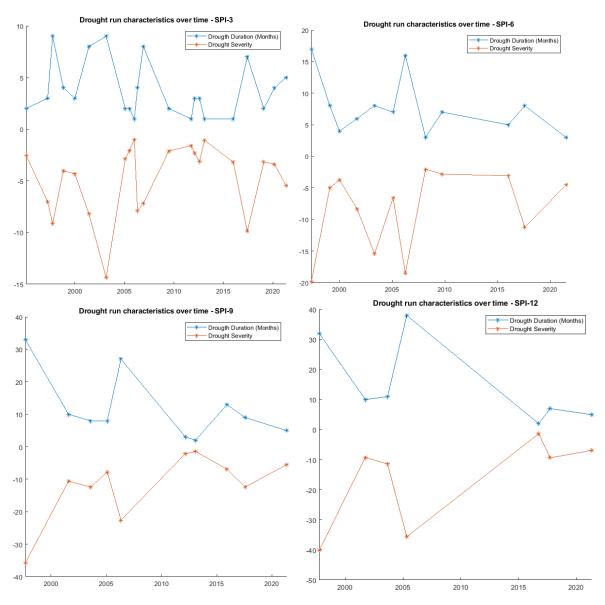


Figura 4-7: Andamento nel tempo della durata e dell'intensità degli eventi ottenuti tramite drought analysis dell'indice SPI-12 per la stazione BRA.

Per quanto riguarda l'intero periodo studiato, si nota la presenza di due fasi caratterizzate da condizioni di siccità differenti: il primo da metà del 1997 fino a metà del 2008, dove è presente una maggior prevalenza di periodi con deficit di precipitazione e dove sono concentrati gli eventi ottenuti dall'analisi; il secondo da metà del 2008 fino alla fine del 2017, che invece sembra essere stato un periodo decisamente umido, che, per quanto riguarda SPI-12, non ha nessun valore al di sotto della soglia -1. Questo si riflette anche nella precipitazione annua per i due periodi, con una media di circa 550 mm per il periodo 1997-2008 e di 670 mm per il periodo 1998-2017 (valori calcolati sull'anno idrologico). Per quanto riguarda l'inizio e la fine della serie, benché sembri possibile che rappresentino due code di periodi rispettivamente umidi e secchi, la mancanza di dati non permette di trarre conclusioni più dettagliate – anche se la forte siccità sviluppatasi da dicembre 2021 ha sicuramente proseguito l'andamento di deficit crescente mostrato nei grafici. Dal punto di vista della ricerca di

tendenze nelle serie, non è stato ottenuto nessun risultato significativo: tutte le analisi tramite modello lineare hanno infatti ottenuto probabilità molto basse rispetto ad un modello costante, ma si sottolinea come i coefficienti delle serie studiate siano molto simili e tutti positivi (che, data la natura dell'indice SPI, indicherebbe una tendenza verso condizioni più umide). In Tabella 10 sono riportati i valori ottenuti da questa analisi; è stato tenuto conto degli effetti di autocorrelazione discussi al Paragrafo 4.1, ma viene riportato il solo valore del test MK modificato in quanto tutte le analisi (compresi il PW e il TFPW) hanno indicato tendenze non significative.

Tabella 10: Risultato dell'analisi tramite modello lineare sulle serie dell'indice SPI, con diverse scale temporali, nella stazione di BRA.

	Coefficiente $(\Delta SPI/mese)$	Intercetta	p-value (serie non modificata)	p-value (MK modificato)	R ² rettificato
SPI-3	2.93·10 ⁻⁴	-5.20·10 ⁻²	0.626	0.964	-2.36·10 ⁻³
SPI-6	4.44.10-4	-7.82·10 ⁻²	0.457	0.785	-1.38·10 ⁻³
SPI-9	5.79·10 ⁻⁴	-9.73·10 ⁻²	0.393	0.427	-1.53·10 ⁻⁴
SPI-12	6.60·10 ⁻⁴	-1.07·10 ⁻¹	0.265	0.326	7.56·10 ⁻⁴

Vengono di seguito presentati i maggiori eventi ottenuti dall'analisi, scelti sulla base dello SPI-12, e le loro caratteristiche:

- **Evento 1**: ottobre 1997 maggio 2000
 - Secondo evento più lungo della serie ed evento con severità maggiore nonostante un'intensità generalmente bassa. Come detto in precedenza, sembra essere dato dal sommarsi di tre eventi avvenuti intorno all'inizio del 1998, 1999 e 2000.
- **Evento 2**: ottobre 2001 luglio 2002
 - Evento tra i più brevi della serie, caratterizzato da media severità e intensità. Osservando le varie scale temporali l'evento sembra essere causato da una mancanza di precipitazione nell'estate 2001, aggravata poi verso la fine dell'anno con picco a dicembre o gennaio.
- **Evento 3**: settembre 2003 luglio 2004
 - Di durata, severità e intensità simile al precedente, presenta il mese più secco per quanto riguarda SPI-12, 9 (novembre 2003) e SPI-6 (ottobre 2003). La causa scatenante, ben rappresentata da SPI-3, sembra essere il luglio del 2003, il luglio meno piovoso della serie; la scarsa precipitazione nei mesi successivi ha determinato condizioni secche fino a novembre.
- **Evento 4**: maggio 2006 maggio 2008
 - Evento più lungo della serie, molto severo e mediamente intenso, sembra avere una dinamica simile all'evento 1997-2000, ovvero somma nel tempo di diversi periodi secchi distinti, con conseguenze durature per le riserve idriche con tempi di accumulo più lunghi (mostrate nell'andamento di SPI-12). Prima dell'inizio della *drought run* secondo SPI-12, sono presenti dei picchi negativi tra febbraio e maggio 2005 (rispettivamente per SPI-3, -6 e -9), che sembrano essere i mesi che hanno inizialmente definito condizioni secche. Nel corso dell'evento, sono poi presenti tre principali picchi ben visibili dallo SPI-6 e -9 avvenuti ad agosto 2006 e marzo 2007 e 2008 che indicano tre periodi di deficit, via via meno gravi, che si sono sommati in un lungo periodo secco. SPI-3 indica un forte deficit a giugno 2006, che dai dati di precipitazione appare essere un giugno relativamente secco a seguito del maggio con meno precipitazione nei dati.

Evento 5: ottobre 2017 – aprile 2018
 Evento breve, mediamente severo e poco intenso. In seguito a un agosto e a un settembre eccezionalmente secchi (ben visibili grazie allo SPI-3), le condizioni di deficit di precipitazione si sono prolungate fino a un picco a dicembre, scemando via via fino alla fine dell'evento.

L'analisi degli eventi presentata dimostra le potenzialità dello SPI nel valutare serie di precipitazioni. Si sottolinea come, oltre ad una valutazione su serie già date, anche una valutazione mese per mese può essere estremamente utile nel valutare quanto sono gravi le condizioni di deficit in cui ci si trova, e se siano presenti avvisaglie di condizioni più gravi cui far fronte con debite strategie. Come già detto, la fine della serie rappresenta condizioni siccitose che probabilmente davano già un'indicazione della forte siccità che si sarebbe sviluppata nell'inverno 2021.

In questo lavoro non si sono ricercati riscontri tra i periodi di siccità ottenuti dall'analisi e fenomeni siccitosi effettivamente avvenuti: pertanto, per quanto si può affermare che le variazioni nella siccità meteorologica siano delle informazioni contenute nei dati, non si può quantificare quanto queste variazioni abbiano avuto corrispondenze in deficit idrici di altro tipo.

Infine, si presentano i risultati della *run analysis* alternativa presentata al Paragrafo 2.1.3 – ovvero l'inclusione dell'*onset* rappresentato dai valori inferiori a zero precedenti al valore sottosoglia che definisce un evento. In Figura 4-8 si presenta il risultato dell'applicazione del metodo alternativo alla serie di SPI-12. In generale, l'inclusione della "coda" precedente al superamento della soglia ha definito per ogni periodo di accumulo un aumento della durata e della severità degli eventi; la durata è aumentata però più che la severità, determinando un'intensità minore rispetto al metodo "classico" (confronto Figura 4-9).

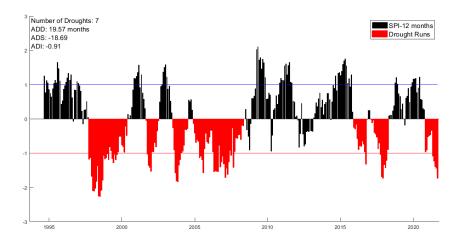


Figura 4-8: SPI-12 della stazione di BRA; gli eventi valutati tramite run analysis comprendono l'onset.

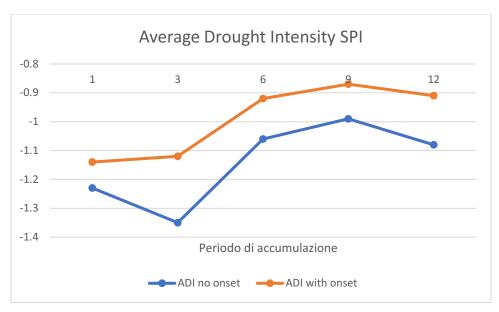


Figura 4-9: Andamento dell'intensità media degli eventi valutati tramite run analysis dell'indice SPI con e senza onset.

4.2.2 SPEI

I dati presentati nel Paragrafo 3.1 sono stati analizzati con il metodo descritto nel Paragrafo 2.2.2 al fine di calcolare l'indice SPEI. I grafici risultanti sono presentati in Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 e Figura 4-14. Come per i grafici dell'indice SPI presentato nel precedente capitolo, le figure riportano in rosso i valori appartenenti a una *drought run* secondo la metodologia descritta nel Paragrafo 2.1.3.

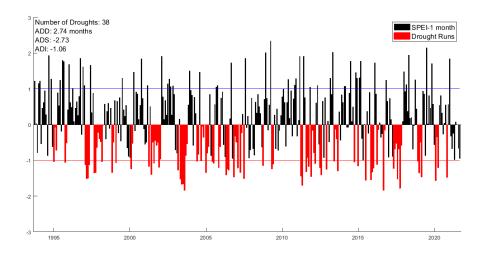


Figura 4-10: SPEI-1 della stazione di BRA.

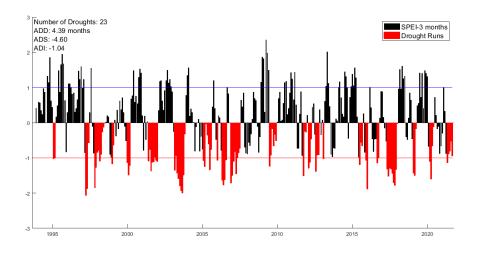


Figura 4-11: SPEI-3 della stazione di BRA.

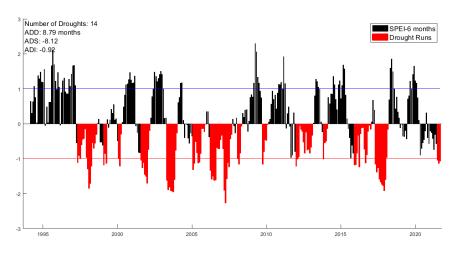


Figura 4-12: SPEI-6 della stazione di BRA.

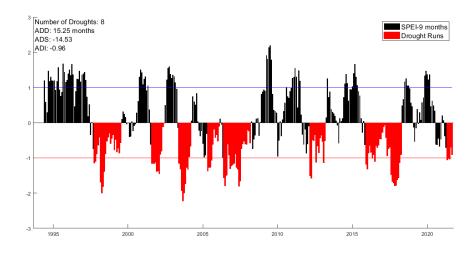


Figura 4-13: SPEI-9 della stazione di BRA.

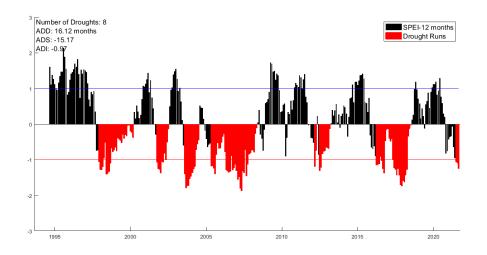


Figura 4-14: SPEI-12 della stazione di BRA.

Analizzando le grandezze generali ottenute dalla *drought run analysis*, si nota, come per l'indice SPI, l'influenza del periodo di accumulo sul definire, per la serie analizzata, periodi di siccità via via meno numerosi, ma più lunghi e severi (Figura 4-15).

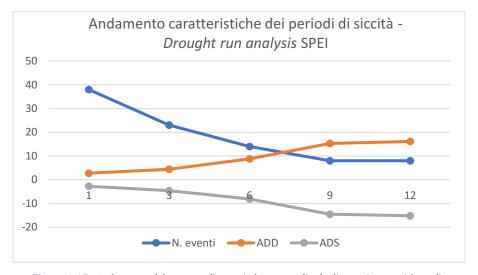


Figura 4-15: Andamento del numero di eventi, durata media degli eventi e severità media degli eventi in base alle scale temporali dello SPEI.

Per le scale temporali di 9 e 12 mesi si nota come i risultati dell'analisi condotta sui valori medi delle drought run riportino essenzialmente gli stessi risultati; un'analisi dei due grafici di Figura 4-13 e Figura 4-14 mostra invece come le serie di SPEI-9 e SPEI-12 mostrino una marcata differenza per quanto riguarda un evento siccitoso tra maggio 2005 e maggio 2008. Osservando l'indice SPEI-12, infatti, questo sembra un unico evento caratterizzato da due picchi, il primo ad agosto 2005, il secondo a maggio 2007 (picco minimo assoluto di tutta la serie); l'indice SPEI-9, oltre a dividere l'evento in due diverse drought run, riporta tre picchi distinti a maggio 2005, luglio 2006 e giugno 2007 – di nuovo, si

può quindi affermare che nonostante le grandezze medie ottenute dall'analisi siano molto simili, i due indici hanno individuato condizioni diverse legate ai tempi di accumulazione.

Un ulteriore esempio dell'utilità delle diverse scale temporali può essere dato dall'analisi dello stesso evento tramite gli altri due indicatori SPEI-3 e SPEI-6 (come per lo SPI, date le caratteristiche della serie descritte nel Paragrafo 3.1.3, si è preferito tralasciare lo SPEI-1). È interessante notare come i due indici testimoniassero condizioni di siccità già da febbraio del 2005, tre mesi in anticipo rispetto a SPEI-9 e SPEI-12; in questo senso un monitoraggio dello SPEI avrebbe potuto, tramite le scale di 3 e 6 mesi, indicare la possibilità di condizioni critiche nei mesi successivi, confermate poi tramite le scale di 9 e 12 mesi. Appare invece più difficile, in questo caso, prevedere la fine dell'evento tramite SPEI-3 e SPEI-6: se è vero che da dicembre 2006 SPEI-3 presenta un ritorno abbastanza marcato da condizioni siccitose a condizioni nella norma, SPEI-6 nello stesso mese mostra un valore non particolarmente gravoso, per poi ritornare a valori più negativi e, dal picco di aprile 2007 in poi, tornare a condizioni nella norma. Nonostante i comportamenti diversi dei due indici, certamente nei mesi successivi a maggio 2007, picco di siccità secondo SPEI-12, si sarebbe potuto affermare alla luce dei valori di SPEI-3 e SPEI-6 che l'evento stava probabilmente per concludersi. In Figura 4-16 è riportato un confronto tra i diversi indici per il periodo discusso.

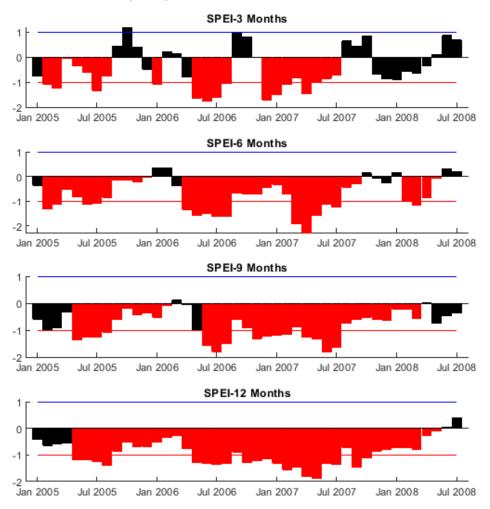


Figura 4-16: Confronto tra le diverse scale temporali dell'indice SPEI per l'evento maggio 2005 – maggio 2008.

Come per lo SPI, si è valutato l'andamento delle caratteristiche degli eventi nel tempo; questo è riportato nei grafici di Figura 4-17. Si nota nuovamente una tendenza verso eventi più brevi e intensi, anche se nessun andamento è risultato statisticamente significativo.

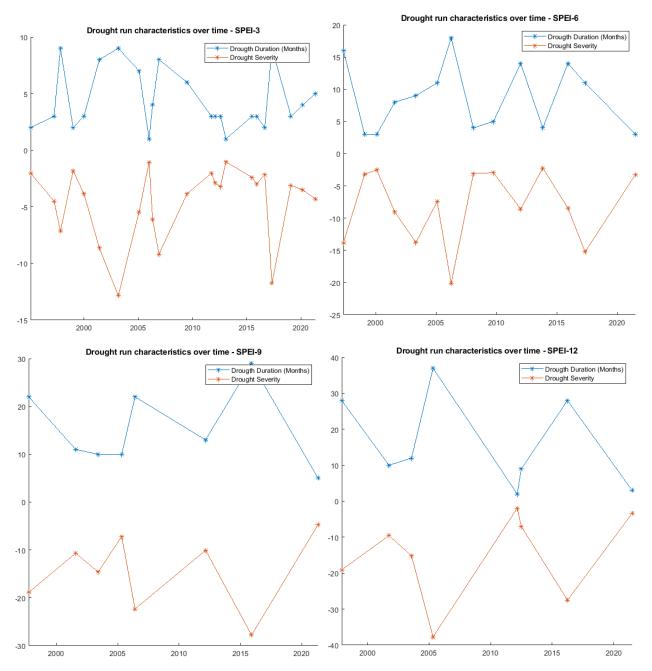


Figura 4-17: Andamento nel tempo della durata e dell'intensità degli eventi ottenuti tramite drought analysis dell'indice SPEI per la stazione BRA.

Considerando poi tutta la serie di dati analizzati, si nota un periodo caratterizzato da *drough run* particolarmente intense, in cui sono presenti i picchi minimi per tutte le scale temporali, che va dalla fine del 1997 a metà del 2008. Il periodo successivo, fino alla fine dei dati studiati, presenta invece un alternarsi di condizioni umide e secche, ma dove comunque quasi tutti i valori inferiori a zero sono

stati valutati nella run analysis come appartenenti ad una stessa drought run. Comune a tutte le scale temporali è inoltre la presenza di un periodo decisamente umido dall'inizio della serie (fine del 1993), fino all'inizio del periodo secco precedentemente menzionato (fine del 1997). Sulla serie di dati è stata anche portata avanti un'analisi di tendenze, adattando un modello lineare a SPEI-3, -6, -9 e -12 (SPEI-1, sempre considerato poco rappresentativo, non è stato analizzato), i cui risultati sono riportati in Tabella 11. Come riportato nel Paragrafo 4.1, si è anche tenuto conto dell'autocorrelazione dei dati attraverso il test Mann-Kendall modificato, la procedura di PW e di TFPW. Per quanto riguarda la serie non modificata, appare innanzitutto come la significatività delle regressioni lineari, valutata tramite il p-value del modello lineare rispetto ad un modello costante, aumenti insieme al periodo di accumulazione, portando a valori statisticamente significativi per SPEI-6, -9 e -12. Questi riportano un simile valore negativo del coefficiente della regressione, indicando che, per la stazione considerata, le condizioni a lungo termine di siccità metereologica sono in peggioramento. La serie analizzata tramite TFPW riporta pendenze simili a quelle valutate sulla serie originale, ma riporta tutte le tendenze come significative, con p-value fortemente decrescenti con il periodo di accumulazione. Le serie analizzate tramite PW mostrano invece pendenze minori di quelle ottenute dalle altre due serie, e nessuna ottiene valori di p-value significativi. Il test MK modificato riporta come significativo la sola tendenza di SPEI-12. Appare quindi come, per i valori di SPEI ottenuti dalla stazione BRA, considerare gli effetti dell'autocorrelazione riporti risultati particolarmente eterogenei, che mettono in dubbio l'effettiva presenza di tendenze al peggioramento della siccità metereologica nella stazione in esame. Dato il basso potere statistico delle serie analizzate tramite PW, però, si può cautelativamente affermare che, visti i risultati ottenuti dall'analisi della serie non modificata, modificata tramite TFPW e valutata con test MK modificato, la tendenza al peggioramento delle condizioni secondo SPEI-12 può essere considerato degno di nota; i risultati sono in ogni modo utili per il confronto con le tendenze dell'indice SPI, come discusso nel Paragrafo 4.2.3.

Tabella 11: Risultato dell'analisi tramite modello lineare sulle serie dell'indice SPEI (dati non modificati e analisi tramite PW, TFPW e test MK modificato), con diverse scale temporali, nella stazione di BRA.

	Serie n	on mod	ificata		TFPW			PW		MK Modif.
	ΔSPEI/ mese	Inter.	p-value	ΔSPEI/ mese	Inter.	p-value	ΔSPEI/ mese	Inter.	p-value	p-value
SPEI-3	-8.36·10 ⁻⁴	0.141	0.132	-6.75·10-4	0.047	0.0212	-2.62·10-4	0.041	0.509	0.119
SPEI-6	-1.18·10 ⁻³	0.196	0.0358	-9.17·10-4	0.034	1.15·10-5	-1.77·10-4	0.025	0.535	0.054
SPEI-9	-1.13·10 ⁻³	0.220	0.0187	-1.36·10 ⁻³	0.047	8.06.10-8	-1.11·10-4	0.012	0.655	0.077
SPEI-12	-1.51·10 ⁻³	0.249	0.0089	-1.46·10-3	0.026	1.71.10-11	-8.20·10 ⁻⁵	0.005	0.695	0.043

Vengono di seguito presentati i maggiori eventi ottenuti dall'analisi, scelti sulla base dello SPEI-12, e le loro caratteristiche:

- **Evento 1**: dicembre 1997 – marzo 2000

Secondo evento più lungo nella serie, caratterizzato da severità media con picco nel mese di giugno 1998. Date queste due caratteristiche di lunghezza e severità risulta essere l'evento meno intenso tra quelli analizzati. L'analisi degli indici SPI-3, -6 e -9 indica la presenza di tre picchi distinti ma non coincidenti tra i 3 indici, riportati in Tabella 12. Si nota come le divere scale temporali riportino un ritardo tra i picchi di 1-3 mesi tra SPEI-3 e -6, e di 2-5 mesi tra SPEI-6 e -9. In generale si può affermare che l'evento sia stato determinato inizialmente da condizioni secche nella primavera del 1997, e che le condizioni si sono acuite dopo un lieve miglioramento estivo verso la fine del 1997, determinando condizioni molto gravose fino alla metà del 1998; da qui l'evento è lentamente andato scemando, prolungato però fino alla primavera del 2000

da un ultimo periodo secco all'inizio del 1999. Un'analisi di temperature e precipitazioni nel periodo descritto riporta condizioni nella norma per le temperature, e invece un deficit abbastanza marcato per le precipitazioni, con due anni idrologici di seguito (1997-1998 e 1998-1999) con precipitazione totale molto sotto la media. In questo caso sembra quindi che la precipitazione sia stata il driver principale.

	Tabella 12: Picchi relativi all	'evento dicembre 1997 -	marzo 2000 per diverse	scale temporali dell'indice SPEI
--	---------------------------------	-------------------------	------------------------	----------------------------------

	1º picco	2° picco	3° picco
SPEI-3	Aprile	Novembre	Gennaio
ST E1-3	1997	1997	1999
SPEI-6	Maggio	Febbraio	Febbraio
SFE1-0	1997	1998	1999
SDEI 0	Ottobre	Aprile	Giugno
SPEI-9	1997	1998	1999

- **Evento 2**: ottobre 2001 – luglio 2002

Evento relativamente breve con severità bassa rispetto alle altre *drought run*. L'evento sembra essere determinato da un'estate particolarmente secca ma non eccezionalmente calda: il valore di precipitazione a giugno 2001 è il più basso per la serie di precipitazioni mensili, mentre la temperatura non riporta un valore particolarmente alto. Questa condizione, testimoniata da SPEI-3 e SPEI-6, si è poi andata aggravando a causa di un autunno secco che ha portato al picco di siccità nel mese di gennaio-febbraio 2002 testimoniato dai SPEI-9 e SPEI-12, prima del ritorno a condizioni nella norma nell'estate seguente.

- **Evento 3**: agosto 2003 – luglio 2004

Evento più intenso della serie, data la breve durata e la severità relativamente alta. Coerentemente con l'alta intensità, tutte le scale temporali testimoniano come picco dell'evento il mese di settembre del 2003. SPEI-3 e SPEI-6 riportano l'inizio condizioni secche già a partire da marzo e maggio 2003, rispettivamente. Da un'analisi delle temperature e delle precipitazioni emerge un sommarsi di tre condizioni diverse: una prima fase, tra febbraio e maggio 2003, caratterizzata da precipitazioni molto basse e temperature nella media; una seconda, da giugno fino ad agosto, caratterizzata invece sia da precipitazioni basse che da temperature molto alte (tutti e tre i mesi presentano il valore medio massimo più alto di tutta la serie); infine, un'ultima fase di temperature nella media e precipitazioni basse terminata a novembre 2003. La fine delle condizioni gravose è testimoniata a novembre 2003 - gennaio 2004 da SPEI-3 e -6 rispettivamente, mentre sia SPEI-9 che -12 riportano il ritorno a condizioni normali per le riserve idriche con tempi di accumulo più lunghi nella prima metà del 2004. Si può quindi affermare come questo evento sia stato caratterizzato nella sua alta intensità da condizioni composte date da precipitazioni e temperatura.

- **Evento 4**: maggio 2005 - maggio 2008

Evento di gran lunga più lungo della serie, con severità totale molto alta e seconda intensità più alta rispetto alle altre *drought run*. Come già analizzato in precedenza, gli indici SPEI-3, -6, -9 riportano il succedersi di 3 picchi, spesso distinti in eventi diversi (confronto Figura 4-16). La dinamica dell'evento, coerentemente il lungo periodo interessato, appare complessa: una prima fase, corrispondente ad un primo picco per gli indici SPEI-3 e SPEI-6, sembra determinato da un inverno (gennaio-marzo 2005) con basse precipitazioni, ma temperature

addirittura al di sotto della media stagionale; la seconda fase critica, corrispondente ad un secondo picco per SPEI-3 e -6, è presente nell'estate 2006, con precipitazioni fortemente sotto la media e temperature lievemente al di sopra; una terza fase, più lunga, è invece presente tra dicembre 2006 e aprile 2007, con temperature anche molto al di sopra della media e precipitazioni basse — subito dopo questo lungo periodo siccitoso si ritrova inoltre la condizione più secca secondo SPEI-12. Nell'anno successivo SPEI-3 e SPEI-6 ritornano rapidamente verso condizioni normali, con la presenza di periodi umidi ed un ultimo periodo secco nel marzo 2008, non particolarmente gravoso. SPEI-9 e SPEI-12 invece, riportano un lento recupero dal picco a maggio-giugno 2007, indicando come il susseguirsi dei periodi secchi descritti avesse avuto un forte impatto sulle risorse idriche con tempi di accumulo più lunghi.

- **Evento 5**: aprile 2016 – luglio 2018

Secondo evento più lungo della serie, con severità e intensità medie. Appare dagli indici SPEI-3, -6 e -9 come il sommarsi di due eventi distinti con picchi a dicembre 2015 – gennaio 2016 (bassa precipitazione e temperatura sopra la media) e a novembre-dicembre 2017 (precipitazioni significativamente basse tra agosto e dicembre 2017). SPEI-12 risponde con un ritardo di circa 3 mesi al primo evento siccitoso, ma con il prolungarsi dell'evento, dopo una fase relativamente più umida all'inizio del 2017, riporta un picco coincidente al secondo periodo descritto nel dicembre 2017.

Dagli eventi descritti si può notare le possibilità che fornisce l'indice SPEI nel considerare situazioni complesse, sia riguardanti deficit di precipitazione che valori elevati di evapotraspirazione. Data la sintesi delle due grandezze tramite BIC, è poi possibile valutare le condizioni particolari che determinano le varie fasi dei fenomeni siccitosi analizzando i dati di precipitazione e temperatura. Inoltre, è emersa una netta tendenza per l'indice calcolato con bassi tempi di ritorno (tre e sei mesi) di precedere il determinarsi di condizioni siccitose presenti nelle serie con tempi di ritorno più lunghi (9 e 12 mesi), che riescono invece a rappresentare il sommarsi di deficit in siccità metereologiche prolungate; lo stesso per il ritorno a condizioni nella norma, con SPEI-3 e -6 in condizioni nella norma qualche mese prima di SPEI-9 -12, che ancora risentono degli effetti dei mesi precedenti.

Come nel caso dello SPI non si è però potuto verificare gli eventi identificati con effettivi periodi di siccità; per quanto, quindi, sia stata descritta la dimensione della siccità quale bilancio tra la disponibilità e la richiesta d'acqua metereologiche, non è necessariamente determinata una relazione con deficit nelle risorse idriche del territorio analizzato.

In ultimo, è stato applicato alle serie di SPEI il metodo alternativo di valutazione di eventi comprendente l'*onset* (valori inferiori a 0 precedenti al superamento della soglia definita per la *run analysis*); si presenta il risultato di questo metodo applicato alla serie dell'indice SPEI-12 in Figura 4-18. L'effetto sulle caratteristiche degli eventi è un aumento della durata e della severità, con risultato generale una diminuzione dell'intensità per tutti i periodi di accumulazione (Figura 4-19). Nel caso di SPEI-12 questa diminuzione è particolarmente marcata, dato che il metodo alternativo ha incluso, per alcuni eventi, molti valori precedenti al superamento della soglia.

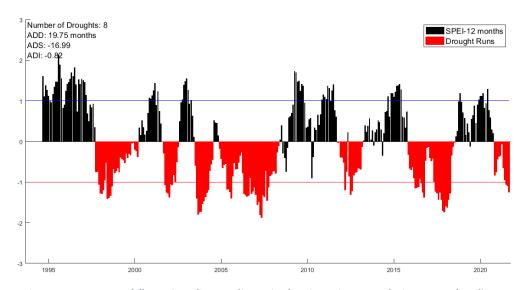


Figura 4-18: SPEI-12 della stazione di BRA; gli eventi valutati tramite run analysis comprendono l'onset.

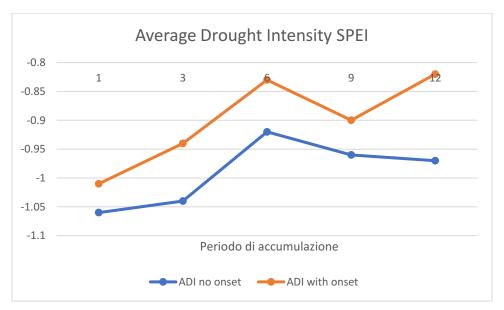


Figura 4-19: Andamento dell'intensità media degli eventi valutati tramite run analysis dell'indice SPEI con e senza onset.

4.2.3 Confronto tra SPI e SPEI

Come affermato nel Paragrafo 1.3, l'analisi di condizioni di siccità tramite indici può produrre più risultati tramite il confronto tra indici diversi, particolarmente nel caso di SPI e SPEI, date le modalità di calcolo sovrapponibili e le diverse dimensioni fisiche considerate (sola precipitazione e precipitazione e temperatura, rispettivamente).

Un primo confronto può essere fatto sulla ricerca di tendenze nelle serie dei due indici, i cui risultati sono riportati in Tabella 10 e Tabella 11. Appare particolarmente significativo come nel caso dello SPI, nessun modello lineare sia risultato preferibile ad un modello stazionario e che tutti i coefficienti trovati siano maggiori di zero (tendenza nel tempo a condizioni umide); per lo SPEI, al contrario, tutte le

regressioni lineari sono risultati decrescenti (tendenza a condizioni secche), e per SPEI-12 si sia trovato parziale accordo sulla significatività considerando l'effetto dell'autocorrelazione. Si può quindi affermare come, per la stazione di BRA, sembri essere presente un peggioramento delle condizioni di siccità metereologica nel tempo, e che questo, in quanto presente in modo significativo solo per l'indice SPEI, sia dovuto principalmente alla pressione data dalla temperatura. Dato coerente sia con le analisi fatte sui valori di temperatura, che determinavano un aumento significativo nel tempo (Paragrafo 3.1.3), sia con gli studi presentati nel Paragrafo 1.3.

Una conferma della tendenza a condizioni più secche secondo lo SPEI rispetto allo SPI si può ottenere valutando la differenza dei due indici per diverse scale temporali (Figura 4-20). Si notano due periodi distinti, rispettivamente all'inizio e alla fine della serie: il primo dal 1993 fino ai primi anni 2000, in cui l'indice SPEI sembra essere sempre maggiore dell'indice SPI, il secondo dal 2010 in poi dove invece l'indice SPEI sembra essere sempre minore dell'indice SPI. Utilizzando lo SPI come base, si può affermare che lo SPEI, considerando oltre alla precipitazione anche la temperatura, sembra aver integrato l'effetto di un trend di temperatura che ha progressivamente reso più secche le condizioni. Data la natura statistica degli indici, infatti, la presenza di una tendenza negativa nei dati non solo va a peggiorare le condizioni col proseguire del tempo, ma anche ad abbassare la media totale, rendendo meno gravose le condizioni all'inizio della serie. Questo comportamento emerge anche confrontando l'indice SPI-12 calcolato su una serie di dati casuali, e sulla stessa serie cui è aggiunto un trend negativo (confronto Figura 4-21). Quest'analisi conferma quindi l'importanza di considerare entrambi gli indici, soprattutto rispetto al ruolo di precipitazione e temperatura nel determinare condizioni di siccità nel tempo.

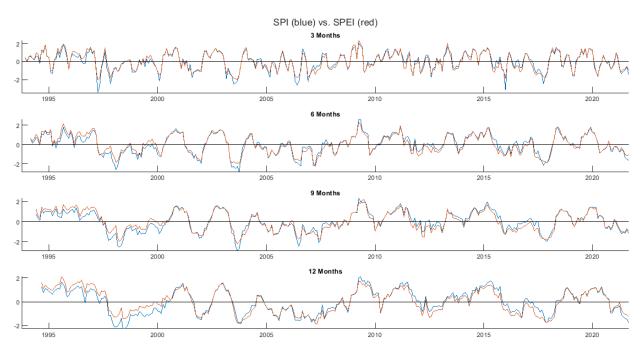


Figura 4-20: Confronto tra l'indice SPI e SPEI per diverse scale temporali nella stazione di BRA.

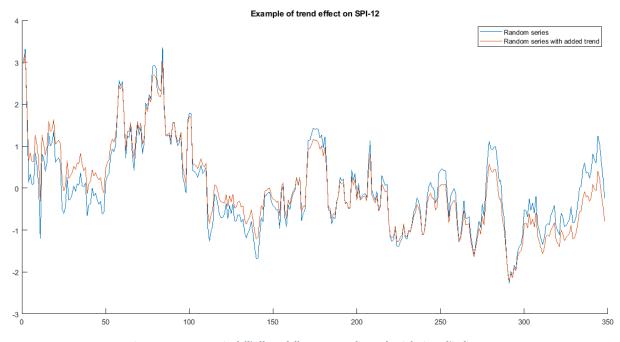


Figura 4-21: Esempio dell'effetto della presenza di trend nei dati per l'indice SPI-12.

Si è inoltre valutata la correlazione delle serie di SPI e SPEI per diversi periodi di accumulazione tramite i grafici di dispersione riportati in Figura 4-22, Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25 e Figura 4-26. Benché il valore di correlazione non vari significativamente col variare del periodo di accumulazione, con una correlazione sempre molto alta, è significativo il cambiamento nella forma che assumono i dati nel grafico. In generale lo SPI, quantomeno nel contesto di quest'analisi, è capace di raggiungere valori più estremi, sia positivi che negativi, come testimoniato dalle code circa orizzontali nei grafici SPI-1 vs. SPEI-1, SPI-3 vs. SPEI-3 e SPI-6 vs. SPEI-6. Solo nel caso con periodo di accumulazione di tre mesi l'indice SPEI presenta un valore positivo superiore a quello ottenuto con SPI. I grafici relativi a nove e dodici mesi presentano invece una distribuzione più lineare, per quanto i punti siano meno vicini alla retta con inclinazione 1:1 che negli altri grafici. Anche in questi due casi l'indice SPI riporta valori estremi più bassi e più alti rispetto allo SPEI. Sembra quindi che il BIC, considerato a partire da valori di temperatura e precipitazione, presenti variazioni meno drastiche rispetto al solo valore di precipitazione, in modo più significativo per i periodi di accumulazione più brevi, per i quali si mantiene comunque una buona aderenza nei valori vicini allo zero. Questo sembra coerente con le variazioni meno significative che il valore di temperatura presenta (confrontando le medie mensili riferite allo stesso mese dell'anno) rispetto alla precipitazione (si vedano Tabella 4, Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7). Su scale temporali più lunghe, invece, gli indici SPI e SPEI riportano da un lato valori estremi più simili e dall'altro una maggiore dispersione; la causa sembra in questo caso essere data dalla componente temporale, nello specifico dalla presenza di chiari trend di temperatura rispetto ai trend non significativi nella precipitazione. Analizzando la Figura 4-26, in cui lo scorrere del tempo è rappresentato da una scala dei colori, si nota come una retta con inclinazione 1:1 sembri abbassarsi nel tempo, passando da sopra la retta unitaria tratteggiata (condizioni più critiche secondo SPI rispetto a SPEI) a sotto (condizioni più critiche per SPEI rispetto a SPI). Bisogna sottolineare però come, verso la fine della serie, questa tendenza viene interrotta da picchi negativi dell'indice SPI, legati alla quasi totale assenza di precipitazioni nell'inverno 2021-2022. La stessa analisi riporta risultati simili per periodo di accumulazione di nove mesi, mentre per i periodi più brevi non si notano tendenze

altrettanto significative. Da un lato, quindi, per le scale temporali più lunghe emerge una tendenza verso condizioni più secche per l'indice SPEI rispetto all'indice SPI, insieme a valori estremi positivi e negativi più simili. Dall'altro, deficit particolarmente marcati di precipitazione riportano invece condizioni molto più gravose per lo SPI, anche se, almeno per il periodo studiato, non invalidano la tendenza generale. Valutando la differenza tra SPEI-12 e SPI-12 (confronto Figura 4-27) si ottiene infatti una regressione negativa significativa: questo indica che nel tempo, sia che gli indici siano positivi che negativi, i valori di SPEI riportano condizioni più secche.

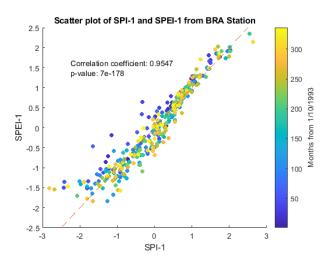


Figura 4-22: Scatter plot tra i valori di SPI-1 e SPEI-1 della stazione BRA.

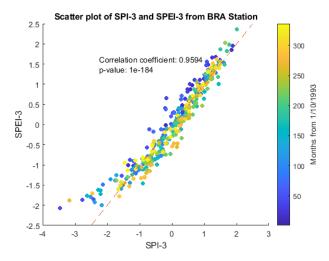


Figura 4-23: Scatter plot tra i valori di SPI-3 e SPEI-3 della stazione BRA.

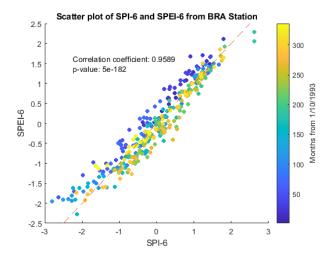


Figura 4-24: Scatter plot tra i valori di SPI-6 e SPEI-6 della stazione BRA.

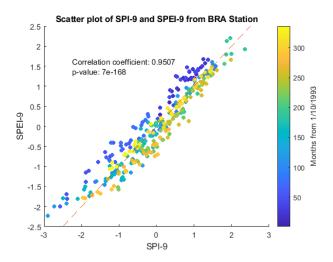


Figura 4-25: Scatter plot tra i valori di SPI-9 e SPEI-9 della stazione BRA.

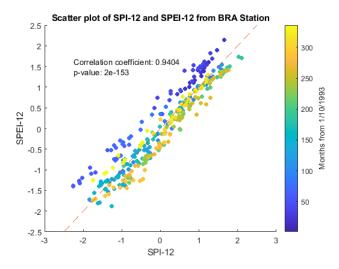


Figura 4-26: Scatter plot tra i valori di SPI-12 e SPEI-12 della stazione BRA.

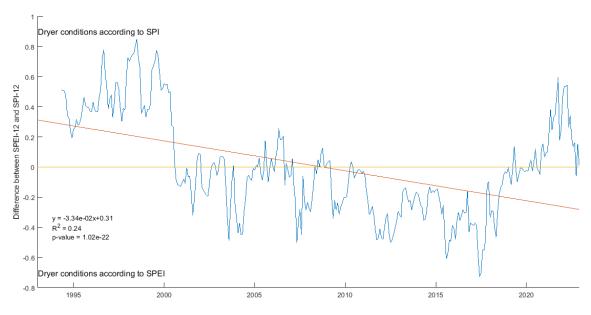


Figura 4-27: Andamento nel tempo della differenza tra SPEI-12 e SPI-12 nella stazione BRA.

Passando all'analisi degli eventi tramite indice SPEI, dal punto di vista qualitativo questa è risultata più difficoltosa, in quanto è stato necessario tenere conto sia dei valori di precipitazione che di temperatura per distinguere le condizioni che possono aver determinato valori negativi nell'indice stesso. Un dato interessante, confermato dal confronto tra SPI e SPEI di Figura 4-20, è che nessun periodo siccitoso nella serie è stato definito solamente da temperature fuori dalla norma (e non anche da precipitazioni scarse); appare quindi come, nonostante l'effetto di una tendenza positiva nei valori di temperatura, che secondo l'indice SPEI porta ad un progressivo peggioramento della siccità metereologica nel territorio studiato, i singoli deficit di disponibilità d'acqua siano generalmente determinati da precipitazioni sotto la media. Data però la mancanza di trend significativi nella precipitazione (Paragrafo 3.1.3), è chiaro come il principale driver del peggioramento nelle condizioni di siccità sia un aumento delle temperature medie.

Se è quindi presente una differenza nella valutazione di tendenze nelle condizioni climatiche sul lungo termine tra SPI e SPEI, l'analisi dei singoli eventi tramite *run analysis* dei due indici ha prodotto risultati molto simili: in tutti i casi tranne uno gli eventi studiati sono risultati quasi perfettamente sovrapponibili. Appare interessante come l'unica differenza importante sia risultata per l'ultimo evento riscontrato nella serie, valutato dallo SPEI come molto più lungo e gravoso che dallo SPI. I due periodi distinti che definiscono la siccità aprile 2016 – luglio 2018 secondo lo SPEI-12, sono infatti molto più secchi che per lo SPI-12, che ha un solo mese con indice inferiore a -1 nel periodo aprile 2016 – gennaio 2017, e che presenta persino condizioni umide all'inizio del 2017. Le caratteristiche generali degli eventi sembrano anche coincidere: per tutti i periodi di accumulo SPI e SPEI mostrano una correlazione positiva significativa tra la durata e la severità dell'evento, con coefficienti della linea di tendenza molto simili (Tabella 13).

Tabella 13: Caratteristiche delle linee di tendenza tra durata (x) e severità (y) dell'evento per diversi tempi di accumulo di SPI e SPEI.

Periodo	SPI		SPEI		
di	Formula	\mathbf{R}^2	Formula	\mathbf{R}^2	
accumulo	romuia	rettificato	Formula	rettificato	
1	-0.886x - 0.548	0.769	-0.855x - 0.392	0.769	
3	-1.126x - 0.517	0.765	-1.117x - 0.306	0.817	
6	-1.236x + 1.047	0.751	-0.916x - 0.070	0.686	
9	-0.965x - 0.348	0.889	-0.926x - 0.404	0.887	
12	-1.0482x - 0.578	0.94	-0.919x - 0.354	0.914	

Ad ogni modo, un tratto comune ai due indici emerso dall'analisi è la capacità di prevedere, tramite l'indice calcolato con periodo di accumulazione di 3 e 6 mesi, possibili situazioni secche per gli indici con periodi di riferimento più lunghi di 9 e 12 mesi; lo stesso poi per il ritorno a condizioni nella norma. Allo stesso modo, entrambi gli indici rendono possibile distinguere singoli periodi critici su tempi più brevi che determinano eventi siccitosi più lunghi, relativi a risorse idriche con tempi di ritorno più lunghi.

4.3 Dati areali

L'analisi dei dati di una singola stazione presentata nei paragrafi precedenti si è focalizzata sull'applicazione della *run analysis*, permettendo quindi di distinguere singoli eventi e di descriverne le caratteristiche, anche in relazione alle diverse dimensioni del fenomeno siccitoso rappresentabili tramite gli indici SPI e SPEI. L'analisi dei dati areali del database NWIO, presentato nel Paragrafo 3.2, richiede dei metodi diversi da quelli precedentemente discussi. Questo sia dato la mole dei dati (più di cinquant'anni su una griglia 20×24) che renderebbe difficoltoso valutare ogni singola serie nella sua specificità, sia la natura dei dati stessi, che possono fornire informazioni aggiuntive sulla distribuzione areale di condizioni di deficit meteorologico di disponibilità d'acqua. Lo studio dei dati in griglia viene quindi usato per contestualizzare i risultati precedenti, più specifici ma anche, in quanto ottenuti da dati effettivamente misurati, più rappresentativi, dando indicazioni sulla siccità nel più ampio contesto regionale. Per fare ciò sono state studiate le tendenze presenti nelle serie degli indici calcolati ed è stata applicata un'analisi degli eventi di siccità (spiegata nel Paragrafo 2.1.3). Sempre in virtù del carattere più generale di questo studio, è stato valutato il solo indice con periodo di accumulo di dodici mesi, in quanto legato alle variazioni a lungo termine nelle condizioni di siccità.

4.3.1 Confronto dei dati

Prima di analizzare i risultati ottenuti dall'analisi del database NWIO, si considera utile confrontare quest'ultimi con i dati puntuali precedentemente descritti, e con i valori di SPI e SPEI ottenuti da due database online. Questo al fine di valutare la rappresentatività reciproca dei dati ed eventualmente validare le valutazioni fatte. Per quanto gli indici siano infatti calcolati con le stesse modalità, la cui applicazione usata in questo studio è già stata validata tramite il confronto con altri metodi di calcolo (Paragrafi 2.1.2 e 2.2.2), rimane molto importante la differenza determinata dal diverso periodo di dati usato per valutare i parametri delle distribuzioni alla base del calcolo stesso. Al fine di presentare conclusioni generalizzabili al contesto piemontese e non solo ristrette all'analisi del singolo database, si cerca di stimare la variazione causata da questa differenza.

Un primo confronto viene fatto rispetto ai valori di SPI-12 e SPEI-12 ottenuti dall'analisi dei dati della stazione BRA e i corrispondenti valori nel database. Come riportato in Figura 4-28 e Figura 4-29, si nota in generale una buona corrispondenza tra le due serie per entrambi gli indici, nonostante in entrambi i casi l'analisi della stazione sembri testimoniare condizioni meno gravose: i punti, disposti su un diagramma di dispersione, sono infatti quasi sempre disposti sotto la retta 1:1, in quanto i valori di SPI e SPEI ottenuti dal database NWIO sono generalmente più bassi (confronto Figura 4-30 e Figura 4-31). I valori puntuali tendono inoltre a sovrastimare maggiormente i valori positivi; questo può essere in parte spiegato dalla presenza all'inizio del periodo della maggior parte dei picchi positivi della serie ottenuta dal database NWIO, sia per lo SPI che per lo SPEI. Lo stesso non vale per i picchi negativi, al contrario maggiormente presenti verso la fine della serie. In questo senso, nonostante simili valori di pioggia e temperatura per le due serie (confronto Paragrafo 3.2.2), la "finestra" più limitata dei dati della stazione, non comprendendo le condizioni più umide e comprendendo quelle più secche, risulta sovrastimare le prime rispetto alle seconde. Appare significativo, inoltre, come la ricerca di tendenze nei dati abbia riportato risultati simili per lo SPEI (Figura 4-29 e Tabella 11), ma non per lo SPI, per cui si evidenzia una tendenza solo nel database NWIO (tranne per la serie valutata tramite PW). Data la presenza di un trend positivo di temperatura in entrambe le serie, sembra quindi che anche nel periodo limitato presente nei dati della stazione esso mostri i suoi effetti sullo SPEI; le precipitazioni, e di conseguenza lo SPI, invece, risentono della mancanza dei dati non mostrando la stessa tendenza. In ogni caso, tenendo conto di queste differenze e considerando l'alto valore di correlazione tra le serie, si considerano i risultati ottenuti dai dati areali generalmente rappresentativi per quelli puntuali.

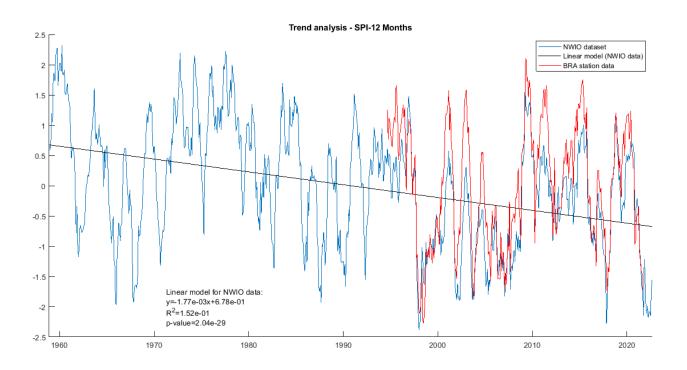


Figura 4-28: Confronto tra i valori di SPI-12 ottenuti dall'analisi della stazione BRA e del database NWIO.

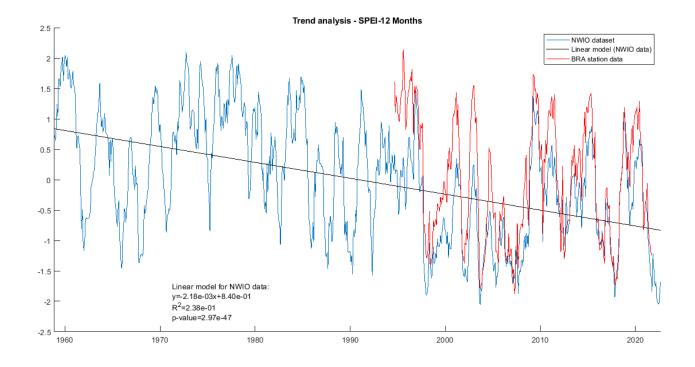


Figura 4-29: Confronto tra i valori di SPEI-12 ottenuti dall'analisi della stazione BRA e del database NWIO.

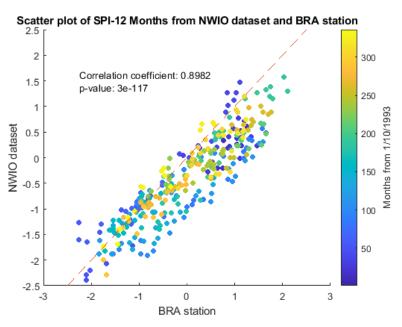


Figura 4-30: Diagramma di dispersione tra i valori di SPI-12 ottenuti dal database NWIO e dalla stazione BRA.

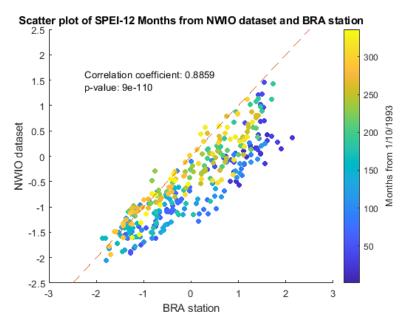


Figura 4-31: Diagramma di dispersione tra i valori di SPEI-12 ottenuti dal database NWIO e dalla stazione BRA.

Sono stati inoltre valutati i risultati di una *run analysis* sui dati del database NWIO riferiti alla zona di BRA, riportati sinteticamente in Figura 4-32 e Figura 4-33. Dalle immagini si nota come la *run analysis* riporti eventi simili per i due set di dati; per quanto siano presenti differenze significative nella durata e severità media degli eventi stessi, dove il database NWIO ne ottiene di più lunghi e severi, ma con un valore di intensità media quasi uguale. Sembra quindi che, nonostante la diversa fonte dei dati e il diverso periodo di riferimento discussi precedentemente, la *run analysis* testimoni forti similitudini nella valutazione delle condizioni attraverso gli indici SPI e SPEI.

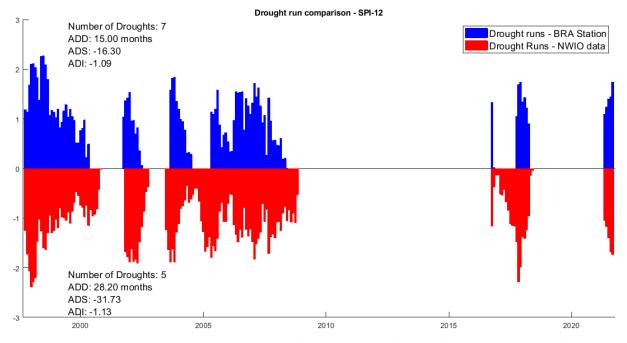


Figura 4-32: Confronto tra i risultati della run anaysis sull'indice SPI-12 ottenuto dai dati della stazione BRA e del database NWIO.

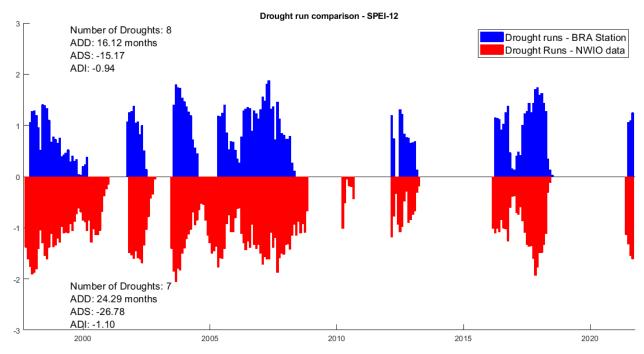


Figura 4-33: Confronto tra i risultati della run analysis sull'indice SPEI-12 ottenuto dai dati della stazione BRA e del database NWIO.

Al fine di considerare l'effetto del periodo di riferimento (ovvero la "finestra" di dati cui viene adattata la distribuzione di probabilità usata per il calcolo degli indici), si sono calcolati gli indici SPI-12 e SPEI-12 utilizzando i soli dati del database NWIO riferiti al periodo ottobre 1993 – settembre 2021, lo stesso dei dati disponibili per la stazione BRA. Rispetto agli indici calcolati su tutto il periodo gennaio 1958 – settembre 2022, non si notano differenze significative: sia per lo SPI che lo SPEI mostrano una simile correlazione e la tendenza per l'indice con periodo di riferimento più breve a presentare condizioni meno gravose e a sovrastimare i valori positivi, già emersa nei confronti tra dati del database e della stazione (Figura 4-34 e Figura 4-35).

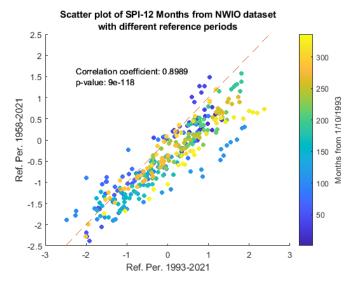


Figura 4-34: Scatter plot tra gli indici SPI-12 ottenuti dal database NWIO con diversi periodi di riferimento.

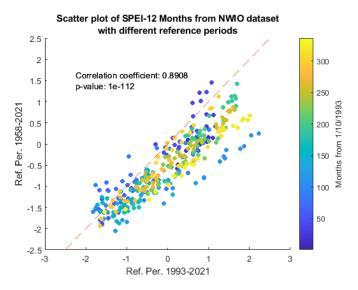


Figura 4-35: Scatter plot tra gli indici SPEI-12 ottenuti dal database NWIO con diversi periodi di riferimento.

Se questo sembra confermare gli effetti del periodo di riferimento ipotizzati in precedenza, il confronto tra gli indici ottenuti con lo stesso periodo di riferimento dai dati NWIO e della stazione BRA non sembra facilmente spiegabile. Da un lato lo SPI-12 sembra concordare maggiormente, con la presenza di *outliers* solo verso la fine della serie (confronto diagramma di dispersione di Figura 4-36); anche l'analisi tramite *run analysis* riporta risultati decisamente concordanti, sia in quanto a coincidenza degli eventi che a caratteristiche di durata e severità (Figura 4-37). Dall'altro, lo SPEI-12 riporta un valore di correlazione minore di quello ottenuto tra gli indici con periodo di riferimento diverso (confronto Figura 4-38 e Figura 4-35), e la *run analysis* riporta risultati non soddisfacenti, in quanto lo SPEI-12 ottenuto dai dati NWIO non riporta interamente un evento, e ne riporta uno solo in parte (Figura 4-39). Osservando la componente temporale, rappresentata in scala di colori, nel diagramma di dispersione di Figura 4-38, sembra essere presente una tendenza a condizioni più gravose secondo lo SPEI-12 ottenuto dai dati della stazione rispetto a quello ottenuto dai dati NWIO con stesso periodo di riferimento. Ad ogni modo, si ritiene il confronto tra gli indici ottenuti con diversi periodi di riferimento dal database NWIO come rappresentativo per il contesto analizzato e per le evidenze emerse dal confronto tra dati areali e puntuali.

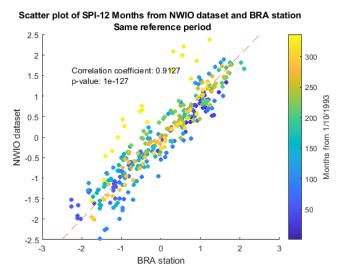


Figura 4-36: Scatter plot tra gli indici SPI-12 ottenuti dal database NWIO e dalla stazione BRA con lo stesso periodo di riferimento.

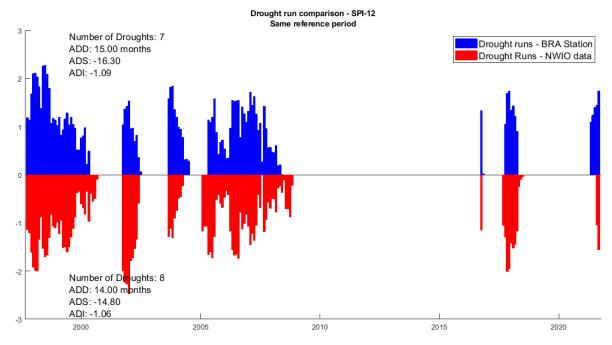


Figura 4-37: Confronto tra i risultati della run analysis sull'indice SPI-12 ottenuto dai dati della stazione BRA e del database NWIO con lo stesso periodo di riferimento.

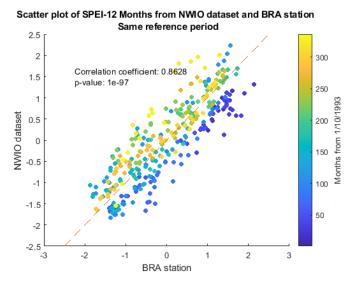


Figura 4-38: Scatter plot tra gli indici SPEI-12 ottenuti dal database NWIO e dalla stazione BRA con lo stesso periodo di riferimento.

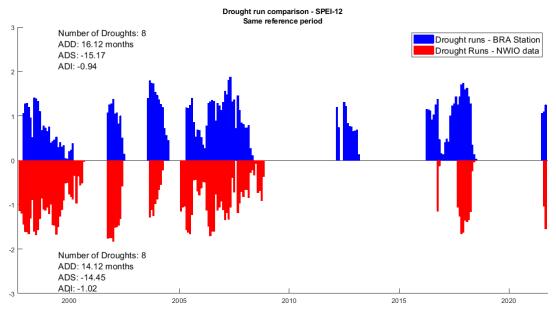


Figura 4-39: Confronto tra i risultati della run analysis sull'indice SPEI-12 ottenuto dai dati della stazione BRA e del database NWIO con lo stesso periodo di riferimento.

I valori di SPI-12 ottenuti sono poi confrontati con quelli scaricati dal database del *Global Drought Observatory* [S20]. Questi sono calcolati sulla base di dati di precipitazione mensile con griglia di un decimo di grado forniti dal *Global Precipitation Climatology Centre*; coprono un periodo che va dall'inizio del 1981 ad oggi. Nonostante i differenti dati di partenza e la diversa durata della serie, si nota una buona corrispondenza tra le due serie (Figura 4-40), con una distribuzione relativamente omogenea delle discrepanze sia nei valori negativi che in quelli positivi (Figura 4-41). Appare però come il GDO calcoli lo SPI-12 con una media non sugli undici valori *precedenti* a quello studiato, ma su quelli successivi, generando un *lag* tra la serie fornita e quella calcolata (che calcola la media mobile sui valori precedenti); un esempio schematico di questa differenza, che è stata rimossa nei confronti proposti con un opportuno spostamento dei dati, è riportata in Figura 4-42.

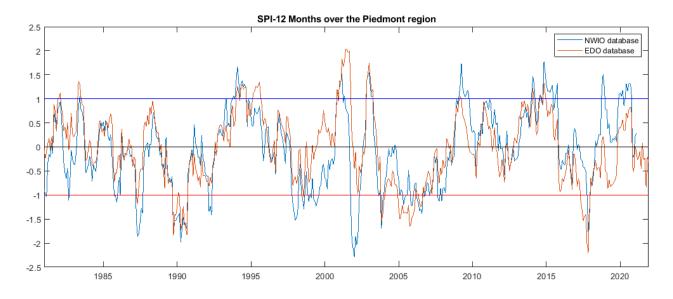


Figura 4-40: Confronto tra i dati di SPI-12 ottenuti dal database NWIO e quelli forniti dal GDO.

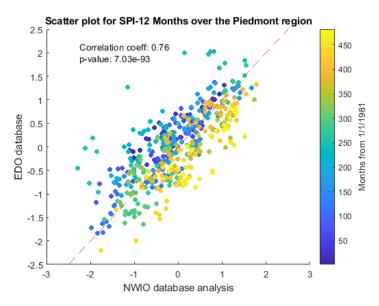


Figura 4-41: Grafico di dispersione dei valori di SPI-12 ottenuti dal database NWIO e forniti dal GDO.

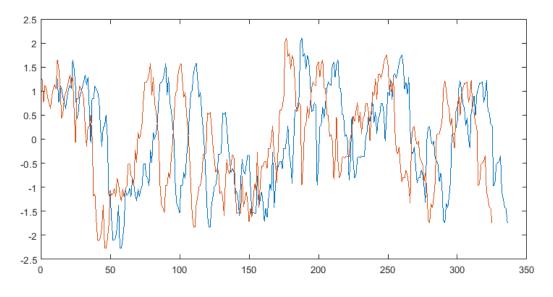


Figura 4-42: Esempio di lag dovuto a medie su finestre mobili sui valori precedenti o successivi.

I valori di SPEI-12 sono stati invece confrontati con i valori forniti dallo SPEI Global Drought Monitor, calcolati sulla base dei dati di temperatura del database GHCN_CMAS del National Oceanic and Athmospheric Administration e dei dati di precipitazione del GPCC con griglia di un grado e periodo di calibrazione che va dal 1950 al 2010. Anche in questo caso la corrispondenza tra le due serie è buona, benché peggiore verso la fine della serie (Figura 4-43). Sono marcate, poi, le corrispondenze nei valori più elevati, mentre sembra essere presente una differenza nei valori più bassi, sovrastimati per l'indice calcolato, che corrispondono per lo più con la parte finale del periodo analizzato (Figura 4-44).

Curiosamente, il coefficiente di correlazione calcolato è uguale a quello valutato per i valori di SPI-12 precedentemente analizzati, nonostante la minore dispersione dei risultati.

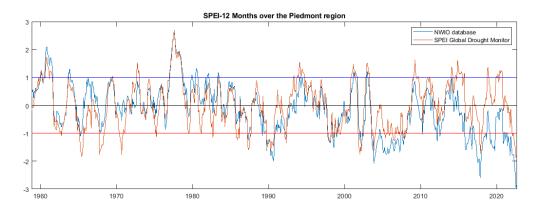
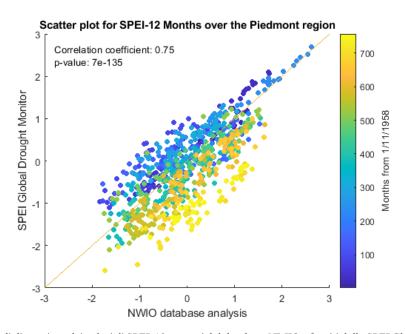


Figura 4-43: Confronto tra i dati di SPEI-12 ottenuti dal database NWIO e quelli forniti dallo SPEI Global Drought Monitor.



 $Figura\ 4-44:\ Grafico\ di\ dispersione\ dei\ valori\ di\ SPEI-12\ ottenuti\ dal\ database\ NWIO\ e\ forniti\ dallo\ SPEI\ Global\ Drought\ Monitor.$

Dal confronto con i due database proposti, si considerano in generale validati i dati ottenuti dall'analisi dei dati areali. Rispetto ai dati forniti è stato però possibile, in virtù della griglia molto più fitta dei dati NWIO, studiare le caratteristiche sub-regionali dei fenomeni analizzati, aggiungendo informazione utile in grado di inserirsi nel contesto globale già delineato dai database disponibili.

4.3.2 Analisi delle tendenze

L'analisi dei dati areali tramite indici SPI e SPEI, condotta per ogni cella su una serie relativamente lunga (più di 60 anni di dati, confronto Paragrafo 3.2.1), può dare dei risultati maggiormente significativi circa le tendenze nella siccità sul territorio piemontese. In modo simile a quanto fatto per la singola stazione di BRA, si è quindi calcolata la linea di tendenza per ogni punto della griglia, tenendo conto dei fenomeni di autocorrelazione con i metodi riportati al Paragrafo 4.1. Riducendo la componente temporale dei dati tramite questa valutazione di trend, è stato quindi possibile visualizzare la componente areale relativa alla loro distribuzione, e determinare sia le condizioni generali che le singole specificità dei fenomeni riscontrati.

Vengono inizialmente riportati i risultati dell'analisi tramite test Mann-Kendall modificato, che indica le serie per cui è presente un andamento significativo (Figura 4-45). Si ha in generale una buona corrispondenza con i punti risultati significativi da una semplice analisi sui dati tramite ricerca di tendenza e valutazione del p-value, come riportato in Figura 4-46 e Figura 4-47.

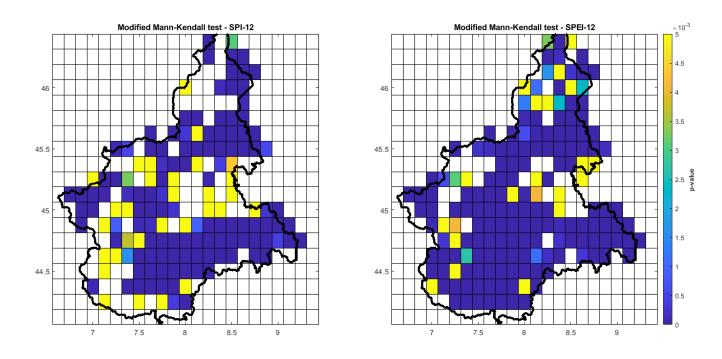


Figura 4-45: Analisi dei punti con tendenza significativa per SPI-12 e SPEI-12 tramite Mann-Kendall test modificato.

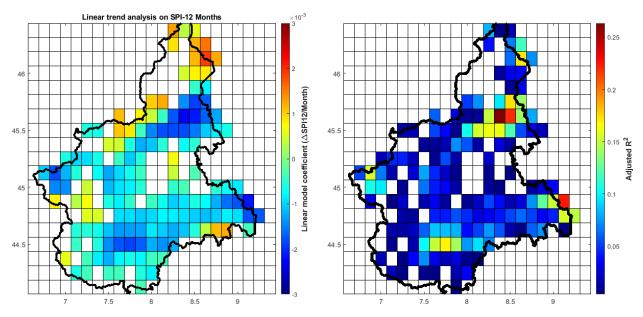


Figura 4-46: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPI-12. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

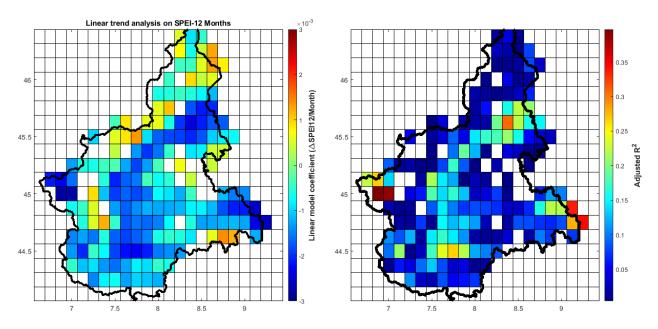


Figura 4-47: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPEI-12. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

Allo stesso modo, l'analisi condotta sulla serie cui è stata applicata la procedura TFPW riporta una generale corrispondenza con la valutazione condotta sulle serie di dati non modificate (Figura 4-48 e Figura 4-49). Si segnala però come la valutazione dell'autocorrelazione abbia riportato per tutti i dati un valore significativo, e che quindi nessun punto del dominio è stato escluso dalla procedura.

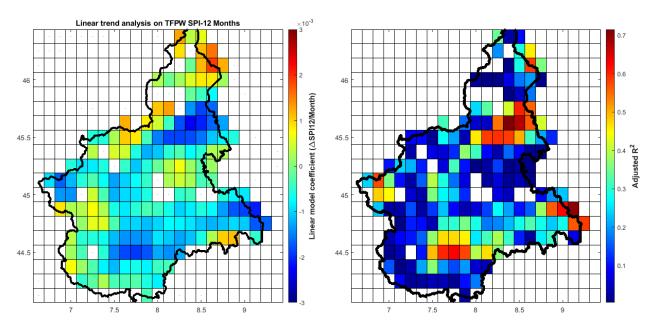


Figura 4-48: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPI-12 cui è stata applicata la procedura TFPW. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

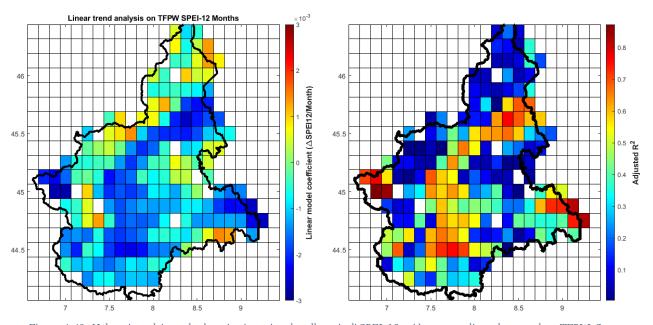


Figura 4-49: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPEI-12 cui è stata applicata la procedura TFPW. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

L'ultimo metodo valutato è stato il PW. Coerentemente con le valutazioni sulle sue caratteristiche (basso errore di tipo I e basso potere statistico, Tabella 9), si nota come le serie risultate significative siano notevolmente poche, nonostante un numero maggiore per l'indice SPEI-12 che SPI-12 (61 e 22 punti nella regione, rispettivamente). Si reputa particolarmente importante come, per lo SPEI-12, i punti risultati significativi dopo la procedura di PW abbiano tutti tendenza negativa, e corrispondano ai punti con R² più alto e tendenza più negativa valutati sulle serie non modificate e TFPW (discussi

nel dettaglio in seguito). Emerge quindi una tendenza che conferma le valutazioni già effettuate sui dati puntuali e coerenti con l'analisi della letteratura del Paragrafo 1.3: le condizioni di siccità metereologica sembrano peggiorare in modo molto più marcato e per aree più ampie della regione se viene considerato anche l'effetto della temperatura. Questo risultato non sembra inoltre derivare da problemi di autocorrelazione nei dati, in quanto diversi metodi atti a rimuoverne l'effetto riportano risultati simili.

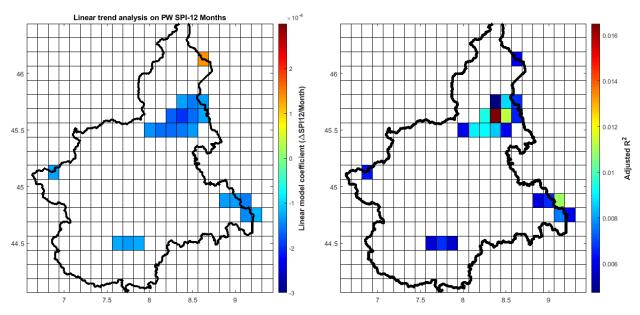


Figura 4-50: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPI-12 cui è stata applicata la procedura PW. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

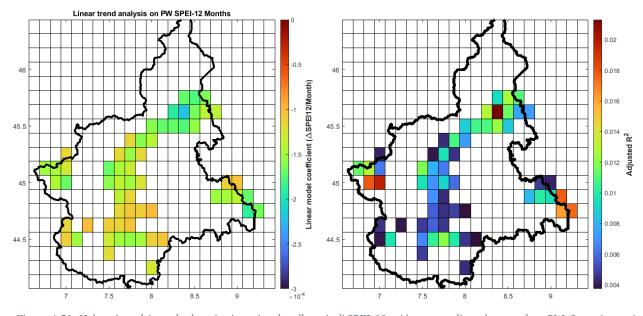


Figura 4-51: Valutazione dei trend sul territorio regionale sulle serie di SPEI-12 cui è stata applicata la procedura PW. Sono riportati solo i punti con significatività, valutata tramite p-value, superiore al 5%.

Si descrivono ora le evidenze emerse dall'analisi delle tendenze; per queste si fa riferimento a Figura 4-46, Figura 4-47, Figura 4-48 e Figura 4-49, data la corrispondenza tra i risultati ottenuti dal test Mann-Kendall modificato, dall'analisi di tendenza sui dati non modificati e sui dati modificati con TFPW. Partendo dalle caratteristiche più generali, si nota innanzitutto come la maggior parte del dominio studiato presenti delle tendenze significative, sia per lo SPI che per lo SPEI (confronto Tabella 14). Sembra però che lo SPEI sia più suscettibile a questi trend, presentandone infatti una percentuale maggiore rispetto allo SPI (confronto Tabella 14).

Tabella 14: Percentuale di punti con tendenze significative (p-value≤0.05) e sia significative che negative nel territorio regionale per la serie non modificata.

	SPI	SPEI
Significativi	75.98 %	86.27 %
di cui negativi	83.14 %	85.62 %

Comparando la distribuzione di tendenze positive e negative tra i due indici (Figura 4-52 e Figura 4-53) si nota una buona corrispondenza, e, nuovamente, vengono confermate le condizioni in peggioramento in Piemonte, data la generale corrispondenza dei trend valutati da SPI e SPEI nella regione. Solo alcune zone, di cui le più estese nella provincia di Biella e nel Verbano Cusio Ossola, presentano invece corrispondenza di trend positivi; un confronto con gli indici R² di Figura 4-46 e Figura 4-47 e di Figura 4-48 e Figura 4-49 riporta però valori bassi per queste zone e, invece, relativamente alti per quasi tutte le celle con condizioni in peggioramento.

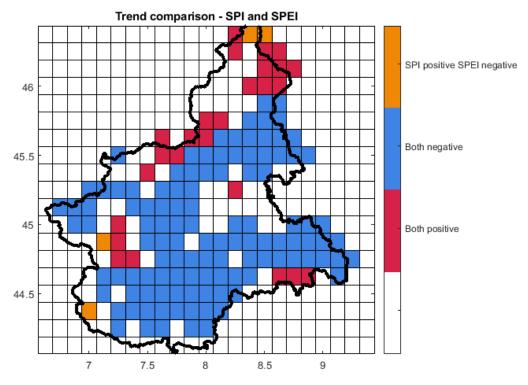


Figura 4-52: Confronto tra i trend valutati con SPI-12 e SPEI-12 su serie non modificate per il database NWIO.

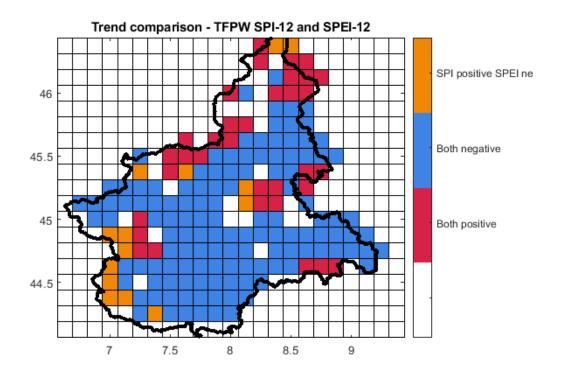


Figura 4-53: Confronto tra i trend valutati con SPI-12 e SPEI-12 su serie TFPW per il database NWIO.

La distribuzione dei dati in griglia permette poi di valutare la presenza di zone con condizioni omogenee in tutto il dominio; queste sono state valutate considerando anche il coefficiente R² e confrontano i risultati di SPI e SPEI. Facendo riferimento a Figura 4-46, Figura 4-47, Figura 4-48 e Figura 4-49 le aree valutate sono:

- Zone tra il biellese e il cuneese: si riscontrano due "punti caldi" posti ai limiti nord e sud della pianura (cuneese e zona tra Biella e Novara), caratterizzati da un aumento della siccità per lo SPI; lo SPEI, oltre a confermare la valutazione in questi due punti, unisce le estremità passando per Torino, determinando quindi un peggioramento per tutta la pianura. Data la corrispondenza delle suddette estremità a due zone con diminuzione della precipitazione, e le condizioni di aumento di temperatura nella pianura piemontese, si è deciso di valutare tutta l'area come interessata da un unico fenomeno di peggioramento delle condizioni siccitose, tenendo conto delle caratteristiche delle sottozone indicate dai due indici.
- Zona nell'alessandrino: caratterizzata da diminuzione di precipitazione e aumento di temperature minime e massime, l'estremità est della regione vicino ad Alessandria presenta una tendenza a condizioni secche sia per quanto riguarda lo SPI che lo SPEI.

Confrontando i risultati riportati sopra con quelli ottenuti dalle analisi di tendenze nel database al Paragrafo 3.2.3, si ottiene un risultato notevole: se dall'analisi delle temperature, specie di quelle massime, l'arco alpino piemontese sembra andare verso condizioni più secche (si hanno gli aumenti sia più intensi sia con R² più elevato), l'analisi dell'indice SPEI indica invece come la pianura debba attendere il peggioramento più significativo delle condizioni di siccità, nonostante le tendenze non univoche delle temperature minime nell'area. La precipitazione mantiene un ruolo importante nel determinare questi trend, come testimoniato dalla corrispondenza dei punti con diminuzioni più

significative di precipitazione e di SPI e SPEI; ma, oltre alla possibilità di fornire informazioni per le ampie zone senza variazioni significative della pioggia, è importante sottolineare la presenza di una zona intorno a Torino segnalata dal solo SPEI come soggetta a peggioramenti. È possibile quindi aggiungere al giudizio precedente sul peggioramento della siccità nella regione, anche una valutazione più specifiche su quali zone ne saranno maggiormente interessate e con quali modalità, sulla base delle analisi presentate.

4.3.3 Analisi degli eventi

Diversamente dal procedimento di valutazione di tendenze riportato nel paragrafo precedente, che valuta le caratteristiche di distribuzione areale riducendo a una sola variabile quelle temporali, l'analisi degli eventi descritta al Paragrafo 2.1.3 mira a rappresentare nello specifico la variazione nel tempo degli eventi di siccità. Viene perciò definito un evento tramite soglie relative al valore degli indici SPI e SPEI (sono considerati in condizioni di siccità punti con valore inferiore a -1) e all'area interessata (almeno 25 % della regione Piemonte), considerando e riducendo la componente spaziale.

Al fine di comprendere meglio l'analisi effettuata, si presenta un esempio esplicativo. I grafici riportati in riportano l'andamento dell'indice SPI-12 nel territorio regionale da febbraio ad agosto 1992. A febbraio il territorio regionale appare in condizioni per lo più nella norma, con ampie zone in condizioni sempre nella norma ma tendenti al secco, e alcune in condizioni secche (secondo la classificazione riportata al Paragrafo 2.1.3). Il mese successivo, invece, buona parte del territorio versa in condizioni di deficit, e inizia quindi un evento di siccità secondo il metodo proposto: più del 25% del Piemonte riporta un indice inferiore a -1 (si sottolinea come non venga dato un peso relativo maggiore alle celle in base al valore che riportano, ma semplicemente vengono contate se superano la soglia). Mantenendosi queste condizioni, l'evento continua fino a giugno, mese in cui le celle che superano la soglia critica sono appena sopra il 25%. Il mese successivo la percentuale scende sotto questo valore e l'evento si conclude.

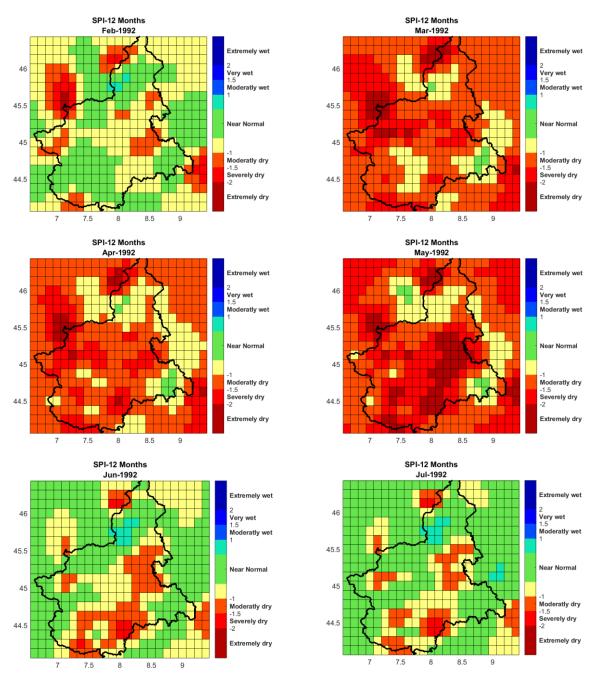


Figura 4-54: Andamento dell'indice SPI-12 sul dominio studiato da febbraio ad agosto 1992.

Presentato nello specifico il metodo, se ne riportano i risultati. L'andamento temporale degli eventi, calcolati nei soli limiti del territorio regionale, è riportato in Figura 4-55 e Figura 4-56. Nei grafici, durante gli eventi riportati sulla linea temporale come un rettangolo rosso, è sia riportata sia la percentuale di celle in condizioni di siccità nel territorio regionale (in blu nel grafico), sia il valore cumulato dell'indice nelle stesse celle (in nero nel grafico).

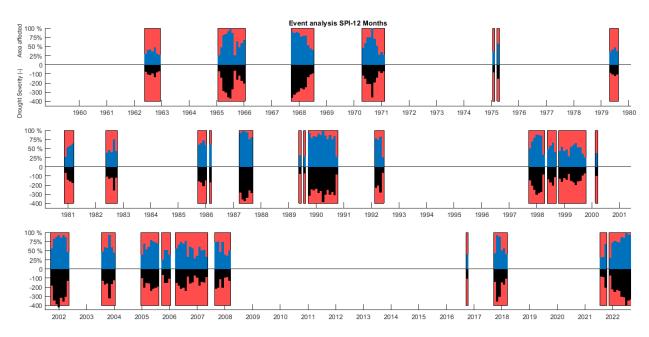


Figura 4-55: Rappresentazione dell'area interessata e della severità degli eventi valutati tramite SPI-12 sui dati NWIO.

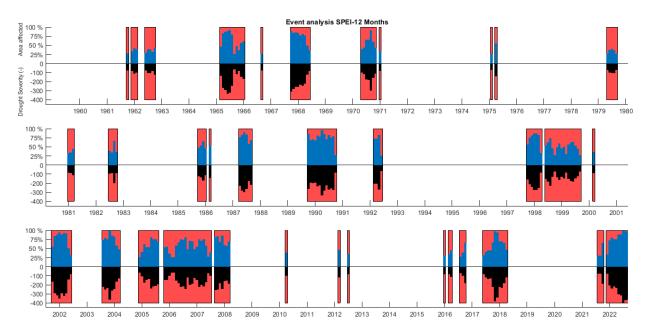


Figura 4-56: Rappresentazione dell'area interessata e della severità degli eventi valutati tramite SPEI-12 sui dati NWIO.

Il numero totale di eventi valutati tramite SPI e SPEI è, rispettivamente, pari a 30 e 35; questa discrepanza, come dimostrato dagli istogrammi di Figura 4-57, è dovuta principalmente al numero nettamente maggiore di eventi con durata di un mese secondo SPEI, che porta anche a un valore inferiore di durata (differenza percentuale del 6.35%) e severità media degli eventi (differenza percentuale del 9.47 %) rispetto a quelli ottenuti con lo SPI. Questa differenza nei valori medi si riduce molto se vengono scartati per entrambi gli indici gli eventi con durata pari a un mese (confronto Tabella

15); nonostante ciò, non si ritiene opportuna questa rimozione per due motivi. Innanzitutto, continua a essere presente una differenza nella deviazione standard, che suggerisce una maggiore variabilità negli eventi ottenuti da SPEI a dispetto della media simile; in secondo luogo, trattandosi di indici calcolati con periodo di accumulo pari a 12 mesi, una variazione mensile indica comunque un deficit rilevante, che deriva da una variazione significativa rispetto a una media annuale. La conclusione, quindi, è che la maggiore suscettibilità dello SPEI, per quanto porti a valori medi meno critici (eventi in media più brevi e meno severi), sia indice di una componente non trascurabile della temperatura, che più facilmente porta a condizioni di siccità nel territorio piemontese rispetto alla sola precipitazione. In ogni caso, sia SPI che SPEI mostrano una relazione inversa tra frequenza degli eventi e sia durata che severità – relazione più netta nel caso di SPEI.

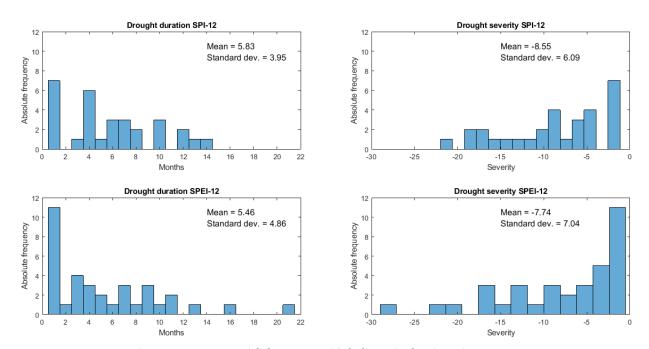


Figura 4-57: Istogrammi di durata e severità degli eventi valutati tramite SPI e SPEI.

Tabella 15: Caratteristiche medie degli eventi valutati tramite SPI-12 e SPEI-12, esclusi gli eventi con durata pari a un mese.

		Media	Deviazione standard
SPI-12 —	Durata	7.30	3.29
	Severità	-10.76	5.18
SPEI-12 —	Durata	7.50	4.60
	Severità	-10.69	6.65

Considerando anche la percentuale del territorio in condizioni siccitose in ogni evento emergono sia punti in comune sia differenze tra SPI e SPEI; si parte dal descrivere le somiglianze. Come si può notare dalla Figura 4-58, per entrambi gli indici si identifica una relazione tra l'area media interessata e intensità e durata: nello specifico, area e intensità hanno una relazione lineare, risultata simile e significativa per SPI e SPEI; area e durata presentano di nuovo una relazione generalmente lineare,

benché eventi di durata maggiore valutati con lo SPEI-12 riportino aree relativamente basse (confronto Figura 4-59 e Figura 4-60). Gli stessi risultati si ottengono anche valutando l'area massima durante l'evento: confrontando il valore medio e quello massimo è emersa infatti una forte correlazione tra i due valori e una relazione lineare significativa con coefficiente pari a circa 1.25 per entrambi gli indici SPI e SPEI. Si può quindi affermare che gli eventi che interessano la maggior parte del territorio piemontese sono in generale quelli con la durata maggiore e la severità maggiore (data la relazione lineare tra le due grandezze per gli eventi presi in esame), cioè quelli con intensità maggiore.

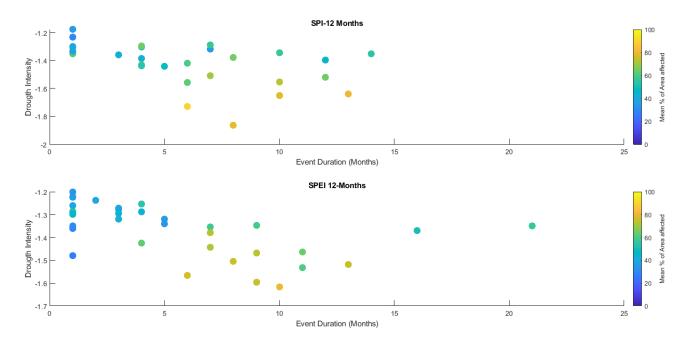


Figura 4-58: Andamento dell'area media rispetto a durata e intensità per gli eventi valutati con SPI-12 e SPEI-12.

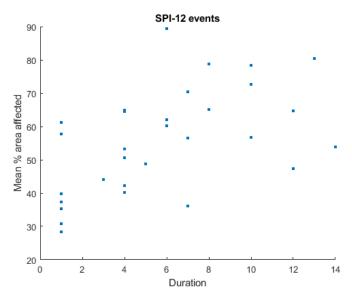


Figura 4-59: Durata e area media per gli eventi valutati con SPI-12.

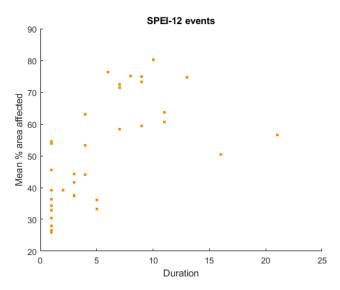


Figura 4-60: Durata e area media per gli eventi valutati con SPEI-12.

Passando invece alle differenze tra le caratteristiche relative all'area, quella che appare maggiormente significativa è l'area media in condizioni di siccità negli eventi valutati secondo SPI e SPEI, riportata in Tabella 16. Nonostante simili deviazioni standard, la percentuale di territorio mediamente parte di un evento siccitoso è più alta dell'8.5 % per lo SPI rispetto allo SPEI. Ad escludere la semplice influenza degli eventi con durata di un mese discussi in precedenza, concorre sia la valutazione dell'area media in condizioni di siccità su tutto il periodo studiato (che ottiene valori molto simili, con una percentuale leggermente più alta per lo SPEI), sia la valutazione dell'indice medio su tutto il territorio - valutando cioè sia celle in condizioni di siccità che non - rispetto alla durata degli eventi, riportata in Figura 4-61. Si nota chiaramente come i due indici riportino condizioni sistematicamente diverse per qualsiasi durata degli eventi, anche se la differenza diminuisce con l'aumentare della durata. Questo sembra indicare una diversa dinamica degli eventi legati alla sola precipitazione rispetto che alla precipitazione e alla temperatura. La valutazione della sola precipitazione con l'indice SPI pare essere legata a fenomeni tendenzialmente più generali, o in altre parole a condizioni più omogenee sul territorio. Le condizioni di siccità valutate dallo SPEI, invece, sembrano inserirsi in contesti più eterogenei.

Tabella 16: Valori percentuali medi dell'area in condizioni di siccità (indice minore di -1) secondo SPI-12 e SPEI-12.

	Area media - solo eventi siccitosi	Area media - totale
SPI-12	55.73 ± 15.75 %	14.04 ± 22.84 %
SPEI-12	50.99 ± 16.77 %	14.95 ± 23.01 %

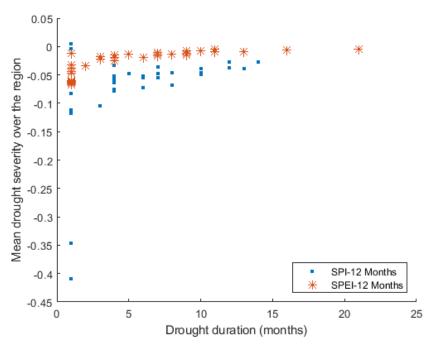


Figura 4-61: Valore medio dell'indice SPI-12 e SPEI-12 su tutto il territorio regionale durante un evento rispetto alla durata dell'evento stesso.

Alla luce di queste evidenze appaiono ancora più significativi i risultati ottenuti dalla valutazione delle tendenze nella siccità sul territorio piemontese. Una prima valutazione viene fatta rispetto al numero di celle in condizioni di siccità secondo SPI e SPEI, riportata in Figura 4-62. Si nota chiaramente come nel tempo la superficie interessata da siccità sia nettamente maggiore secondo lo SPEI, con le differenze percentuali maggiori tutte a favore dello SPEI rispetto allo SPI. Questa tendenza sembra nuovamente l'effetto della presenza di un trend significativo nella temperatura della regione, che determina un ampliarsi delle zone interessate dalla siccità: risultato corrispondente con le analisi di tendenze valutate per le singole celle nel Paragrafo 4.3.2. L'effetto della temperatura però, come già precedentemente osservato, non sembra soprassedere agli effetti di siccità eccezionali date dalla pioggia, quali quelle descritta al Paragrafo 1.1, relative al periodo 2021-2022. Se si osservano le aree in condizioni di siccità da novembre 2011 si nota infatti una differenza trascurabile tra i due indici, che in virtù delle condizioni di assenza pressoché totale di precipitazione sembrano concordare sull'estensione del fenomeno. A questa tendenza si associa anche un trend nell'intensità della siccità, come riportato in Figura 4-63. In questa viene riportata la differenza tra il valore di SPI-12 e SPEI-12 medio su tutto il dominio: valori negativi nel grafico denotano quindi condizioni più secche secondo lo SPEI, ovvero valori meno positivi o più negativi rispetto allo SPI. Di nuovo, coerentemente con quanto visto per l'area, sembra che lo SPEI indichi una tendenza significativa ad un aggravarsi delle condizioni di siccità a causa della temperatura rispetto alla sola precipitazione.

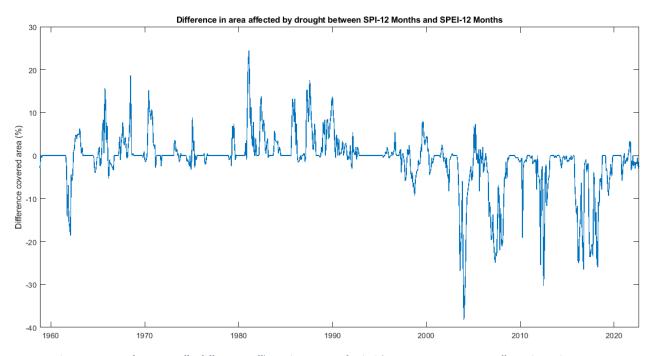


Figura 4-62: Andamento nella differenza nell'area interessata da siccità tra SPI-12 e SPEI-12 nella regione Piemonte

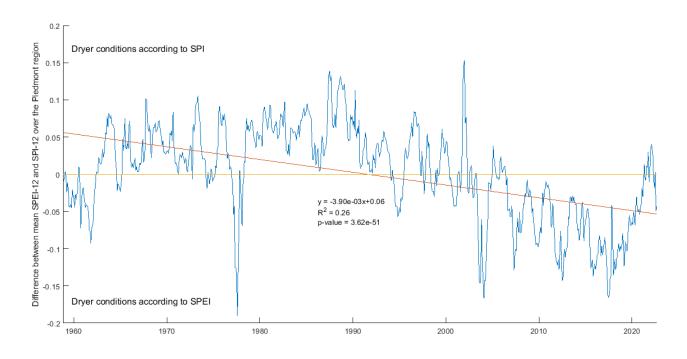


Figura 4-63: Andamento nella differenza tra l'indice SPEI-12 e SPI-12 medio sul territorio piemontese.

Considerando quanto detto analizzando gli eventi, si può affermare che nel periodo analizzato, nonostante in generale gli eventi valutati con lo SPEI siano in generale meno estesi, meno lunghi e leggermente meno severi, essi sono più numerosi; la maggiore suscettibilità a periodi di siccità è inoltre legata a una netta tendenza a condizioni di siccità più gravi per lo SPEI che per lo SPI.

5 Conclusioni

Lo studio ha valutato le tendenze nelle condizioni di siccità metereologica nel territorio piemontese, adottando un'analisi basata sulla visione lineare driver-impatto, generalmente utilizzata in questo tipo di applicazioni. In questo modo si sono caratterizzate le condizioni legate alla siccità metereologica valutandone l'eventuale peggioramento tramite l'indice SPI (calcolato da valori di precipitazione) e l'indice SPEI (calcolato da valori di precipitazione e temperatura). Il confronto tra i due indici si è dimostrato particolarmente significativo: sia nell'analisi dei dati di una stazione metereologica nella città di Bra (maggio 1993 - giugno 2022), sia nella valutazione dei dati del database NWIO di Arpa Piemonte (dicembre 1957 - 30 settembre 2022), è emerso come lo SPEI mostri condizioni più critiche rispetto allo SPI, indicando come il Piemonte sia al momento interessato da un peggioramento delle condizioni principalmente all'aumento della temperatura, e di dell'evapotraspirazione. Questo risultato è coerente con le tendenze del valore di precipitazione sul territorio regionale (che in generale non risultano significative) e con le tendenze del valore di temperatura (spesso significative e positive), e conferma quanto risulta da un'analisi della letteratura in tema. L'analisi dei dati del database NWIO ha inoltre permesso di valutare delle specificità areali del fenomeno, indicando la zona pianeggiante pedemontana dal cuneese al biellese, passando per Torino, come interessata da un peggioramento attestato nei punti estremi da entrambi gli indici e nella zona centrale dal solo SPEI. Allo stesso modo, l'alessandrino è emerso in modo condiviso da SPI e SPEI come zona in peggioramento. Un dato significativo riguarda invece l'arco alpino, che nonostante riporti gli aumenti di temperatura maggiori, presenta tendenze verso condizioni più umide secondo entrambi gli indici, anche se con meno continuità spaziale nei valori significativi e la quasi totale assenza di valori significativi dopo pre-whitening dei dati. L'analisi degli eventi siccitosi, valutati come mesi in cui almeno il 25% del territorio regionale si trova in condizioni di siccità (valore inferiore a -1) secondo gli indici, ha inoltre indicato come, nonostante lo SPEI valuti condizioni più gravose nel tempo, con un'area maggiore del territorio soggetta a siccità e un valore medio dell'indice più critico, gli eventi legati alla temperatura siano spesso meno intensi, meno estesi arealmente e più numerosi di quelli valutati tramite SPI. In questo senso, secondo il tipo di analisi degli eventi effettuata, sono presenti differenze nelle dinamiche di propagazione di condizioni siccitose legate alla temperatura, con una maggiore discontinuità temporale e areale se si tiene conto dell'evapotraspirazione.

L'evolvere della siccità nel territorio piemontese necessita in ogni caso di un monitoraggio continuo, e non si può escludere che deficit significativi di precipitazione ne diventino col tempo il driver principale. Valutando SPI e SPEI sui dati della stazione nella città di Bra aggiornati a dicembre 2022, la seconda metà del 2021 e tutto il 2022 mostrano condizioni particolarmente secche. Le scale temporali di 3, 6 e 9 mesi non presentano i valori più critici della serie, ma riportano tutte l'inizio dell'evento siccitoso a maggio-aprile 2021. Questa è una condizione inusuale rispetto al resto dei dati, dove le scale temporali più brevi "annunciano" la siccità con qualche mese di anticipo. Ciò indica un deficit con un'insorgenza molto veloce che, protraendosi per diversi mesi, ha importanti conseguenze sulle condizioni a lungo termine. I valori di SPI-12 e SPEI-12, secondo i quali tutto il periodo fa parte di una drough run particolarmente intensa, riportano infatti il valore più basso di tutta la serie ad aprile e luglio 2022. Questo evento, ancora in corso a marzo 2023, presenta quindi delle caratteristiche di eccezionalità tali da rendere necessari ulteriori studi.

Possibili sviluppi dei metodi presentati riguardano sicuramente l'analisi degli eventi tramite *run analysis* condotta sui dati della stazione metereologica nella città di Bra. Nonostante si sia potuto descrivere gli andamenti nella siccità metereologica tramite il confronto tra indici con vari tempi di riferimento, non è stato possibile valutare la coincidenza degli eventi valutati con effettive condizioni di siccità agriculturale, idrologica e socioeconomica, data la mancanza di database di eventi effettivamente

avvenuti. La possibilità di legare il dato derivante da analisi delle grandezze metereologiche a effettive condizioni sul territorio sarebbe particolarmente significativa in quanto permetterebbe di creare sistemi di allarme preventivo della siccità (*Drought Early Warning System*, DEWS) più robusti. Per quanto riguarda i dati in griglia, l'applicazione di algoritmi più sofisticati nella valutazione degli eventi di siccità, in grado di valutare lo spostamento nel tempo (un esempio è presente in Haslinger e Blöschl, 2017), fornirebbe informazioni circa le variazioni spazio-temporali delle zone interessate. Infine, nonostante attraverso diversi metodi siano stati esaminati gli effetti dell'autocorrelazione, particolarmente critici nel valutare la significatività dei trend dei dati, si ritiene necessario investigarli ulteriormente, visti i risultati non sempre concordi che sono stati ottenuti.

6 Sitografia

[S1]: https://www.regione.piemonte.it/web/pinforma/notizie/siccita-riconosciuto-stato-demergenza-al-piemonte

Consultato l'8/10/2022.

[S2]: http://www.arpa.piemonte.it/news/inverno-da-primato-in-ticino-lombardia-e-piemonte Consultato l'8/10/2022.

[S3]: https://www.ansa.it/piemonte/notizie/2022/06/29/siccita-confagri-oltre-1-mld-di-danni-diretti-agricoltura 0bb2d760-eb6a-49af-92c3-5406ea5808f8.html Consultato l'8/10/2022.

[S4]: https://www.regione.piemonte.it/web/pinforma/notizie/regione-piemonte-contro-crisi-idrica Consultato l'8/10/2022.

[S5]: http://www.arpa.piemonte.it/news/pubblicato-il-rappporto-sulla-siccita2019-in-piemonte-nel-2022 Consultato l'8/10/2022.

[S6]: https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1001 Consultato l'8/10/2022.

[S7]: https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx Consultato l'8/10/2022.

[S8]: $\underline{\text{https://drought.unl.edu/dustbowl/}}$

Consultato il 10/11/2022.

[S9]: https://www.environment.sa.gov.au/topics/river-murray/current-dry-conditions/millennium-drought Consultato il 10/10/2022.

[S10]: https://earthobservatory.nasa.gov/features/DroughtFacts Consultato il 9/10/2022.

[S11]: https://ipccitalia.cmcc.it/il-rapporto-ipcc-spiegato-dagli-esperti-italiani-con-i-contenuti-principali-su-europa-mediterraneo-e-italia/

Consultato il 12/10/2022.

 $[S12]: \underline{https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/cambiamenti-climatici-e-impatti/le-informazioni-di-base-\underline{sul-clima/cosa-sono-gli-scenari-di-emissione-.html}$

Consultato il 12/10/2022.

[S13]: https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html

Consultato il 15/11/2022.

[S14]: https://spei.csic.es/index.html

Consultato il 11/11/2022.

[S15]: https://www.agraria.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1462_2016_412_27105.pdf Consultato il 15/11/2022.

[S16]: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali-meteo-idro/banca-dati-meteorologica.html

Consultato il 2/9/2022.

[S17]:

https://web.archive.org/web/20160305202320/http://clisun.casaccia.enea.it/profili/tabelle/023%20%5BBr

a%5D%20capoluogo.Txt

Consultato il 9/10/2022.

[S18]: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/confronti-storici/dati/dati.html#2.0 Consultato il 21/10/2022.

[S19]: https://www.arpa.piemonte.it/export/sites/default/tematismi/clima/confrontistorici/dati/metodologia.pdf

Consultato l'8/11/2022.

[S20]: https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2112

Consultato il 6/12/2022.

[S21]: https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=9#year=2022

Consultato il 6/12/2022.

7 Bibliografia

Achour, Kenza, Mohamed Meddi, Ayoub Zeroual, Senna Bouabdelli, Pamela Maccioni, e Tommaso Moramarco. «Spatio-Temporal Analysis and Forecasting of Drought in the Plains of Northwestern Algeria Using the Standardized Precipitation Index». Journal of Earth System Science 129, fasc. 1 (dicembre 2020): 42. https://doi.org/10.1007/s12040-019-1306-3.

Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N.J.M. Hilmi, G. Le Cozannet, and P. Lionello, 2022: CrossChapter Paper 4: Mediterranean Region. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233-2272, doi:10.1017/9781009325844.021.

Angelidis, Panagiotis, Fotios Maris, Nikos Kotsovinos, e Vlassios Hrissanthou. «Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions». *Water Resources Management* 26, fasc. 9 (luglio 2012): 2453–73. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0.

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali, «Rapporto siccità in Piemonte 2022». Torino, ottobre 2022. http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi/eventi-2022/rapporto-siccita-in-piemonte-2022

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali e Dipartimento Sistemi Previsionali e Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Energia e Territorio, «Analisi del clima regionale del periodo 1981-2010 e tendenze negli ultimi 60 anni». Torino, giugno 2020 [1].

https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2021-02/analisi_clima_regionale_1981-2010.pdf

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali e Dipartimento Sistemi Previsionali e Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Energia e Territorio, «Analisi degli scenari di clima regionale del periodo 2011-2100». Torino, giugno 2020 [2].

https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2021-02/analisi scenari clima regionale periodo 2011- 2100.pdf

Azam, Muhammad, Seung Maeng, Hyung Kim, Seung Lee, e Jae Lee. «Spatial and Temporal Trend Analysis of Precipitation and Drought in South Korea». Water 10, fasc. 6 (12 giugno 2018): 765. https://doi.org/10.3390/w10060765.Baronetti, Alice, Vincent Dubreuil, Antonello Provenzale, e Simona Fratianni. «Future Droughts in Northern Italy: High-Resolution Projections Using EURO-CORDEX and MED-CORDEX Ensembles». *Climatic Change* 172, fasc. 3–4 (giugno 2022): 22. https://doi.org/10.1007/s10584-022-03370-7.

Baronetti, Alice, José Carlos González-Hidalgo, Sergio M. Vicente-Serrano, Fiorella Acquaotta, e Simona Fratianni. «A Weekly Spatio-temporal Distribution of Drought Events over the Po Plain (North Italy) in the Last Five Decades». *International Journal of Climatology* 40, fasc. 10 (agosto 2020): 4463–76. https://doi.org/10.1002/joc.6467.

Bhuiyan, Muhammed, Siti Nazahiyah Rahmat, e Nira Jayasuriya. «Trend analysis of drought using Standardised Precipitation Index (SPI) in Victoria, Australia», 2012.

Bordi, Isabella, e Alfonso Sutera. «An analysis of drought in Italy in the last fifty years». *Il Nuovo Cimento C* 25 (marzo 2002).

Brunetti, Michele, Maurizio Maugeri, Teresa Nanni, e Antonio Navarra. «Droughts and Extreme Events in Regional Daily Italian Precipitation Series». *International Journal of Climatology* 22, fasc. 5 (aprile 2002): 543–58. https://doi.org/10.1002/joc.751.

Caloiero, Tommaso. «SPI Trend Analysis of New Zealand Applying the ITA Technique». Geosciences 8, fasc. 3 (15 marzo 2018): 101. https://doi.org/10.3390/geosciences8030101.

Caloiero, Tommaso, Giulio Nils Caroletti, e Roberto Coscarelli. «IMERG-Based Meteorological Drought Analysis over Italy». *Climate* 9, fasc. 4 (16 aprile 2021): 65. https://doi.org/10.3390/cli9040065.

Chad A. Greene, Kaustubh Thirumalai, Kelly A. Kearney, José Miguel Delgado, Wolfgang Schwanghart, Natalie S. Wolfenbarger, Kristen M. Thyng, David E. Gwyther, Alex S. Gardner, and Donald D. Blankenship. The Climate Data Toolbox for MATLAB. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 2019. doi:10.1029/2019GC008392 https://doi.org/10.1029/2019GC008392

Collaud Coen, Martine, Elisabeth Andrews, Alessandro Bigi, Giovanni Martucci, Gonzague Romanens, Frédéric P. A. Vogt, e Laurent Vuilleumier. «Effects of the Prewhitening Method, the Time Granularity, and the Time Segmentation on the Mann–Kendall Trend Detection and the Associated Sen's Slope». Atmospheric Measurement Techniques 13, fasc. 12 (21 dicembre 2020): 6945–64. https://doi.org/10.5194/amt-13-6945-2020.

Crausbay, Shelley D., Aaron R. Ramirez, Shawn L. Carter, Molly S. Cross, Kimberly R. Hall, Deborah J. Bathke, Julio L. Betancourt, et al. «Defining Ecological Drought for the Twenty-First Century». *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, fasc. 12 (1 dicembre 2017): 2543–50. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0292.1.

Eslamian, Saeid, Kaveh Ostad-Ali-Askari, Vijay P. Singh, Nicolas R. Dalezios, Mohsen Ghane, Yohannes Yihdego, e Mohammed Matouq. «A Review of Drought Indices». *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering* 3, fasc. 4 (2017). https://doi.org/10.20431/2454-8693.0304005.

Falzoi, Simone, Fiorella Acquaotta, Maria Antonia Pulina, e Simona Fratianni. «Hydrological Drought Analysis in Continental Temperate and Mediterranean Environment during the Period 1981-2017». *Italian Journal of Agrometeorology*, 28 dicembre 2019, 13-23 Pages. https://doi.org/10.13128/IJAM-798.

Fatichi, Simone (2023). Mann-Kendall Modified test (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25533-mann-kendall-modified-test), MATLAB Central File Exchange. Retrieved February 14, 2023.

George H. Hargreaves e Zohrab A. Samani. «Reference Crop Evapotranspiration from Temperature». *Applied Engineering in Agriculture* 1, fasc. 2 (1985): 96–99. https://doi.org/10.13031/2013.26773.

González-Hidalgo, J. C., S. M. Vicente-Serrano, D. Peña-Angulo, C. Salinas, M. Tomas-Burguera, e S. Beguería. «High-Resolution Spatio-Temporal Analyses of Drought Episodes in the Western Mediterranean Basin (Spanish Mainland, Iberian Peninsula)». *Acta Geophysica* 66, fasc. 3 (giugno 2018): 381–92. https://doi.org/10.1007/s11600-018-0138-x.

Güner Bacanli, Ülker. «Trend Analysis of Precipitation and Drought in the Aegean Region, Turkey: Trend Analysis of Precipitation and Drought». Meteorological Applications 24, fasc. 2 (aprile 2017): 239–49. https://doi.org/10.1002/met.1622.

Hamed, Khaled H., e A. Ramachandra Rao. «A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data». Journal of Hydrology 204, fasc. 1–4 (gennaio 1998): 182–96. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X.

Hanel, Martin, Oldřich Rakovec, Yannis Markonis, Petr Máca, Luis Samaniego, Jan Kyselý, e Rohini Kumar. «Revisiting the Recent European Droughts from a Long-Term Perspective». *Scientific Reports* 8, fasc. 1 (dicembre 2018): 9499. https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4.

Hargreaves GL, Samani ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture 1: 96–99.

Haslinger, K., e G. Blöschl. «Space-Time Patterns of Meteorological Drought Events in the European Greater Alpine Region Over the Past 210 Years: SPACE-TIME PATTERNS OF DROUGHT EVENTS». *Water Resources Research* 53, fasc. 11 (novembre 2017): 9807–23. https://doi.org/10.1002/2017WR020797.

Hayes, Michael, Mark Svoboda, Nicole Wall, e Melissa Widhalm. «The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended». *Bulletin of the American Meteorological Society* 92, fasc. 4 (1 aprile 2011): 485–88. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1.

Hayes, Michael, Mark Svoboda, Donald Wilhite, e Olga Vanyarkho. «Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index». *Bulletin of The American Meteorological Society - BULL AMER METEOROL SOC* 80 (marzo 1999): 429–38. <a href="https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2">https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2.

Hoerling, Martin, Jon Eischeid, Judith Perlwitz, Xiaowei Quan, Tao Zhang, e Philip Pegion. «On the Increased Frequency of Mediterranean Drought». *Journal of Climate* 25, fasc. 6 (15 marzo 2012): 2146–61. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1.

Hosking, J.R.M., (1986): The theory of probability weighted moments. Res. Rep. RC 12210 IBM Research Division, Yorktown Heights NY 10598

Kchouk, Sarra, Lieke A. Melsen, David W. Walker, e Pieter R. van Oel. «A Geography of Drought Indices: Mismatch between Indicators of Drought and Its Impacts on Water and Food Securities». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, fasc. 2 (7 febbraio 2022): 323–44. https://doi.org/10.5194/nhess-22-323-2022.

Khaliq, M.N., T.B.M.J. Ouarda, P. Gachon, L. Sushama, e A. St-Hilaire. «Identification of Hydrological Trends in the Presence of Serial and Cross Correlations: A Review of Selected Methods and Their Application to Annual Flow Regimes of Canadian Rivers». Journal of Hydrology 368, fasc. 1–4 (aprile 2009): 117–30. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.035.

Koudahe, Komlan, Adewumi J. Kayode, Awokola O. Samson, Adekunle A. Adebola, e Koffi Djaman. «Trend Analysis in Standardized Precipitation Index and Standardized Anomaly Index in the Context of Climate Change in Southern Togo». Atmospheric and Climate Sciences 07, fasc. 04 (2017): 401–23. https://doi.org/10.4236/acs.2017.74030.

Kulkarni, A, e H von Storch. «Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend», Meteorologische Zeitschrift N.F., Vol. 4, No. 2, 1995, pp. 82-85.

La Jeunesse, I., C. Cirelli, D. Aubin, C. Larrue, H. Sellami, S. Afifi, A. Bellin, et al. «Is Climate Change a Threat for Water Uses in the Mediterranean Region? Results from a Survey at Local Scale». *Science of The Total Environment* 543 (febbraio 2016): 981–96. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.062.

Laimighofer, Johannes, e Gregor Laaha. «How Standard Are Standardized Drought Indices? Uncertainty Components for the SPI & SPEI Case». *Journal of Hydrology* 613 (ottobre 2022): 128385. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128385.

Lionello, Piero, e Luca Scarascia. «The Relation between Climate Change in the Mediterranean Region and Global Warming». Regional Environmental Change 18, fasc. 5 (giugno 2018): 1481–93. https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1.

McKee, Thomas B., Nolan J. Doesken, e John R. Kleist. «THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES», 1993.

Nistor, Mărgărit-Mircea. «Groundwater Vulnerability in the Piedmont Region under Climate Change». *Atmosphere* 11, fasc. 8 (23 luglio 2020): 779. https://doi.org/10.3390/atmos11080779.

Pavan, Valentina, Gabriele Antolini, Roberto Barbiero, Nicola Berni, Fabio Brunier, Carlo Cacciamani, Anselmo Cagnati, et al. «High Resolution Climate Precipitation Analysis for North-Central Italy, 1961–2015». *Climate Dynamics* 52, fasc. 5–6 (marzo 2019): 3435–53. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4337-6.

Ronchi, Christian, De Luigi, Chiara (Arpa Piemonte, Dipartimento di Sistemi Previsionali). «Il cambiamento climatico: le attività di ARPA Piemonte su stato, impatti e risposte - Conferenza al Museo Regionale di Scienze Naturali». Torino, 13 giugno 2011.

https://www.arpa.piemonte.it/export/sites/default/tematismi/clima/confronti-storici/dati/Dati_Ronchi.pdf

Spinoni, Jonathan, Gustavo Naumann, Jürgen V. Vogt, e Paulo Barbosa. «The Biggest Drought Events in Europe from 1950 to 2012». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3 (marzo 2015): 509–24. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.01.001.

Taesam Lee (2023). Standardized Precipitation Index (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26018-standardized-precipitation-index), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 7, 2023.

Tigkas, Dimitris, Harris Vangelis, e George Tsakiris. «DrinC: A Software for Drought Analysis Based on Drought Indices». *Earth Science Informatics* 8, fasc. 3 (settembre 2015): 697–709. https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y.

Van Loon, Anne F. «Hydrological Drought Explained». WTREs Water 2, fasc. 4 (luglio 2015): 359–92. https://doi.org/10.1002/wat2.1085.

Vicente-Serrano, S. M., e J. I. López-Moreno. «Hydrological Response to Different Time Scales of Climatological Drought: An Evaluation of the Standardized Precipitation Index in a Mountainous Mediterranean Basin». *Hydrology and Earth System Sciences* 9, fasc. 5 (7 novembre 2005): 523–33. https://doi.org/10.5194/hess-9-523-2005.

Vogel, Johannes, Eva Paton, Valentin Aich, e Axel Bronstert. «Increasing Compound Warm Spells and Droughts in the Mediterranean Basin». *Weather and Climate Extremes* 32 (giugno 2021): 100312. https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100312.

World Meteorological Organization. *Standardized Precipitation Index User Guide*. WMO 1090. Geneva, Switzerland, 2012.

Yue, Sheng, Paul Pilon, Bob Phinney, e George Cavadias. «The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series». Hydrological Processes 16, fasc. 9 (30 giugno 2002): 1807–29. https://doi.org/10.1002/hyp.1095.

Zucaro, Raffaella, Chiara Antinoro, e Gianfranco Giannerini. «CHARACTERIZATION OF DROUGHT IN ITALY APPLYING THE RECONNAISSANCE DROUGHT INDEX », 2017.