

# VALUTAZIONE DELLE CURVE DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA PER IL XXI SECOLO IN SICILIA

*Dario Treppiedi<sup>1</sup>, Antonio Francipane<sup>1</sup> & Leonardo Valerio Noto<sup>1</sup>*

*(1) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, Palermo*

## ASPETTI CHIAVE

- *L'adattamento delle CPP ai cambiamenti climatici per la Sicilia è stato effettuato utilizzando un framework basato sul CC-scaling e gli incrementi previsti nella temperatura media;*
- *A partire dai dati osservati nell'ultimo ventennio, in differenti aree della Sicilia il CC-scaling relativo alle piogge orarie è ben al di sopra del 7%/°C;*
- *Alla fine del XXI secolo, le piogge di progetto relative alla durata oraria potrebbero aumentare in maniera rilevante, con importanti conseguenze sulla risposta idrologica specialmente sui bacini di piccole dimensioni (flash floods);*

## 1 INTRODUZIONE

Le curve di probabilità pluviometrica (CPP) sono uno strumento fondamentale per la progettazione delle infrastrutture idrauliche, consentendo agli ingegneri e ai pianificatori di prendere decisioni informate non solo in merito alla resilienza di questi sistemi ma anche alle strategie per una migliore gestione della risorsa idrica. Negli ultimi decenni, diversi lavori hanno dimostrato come i cambiamenti climatici stiano alterando le caratteristiche degli eventi pluviometrici (estremi e non), compromettendo l'affidabilità delle attuali CPP per il futuro. Infatti, con l'evolversi del clima, le osservazioni storiche su cui si basano queste curve potrebbero via via diventare meno rappresentative degli scenari di precipitazione attuali e futuri.

Questo è il caso della Sicilia che, posizionata al centro del Mar Mediterraneo, rappresenta una zona di transizione tra il clima arido che caratterizza il nord Africa e quello temperato tipico dell'area mediterranea. L'isola è sempre stata oggetto di studio per verificare se fossero presenti cambiamenti nelle caratteristiche degli estremi pluviometrici. In quest'ottica, è stato recentemente riscontrato che soprattutto le precipitazioni di breve durata (orarie e sub-orarie) si sono intensificate negli ultimi anni (Arnone et al., 2013; Treppiedi et al., 2021). Se è dunque possibile che il regime pluviometrico a scala regionale stia cambiando, almeno limitatamente alle piogge estreme, è anche probabile che le CPP, ricavate utilizzando solamente i dati registrati nel secolo scorso, possano non essere più idonee alle odierne applicazioni. A tal proposito Treppiedi et al. (2023) hanno osservato una significativa sottostima dei quantili di pioggia calcolati dalla più aggiornata analisi di frequenza regionale (Forestieri et al., 2018), che si basa sulle osservazioni del periodo 1928-2010, soprattutto per le durate più brevi e i bassi periodi di ritorno

Di conseguenza, risulta necessario effettuare un 'upgrade' delle CPP attualmente disponibili, al fine di tenere in considerazione le possibili variazioni avvenute negli ultimi decenni, nonché predisporre una metodologia semplice e flessibile che permetta di quantificare le possibili variazioni dei quantili per dato tempo di ritorno per la fine del XXI secolo.

## 2 MATERIALI E METODI

La metodologia implementata è stata derivata e adattata al caso studio siciliano a partire da quanto proposto da Martel et al. (2021), in cui si suggerisce che l'adattamento delle CPP avvenga tenendo conto di come gli estremi di pioggia possano essere influenzati dalla variazione nella temperatura. Di fatti, l'aumento della temperatura superficiale e atmosferica, è direttamente connesso ad un incremento dei maggiori tassi evaporativi dagli oceani e, in generale, da tutti gli specchi liquidi, dai suoli, etc... . Al contempo, un'aria più calda è in grado di contenere maggiori quantità di vapore acqueo, incrementando quindi l'umidità relativa dell'aria. Questo, oltre a favorire un aumento del quantitativo di acqua precipitabile, favorisce anche le condizioni affinché l'atmosfera sia instabile, incrementando quindi la probabilità di fenomeni di pioggia intensa dovuti a movimenti convettivi delle masse d'aria. In altre parole, questo si traduce in un aumento della frequenza di fenomeni intensi e, contemporaneamente, in un incremento della loro intensità.

L’approccio proposto da Martel et al. (2021) prevede che i quantili di pioggia di durata  $d$  e tempo di ritorno  $T$  riferiti ad uno scenario futuro possano essere ricavati correggendo quelli attuali attraverso *i*) dei termini che tengano conto di come le precipitazioni di durata 24 ore e tempo di ritorno di 2 anni si riscalinano con la temperatura e *ii*) di alcuni fattori che considerano il modo in cui gli estremi delle precipitazioni possano cambiare con la frequenza di accadimento e con la durata.

Secondo questa procedura l’adattamento delle curve di probabilità pluviometrica ai cambiamenti climatici può essere fatta a partire da approcci basati sull’implementazione della relazione di Clausius-Clapeyron (CC). Tale relazione, che descrive la capacità dell’atmosfera di contenere vapore acqueo, suggerisce che, tendenzialmente, per ogni aumento di temperatura di 1°C, l’atmosfera incrementa la propria capacità di trattenere l’acqua del 7%. Questo avviene in virtù del fatto che un incremento della temperatura porta ad un aumento del vapore acqueo disponibile affinché si generi precipitazione.

Tuttavia, la percentuale prima riportata è fortemente influenzata dalla posizione geografica cui si fa riferimento. Differenti studi (Lenderink et al., 2011, Ali et al., 2021), hanno già dimostrato come questo valore sia drammaticamente più elevato in differenti aree del globo (Olanda, Germania, Australia, ecc..), arrivando anche a valori del 14%/°C (noto come super-CC).

Il lavoro di Martel et al. (2021), applicando la formulazione sopra riportata alle proiezioni di modelli di circolazione globale, è stato in grado di fornire scenari di cambiamento nelle CPP per l’ultimo ventennio del XXI secolo, evidenziando la semplicità e, contemporaneamente, la robustezza della metodologia proposta. D’altro canto, l’applicazione del medesimo framework a scale spaziali di dettaglio, come per esempio la Sicilia, comporta la necessità di effettuare piccole variazioni alla metodologia proposta. Di fatti, l’utilizzo di modelli climatici globali, caratterizzati da risoluzioni spaziali superiori ai 100 km, autorizza a non interrogarsi sull’influenza di fenomeni tipici delle scale più piccole, come ad esempio le piogge convettive, che, al contrario, non possono essere trascurati a scala regionale, soprattutto in quelle regioni in cui il loro contributo è stato verificato essere importante (Sottile et al., 2021, Treppiedi et al., 2023). Di conseguenza, utilizzare le proiezioni climatiche della precipitazione provenienti da modelli globali e/o regionali, in cui la convezione è parametrizzata e non risolta direttamente, potrebbe comportare forti sottostime e/o elevate incertezze nel calcolo del CC-scaling.

La risoluzione della problematica sopra riportata è stata possibile grazie alla disponibilità dei dati di precipitazione e temperatura registrati dalla rete SIAS (2002 – 2023). In particolare, l’utilizzo delle serie storiche SIAS ha permesso di calcolare il coefficiente CC-scaling non più da proiezioni climatiche ottenute da modelli, bensì da osservazioni dirette, favorendo una maggiore robustezza nelle stime. Ipotizzando che il CC-scaling calcolato per quest’ultimo ventennio sia rappresentativo di tutto il XXI secolo, l’equazione che ha permesso di aggiornare ed estendere le CPP a differenti periodi futuri è la seguente:

$$h_{fut,d,T} = h_{ref,d,T} \cdot \left( \frac{100 + CC_{SIAS}}{100} \right)^{\Delta T} \quad (1)$$

in cui:

- $h_{fut,d,T}$  rappresenta il quantile di pioggia futuro di durata  $d$  e tempo di ritorno  $T$ ;
- $h_{ref,d,T}$  rappresenta il quantile di pioggia di durata  $d$  e tempo di ritorno  $T$  ottenuto dallo studio di regionalizzazione di Forestieri et al. (2018);
- $CC_{SIAS}$  è il coefficiente di scaling ottenuto dal dataset osservato della rete di monitoraggio SIAS nel periodo 2002-2023 e dipendente dalla durata;
- $\Delta T$  rappresenta l’incremento di temperatura tra il periodo di riferimento e il periodo futuro considerato; questo è stato calcolato a partire da un ensemble di 16 modelli regionali (RCM) del progetto EURO-CORDEX come differenza tra la temperatura media in quattro differenti periodi futuri relativi allo scenario RCP8.5 (‘Now’- 2002-2022; ‘Near’ – 2023-2050; ‘Mid’ – 2051-2075; ‘Far’ 2076-2100) e la temperatura media nella baseline storica (1950-2002).

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Il calcolo del CC-scaling è stato effettuato seguendo un approccio largamente utilizzato nella letteratura scientifica (Pumo et al., 2021, Ali et al., 2021) e secondo cui il CC-scaling corrisponde alla pendenza di una retta di regressione dei quantili (Koenker, 2005) nel piano  $T\text{-log}_{10}(P)$ , dove  $T$  e  $P$  indicano, rispettivamente, la temperatura e la precipitazione. Complessivamente, si è potuto disporre dei dati provenienti da 93 stazioni di misura SIAS omogeneamente distribuite su tutto la Sicilia.

I dati di temperatura e umidità sono stati quindi utilizzati per il calcolo della temperatura al punto di rugiada,  $T_{\text{dew}}$ , mediante la formulazione di Magnus (Buck, 1981). L'utilizzo della temperatura di rugiada è preferibile all'utilizzo della temperatura in quanto, come visto in precedenza, l'umidità è una componente fondamentale per spiegare i fenomeni precipitativi, soprattutto a scale temporali dell'ordine dell'ora. Disponendo delle serie orarie di temperatura al punto di rugiada e di precipitazione, per ogni stazione, sono stati inizialmente identificati i 'giorni piovosi', definiti come tutti quei giorni in cui è stata registrata una precipitazione cumulata maggiore di 1 mm, e successivamente estratti i massimi valori di precipitazione, cumulata tramite finestra mobile, per le durate di 10 e 30 minuti e 1, 3, 6 e 12 ore. Infine, ai valori di precipitazione massima prima ottenuti è stata associata la temperatura di rugiada registrata all'inizio dell'evento; così facendo è possibile osservare se la concomitanza di temperature e umidità relative elevate è in grado di spiegare la formazione di eventuali fenomeni di pioggia intensa. Conoscendo, quindi, le coppie dei valori di temperatura di rugiada e precipitazione per le differenti durate è stato possibile effettuare la regressione dei quantili. In particolare, è stato scelto un quantile delle precipitazioni abbastanza elevato (0.99) al fine di considerare come soltanto le piogge più intense possano riscaldarsi con la temperatura. Riportando i valori del CC-scaling in funzione delle diverse durate ed interpolandoli tramite una relazione di potenza, è stato possibile ricavare la legge che, per una qualsiasi durata, fornisce il suddetto coefficiente. Infine, per ogni durata compresa tra 1 e 24 ore a step di 1 ora, i valori del CC-scaling sono stati interpolati spazialmente utilizzando un Ordinary Kriging. Al fine di non creare prodotti con risoluzioni spaziali differenti, è stata utilizzata la stessa griglia fornita dai modelli climatici regionali (circa 10 km di lato). Da quanto ottenuto in questa prima fase, è stato possibile osservare come il CC-scaling relativo alle durate più basse (soprattutto quella oraria), sia ben al di sopra del 7%/°C comunemente riportato in letteratura, arrivando a valori anche prossimi al super-CC, ossia circa 14 %/°C (Lenderink et al., 2011).

Avendo a disposizione le mappe del coefficiente di CC-scaling e le variazioni di temperatura  $\Delta T$  è stato quindi possibile adattare le CPP ai diversi scenari di cambiamento climatico previsti seguendo l'equazione (1). A parità di periodo di riferimento, è stato possibile osservare come le piogge di progetto per le durate più basse aumentino proporzionalmente in modo più repentino. Questo, ovviamente, è dovuto all'effetto del fattore moltiplicativo che tiene conto del CC-scaling e delle variazioni di temperatura. Esaminando, invece, i cambiamenti nelle CPP per fissata durata al variare del periodo di riferimento considerato, è stato possibile osservare come l'incremento sia preponderante soprattutto nello scenario 'Far' (2075 – 2100) in cui, secondo lo scenario RCP8.5, potrebbero essere registrati incrementi della temperatura media fino a 4°C rispetto al periodo di riferimento 1950-2002.

### 4 CONCLUSIONI

È ormai largamente riconosciuto che il cambiamento climatico stia modificando i normali regimi di precipitazione. Queste alterazioni potrebbero avere delle conseguenze importanti sullo strumento cardine utilizzato nella progettazione delle opere idrauliche, ossia le curve di probabilità pluviometrica. Focalizzandosi sul territorio siciliano, è stata applicata una semplice formulazione per tener conto degli effetti dei cambiamenti climatici sulle CPP. Tale metodologia ha permesso di aggiornare le piogge di progetto attualmente utilizzate, e ottenute da un'analisi regionale di frequenza, considerando le variazioni del CC-scaling a differenti durate e le proiezioni nei valori di temperatura media per il XXI secolo. In particolare, è stato osservato come, specialmente alla durata oraria, è probabile che le piogge di progetto possano essere importantemente sottostimate nel futuro. Da un punto di vista più pratico, eventi di pioggia intensa di breve durata più intensi potrebbero portare ad importanti insufficienze delle opere idrauliche attualmente esistenti, specialmente in ambito urbano, e in generale a forti cambiamenti nella risposta idrologica, soprattutto dei bacini caratterizzati da tempi di corrivazione non elevati, portando a eventi di piena più severi e frequenti.

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- Ali, H., Peleg, N., & Fowler, H. J. (2021). Global scaling of rainfall with dewpoint temperature reveals considerable ocean-land difference. *Geophysical Research Letters*, 48(15), e2021GL093798.
- Arnone, E., Pumo, D., Viola, F., Noto, L. V., and La Loggia, G. (2013). Rainfall statistics changes in Sicily. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2449–2458, <https://doi.org/10.5194/hess-17-2449-2013>, 2013
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 20(12), 1527-1532.
- Forestieri A., Lo Conti F., Blenkinsop S., Cannarozzo M., Fowler H.J., Noto L.V., 2018. Regional frequency analysis of extreme rainfall in Sicily (Italy). *International Journal of Climatology*, 38, pp. e698-e716.
- Koenker, R. (2005) *Quantile Regression*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lenderink, G., Mok, H. Y., Lee, T. C., & Van Oldenborgh, G. J. (2011). Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones—Hong Kong and the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 3033-3041.
- Martel, J. L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., & Arsenault, R. (2021). Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10), 03121001.
- Pumo, D., & Noto, L. V. (2021). Exploring the linkage between dew point temperature and precipitation extremes: A multi-time-scale analysis on a semi-arid Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 254, 105508.
- Sottile, G., Francipane, A., Adelfio, G., & Noto, L. V. (2022). A PCA-based clustering algorithm for the identification of stratiform and convective precipitation at the event scale: an application to the sub-hourly precipitation of Sicily, Italy. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(8), 2303-2317.
- Treppiedi, D., Cipolla, G., Francipane, A., & Noto, L. V. (2021). Detecting precipitation trend using a multiscale approach based on quantile regression over a Mediterranean area. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5938–5955. <https://doi.org/10.1002/joc.7161>
- Treppiedi, D., Cipolla, G., & Noto, L. V. (2023). Convective precipitation over a Mediterranean area: From identification to trend analysis starting from high-resolution rain gauges data. *International Journal of Climatology*, 43(1), 293-313.
- Treppiedi D., Cipolla G., Francipane A., Cannarozzo M., Noto L.V. (2023). Investigating the Reliability of Stationary Design Rainfall in a Mediterranean Region under a Changing Climate. *Water*. 2023; 15(12):2245. <https://doi.org/10.3390/w15122245>