

PREDICTION OF FUTURE CLIMATE SCENARIOS FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE BRADANO BASIN AS A CLIMATE CHANGE ADAPTATION MEASURE

PREVISIONE DI SCENARI CLIMATICI FUTURI PER LA GESTIONE SOSTENIBILE DELLE RISORSE IDRICHE NEL BACINO DEL BRADANO COME MISURA DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Silvano Fortunato Dal Sasso^{1*}, Htay Htay Aung¹, Teresa Pizzolla¹, Emanuele Scalcione², Pietro Dichio², Bartolomeo Dichio³

¹ Dipartimento per l'Innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale (DIUSS), Università della Basilicata, via Lanera 20, 75100 Matera (MT)

² ALSIA, Agenzia Lucana di Sviluppo e Innovazione in Agricoltura, via Annunziata 64, 75100 Matera (MT)

³ Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari e Ambientali (DAFE), Università degli Studi della Basilicata, Via dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italia

*silvano.dalsasso@unibas.it

Abstract

The sustainable management of water resources requires a detailed understanding of the water balance under both current conditions and climate change scenarios. Reconstructing the water balance relies on the analysis of meteorological data, climate model projections, the hydromorphological features of the basin, and the assessment of water demand.

This study reconstructs future climate scenarios for the Bradano basin to improve hydrological modeling in line with IPCC recommendations. Using the CHELSA v2.1 dataset, nine Global Climate Models (GCMs) from CMIP6 were evaluated using statistical indices (Taylor diagram and weighted ranking). Four models (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 and HadGEM3-GC31-LL) were selected to drive the HYGRID-M hydrological model. Projections for the period 2025–2050 were used to simulate the water balance components at a spatial resolution of 1 km and on a monthly time scale.

The results indicate a warmer future climate, with a tendency toward drier summer conditions and increased interannual variability in hydrological components, highlighting the need for adaptive water management strategies.

Parole chiave

Cambiamento climatico, bilancio idrologico, stress idrico, scenari climatici futuri

Keywords

Climate change, hydrological balance, water stress, future climate scenarios

Introduzione

Il cambiamento climatico è una delle sfide più urgenti del XXI secolo. I suoi impatti incidono in modo significativo su ambiente, agricoltura, risorse idriche ed economia globale. Le variazioni nei regimi di temperatura e precipitazione stanno generando criticità rilevanti per una gestione efficace delle risorse idriche (Ghafari and Parvishi, 2025). I Modelli Climatici Globali (GCM) del Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (CMIP6) costituiscono lo strumento principale per generare scenari climatici futuri coerenti con le linee guida dell'IPCC. Tuttavia, la loro risoluzione spaziale originaria (tipicamente 100–200 km) risulta inadeguata per applicazioni idrologiche a scala di bacino, dove la topografia complessa e i gradienti orografici giocano un ruolo determinante. Per colmare questo divario, è essenziale ricorrere a tecniche di downscaling ad alta risoluzione.

In questo studio si utilizza il dataset CHELSA v2.1 (Karger et al., 2021, 2023), che fornisce campi di temperatura e precipitazione a risoluzione di 30 arc-secondi (circa 1 km) derivati dai GCM CMIP6. Dataset ad alta risoluzione come CHELSA v2.1 sono stati recentemente utilizzati con successo come riferimento per studi bioclimatici e di

downscaling in Italia meridionale e nel Mediterraneo (Keserci, 2026; Pellicone & Caloiero, 2025; Ferreira-Lera et al., 2025), confermando la loro affidabilità in contesti orograficamente complessi come quelli del Mediterraneo.

L'obiettivo principale del lavoro è valutare l'impatto del cambiamento climatico sulle componenti del bilancio idrologico del bacino del Bradano nel periodo 2025–2050. A tal fine: (i) si è effettuata una selezione oggettiva di nove GCM CMIP6 mediante diagrammi di Taylor e un approccio di ranking pesato multi-metrica; (ii) sono stati scelti i quattro modelli più performanti (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL); (iii) si sono generate proiezioni climatiche sotto tre Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5); (iv) si è applicato il modello idrologico distribuito HYGRID-M (Aung et al., 2026) a risoluzione di 1 km e scala mensile per simulare precipitazione, evapotraspirazione reale, deflusso e deficit idrico. I risultati forniscono indicazioni operative per l'adattamento della gestione dell'invaso di San Giuliano e delle risorse idriche del distretto irriguo.

Materiali e Metodi

Area di studio

L'area di studio è rappresentata dal bacino idrografico del Bradano a monte dell'invaso di San Giuliano, situato nell'Italia meridionale ($40^{\circ}36'50''$ N, $16^{\circ}30'06''$ E), a pochi chilometri a sud della città di Matera (Figura 1). L'invaso, realizzato negli anni Sessanta lungo il fiume Bradano a scopo irriguo, fornisce attualmente risorsa idrica a un'area agricola di oltre 200 km².

Il bacino del San Giuliano presenta un'estensione di circa 1627 km², con un'altitudine variabile tra 96 e 1125 m s.l.m. Dal punto di vista climatico, il bacino è caratterizzato da condizioni tipicamente mediterranee, con precipitazioni concentrate nei mesi autunnali e invernali ed estati calde e secche. Questa marcata stagionalità, unita all'elevata variabilità interannuale delle precipitazioni, determina una forte vulnerabilità a condizioni di stress idrico.

L'uso del suolo è prevalentemente agricolo, con una significativa presenza di colture erbacee e arboree, mentre le aree urbanizzate risultano marginali. Dal punto di vista idrologico, il bacino mostra caratteristiche tipiche dei sistemi semi-aridi, con una limitata generazione di deflusso e una forte incidenza dei processi evaporativi nel bilancio idrico.

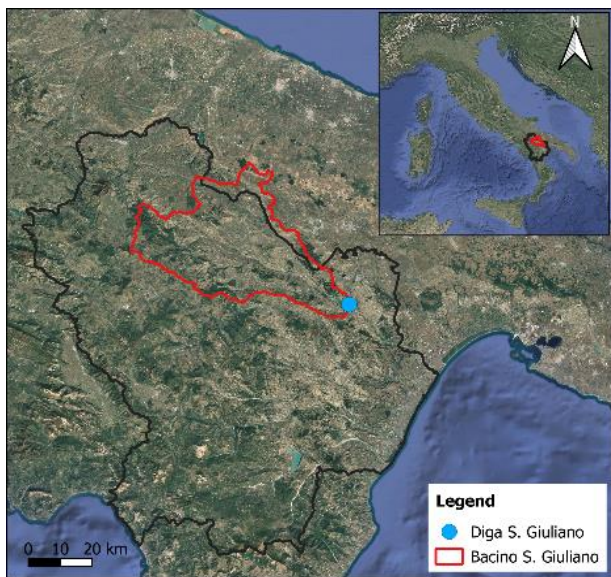


Fig. 1 - Localizzazione del bacino del fiume Bradano a monte dell'invaso di San Giuliano.

Fig. 1 - Location of the Bradano river basin upstream of the San Giuliano reservoir.

Dati CHELSA e scenari climatici

I dati utilizzati derivano da CHELSA v2.1 (Karger et al., 2021), che fornisce output downscalati di temperatura e precipitazione con risoluzione orizzontale di 30 arc-seconds (circa 1 km). L'algoritmo per la temperatura si basa sul downscaling statistico dei campi di temperatura atmosferica, mentre l'algoritmo per la precipitazione integra predittori orografici, tra cui i campi di vento, l'esposizione delle valli e l'altezza dello strato limite atmosferico, seguiti da una procedura di correzione del bias (Karger et al., 2017, 2023). I dati climatici CMIP6, sia storici sia di scenario, downscalati tramite CHELSA sono utilizzati per la selezione dei GCM

secondo il metodo della past performance e per la valutazione degli impatti climatici futuri sulle componenti del bilancio idrico.

Lo studio considera tre scenari SSP (Shared Socioeconomic Pathways), descritti come segue:

- SSP1-2.6 rappresenta lo scenario a basse emissioni, con un riscaldamento globale inferiore a 2 °C entro il 2100.
- SSP3-7.0 rappresenta uno scenario intermedio-alto, con livelli di forcing radiativo elevati con un riscaldamento globale di 4,5-5 °C entro il 2100.
- SSP5-8.5 rappresenta lo scenario ad alte emissioni, con un forcing radiativo pari a circa 8.5 W m⁻² entro il 2100.

Considerato l'elevato numero di Global Climate Models (GCM) disponibili, l'individuazione dei modelli più idonei per analisi a scala di bacino o regionale rappresenta un passaggio fondamentale. In questo studio sono stati selezionati nove GCM CMIP6 sulla base di applicazioni precedenti e di valutazioni prestazionali riferite all'Europa e all'area del Mediterraneo (Masson and Knutti, 2011; Dubrovsky et al., 2015; Palmer et al., 2023). I dati climatici ad alta risoluzione derivati da CHELSA nello scenario storico sono stati validati utilizzando come riferimento i dati meteorologici osservati raccolti dalle reti del Centro Funzionale della Protezione Civile (CFD) e di ALSIA, comprendenti stazioni pluviometriche e termometriche distribuite sul bacino del Bradano. I dati osservati sono stati spazializzati mediante il metodo dei poligoni di Thiessen per consentire un confronto coerente e verificare l'affidabilità dei dati CHELSA per le successive applicazioni idrologiche.

Prestazioni nel periodo storico

Nell'approccio della past performance, i Global Climate Models (GCM) vengono selezionati in funzione della loro capacità di riprodurre le condizioni climatiche storiche. L'assunzione è che i modelli più accurati nella simulazione del clima passato possano fornire proiezioni future più affidabili. In questo contesto, le variabili climatiche simulate negli esperimenti storici vengono confrontate con i dati osservati per valutare la capacità dei modelli di rappresentare le condizioni climatiche reali.

La selezione dei GCM si articola in due fasi principali: (i) valutazione e (ii) ranking. Nella prima fase, la valutazione delle prestazioni viene condotta tramite il diagramma di Taylor, che fornisce una rappresentazione sintetica di tre metriche statistiche: coefficiente di correlazione di Pearson (R), la deviazione standard (SD) e la radice dell'errore quadratico medio (RMSE). Questo approccio consente una valutazione integrata delle prestazioni dei diversi modelli. Nella seconda fase viene applicato un approccio di ranking pesato per classificare i GCM. A tal fine vengono considerati diversi indicatori statistici di performance, tra cui: errore assoluto medio (MAE), RMSE, bias percentuale (PBIAS), rapporto tra deviazioni standard (rSD), efficienza di Nash-Sutcliffe (NSE), indice di accordo (d), coefficiente di persistenza (cp), coefficiente di correlazione (CC), coefficiente di determinazione (R²) ed efficienza di Kling-Gupta (KGE). I valori di ciascun indicatore sono

normalizzati nell'intervallo 0–1 e successivamente aggregati per ottenere un punteggio complessivo per ciascun modello.

Modello idrologico HYGRID-M

Il modello HYGRID-M è stato sviluppato alla scala del Distretto Idrografico (RBD), con risoluzione spaziale di 1 km e temporale mensile, implementando l'approccio del modello BIGBANG (Braca and Ducci, 2018) in combinazione con il modello di bilancio idrico mensile di Thornthwaite (McCabe and Markstrom, 2007; Thornthwaite, 1948).

Sviluppato in ambiente Python, il modello è progettato per simulare i principali processi idrologici, tra cui la fusione nivale, l'evapotraspirazione reale (AET), il deflusso (Q), il surplus (S) e il deficit idrico (DF) alla scala della singola cella di griglia, integrando dati climatici quali precipitazione, temperatura dell'aria e caratteristiche di umidità del suolo. L'equazione di governo del modello è basata sul bilancio di massa, espresso per il mese i -esimo come segue:

$$P_i - AET_i - Q_i = \Delta ST_i$$

dove P_i rappresenta la precipitazione totale, AET_i è l'evapotraspirazione reale, Q_i è il deflusso superficiale, ΔST_i è la variazione della riserva idrica nel suolo.

Il modello considera esplicitamente l'eterogeneità spaziale della capacità di immagazzinamento dell'umidità del suolo e le variazioni temporali dell'uso del suolo. L'evapotraspirazione è stimata mediante l'equazione di Hargreaves (HE), utilizzando un coefficiente calibrato a livello regionale per l'Italia meridionale, al fine di calcolare l'evapotraspirazione di riferimento ETo (Mendicino and Senatore, 2013).

Risultati e Discussione

Selezione dei GCM

Le variabili climatiche osservate nel bacino del Bradano, in particolare precipitazione e temperatura media, sono stati confrontati con i corrispondenti dati simulati dai GCM, al fine di valutare le prestazioni mediante il diagramma di Taylor e un approccio di ranking pesato. I diagrammi di Taylor relativi a entrambe le variabili (Figura 2a, b) evidenziano la capacità dei diversi modelli di riprodurre i pattern osservati di precipitazione e di temperatura media. In particolare, i modelli MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4 e IPSL-CM6A-LR risultano più prossimi ai valori osservati per la precipitazione, mentre per la temperatura media tutti i GCM mostrano prestazioni complessivamente soddisfacenti.

Fig. 2 - Diagrammi di Taylor che mostrano le prestazioni di nove GCM rispetto ai dati osservati: (a) precipitazione e (b) temperatura media.

Fig. 2 - Taylor diagrams showing the performance of nine GCMs compared with observed data: (a) precipitation and (b) mean temperature.

Sulla base dei risultati ottenuti con l'approccio di ranking, quattro modelli GCM - CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL - sono stati selezionati per le successive simulazioni finalizzate alla valutazione della disponibilità idrica futura (Figura 3).

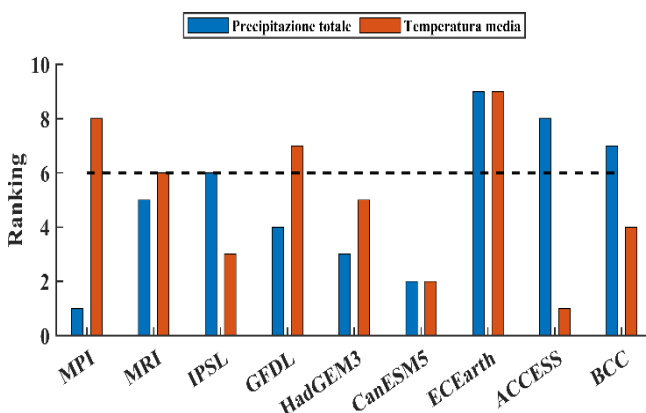


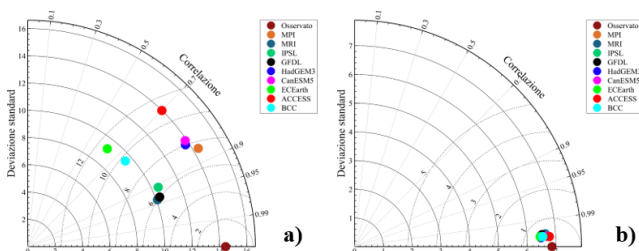
Fig. 3 - Punteggi normalizzati del ranking pesato per i nove GCM CMIP6 considerati.

Fig. 3 - Normalized weighted ranking scores for the nine CMIP6 GCMs considered.

Dati climatici

La Figura 4 mostra i cicli stagionali di precipitazione e temperatura nel periodo 2025–2050, combinando i dati osservati (2000–2014) con le proiezioni future (2025–2050) derivate dal modello CanESM5 nello scenario SSP5-8.5. La precipitazione media mensile (Figura 4a) evidenzia una marcata stagionalità, con valori più elevati nei mesi autunnali e invernali (novembre–febbraio) e condizioni più secche durante l'estate (giugno–agosto). Nel periodo futuro si osserva una sostanziale conferma del ciclo stagionale, accompagnata da una maggiore variabilità interannuale e da una tendenza verso condizioni più secche nei mesi estivi, con episodi isolati di precipitazioni intense.

La temperatura media mensile (Figura 4b) mostra un ciclo stagionale ben definito, con minimi in inverno e massimi in estate. Rispetto al periodo osservato, le proiezioni indicano un aumento sistematico delle temperature in tutti i mesi, con un riscaldamento più marcato durante la stagione estiva. Tale andamento evidenzia una chiara tendenza al riscaldamento, pur mantenendo invariata la struttura stagionale.



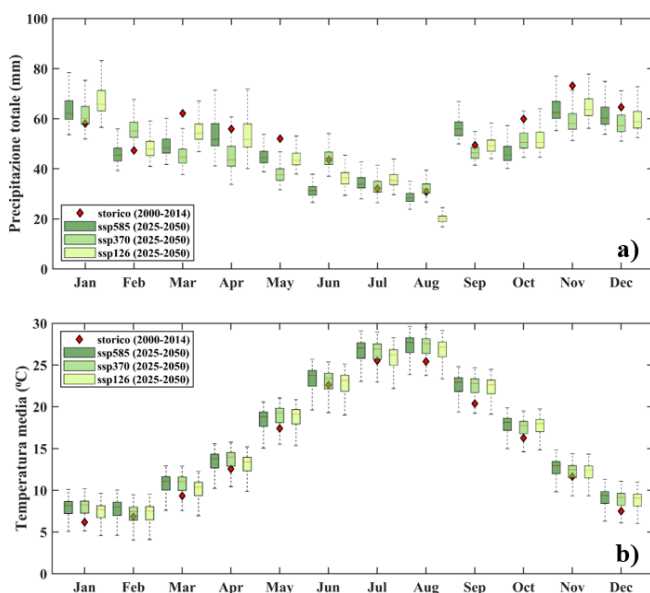


Fig. 4 - Cicli stagionali di (a) precipitazione totale e (b) temperatura media per il periodo 2025–2050.

Fig. 4 - Seasonal cycles of (a) total precipitation and (b) mean temperature for the period 2025–2050.

Componenti del bilancio idrologico

Il modello HYGRID-M è stato applicato per simulare le componenti del bilancio idrologico nel periodo 2025–2050 utilizzando i dati climatici dei GCM selezionati (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL) nei tre scenari SSP1-2.6, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Il modello è stato preventivamente calibrato mediante confronto tra portate osservate e simulate, individuando un valore ottimale del coefficiente di deflusso pari a $\beta = 0,5$.

Le simulazioni mostrano che la precipitazione (P) è caratterizzata da una marcata variabilità interannuale in tutti gli scenari, con una tendenza a una maggiore dispersione nei casi a più alte emissioni. L'evapotraspirazione reale (AET) risulta fortemente correlata alla disponibilità idrica, evidenziando un comportamento coerente con l'andamento della precipitazione. Il deflusso (Q), invece, rappresenta una componente relativamente limitata del bilancio idrologico, con incrementi episodici associati agli anni più piovosi. La Figura 5 mostra le componenti del bilancio idrologico simulate dal modello CanESM5, utilizzato come modello rappresentativo per descrivere il comportamento generale osservato nei GCM selezionati.

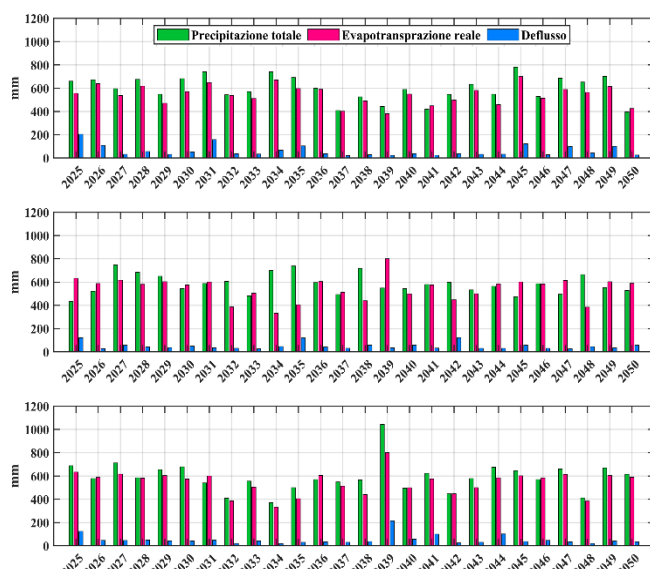


Fig. 5 - Componenti annuali del bilancio idrologico simulate con il modello HYGRID-M per il periodo 2025–2050 nei tre scenari futuri basati sul modello CanESM5.

Fig. 5 - Annual water balance components simulated by the HYGRID-M model for the period 2025–2050 under three future scenarios based on CanESM5.

Nel complesso, gli scenari SSP3-7.0 e SSP5-8.5 mostrano una maggiore variabilità delle componenti del bilancio idrologico rispetto allo scenario SSP1-2.6, senza tuttavia evidenziare incrementi sistematici del deflusso. Questo comportamento conferma la natura del bacino del Bradano, caratterizzato da condizioni prossime a quelle dei sistemi semi-aridi, in cui i processi evaporativi dominano il bilancio idrico.

L'analisi spaziale delle componenti del bilancio idrologico evidenzia una marcata eterogeneità all'interno del bacino. Il deflusso (Q) assume valori generalmente bassi su gran parte dell'area, mentre valori relativamente più elevati si riscontrano in aree limitate e in condizioni idro-climatiche più favorevoli. L'evapotraspirazione (AET), al contrario, presenta valori più elevati nelle porzioni occidentali e sud-occidentali del bacino e valori inferiori nelle aree centrali e orientali.

Le proiezioni future indicano anomalie prevalentemente negative del deflusso in tutti gli scenari, con maggiore intensità nelle condizioni di emissioni elevate. Anche l'AET mostra una tendenza generale alla riduzione, sebbene con variazioni tra i modelli. Nel complesso, emerge un segnale coerente di diminuzione della disponibilità idrica futura, associato a un aumento della variabilità climatica e della domanda evaporativa.

Conclusioni

La disponibilità idrica futura nel bacino del Bradano è stata valutata mediante il modello HYGRID-M, alimentato da dati climatici CMIP6 derivati da CHESLA. La valutazione preliminare delle prestazioni dei GCM, effettuata mediante

diagrammi di Taylor e ranking pesato, ha evidenziato una buona capacità dei modelli di riprodurre i dati osservati, con coefficienti di correlazione elevati, pur in presenza di alcune differenze nella variabilità. Tale analisi ha consentito la selezione di quattro GCM (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL) per le simulazioni future.

I risultati evidenziano una marcata variabilità delle componenti del bilancio idrologico, con una risposta dominata da precipitazione ed evapotraspirazione e un contributo limitato del deflusso. Gli scenari a maggiori emissioni mostrano una riduzione del deflusso e un aumento della variabilità, indicando una diminuzione della disponibilità idrica futura.

I risultati mostrano un segnale coerente di incremento dello stress idrologico nel bacino, che sottolinea la necessità di strategie di gestione adattiva delle risorse idriche.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato dal progetto “*Ecosistema TECH4YOU – Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement—Missione 4 Componente 2 Investimento 1.5 NextGenerationEU*” ECS00000009 CUPC43 C22000400006—PP 3.3.1 SMART WATER

Bibliografia

- Aung, H. H., Sileo, B., Fiorentino, M., Dal Sasso, S. F., 2026. A Grid-Based Hydrological Balance Model for Water Management at River Basin District Scale. Catena, in press.
- Braca, G. and D. Ducci, 2018. Development of a GIS based procedure (BIGBANG 1.0) for evaluating groundwater balances at national scale and comparison with groundwater resources evaluation at local scale. In *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*, pp. 53–61. Springer.
- Dubrovsky, M., M. Trnka, I. P. Holman, E. Svobodova, and P. A. Harrison, 2015. Developing a reduced-form ensemble of climate change scenarios for Europe and its application to selected impact indicators. *Climatic Change* 128 (3), 169–186.
- Ghafari, L. and A. Parvishi, 2025. Climate projection and drought assessment in the lake Urmia basin using LSTM-based downscaling of GCM models under SSP scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 104134.
- Karger, D. N., Y. Chauvier, and N. E. Zimmermann, 2023. chelsa-cmip6 1.0: a python package to create high resolution bioclimatic variables based on CHELSA ver. 2.1 and CMIP6 data. *Ecography*, 2023 (6): e06535.
- Karger, D. N., O. Conrad, J. Böhner, T. Kawohl, H. Kreft, R. W. Soria-Auza, N. E. Zimmermann, H. P. Linder, and M. Kessler, 2017. Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. *Scientific data* 4 (1), 1–20.
- Karger, D. N., S. Lange, C. Hari, C. P. Reyer, and N. E. Zimmermann, 2021. CHELSA-W5E5 v1.0: W5E5 v1.0 downscaled with CHELSA v2.0.
- Keserci, F., 2026. Comparative Performance of Global Datasets and Ground-Based Precipitation and Temperature Products in the Eastern Mediterranean Basin: The Case of Türkiye. *International Journal of Climatology*, 46: e7076.
- Masson, D. and R. Knutti, 2011. Climate model genealogy. *Geophysical Research Letters*, 38 (8).

- McCabe, G. J. and S. L. Markstrom, 2007. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Technical report, US Geological Survey.
- Mendicino, G., Senatore, A., 2013. Regionalization of the Hargreaves coefficient for the assessment of distributed reference evapotranspiration in southern Italy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (5): 349–362.
- Palmer, T. E., C. F. McSweeney, B. B. Booth, M. D. Priestley, P. Davini, L. Brunner, L. Borchert, and M. B. Menary, 2023. Performance-based sub-selection of CMIP6 models for impact assessments in Europe. *Earth System Dynamics* 14 (2), 457–483.
- Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38 (1), 55–94.