AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS CLIMÁTICOS DO CMIP6 NA REPRESENTAÇÃO DE SECAS NA BACIA DO RIO CAPIBARIBE

Vanine E. Menezes de Farias[1] ; Richarde Marques da Silva [2] & Suzana M. Gico L. Montenegro [3]

RESUMO – Este estudo avaliou o desempenho de 10 modelos climáticos do CMIP6 (MRI-ESM2, EC-EARTH3, CMCC-ESM2, INM-CM4-8, NorESM2-MM, MPI-ESM1.2-HR, INM-CM5, ACCESS-ESM1-5, IPSL-CM6A e MIROC6) na representação de secas na Bacia do Rio Capibaribe, em Pernambuco. A caracterização das secas foi realizada com o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) em múltiplas escalas temporais (6, 12, 24 e 48 meses), avaliada por métricas estatísticas (R, RB, MSE, RMSE, Kd e Kp). Os resultados indicam que a acurácia melhora em escalas temporais mais longas (SPI-24 e SPI-48). O MIROC6 obteve o melhor desempenho geral, enquanto INM-CM5, CMCC-ESM2 e ACCESS-ESM1-5 apresentaram menor precisão. Projeções futuras (SSP2–4.5 e SSP5–8.5) indicam divergência espacial: áreas costeiras deverão enfrentar secas de curta duração mais frequentes, enquanto regiões interioranas deverão experenciar eventos multianuais mais prolongados e intensos. Esses resultados fornecem base para estratégias de gestão hídrica frente às mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Seca; SPI; Mudanças Climáticas; CMIP6.

ABSTRACT– This study evaluated the performance of ten CMIP6 climate models (MRI-ESM2, EC-Earth3, CMCC-ESM2, INM-CM4-8, NorESM2-MM, MPI-ESM1.2-HR, INM-CM5, ACCESS-ESM1-5, IPSL-CM6A, and MIROC6) in representing drought conditions in the Capibaribe River Basin, Pernambuco, Brazil. Drought characterization was performed using the Standardized Precipitation Index (SPI) at multiple temporal scales (6, 12, 24, and 48 months), and model performance was assessed through statistical metrics (R, RB, MSE, RMSE, Kd, Kp). The results indicate that model accuracy improves at longer temporal scales (SPI-24 and SPI-48). MIROC6 exhibited the best overall performance, whereas INM-CM5, CMCC-ESM2, and ACCESS-ESM1-5 showed lower accuracy. Future projections under the SSP2–4.5 and SSP5–8.5 scenarios reveal significant spatial variability: coastal areas are expected to experience more frequent short-term droughts, while inland regions are projected to face longer-lasting and more intense multi-year drought events. These findings provide valuable support for the development of water resources management strategies aimed at enhancing climate change adaptation and resilience.

Keywords: Drought; SPI; Climate Change; CMIP6.

[1]) Professora da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Sertão, Avenida Agamenon Magalhães, nº 619, Centro, Sertânia – PE. vanine.menezes@ufpe.br
[2]) Professor Associado II do Departamento de Geociências/CCEN/UFPB. Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco, João Pessoa – PB. richarde@geociencias.ufpb.br
[3]) Professora Titular da Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cid. Universitária, Recife – PE, suzanam.ufpe@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A seca é um dos desastres naturais mais recorrentes e impactantes do mundo, com grandes efeitos sobre o ambiente, a economia e os meios de subsistência humanos (Zhao e Dai, 2022). No Brasil, a região Nordeste foi historicamente marcada por secas severas e multianuais, com destaque para o evento de 2012–2016, que afetou cerca de 33,4 milhões de pessoas e gerou perdas econômicas estimadas em US$ 30 bilhões (Marengo et al., 2018).

De acordo com o Sexto Relatório do IPCC (2022), a frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos tendem a aumentar, com cenários de redução de precipitação de até 22% no Nordeste brasileiro (IPCC, 2014). Nesse contexto, a avaliação da capacidade dos modelos climáticos globais (MCGs) em reproduzir padrões históricos de seca é etapa fundamental para a credibilidade das projeções futuras e para o planejamento de recursos hídricos (Raju e Kumar, 2020).

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) é a principal fonte de projeções climáticas globais. A geração mais recente, CMIP6, incorpora cenários socioeconômicos atualizados (SSPs) e melhorias na representação de processos físicos. Apesar disso, os modelos frequentemente apresentam desvios sistemáticos (vieses) em relação a observações locais (Teutschbein e Seibert, 2012), tornando a avaliação e correção de vieses imprescindível.

O Índice de Precipitação Padronizada (SPI), proposto por McKee et al. (1993), é um dos índices de seca mais utilizados, pois se baseia exclusivamente em séries de precipitação e permite comparações entre regiões de diferentes regimes climáticos. A bacia do Rio Capibaribe, localizada em Pernambuco e com área de 7.454 km², atravessa um gradiente climático acentuado, do semiárido da Caatinga (precipitação ~600–700 mm/ano) até a zona úmida da Mata Atlântica (~2.400 mm/ano), constituindo um laboratório natural robusto para avaliação de modelos climáticos.

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de 10 modelos CMIP6 na representação de secas meteorológicas na bacia do Rio Capibaribe e projetar características futuras de seca sob os cenários SSP2–4.5 e SSP5–8.5.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A Bacia do Rio Capibaribe está localizada no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil, com área de aproximadamente 7.454 km², correspondendo a cerca de 7,58% do território pernambucano. A bacia estende-se desde suas nascentes na região semiárida até a foz no Oceano Atlântico, abrangendo uma população de aproximadamente 1,71 milhão de habitantes, dos quais 0,76 milhão residem em Recife, capital do estado (Ribeiro Neto et al., 2014).

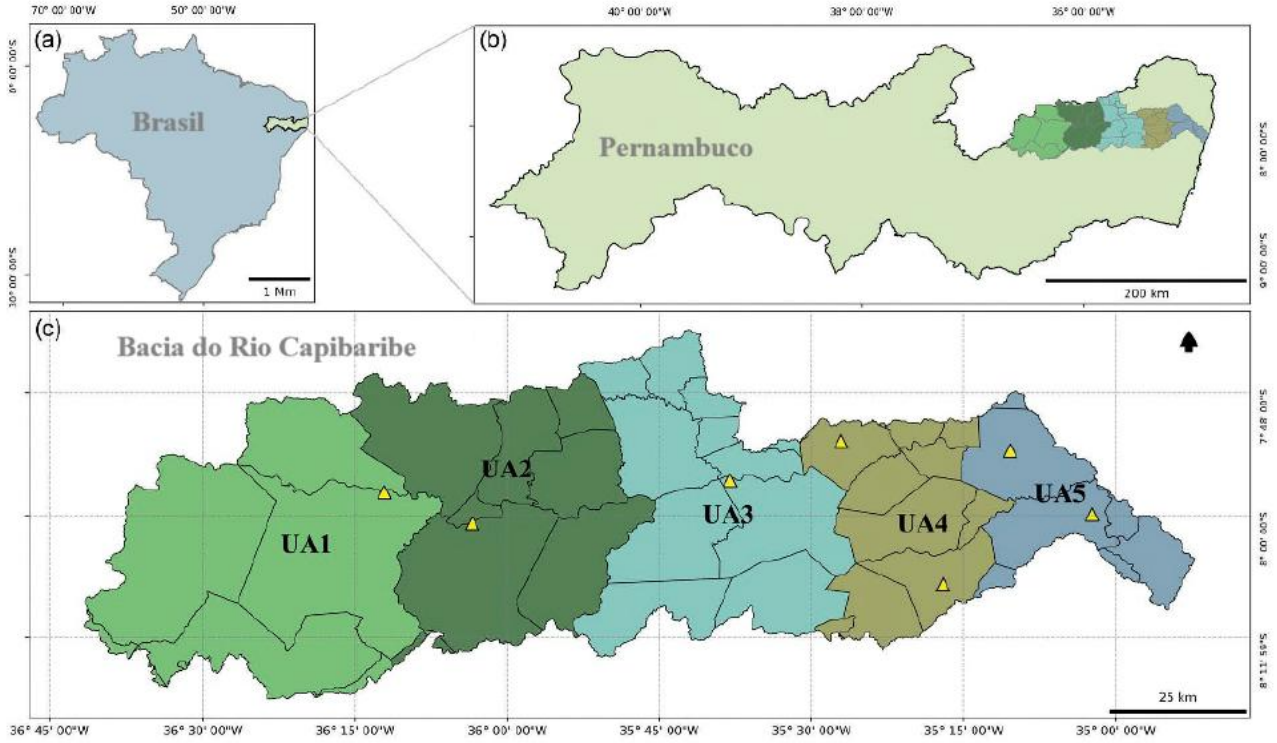


Figura 1 – Localização geográfica da bacia do rio Capibaribe no Brasil e no estado de Pernambuco, destacando a subdivisão em unidades de análise (UA1, UA2, UA3, UA4) e a Região Metropolitana do Recife (RMR).

A bacia apresenta um pronunciado gradiente climático e ecológico ao longo de seu curso, constituindo um laboratório natural para avaliação de modelos climáticos. As nascentes estão inseridas no bioma Caatinga, no semiárido, com precipitação média anual de 600–700 mm, enquanto a foz está situada na zona úmida da Mata Atlântica, com precipitação de aproximadamente 2.400 mm/ano. O período mais seco ocorre tipicamente entre setembro e março, com aumento das chuvas no sentido oeste–leste. Para fins de gestão, a bacia é subdividida em quatro Unidades de Análise (UA1 a UA4) e a Região Metropolitana do Recife (RMR), agrupadas com base em características hidrológicas, climatológicas e socioeconômicas (Pernambuco, 2010).

2.2 Dados

Foram utilizados dados de 10 MCGs disponibilizados pela plataforma CLIMBra (Ballarin et al., 2023), que fornece projeções para 735 bacias brasileiras com resolução espacial de 0,25° × 0,25°. O conjunto inclui simulações históricas (1980–2013) e projeções futuras (2015–2100) para os cenários SSP2–4.5 e SSP5–8.5. Para o estudo, foram baixados os dados na forma bruta, sem correção de viés, apenas aproveitando a reamostragem espacial. Como referência observacional, foram utilizados dados do BR-DWGD (Xavier et al., 2016), com resolução diária e espacial de 0,25° × 0,25°, cobrindo o período 1980–2010.

2.3 Correção de Viés e Cálculo do SPI

A correção de viés foi realizada pelo método de Mapeamento por Quantis (QM), amplamente utilizado para ajuste de saídas de MCGs (Shrestha et al., 2017), implementado no ambiente RStudio com o pacote *qmap* (Gudmundsson, 2014). O SPI foi calculado em quatro escalas temporais, de 6, 12, 24 e 48 meses, representando secas de curto, médio e longo prazo. Os valores de SPI foram classificados em nove categorias de severidade, de extremamente seco (SPI ≤ –2,0) a extremamente úmido (SPI ≥ 2,0).

2.4 Avaliação do Desempenho dos Modelos

O desempenho de cada modelo foi avaliado por dois grupos de métricas: (a) métricas baseadas nos valores de SPI ao longo do tempo: coeficiente de correlação de Pearson (R), viés relativo (VR), erro quadrático médio (EQM) e raiz do EQM (REQM); e (b) métricas baseadas na concordância de categorias de severidade: coeficiente de concordância de Kendall (Kd) e índice Kappa (Kp). A seleção do melhor modelo priorizou desempenho consistente em R e Kd para SPI-24 e SPI-48, por representarem os padrões de seca de longo prazo, foco principal das projeções.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir sintetizam os principais achados deste estudo. Análises detalhadas, incluindo todas as figuras, cálculos, estatísticas espaciais e discussões aprofundadas, estão disponíveis no artigo completo: Farias et al. (2026): "Comprehensive assessment of climate model performance in representing drought dynamics at catchment scale", publicado no *Hydrological Sciences Journal* (DOI: https://doi.org/10.1080/02626667.2026.2676091).

3.1 Seca Histórica na bacia do Rio Capibaribe (1980–2013)

A análise do SPI histórico (Figura 2) revelou que secas de curta duração (SPI-6) são as mais frequentes em todas as Unidades de Análise (UAs). Na UA1, situada no semiárido, foram identificados 24 eventos com duração média de 7,2 meses. À medida que a escala temporal aumenta, os eventos tornam-se menos frequentes, porém mais prolongados, na UA1, SPI-12 e SPI-24 registraram duração média de 41,8 meses, evidenciando a vulnerabilidade do semiárido a secas multianuais. Nas áreas mais úmidas (UA4 e RMR), próximas ao litoral, as secas são menos intensas e de menor duração, com eventos de SPI-48 atingindo no máximo 14,6 meses.

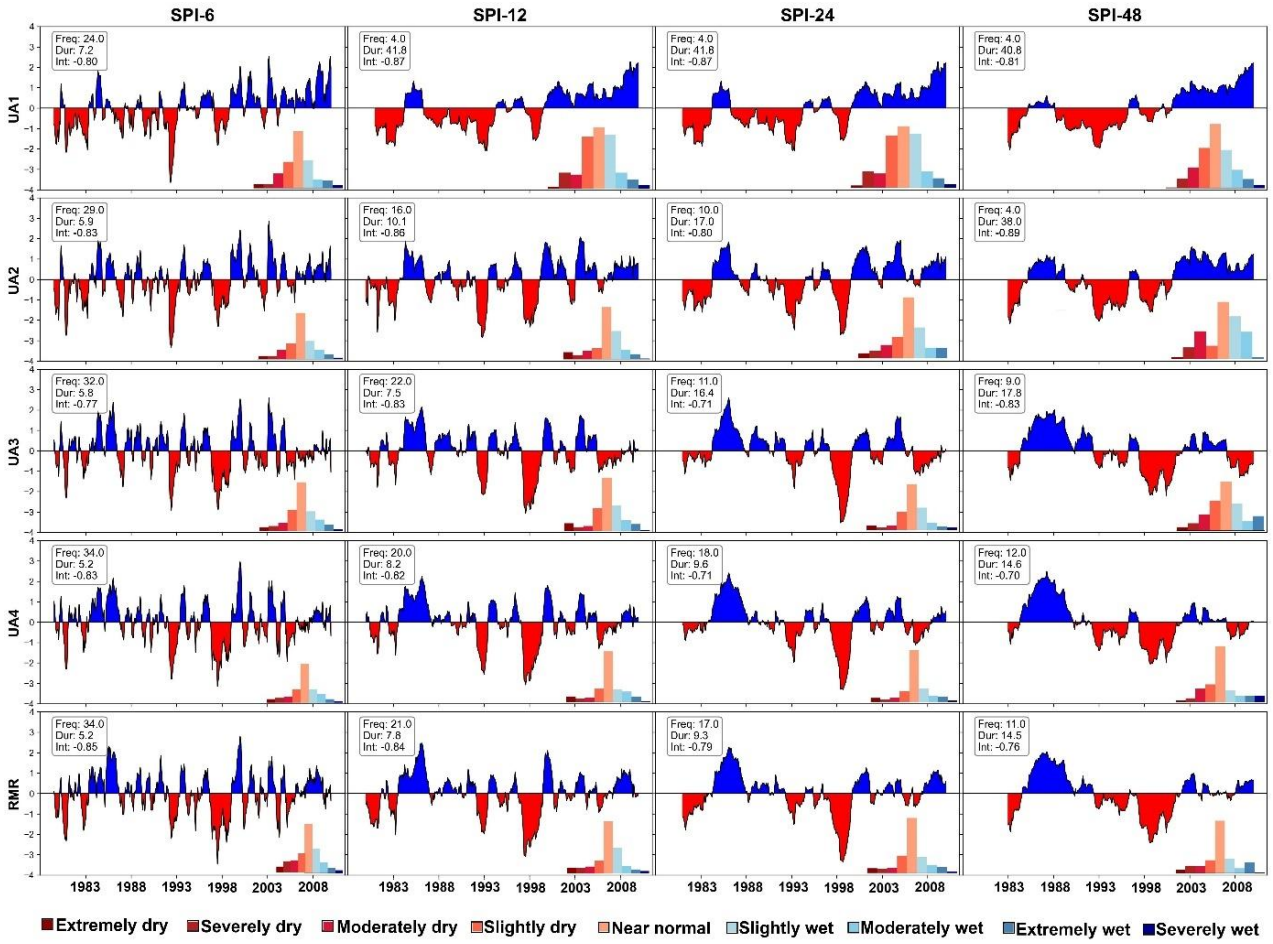


Figura 2 – Índice de seca para o período histórico na bacia do rio Capibaribe: escalas de tempo de 6, 12, 24 e 48 meses.

3.2 Desempenho dos Modelos na Linha de Base

Todos os modelos apresentaram baixa correlação nas escalas curtas (SPI-6 e SPI-12), com melhora progressiva para SPI-24 e SPI-48. Esse comportamento é esperado e documentado na literatura: os MCGs são fundamentalmente projetados para capturar padrões de larga escala e climatologias de longo prazo, tendo dificuldade em simular a variabilidade precipitação de curto prazo (Papalexiou et al., 2021). Para SPI-48, o MIROC6 obteve R de 0,64 na UA2 e Kd de 0,80 na mesma unidade. Em contraste, INM-CM5, CMCC-ESM2 e ACCESS-ESM1-5 apresentaram EQM superiores a 2,5 nas regiões secas, indicando vieses expressivos na representação da variabilidade de precipitação nessas zonas.

A Tabela 1 sintetiza o ranking dos modelos para SPI-48 (média da bacia). O MIROC6 ocupou a primeira posição em todas as métricas avaliadas, resultado consistente com avaliações em outras regiões tropicais (Monteverde et al., 2022; Li et al., 2022). Seu melhor desempenho é atribuído, em parte, a melhorias na microfísica de nuvens, na parametrização de convecção rasa e no acoplamento oceano–atmosfera (Tatebe et al., 2019).

Tabela 1 – Ranking dos modelos CMIP6 para SPI-48 (média da bacia).

Modelo	R	Kd	MSE	RMSE	Ranking
MIROC6	0,466	0,740	1,067	1,027	1º
NorESM2-MM	0,363	0,694	1,274	1,108	2º
INM-CM4-8	0,236	0,671	1,523	1,228	3º
MRI-ESM2	0,211	0,622	1,579	1,228	4º
EC-EARTH3	0,124	0,625	1,752	1,257	5º
MPI-ESM1.2-HR	0,099	0,600	1,802	1,324	6º
IPSL-CM6A	0,082	0,585	1,835	1,340	7º
ACCESS-ESM1-5	0,000	0,530	2,432	1,351	8º
CMCC-ESM2	0,000	0,430	2,369	1,512	9º
INM-CM5	0,000	0,340	2,800	1,673	10º

3.3 Projeções Futuras de Seca (2015–2100)

As projeções com o MIROC6 revelam três padrões críticos para o século XXI: (1) divergência espacial e temporal, enquanto o setor costeiro (RMR e UA4) apresenta maior frequência de eventos de curta duração (SPI-6 e SPI-12), as regiões interioranas (UA1 e UA2) mostram transição para eventos menos frequentes, porém mais prolongados (SPI-24 e SPI-48); (2) o cenário SSP5–8.5 atua como catalisador de persistência de secas onde, no interior semiárido, eventos SPI-48 podem atingir até 40 meses de duração em meados do século; e (3) uma transição sistemática em relação ao histórico, com redução do número absoluto de eventos, compensada por aumento expressivo na duração e intensidade.

A Tabela 2 sintetiza as características projetadas de seca para os dois cenários. No cenário SSP5–8.5, as secas SPI-48 no litoral atingem intensidades de –1,15 no longo prazo (2075–2100), indicando que futuras secas tendem a ser mais persistentes e severas sob emissões não mitigadas.

Tabela 2 – Síntese das projeções de seca para a BACIA DO RIO CAPIBARIBE (2015–2100)

Cenário	Escala	Freq/Dur (meses) Interior AU1/AU2	Intensidade Interior	Freq/Dur (meses) Litoral AU4/RMR	Intensidade Litoral
SSP2–4.5	SPI-6	14–17 / 10,8–12,2	–0,79 a –0,85	22–27 / 7,4–9,0	–0,70 a –0,71
	SPI-12	12–15 / 12,2–14,1	–0,84 a –0,92	12–20 / 8,5–13,5	–0,73 a –0,93
	SPI-24	7–9 / 15,7–24,4	–0,75 a –0,82	7–9 / 18,9–25,0	–0,68 a –0,81
	SPI-48	7–9 / 15,7–24,1	–0,62 a –0,93	3–12 / 15,3–53,7	–0,63 a –0,67
SSP5–8.5	SPI-6	15–20 / 9,8–12,4	–0,71 a –0,83	16–25 / 7,8–10,6	–0,71 a –0,85

	SPI-12	11–18 / 12,8–17,9	–0,72 a –0,79	11–17 / 8,9–17,0	–0,72 a –0,89
	SPI-24	8–11 / 15,4–20,0	–0,75 a –0,82	6–13 / 13,8–23,8	–0,71 a –0,92
	SPI-48	4–8 / 14,1–40,2	–0,66 a –0,93	4–7 / 23,5–41,5	–0,79 a –1,15

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou 10 modelos CMIP6 na representação de secas meteorológicas na Bacia do Rio Capibaribe, com os seguintes achados principais:

(i) O desempenho dos modelos é escala-dependente: a acurácia é baixa para SPI-6 e SPI-12, melhorando significativamente para SPI-24 e SPI-48, indicando maior capacidade de representar secas prolongadas associadas a déficits acumulados de precipitação.

(ii) O MIROC6 foi identificado como o modelo de melhor desempenho, com os maiores valores de R e Kd e menores EQM e REQM para SPI-48, especialmente nas regiões mais úmidas da bacia. INM-CM5, CMCC-ESM2 e ACCESS-ESM1-5 apresentaram desempenho consistentemente inferior, com dificuldades na representação da variabilidade de precipitação nas zonas mais áridas.

(iii) As projeções futuras indicam divergência espacial na bacia: o litoral deverá enfrentar maior frequência de secas de curta duração, enquanto o interior semiárido tenderá a eventos menos frequentes, porém mais prolongados e intensos. O cenário SSP5–8.5 projeta cenários substancialmente piores, com secas SPI-48 podendo ultrapassar 40 meses de duração no interior e atingir intensidades de –1,15 no litoral ao final do século.

Esses resultados fornecem embasamento científico para o desenvolvimento de estratégias de gestão hídrica adaptativa na bacia, orientando tanto investimentos em infraestrutura de armazenamento hídrico no semiárido quanto políticas de diversificação da matriz hídrica urbana no litoral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FACEPE pelo apoio à pesquisa e pela bolsa de pós-graduação, e à CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa de Doutorado Sanduíche concedida no âmbito do Programa de Internacionalização Institucional (PRINT). Agradecemos também ao CNPq pelos projetos INCT – Observatório Nacional para Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa [Proc. 406919/2022-4], CNPq/MCTIC/BRICS 29/2017 [Proc. 442335/2017.2] e Universal MCTIC/CNPq 28/2018 [Proc. 431980/2018-7]. E ao Núcleo de Estudos de Recursos Hídricos do Semiárido (NERHIS).

REFERÊNCIAS

BALLARIN, A.S. et al. (2023). CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. Scientific Data, 10(1), 1–31.

FARIAS, V. E. M. et al. (2026). Comprehensive assessment of climate model performance in representing drought dynamics at catchment scale. Hydrological Sciences Journal. DOI: 10.1080/02626667.2026.2676091

GUDMUNDSSON, L. (2014). Qmap: statistical transformations for post-processing climate model output. R package version.

IPCC (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, 305 p.

LI, et al. (2022). Assessment of CMIP6 precipitation performance in the Huaihe River Basin. Journal of Hydrology.

MARENGO, J.A. et al. (2018). Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 90(2), 1973–1985.

McKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 179–184.

MONTEVERDE, C. et al. (2022). CMIP6 performance in different zones of the Amazon Basin. Climate Dynamics.

PAPALEXIOU, S.M. et al. (2021). Probabilistic evaluation of drought in CMIP6 simulations. Earth's Future, 9(10).

PERNAMBUCO. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos (2010). Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. Tomo I – Diagnóstico Hidroambiental. Recife.

RAJU, K.S.; KUMAR, D.N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. Journal of Water and Climate Change, 11(3), 577–599.

SHRESTHA, M.; ACHARYAA, S.C.; SHRESTHA, P.K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling. Meteorological Applications, 24(3), 531–539.

TATEBE, H. et al. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state in MIROC6. Geoscientific Model Development, 12(7), 2727–2765.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies. Journal of Hydrology, 456-457, 12–29.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). International Journal of Climatology, 36(6), 2644–2659.

ZHAO, T.; DAI, A. (2022). CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes in the 21st century. Journal of Climate, 35(3), 897–921.