

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CORREÇÃO DE TENDÊNCIA EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS SIMULADOS PELOS MODELOS HADGEM3 E MIROC6 PARA A BACIA DO ALTO IPANEMA, NORDESTE DO BRASIL

Aline Maria Soares das Chagas¹; Carlyne Wanessa Lins de Andrade Farias²; Abelardo Antônio Assunção Montenegro³ & Thayná Alice Brito Almeida⁴

Abstract: Climate change has intensified extreme events, such as droughts and intense rainfall, especially in vulnerable regions such as the semiarid region of Brazil. Projections from CMIP6 indicate a significant increase in global temperature and changes in precipitation patterns. However, climate models have systematic biases that need to be corrected to increase the representativeness of the data, and these adjustments are fundamental to supporting more accurate hydrological studies and decision-making. The objective of this work was to correct the trends in the historical precipitation data simulated by the HadGEM3 and MIROC6 climate models through four systematic bias correction methods and to evaluate the performance of these methods. The daily historical precipitation data of the climate projections made available by the CLIMBra dataset were used and these data were corrected using the CMhyd software that enables trend correction through the Linear Scaling (LS), Local Intensity Scaling (LOCI), Power Transformation (PT) and Distribution Mapping (DM) methods. The correction methods applied significantly improved the performance of the models, with reductions of over 90% in PBIAS, RMSE, MAE and SD, with LS and PT standing out with the best adjustments. However, the DM showed superior performance in the estimation of rainfall events above 10 mm. In addition, the HadGEM3 climate model showed better fits compared to MIROC6. This work reinforces the need for trend correction to improve the accuracy of hydrological projections, significantly reducing the uncertainties of climate models and enabling more effective strategies to cope with climate change.

Resumo: As mudanças climáticas têm intensificado eventos extremos, como secas e chuvas intensas, especialmente em regiões vulneráveis como o semiárido brasileiro. Projeções do CMIP6 indicam aumento significativo da temperatura global e alterações nos padrões de precipitação. Contudo, os modelos climáticos apresentam vieses sistemáticos que precisam ser corrigidos para aumentar a representatividade dos dados, sendo esses ajustes fundamentais para subsidiar estudos hidrológicos mais precisos e tomada de decisão. O objetivo deste trabalho foi corrigir as tendências nos dados de precipitação histórico simulados pelos modelos climáticos HadGEM3 e MIROC6 através de quatro métodos de correção de vieses sistemáticos e avaliar o desempenho desses métodos. Foram utilizados os dados históricos de precipitação diária das projeções climáticas disponibilizados pelo dataset CLIMBra e esses dados passaram pela correção utilizando o software CMhyd que possibilita a correção de tendência através dos métodos *Linear Scaling (LS)*, *Local Intensity Scaling (LOCI)*, *Power Transformation (PT)* e *Distribution Mapping (DM)*. Os métodos de correção aplicados melhoraram significativamente o desempenho dos modelos, com reduções acima de 90% em PBIAS, RMSE, MAE e SD, se destacando o LS e o PT com os melhores ajustes. Entretanto, o DM apresentou desempenho superior na estimativa de eventos pluviométricos acima de 10 mm. Além disso, o modelo climático HadGEM3 evidenciou melhores ajustes em comparação ao MIROC6. Este trabalho reforça a necessidade de correção de tendência para aprimorar a precisão das projeções hidrológicas,

¹) Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil, e-mail: alinemschagas@gmail.com

²) Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Geociências, Recife, Brasil, e-mail: carolyne.andrade@academico.ufpb.br

³) Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil, e-mail: montenegro.ufpe@gmail.com

⁴) Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil, e-mail: thayna_tau@hotmail.com

reduzindo significativamente as incertezas dos modelos climáticos e possibilitando estratégias mais eficazes de enfrentamento às mudanças climáticas.

Palavras-Chave – precipitação, CMhyd, modelos climáticos globais

INTRODUÇÃO

O século XXI está testemunhando a ascensão das mudanças climáticas como um desafio significativo devido aos seus impactos ambientais e socioeconômicos devastadores e condições climáticas extremas tornaram-se mais frequentes e severas nas últimas décadas como resultado da atividade humana (Mukheef et al., 2024). De acordo com as projeções climáticas do sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) derivadas de diferentes modelos climáticos globais do Projeto *Coupled Model Intercomparison Project* Fase 6 (CMIP6), a temperatura da superfície global nas duas primeiras décadas do século XXI (2001-2020) foi cerca de 1 °C (faixa de 0,84-1,10 °C) superior à do período pré-industrial (1850-1900). Como consequência, são esperados efeitos ainda mais severos e irreversíveis, entre eles uma maior ocorrência de eventos extremos de chuva, colocando em risco especialmente para as sociedades mais vulneráveis, que não dispõem de recursos necessários para se adaptar rapidamente a ela (Mukheef et., 2024; Castellanos et al., 2022).

O semiárido brasileiro se destaca como a região semiárida mais densamente povoada do mundo e sua população é altamente vulnerável a eventos climáticos extremos devido ao baixo desenvolvimento econômico, onde cerca de 45% da população vive na pobreza (IBGE, 2020; Castellanos et al., 2022). Nessa região, projetam-se reduções na precipitação total, acompanhadas de um aumento em eventos de chuva intensa e maior aridez, intensificando a severidade das secas na região semiárida (Castellanos et al., 2022; Marengo et al., 2017). Assim, compreender os efeitos das mudanças climáticas no semiárido é essencial para que ações de adaptação e mitigação sejam tomadas.

Em estudos de mudanças climáticas, os modelos climáticos globais são instrumentos frequentemente utilizados para pesquisar o sistema climático mundial, abrangendo períodos históricos e projetados (Mohammed et al., 2021). A nova geração de Modelos de Circulação Geral, que inclui o CMIP6, utilizou um novo conjunto de cenários SSP para concentrações e um novo ano de início, e os modelos climáticos globais foram atualizados com novas versões (Almazroui et al., 2020), utilizando de *Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)* para considerar aspectos sociais, econômicos e tecnológicos que podem impactar as emissões, resultando em uma compreensão mais completa de possíveis cenários futuros. Os cinco cenários (SSP1–1.9, SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0 e SSP5–8.5), preveem um aumento de temperatura de 1,5 °C a curto prazo (2021–2040) e de 3,3–5,7 °C a longo prazo (2081–2100) no cenário de emissão mais extremo.

No entanto, os dados oriundos de modelos climáticos geralmente possuem erros sistemáticos, sendo necessário realizar o procedimento de correção de tendência dos dados de saída dos modelos (Teutschbein & Seibert, 2012; Zhang et al., 2015). Rathjens et al. (2016) desenvolveram o *Climate Model for Hydrologic Modeling (CMhyd)* para executar a correção de tendência dos dados de precipitação e temperatura de vários modelos climáticos. Tal modelo extrai e corrige os dados de precipitação e temperatura de forma semiautomática e fornece oito métodos de correção de tendência, incluindo o *Linear Scaling (LS)*, *Local Intensity Scaling (LOCI)*, *Power Transformation (PT)* e *Distribution Mapping (DM)*.

O objetivo deste trabalho foi corrigir as tendências nos dados de precipitação simulados pelos modelos climáticos HadGEM3 e MIROC6, considerando os cenários de mudanças climáticas SSP2–4.5 e SSP5–8.5, e avaliar o desempenho de quatro métodos de correção de vieses sistemáticos, visando aprimorar a representatividade das projeções futuras em relação aos dados observados.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia do Alto Ipanema, sub-bacia representativa da bacia do Ipanema, localizada na região semiárida de Pernambuco. A área em estudo abrange a região da nascente da bacia do Ipanema, afluente da Bacia do Rio São Francisco (Figura 1), situando-se em sua porção inferior. O clima predominante é do tipo semiárido quente (BSsh), conforme a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de aproximadamente 607 mm, com temperatura média de 23 °C e evapotranspiração potencial em torno de 2000 mm por ano (Silva Júnior et al., 2016). De acordo com estudos de Chagas et al. (2020) sobre os padrões da precipitação na bacia experimental do riacho Jatobá (que está inserida na bacia representativa do Alto Ipanema), há dois períodos de transição: o período de agosto a outubro, com diminuição do número de dias chuvosos, antecedendo o período de estação seca de novembro a janeiro; e o período de fevereiro a abril, com aumento de dias chuvosos, antecedendo a estação chuvosa no período de maio a julho.

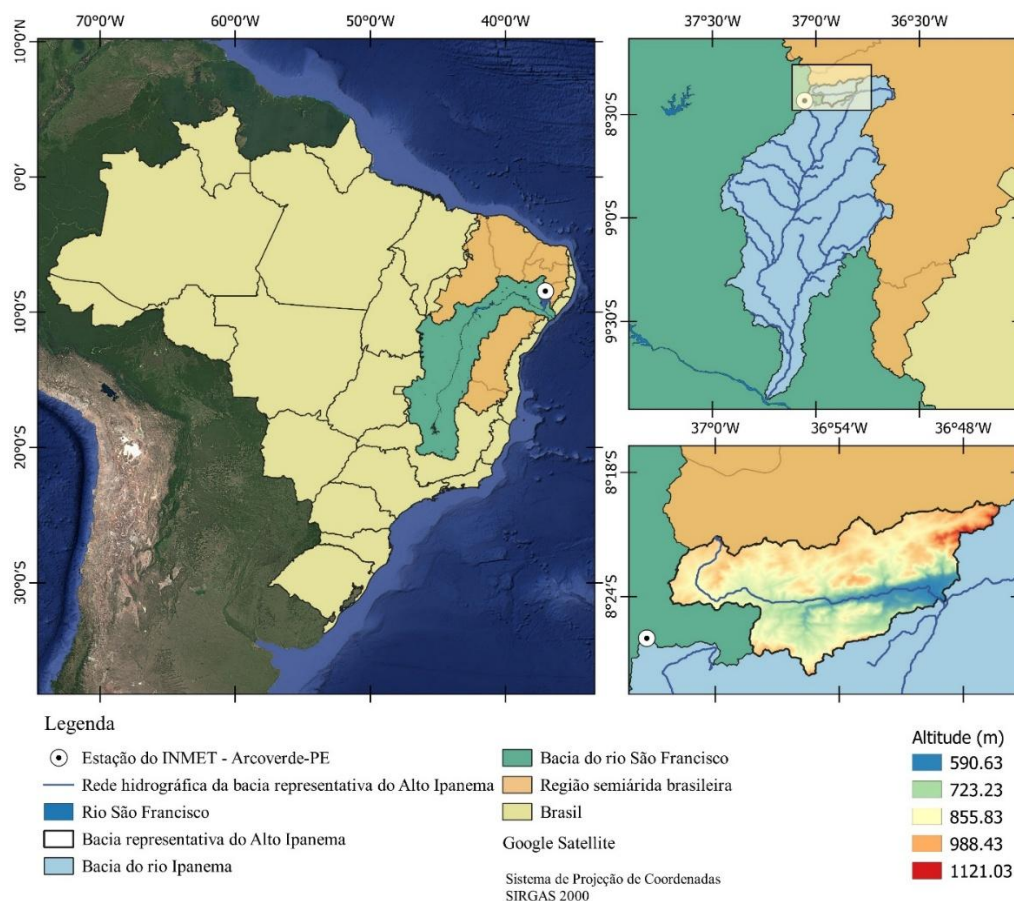


Figura 1. Localização da bacia representativa do Alto Ipanema.

Dados climáticos de modelos climáticos globais

As informações detalhadas sobre os potenciais impactos das mudanças climáticas foram obtidas através dos modelos climáticos de circulação global, que é uma ferramenta essencial para entender alterações climáticas em diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa (Xavier et

al., 2021; Ballarin et al., 2023). Além disso, o projeto *Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)* desempenha um papel significativo ao oferecer projeções climáticas baseadas em uma avaliação integrada de modelos, considerando novos cenários de emissões de gases de efeito estufa e uso do solo, bem como trajetórias de desenvolvimento social futuras (IPCC, 2022; Siqueira et al., 2021).

O estudo utilizou um conjunto de dados provenientes de dois Modelos Climáticos de Circulação Global, o MIROC6 e HadGEM3-GCM-31-LL, disponibilizados pelo CLIMBra – *Climate Change Dataset for Brazil* (Ballarin et al., 2023), que fornece as projeções dos modelos climáticos tanto em sua forma bruta quanto com correção de viés. Por tanto, nesse estudo optou-se por utilizar o dado bruto disponível na plataforma, disponível no formato de grid, com uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, para que pudesse ser aplicado outro método de correção de viés. Para a bacia do Alto Ipanema, o método de correção aplicado pelo CLIMBra não apresentou boa representação nas normais climatológicas, apresentando um deslocamento no período de concentração da chuva. Dessa forma, os dados foram obtidos no formato *.netCDF* e extraídos a partir de um código em R utilizando o RStudio, com o pacote RnetCDF.

Para a correção de viés, foram utilizados dados históricos brutos de precipitação (1980 a 2013) provenientes dos modelos climáticos e dados observados da estação meteorológica do INMET localizada em Arcoverde (82890). Após a identificação de tendência nos dados, foi aplicada a correção de tendência utilizando quatro métodos disponibilizados pelo *software CMhyd: Linear Scaling, Distribution Mapping, Power Transformation e Local Intensity of Precipitation*. Em seguida, os dados de precipitação das projeções futuras (2025 a 2100) também foram corrigidos. As projeções analisadas correspondem aos cenários climáticos SSP2-4.5, que representa uma trajetória de emissões intermediárias de gases de efeito estufa, e SSP5-8.5, associado a um cenário de altas emissões.

Climate Model for Hydrologic Modeling (CMhyd)

Os métodos de correção de tendência utilizados neste estudo — *Linear Scaling, Distribution Mapping, Power Transformation e Local Intensity of Precipitation* — apresentam diferentes abordagens e capacidades em relação ao ajuste de séries de precipitação simuladas por modelos climáticos (Teutschbein e Seibert, 2013).

O método *Linear Scaling (LS)* é uma técnica que ajusta os dados simulados com base na diferença entre as médias observadas e simuladas. Ele corrige a média da precipitação, mas não ajusta a variabilidade e a frequência de dias secos ou chuvosos, submetendo todos os eventos a um mesmo fator de correção (Lenderink et al., 2007). Por outro lado, o *Distribution Mapping (DM)* objetiva corrigir a função de distribuição dos dados simulados pelo modelo climático, de forma a concordar com a função de distribuição dos dados observados e isso pode ser feito por meio da criação de uma função de transferência para mudar as distribuições de ocorrência de precipitação (Johnson e Sharma, 2011, Farias et al. 2020). O *Power Transformation (PT)* transforma os dados de precipitação aplicando funções não lineares, como raízes ou potências, com o objetivo de ajustar a assimetria da distribuição. Ele corrige a média e o desvio padrão, sendo particularmente útil para dados assimétricos ou com alta variabilidade (Leander e Buishand, 2008). Por fim, o método *Local Intensity of Precipitation (LOCI)* combina um limiar específico para a ocorrência de precipitação com um fator de escala linear aplicado apenas aos valores acima desse limiar. Esse método se destaca por corrigir não apenas a média, mas também a frequência de dias secos e a intensidade das chuvas, mantendo a variabilidade temporal diária próxima à dos dados originais.

Análise estatística

A avaliação do desempenho dos modelos e das técnicas de correção de viés foi realizada com base em seis métricas estatísticas: coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE), viés percentual (PBIAS), eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), erro médio absoluto (MAE) e o desvio padrão (SD), como apresentado na Tabela 1. Essas métricas permitiram analisar os padrões mensais das estimativas de precipitação, a qualidade do ajuste entre os dados simulados e observados, considerando tanto a magnitude dos erros quanto a tendência de superestimação ou subestimação dos modelos.

Tabela 1. Métricas estatísticas de avaliação de desempenho dos modelos

Métricas estatísticas	Unid	Equação	Valor ótimo
(1) Percentual de viés (PBIAS)	%	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{obs} - P_{sim})}{\sum_{i=1}^n (P_{obs})} \times 100$	0
(2) Nash-Sutcliffe coefficient (NSE)	-	$NS = 1 - \left(\frac{\sum_i (P_{obs} - P_{sim})^2}{\sum_i (P_{obs} - \bar{P}_{obs})^2} \right)$	1
(3) Coeficiente de determinação (R^2)	-	$R^2 = \frac{[\sum_i (P_{obs,i} - \bar{P}_{obs})(P_{sim,i} - \bar{P}_{sim})]^2}{\sum_i (P_{obs,i} - \bar{P}_{obs})^2 \sum_i (P_{sim,i} - \bar{P}_{sim})^2}$	1
(4) Erro quadrático médio (RMSE)	mm	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (P_{obs} - P_{sim})^2}$	0
(5) Erro médio absolute (MAE)	mm	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (P_{obs} - P_{sim})^2$	0
(6) Desvio padrão (SD)	mm	$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (P_{sim} - \bar{P}_{sim})^2}$	-

onde P_{obs} = precipitação observada, P_{sim} = precipitação simulada, \bar{P}_{obs} = precipitação observada média, \bar{P}_{sim} = precipitação simulada média.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a avaliação do desempenho dos modelos climáticos HadGEM3 e MIROC6 considerando as simulações brutas (bruto) e as séries ajustadas por meio dos métodos de correção de viés (DM, LS, LOCI e PT), para a estimativa da precipitação mensal no período histórico na bacia do Alto Ipanema.

Tabela 2. Desempenho das estimativas dos dados brutos e corrigidos dos modelos climáticos HadGEM3 e MIROC6

Modelo	Métrica	Bruto	DM	LS	LOCI	PT
HadGEM3	NSE	14,16	0,98	0,99	0,99	0,99
	PBIAS	112,10	5,80	0,20	0,20	0,60

	RMSE	116,86	4,28	3,17	3,17	2,84
	R ²	0,37	0,99	0,99	0,99	0,99
	MAE	81,63	3,51	2,14	2,14	2,07
	SD	102,24	2,86	3,31	3,31	2,94
MIROC6	NSE	5,19	0,97	0,99	0,99	0,99
	PBIAS	35,50	2,90	2,00	2,00	2,00
	RMSE	74,67	5,54	2,48	2,48	2,48
	R ²	0,22	0,97	0,99	0,99	0,99
	MAE	62,37	4,49	1,12	1,12	1,12
	SD	75,07	5,52	2,31	2,31	2,31

Observando os dados brutos dos modelos, nota-se uma expressiva divergência entre a precipitação observada e as estimativas fornecidas pelos modelos HadGEM3 e MIROC6. Os valores de PBIAS evidenciam essas discrepâncias nas tendências de previsão, indicando desde superestimações até subestimações. O modelo HadGEM3 apresentou desempenho inferior ao do MIROC6, com PBIAS de 112,10 e 35,50, respectivamente. A métrica MAE revelou uma discrepância, com o modelo HadGEM3 (81,63) apresentando valor mais elevado que o MIROC6 (62,37). Essa diferença representa a magnitude diversa das diferenças absolutas entre as previsões dos modelos e as observações reais. Os valores da RMSE delineiam ainda mais as diferenças na capacidade do modelo de prever a precipitação com precisão, onde o MIROC6 apresentou valor de RMSE de 74,67 e o HadGEM3 de 116,86. Os valores de Nash-Sutcliffe (NSE) proporcionam uma avaliação mais criteriosa, mas ambos os modelos demonstraram um nível baixo de previsão com relação à média dos dados observados. Baixos coeficientes de correlação (R²) também foram encontrados nas duas séries de dados brutos (0,37 para o HadGEM3 e 0,22 para o MIROC6), bem como elevados desvios padrões.

Ao avaliarem diversos modelos climáticos do CMIP5, Londhe et al. (2023) também observaram baixos índices de desempenho na representação da precipitação pelos dados brutos dos modelos. Os resultados indicaram que a capacidade dos modelos em simular a precipitação varia significativamente, evidenciando a complexidade envolvida na modelagem desse processo. Essas variações, refletidas nas diferentes métricas estatísticas, contribuem para uma compreensão mais abrangente sobre as limitações e o desempenho dos modelos climáticos na previsão de precipitação.

Os quatro métodos de correção de viés aplicados aos dados brutos de precipitação dos modelos climáticos apresentaram bom desempenho, aprimorando significativamente as estimativas. Entre os métodos avaliados, o DM apresentou os maiores erros em comparação aos demais, com valores mais elevados de MAE (3,51), RMSE (4,28) e PBIAS (5,80). Em geral, o método Linear Scaling obteve, os melhores resultados entre os modelos, destacando-se pelo desempenho mais consistente. Nesse aspecto, Eisner et al. (2012) e Teutschbein e Seibert (2013) destacaram em seus trabalhos que embora o DM tenha apresentado melhor desempenho em suas análises, o LS apresenta boa performance para análise de médias mensais e séries temporais gerais, sendo mais prático em termos de implementação e menores requisitos de dados. Entretanto, estudos de Luo et al. (2018) corroboram com os achados encontrados neste trabalho, onde o LS e LOCI obtiveram desempenho superior aos demais modelos avaliados. Os autores explicam que quando métricas baseadas em séries temporais são incluídas, os métodos LS e LOCI apresentam melhor desempenho pois são lineares, seguidos de perto pelo método PT baseado em não lineares. Farias et al. (2020) avaliando os métodos os métodos Linear Scaling e Distribution Mapping para a bacia do rio Mundaú com a projeção climática do modelo regional EtaHadGEM2-ES, observaram que o método LS foi mais eficaz na correção quando comparado ao DM para a precipitação média mensal com valores mais próximos às médias observadas.

A Figura 2 apresenta as curvas de frequência de excedência da precipitação mensal acumulada para os dados observados, os modelos brutos e os dados corrigidos pelos métodos avaliados, com base nas projeções dos modelos HadGEM3 e MIROC6. Observa-se que o modelo bruto MIROC6 superestima significativamente os volumes de precipitação em comparação ao HadGEM3. Após a correção, os métodos DM e PT ainda mantêm valores elevados, semelhantes aos dados brutos, o que pode justificar a superestimação da precipitação, especialmente em eventos extremos. Para o HadGEM3, o PT também apresenta comportamento semelhante ao DM, mas dessa vez com valores mais próximos a curva dos dados observados, mostrando boa capacidade de representar as chuvas mais intensas na bacia. Por outro lado, o método LOCI, aplicado ao MIROC6, apresenta uma distribuição mais próxima à observada, especialmente para os eventos extremos. Para os dois modelos climáticos, o LS mostrou baixo desempenho em representar os eventos extremos.

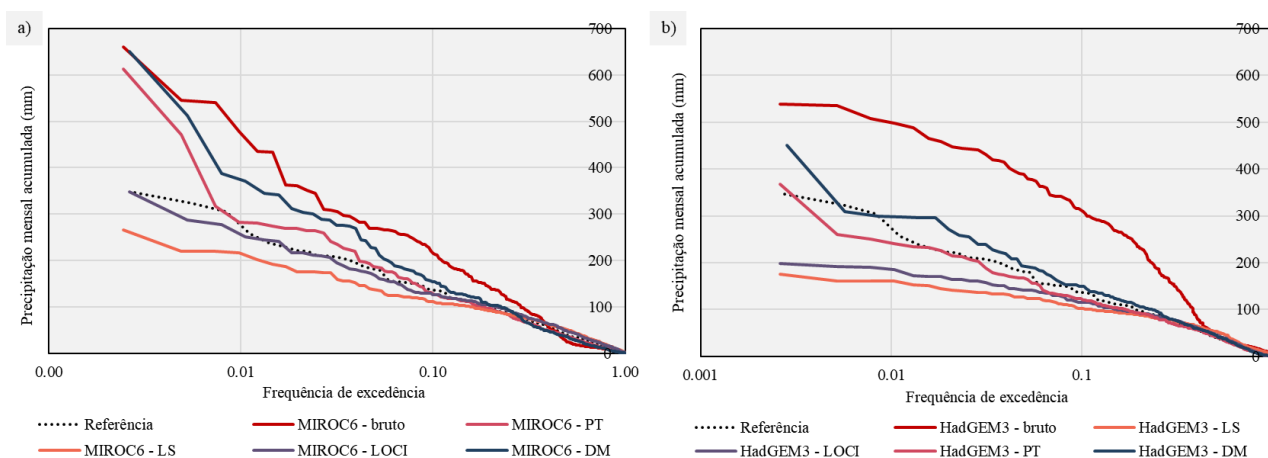


Figura 2. Frequências de excedência da precipitação mensal acumulada dos dados de referência, os modelos brutos e os modelos corrigidos com os métodos avaliados para as projeções MIROC6 (a) e HadGEM3 (b)

Luo et al. (2018) encontraram resultados semelhantes em suas análises, e identificaram que os métodos DM e PT superestimam a precipitação original dentro de uma faixa de probabilidades de 0,09 a 0,30 e observaram que vários outliers (valores extremos) foram estimados por esses modelos. Neste estudo também foram identificados outliers nesses métodos, com valores de 649,87 e 512,41 para o DM e 613,02 e 471,26 para o PT das estimativas do MIROC6, e 470,75 para o DM nas estimativas do HadGEM3. Quanto aos métodos LS e LOCI, os mesmos autores observaram que esses métodos subestimam a precipitação intensa, com probabilidades até 0,10, corroborando com os achados deste estudo.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos em eventos isolados de precipitação, a Figura 3 apresenta a distribuição mensal acumulada dos eventos com precipitação igual ou superior a 10 mm para os modelos HadGEM3 e MIROC6 (Figuras 3a e 3b) no período histórico, considerando os dados brutos e os ajustados de precipitação por meio dos diferentes métodos de correção de viés aplicado.

Para ambos os modelos, nota-se que os dados brutos dos modelos superestimam a precipitação, resultando em uma frequência maior de eventos com precipitação igual ou superior a 10 mm em comparação com os valores observados no período histórico. Os coeficientes de correlação entre os dados observados e os dados brutos foram de 0,32 para o HadGEM3 e 0,25 para o MIROC6, evidenciando uma baixa capacidade de representar adequadamente os eventos isolados de chuva. Após a aplicação dos métodos de correção de viés, destaca-se o desempenho superior dos métodos

DM e PT em relação ao LS e ao LOCI. Para o modelo HadGEM3, os valores de correlação alcançaram 0,98 (DM) e 0,96 (PT), enquanto para o MIROC6, os valores foram de 0,89 (DM) e 0,77 (PT).

Diversos estudos, como o de Londhe et al. (2018) e Chen et al. (2020) indicam que o método Distribution Mapping apresenta desempenho superior na correção de estimativas diárias de precipitação. Nesses estudos, o método do DM foi o método mais eficaz na correção das estimativas diárias de precipitação maiores que 10 mm e evidenciaram que o método LS tende a subestimar eventos extremos, enquanto os métodos DM e PT geralmente superaram modelos lineares, como o LS e LOCI, na correção da precipitação e na representação adequada de eventos extremos.

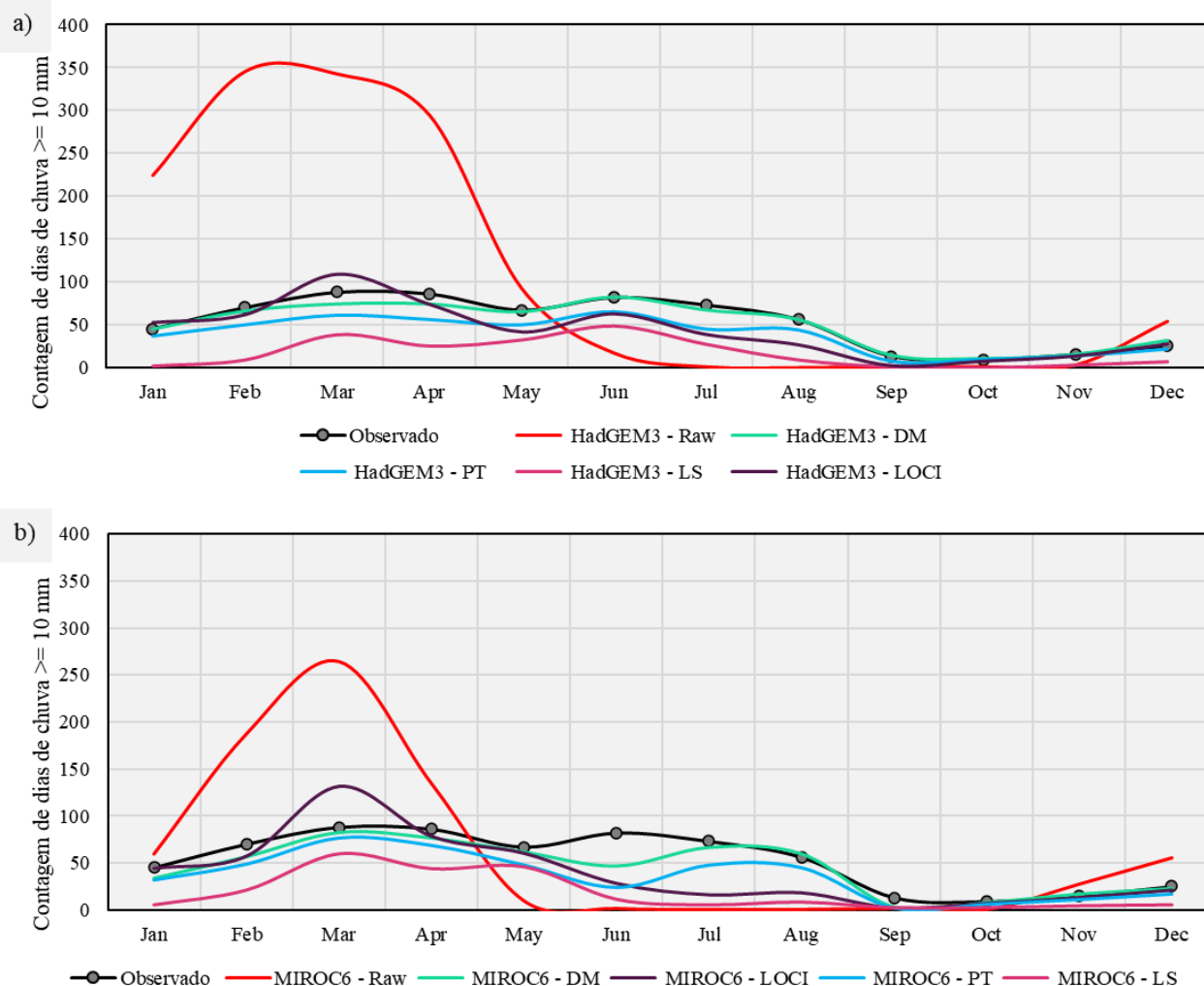


Figura 3. Distribuição mensal acumulada de eventos de precipitação maiores que 10 mm na bacia do Alto Ipanema para o período histórico entre 1980 e 2013 das projeções do HadGEM3 (a) e MIROC6 (b)

Pode-se observar que para as estimativas do modelo MIROC6, os métodos do DM e PT representaram bem os eventos maiores que 10 mm no período de transição (fevereiro a abril), onde ocorrem a maior quantidade de eventos de precipitações máximas, e o período chuvoso (maio a julho) enquanto LS subestimou tais eventos. No mês de junho nenhum dos métodos conseguiram representar os eventos observados, se mostrando ser uma limitação do próprio modelo MIROC6. Já para as correções do modelo HadGEM3, o DM se destacou por obter um excelente desempenho na representação os eventos observados, conseguindo representar bem os eventos tanto no período de transição quanto no período chuvoso. De modo geral, os métodos de correção mostraram um

desempenho superior nas correções das projeções do HadGEM3 quando comparados com as correções do modelo MIROC6.

Firpo et al. (2022), ao avaliarem 35 modelos climáticos globais em cinco regiões do Brasil, destacaram que de modo geral os modelos superestimam a precipitação durante os meses chuvosos na região Nordeste. Entretanto, os autores identificaram que o modelo HadGEM3-GC31-LL apresentou excelente desempenho durante o inverno na região Nordeste, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9. No verão, o desempenho também foi considerado satisfatório, com R^2 de 0,6. Esses valores foram superiores aos obtidos pelo modelo MIROC6, que apresentou R^2 de 0,8 no inverno e 0,55 no verão, evidenciando a maior capacidade do HadGEM3 em representar o clima da região Nordeste nas diferentes estações do ano. Chen et al. (2020) reforça que a eficácia da correção também depende da estrutura do modelo climático empregado bem como o período de referência e recomendam o uso de períodos de referência longos e estáveis para evitar erros na geração de eventos extremos corrigidos.

CONCLUSÃO

De modo geral, nesse estudo destaca que a aplicação dos métodos *Distribution Mapping*, *Linear Scaling*, *Local Intensity of Precipitation* e *Power Transformation of Precipitation* na correção de viés das projeções climáticas do MIROC6 e HadGEM3 trouxe uma melhoria significativa no desempenho dos modelos. Entre os métodos avaliados, o *Linear Scaling* destacou-se por sua melhor representação da precipitação média mensal, enquanto o *Distribution Mapping* foi mais eficaz na reprodução de eventos com precipitação superior a 10 mm. Além disso, o modelo HadGEM3 demonstrou desempenho superior ao MIROC6 na estimativa da precipitação na região de estudo.

Este estudo reforça a necessidade da correção de viés em estudos de mudanças climáticas, evidenciando seu papel fundamental na melhoria das estimativas hidrológicas e na redução das incertezas associadas ao uso de modelos hidrológicos. Os achados obtidos neste estudo fornecem subsídios sólidos para a compreensão dos efeitos das alterações do clima, contribuindo com informações valiosas para o planejamento de políticas públicas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), à FACEPE (BFP-0092-5.03/24), à CAPES, CNPq (11.588/2023-9) e à Financiadora de Estudos e Projetos-FINEP pelo financiamento e suporte ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; ABID, M.A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M.S.; SÖRENSON, A.A.; ARIAS, P.A.; ALVES, L.M.; TIPPETT, M.K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J.A.; EHSAN, M.A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á.G.; ALI, M.A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M.B. (2021). "Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America". *Earth Systems and Environment*, 5(2), pp. 155–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>

- BALLARIN, A.S.; SONE, J.S.; GESUALDO, G.C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E.C. (2023). “CLIMBra - Climate change dataset for Brazil”. Scientific Data, 10(1), p. 47. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>
- CASTELLANOS, J.C.; HUMPHREYS, E.; CLAYTON, R.W. (2022). “Evidence of mantle-based deformation across the western United States”. Geophysical Research Letters, 49(4). DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL094854>
- CHAGAS, A.M.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, T.A.B.; SILVA, J.A.S.S. (2020). “Caracterização dos padrões de chuva na bacia do Riacho Jatobá no semiárido pernambucano”, in Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste – XV SRHNE, Caruaru – PE, nov. 2020, 1.
- FARIAS, C.W.L.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; LINS, F.A.C.; MONTENEGRO, A.A.A. (2020). “Correção de tendência das projeções climáticas futuras simuladas pelo modelo regional Eta-Hadgem2-Es para a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil”. Journal of Environmental Analysis and Progress, 5(3), pp. 288–301. DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.2812.288-301>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Cidades e Estados*. Dados de 2003, 2010 e 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 30 de maio de 2025
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2022). “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability”. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Org. por PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.C.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.S.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A.; RAMA, B. Cambridge University Press, Cambridge, UK e New York, NY, USA, 3056 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- JOHNSON, F.; SHARMA, A. (2011). “Accounting for interannual variability: a comparison of options for water resources climate change impact assessments”. Water Resources Research, 47(4). DOI: <https://doi.org/10.1029/2010WR009272>
- LEANDER, R.; BUISHAND, T.A.; VAN DEN HURK, B.J.J.M.; DE WIT, M.J.M. (2008). “Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output”. Journal of Hydrology, 351(3–4), pp. 331–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.020>
- LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; VAN DEURSEN, W. (2007). “Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach”. Hydrology and Earth System Sciences, 11(3), pp. 1145–1159. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>
- MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. (2017). “Drought in Northeast Brazil—past, present, and future”. Theoretical and Applied Climatology, 129(3–4), pp. 1189–1200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- MOHAMMED, M.H.; ZWAIN, H.M.; HASSAN, W.H. (2021). “Modeling the impacts of climate change and flooding on sanitary sewage system using SWMM simulation: a case study”. Results in Engineering, 12, p. 100307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100307>

- MUKHEEF, R.A.H.; HASSAN, W.H.; ALQUZWEENI, S. (2024). “*Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: a case study of Iraq’s Middle and West*”. Atmospheric Research, 306, p. 107470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470>
- RATHJENS, H.; BIEGER, K.; SRINIVASAN, R.; CHAUBEY, I.; ARNOLD, J.G. (2016). “*CMhyd User Manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*”. <https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>. Acesso em 30 de maio de 2025
- SILVA JUNIOR, V.P.; MONTENEGRO, A.A.A.; DE MELO, R.O. (2016). “*Temporal stability of soil moisture in an experimental watershed in the Pernambuco semi-arid region*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20(10), pp. 880–885. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p880-885>
- SIQUEIRA, P.P.; OLIVEIRA, P.T.S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A.A.; RODRIGUES, D.B.B. (2021). “*Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin*”. Journal of Hydrology: Regional Studies, 37, p. 100931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. (2013). “*Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?*”. Hydrology and Earth System Sciences, 17(12), pp. 5061–5077. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>
- XAVIER, A.C.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; ALVES, A.I. (2022). “*New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*”. International Journal of Climatology, 42(16), pp. 8390–8404. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7731>
- ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, B. (2015). “*Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dry seasons*”. Ecological Modelling, 301, pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.018>