PROJENE: BASE DE DADOS CLIMÁTICOS DE ALTA RESOLUÇÃO COM CORREÇÃO DE VIÉS PARA O NORDESTE BRASILEIRO

Diego Cezar dos Santos Araujo [1] ; Vanine Elane Menezes de Farias [2]; Arivânia Bandeira Rodrigues [3]; Cinthia Maria de Abreu Claudino [4]; Samara Fernanda da Silva [5]; Rochele Sheila Vasconcelos [6]; Cinthya Santos da Silva [7]; Germano Ribeiro Neto [8] & Breno Thierry Caldas Bezerra [9] ; Raquel Ferreira do Nascimento [10]

RESUMO – Este artigo apresenta a PROJENE (Projeções de Dados Climáticos para o Nordeste), uma base de dados climáticos de alta resolução espacial (0,25° × 0,25°) com correção de viés pelo método Quantile Delta Mapping (QDM), desenvolvida especificamente para o Nordeste Brasileiro (NEB). A base integra saídas diárias de dez modelos CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015–2100), cobrindo seis variáveis meteorológicas essenciais: precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. A correção de viés foi realizada com base nos dados observacionais do BR-DWGD e demonstrou desempenho expressivo, com reduções superiores a 65% (muitos chegando a 100%) no viés sistemático na maioria dos modelos. A PROJENE disponibiliza ainda índices climáticos extremos do ETCCDI e uma plataforma web interativa que permite a extração de séries temporais por coordenada, bacia hidrográfica ou divisão político-administrativa, eliminando a necessidade de pré-processamento local de arquivos NetCDF.

ABSTRACT– This article presents PROJENE (Climate Data Projections for Northeastern Brazil), a high spatial resolution climate database (0.25° × 0.25°) bias-corrected using the Quantile Delta Mapping (QDM) method, specifically developed for Northeastern Brazil (NEB). The database integrates daily outputs from ten CMIP6 climate models under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios (2015–2100), covering six essential meteorological variables: precipitation, maximum and minimum air temperature, solar radiation, relative humidity, and wind speed. Bias correction was performed using observational data from the Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) dataset and demonstrated substantial improvements, with reductions exceeding 65% (and in many cases reaching 100%) in systematic bias across most models. In addition, PROJENE provides ETCCDI climate extreme indices and an interactive web platform that enables users to extract time series data by geographic coordinates, watershed boundaries, or political-administrative divisions, eliminating the need for local preprocessing of NetCDF files.

Palavras-Chave – CMIP6; Nordeste Brasileiro; Projeções Climáticas

[1]) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, 81 98815-1111. diego.caraujo@ufpe.br
[2]) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Sertânia, Pernambuco, 83 98732-9645. vanine.menezes@ufpe.br
[3]) Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (HU-Brasil), Lagarto- Sergipe, 81 999169963, arivania_@hotmail.com
[4]) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, (83) 999618-9626, cinthiamariaac@gmail.com.
[5]) Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB, Barreiras, samara.silva@ufob.edu.br
[6]) Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus, Bahia, rsvasconcelos1@uesc.br
[7]) Instituto federal da Paraíba - campus Cajazeiras, Cajazeiras/PB, (83) 98692-5125, cinthya.santos@ifpb.edu.br
[8]) Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. germano.ribeiro@ct.ufpb.br
[9]) Universidade Federal de Pernambuco/TPF Engenharia: Recife-PE, 50740-550, 81 8998-0335, breno.thierry@ufpe.br
[10]) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Floriano, Floriano – PI, raquel.ferreira@ifpi.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste Brasileiro (NEB) é um dos *hotspots* de mudanças climáticas mais críticos da América do Sul. Com áreas de precipitação média anual inferior a 800 mm em grande parte do semiárido, evapotranspiração potencial superior a 2.000 mm e solos rasos sobre embasamento cristalino, a região já opera próxima aos limites da disponibilidade hídrica natural (Marengo et al., 2021). O Sexto Relatório do IPCC (AR6) reforça que regiões semiáridas de médias latitudes devem experimentar os maiores incrementos de temperatura e alterações nos padrões de precipitação (IPCC, 2021). Secas são recorrentes desde pelo menos o século XVI, com eventos extremos em 1877–1879 e a crise de 2012–2018, classificada como a mais grave já registrada em muitas séries históricas (Marengo et al., 2021).

Apesar da crescente disponibilidade de projeções climáticas oriundas do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6), seu uso efetivo por gestores, engenheiros e tomadores de decisão no NEB ainda é limitado por barreiras técnicas. Os dados são distribuídos em formato NetCDF com convenções CF (Climate and Forecast), exigem infraestrutura computacional especializada e volumes de dezenas de petabytes, restringindo o acesso a uma estreita comunidade de especialistas (Jones et al., 2023; Nicholls et al., 2021). Adicionalmente, mesmo quando disponíveis, os dados brutos apresentam vieses sistemáticos em relação às observações locais, comprometendo a confiabilidade de avaliações de impacto e risco hidroclimático (Teutschbein e Seibert, 2012).

Diante desse duplo desafio, a necessidade de projeções regionalmente calibradas e a democratização do acesso à informação climática, este trabalho apresenta a PROJENE. Trata-se de uma base de dados climáticos de alta resolução com correção de viés pelo método *Quantile Delta Mapping* (QDM) e uma plataforma web de acesso simplificado, desenvolvida especificamente para o NEB. O artigo descreve a metodologia de construção da base, avalia o desempenho da correção de viés, apresenta as principais projeções climáticas para a região e demonstra as funcionalidades da plataforma.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O Nordeste Brasileiro ocupa aproximadamente 1,5 milhão de km², abrangendo os nove estados da região, com elevada diversidade climática e fisiográfica (IBGE, 2022). Os totais pluviométricos variam de menos de 400 mm nas áreas áridas do interior a mais de 2.000 mm em setores litorâneos e de altitude. A variabilidade climática é modulada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o ENOS, gradientes de temperatura do mar no Atlântico Tropical, Vórtices

Ciclônicos de Altos Níveis e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) (Hastenrath, 2012; Reboita et al., 2010). A elevada variabilidade hidroclimática, associada à recorrência de secas, impõe desafios significativos para o monitoramento climático e a gestão dos recursos hídricos (Utida et al., 2019).

2.2 Dados dos Modelos CMIP6 e Pré-processamento

Foram obtidos dados climáticos diários de dez Modelos de Circulação Global (MCGs) do CMIP6, extraídos da plataforma *Earth System Grid Federation* (ESGF), cobrindo o período histórico de 1980 a 2014 e as projeções futuras de 2015 a 2100 sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Foram extraídas seis variáveis: precipitação (pr), temperatura máxima (tasmax), temperatura mínima (tasmin), radiação de ondas curtas (rss), velocidade do vento (sfcWind) e umidade relativa (hur). Os modelos incluem ACCESS-CM2, GFDL-CM4, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2, NESM3 e NorESM2-MM, todos reamostrados para resolução comum de 0,25° × 0,25°.

Como referência observacional para a correção de viés, foi utilizado o *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) (Xavier et al., 2022), com resolução também de 0,25°. A padronização temporal incluiu atribuição de calendário completo a todos os modelos, com os dias ausentes preenchidos como NaN para garantir a continuidade cronológica das séries de longo prazo.

2.3 Correção de Viés pelo Método QDM

O método *Quantile Delta Mapping* (QDM) foi selecionado por sua capacidade de preservar a mudança relativa ou absoluta projetada em cada quantil, combinando a eficiência do *Quantile Mapping* (QM) com robustez superior na preservação do sinal de mudança climática (Cannon et al., 2015). A correção foi configurada como multiplicativa para precipitação e aditiva para temperatura, com agrupamento por mês (*time.month*) para preservar a sazonalidade regional. O período histórico foi dividido em treinamento (1961–1995) e validação independente (1996–2014). O processamento foi executado em Python com o repositório *xclim*.

O desempenho do QDM foi avaliado por métricas estatísticas (RMSE, Bias, MAE), análise da climatologia mensal, percentis P90, P95 e P99, diagramas quantil-quantil e índices climáticos extremos do ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) calculados no período histórico de validação em comparação com o BR-DWGD.

2.4 Ensemble Multi-Modelo e Plataforma Web

A estratégia do ensemble da PROJENE baseia-se no uso dos dez MCGs, seguindo recomendações do IPCC (Herger et al., 2018). A Média Multi-Modelo (MMM) representa a tendência

central, acompanhada da técnica de *stippling* para indicar convergência inter-modelos: pontilhado indica que ≥ 80% dos modelos concordam na direção do sinal climático. Destaca-se que a MMM se consolida como a métrica mais robusta e o cenário referencial primário para o planejamento estratégico. A utilização de um único modelo climático isolado pode representar um alto risco, visto que adiciona grande incerteza ao sinal da mudança.

Contudo, a plataforma PROJENE confere flexibilidade ao usuário, que possui a opção de compor um ensemble personalizado. O conjunto agregado pela PROJENE constitui, portanto, uma síntese robusta dos 10 modelos disponíveis. A plataforma web disponibiliza também os dados via interface interativa, permitindo extração por coordenada, *shapefile* de bacia ou divisão político-administrativa, com exportação em *CSV*, eliminando a necessidade de pré-processamento local de arquivos *NetCDF*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Desempenho da Correção de Viés

O QDM demonstrou eficiência expressiva na correção do viés sistemático de precipitação. Durante as etapas de treinamento (1980–2004), a maioria dos modelos apresentou redução superior a 65% no Bias, com vários atingindo 100%. Modelos como GFDL-ESM4, MIROC6 e ACCESS-CM2 registraram as maiores melhorias no RMSE. A Figura 1 ilustra a melhoria percentual nas métricas RMSE e Bias nas fases de treinamento e validação para os dez modelos.

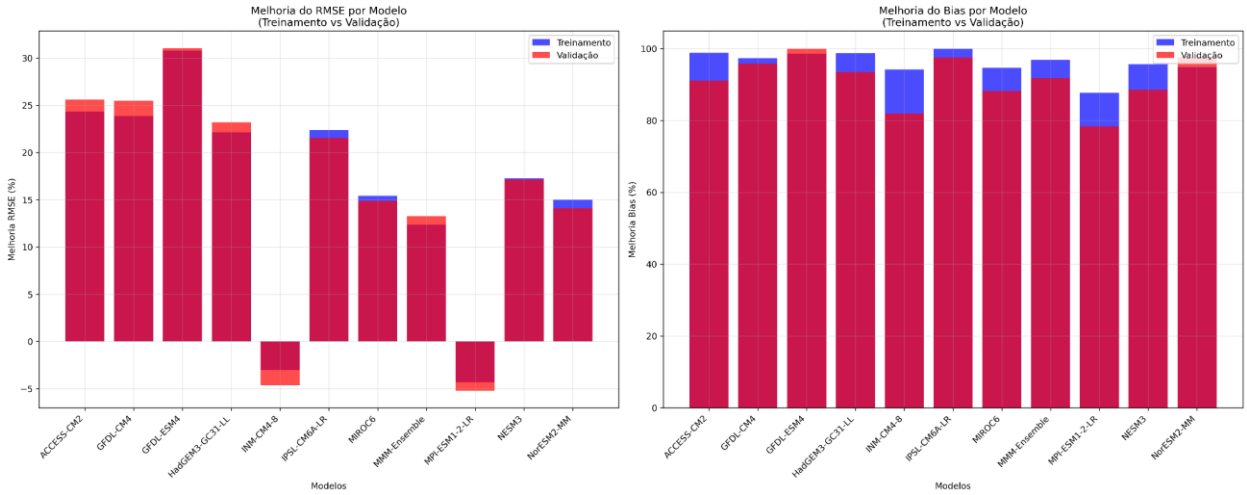


Figura 1 – Melhoria percentual das métricas RMSE (a) e Bias (b) nas fases de treinamento e validação do QDM para os dez modelos CMIP6.

No período de validação independente (2005–2013), houve leve queda de desempenho em relação ao treinamento, comportamento esperado e consistente com a literatura, mantendo-se, contudo, consistência satisfatória entre as duas fases, o que atesta a estabilidade das funções de

correção para o horizonte futuro. Para eventos no percentil P99, os valores pós-correção igualaram-se à referência observacional (BR-DWGD) em praticamente todos os modelos, evidenciando a capacidade do método em ajustar a distribuição também nas caudas, aspecto crítico para estudos de extremos hidrológicos.

A análise da climatologia mensal mostrou que, antes da correção, a maioria dos modelos superestimava a precipitação no período chuvoso (janeiro–maio) e subestimava no início da estação úmida (outubro–dezembro). Após o QDM, todos os modelos ajustaram-se significativamente à sazonalidade do BR-DWGD, conforme esperado pelo método, que corrige a distribuição de quantis preservando o sinal da mudança climática original (Cannon et al., 2015). A Figura 2 apresenta a climatologia mensal antes e após a correção.

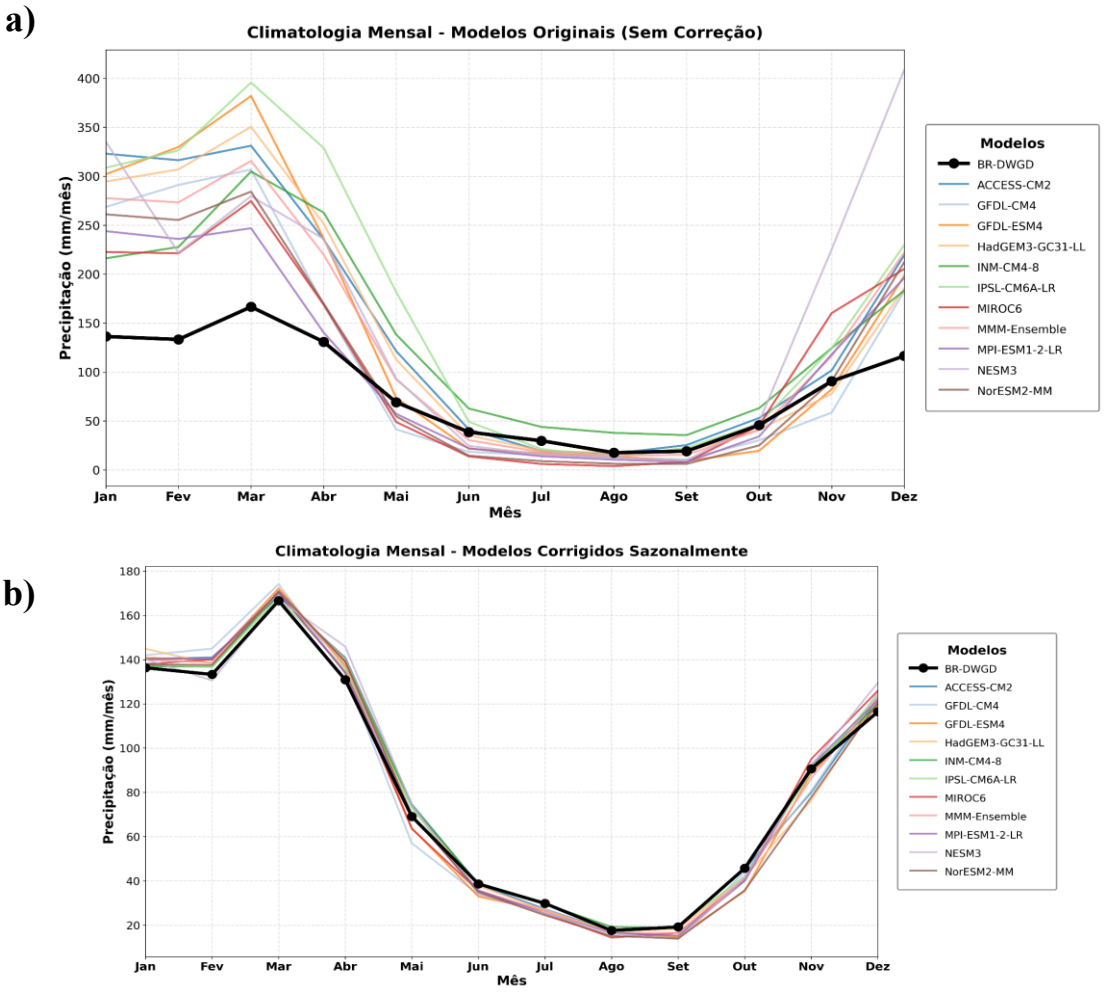


Figura 2 – Climatologia mensal da precipitação antes (a) e após (b) a correção de viés com QDM. Linha de referência: BR-DWGD.

3.2 Ensemble: Média Multi-Modelo (MMM)

A avaliação do desempenho dos MCGs do CMIP6 para o Nordeste Brasileiro revela que simulações individuais frequentemente apresentam vieses significativas. Foi possível observar que a

variação percentual da precipitação total anual (PRCPTOT) projetada por diversos modelos do CMIP6 para os cenários de emissão SSP2-4.5 e SSP5-8.5, apresenta uma dispersão entre as simulações individuais. Diante dessa alta variabilidade, a adoção da MMM justifica-se como a abordagem metodológica mais robusta. O Ensemble permite diluir os vieses isolados e os erros sistemáticos de cada MCG, convergindo para uma tendência central que, para a região de estudo, aponta para uma redução geral do volume de chuvas em ambos os cenários.

A avaliação desagregada dos índices climáticos revela comportamentos distintos quanto à concordância dos modelos, refletindo a complexidade física de cada variável analisada. O índice Precipitação Total (PRCPTOT), ilustrado na Figura 3 caracteriza-se por uma baixa convergência e forte dispersão inter-modelos. O mapa revela um padrão espacial dipolar: projeta-se um aumento dos volumes no norte da região NEB e uma redução no sul e sudeste da região NEB. A concordância de > 80% atinge apenas 21% da área no cenário SSP2-4.5 e 29% no cenário SSP5-8.5.

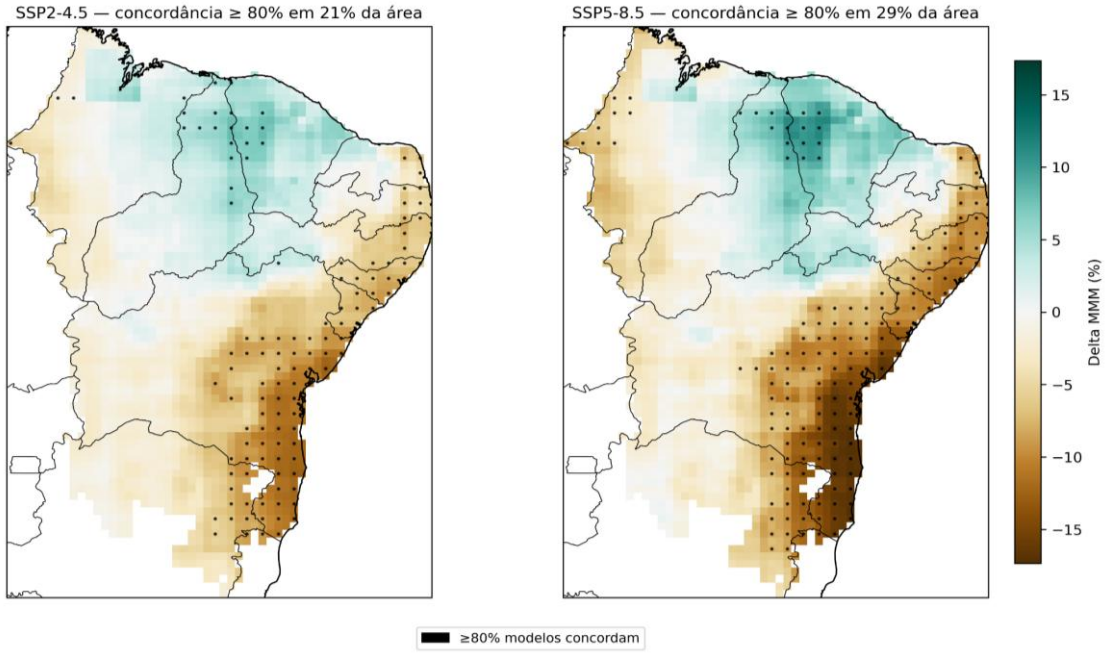


Figura 3 - Mudanças projetadas (Delta) na Precipitação Total (PRCPTOT, em %) no Nordeste do Brasil para os cenários SSP2-4.5 (esquerda) e SSP5-8.5 (direita) em relação ao período histórico.

É importante destacar que a reprodução da climatologia no NEB, e em particular na sua porção litorânea, constitui um desafio sistêmico para modelos climáticos globais (como o CMIP6), que apresentam nessa região o pior desempenho do Brasil. Isso ocorre porque as dinâmicas de mesoescala que regem as chuvas locais não são bem capturadas pelas resoluções espaciais dos modelos atuais, resultando em uma tendência geral de superestimar o volume de chuva durante a estação chuvosa (Firpo et al. 2022). A evolução temporal das anomalias de precipitação para a Costa Leste mostra uma diminuição da precipitação, com uma tendência negativa mais evidente para os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 no longo prazo (Dantas et al., 2022).

Em contraste com a precipitação total, o índice de Dias Secos Consecutivos (CDD) exibe um sinal climático robusto e o maior grau de convergência do estudo (Figura 4). O sinal aponta para um aumento na frequência de dias secos persistentes, com destaque para um núcleo de forte anomalia positiva na porção centro-norte do Nordeste. Esta elevada confiabilidade é evidenciada por um *stippling* massivo que cobre quase a totalidade do domínio: 97% da área no cenário SSP2-4.5 e 100% no cenário mais extremo (SSP5-8.5). O alto consenso projetado sugere que os MCGs demonstram grande habilidade e concordância em capturar a intensificação do período seco e os padrões de subsidência de grande escala associados ao aquecimento global. Assim, independentemente da incerteza observada no volume total de chuva (PRCPTOT), as projeções são unânimes em indicar que a região enfrentará períodos de estiagem significativamente mais longos e severos.

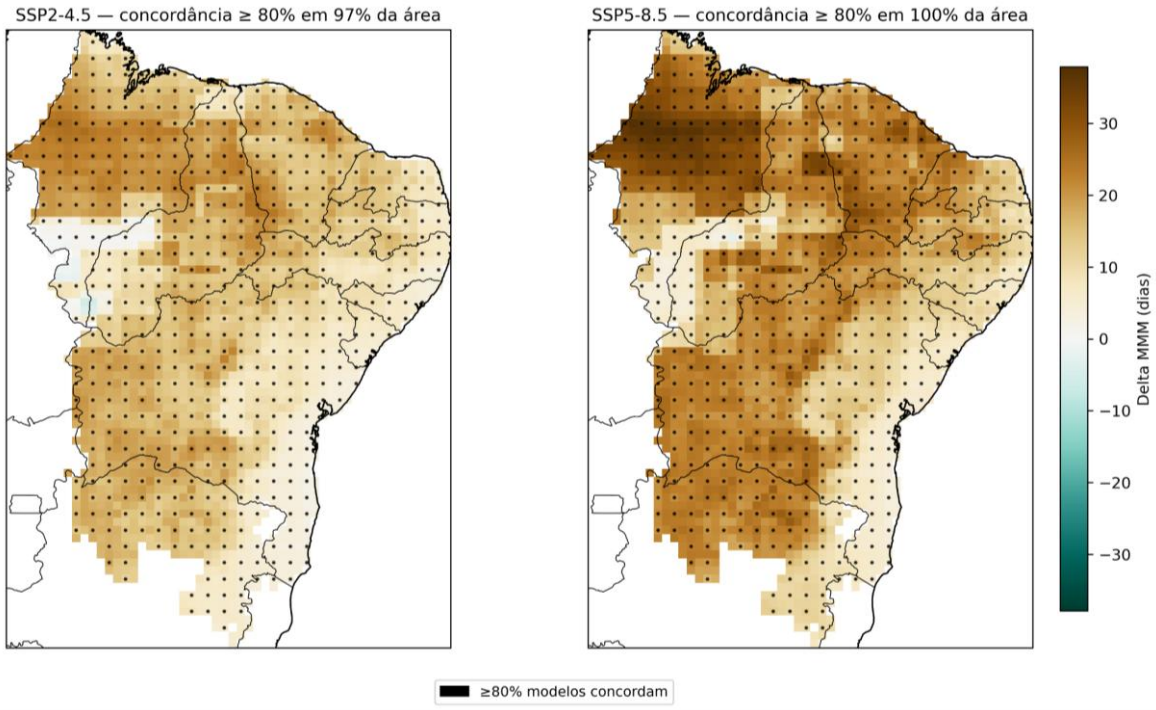


Figura 4 - Mudanças projetadas (Delta) nos Dias Secos Consecutivos (CDD, em dias) para os cenários SSP2-4.5 (esquerda) e SSP5-8.5 (direita).

O mapa de Dias Secos Consecutivos evidencia anomalias positivas extremas (tons mais escuros) na porção noroeste da região, abrangendo a área de transição para o bioma amazônico e a fronteira agrícola do MATOPIBA, importante fronteira agrícola que inclui os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. O incremento expressivo do CDD nessa localidade, que se agrava no cenário de altas emissões, sinaliza um estresse severo sobre a vegetação e o esgotamento precoce da umidade do solo. Marengo et al., (2020) também verificou que há tendência a períodos mais longos de dias secos, maior déficit hídrico e avanço de condições áridas, com risco de "semi-deserto" substituindo a caatinga até 2100 sob forte aquecimento.

A análise da Precipitação Máxima Diária (Rx1day) apresentada na Figura 5 indica uma projeção de aumento generalizado na intensidade do dia mais chuvoso do ano, abrangendo 63% da área no cenário moderado (SSP2-4.5) e expandindo-se para 84% no cenário pessimista (SSP5-8.5). Essa convergência mais reduzida em comparação ao CDD é um comportamento fisicamente esperado para extremos diários. Por se tratar da representação do dia mais chuvoso do ano, a anomalia depende fortemente de processos convectivos de mesoescala e parametrizações locais, escalas em que os modelos globais apresentam maior dificuldade de representação espaço-temporal exata. Contudo, a expansão substancial da área de concordância sob o cenário SSP5-8.5 (84%) reforça a robustez termodinâmica do sinal: em um cenário de maior aquecimento, o aumento da capacidade de retenção de umidade da atmosfera impulsiona de forma consistente a intensificação dos eventos de precipitação extrema de curto prazo.

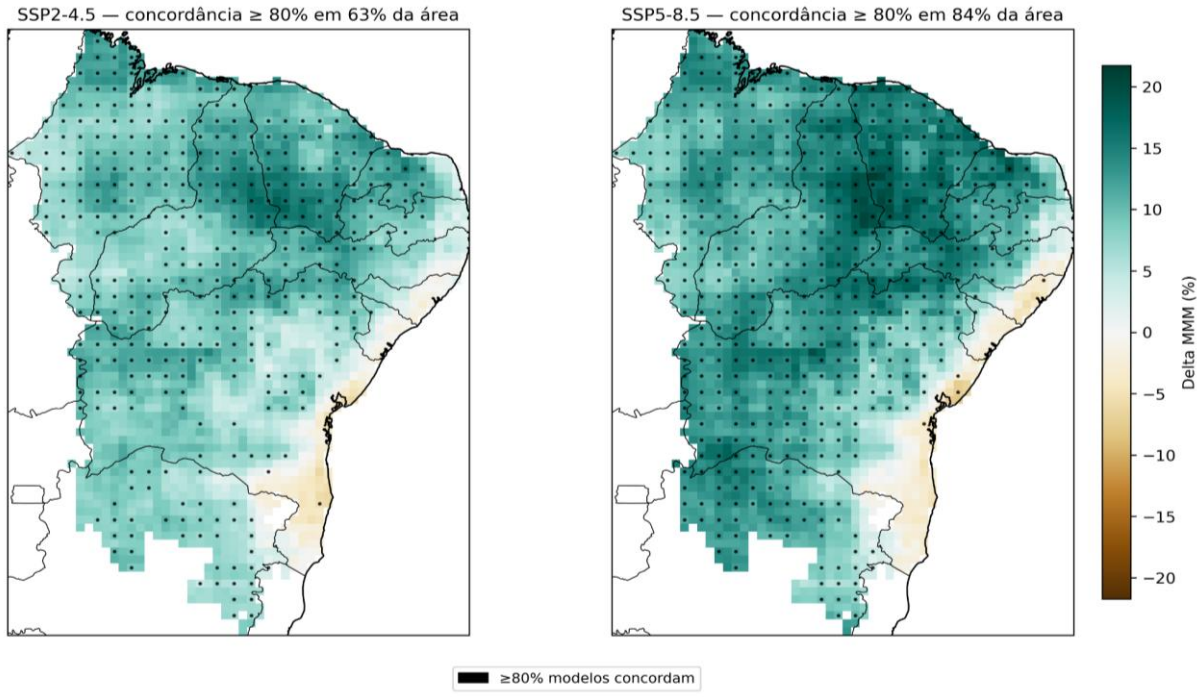


Figura 5 - Mudanças projetadas (Delta) na Precipitação Máxima Diárias (RX1day, em dias) para os cenários SSP2-4.5 (esquerda) e SSP5-8.5 (direita).

As margens de incerteza observadas espacialmente, ilustradas pela ausência de *stippling* em determinados índices e áreas, não decorrem de falhas ou artefatos gerados pelo pós-processamento estatístico. O método QDM operou de modo plenamente estável e robusto, caracterizado como um método matematicamente estruturado com o propósito explícito de corrigir o viés histórico sem alterar o sinal de mudança climática (a tendência futura) projetado pelos modelos originais.

Dessa forma, a divergência inter-modelos atestada nos resultados representa uma limitação física e de resolução espacial nativa intrínseca aos próprios MCGs brutos. O QDM, portanto, cumpriu a premissa de preservar essa incerteza estrutural, refletindo-a adequadamente na base final.

Além da distribuição espacial, é imperativo avaliar como cada modelo individual se comporta em relação à média geral. Para subsidiar análises mais refinadas sobre a confiabilidade das projeções agregadas, apresentam-se na Figura 6 os rankings de concordância geral.

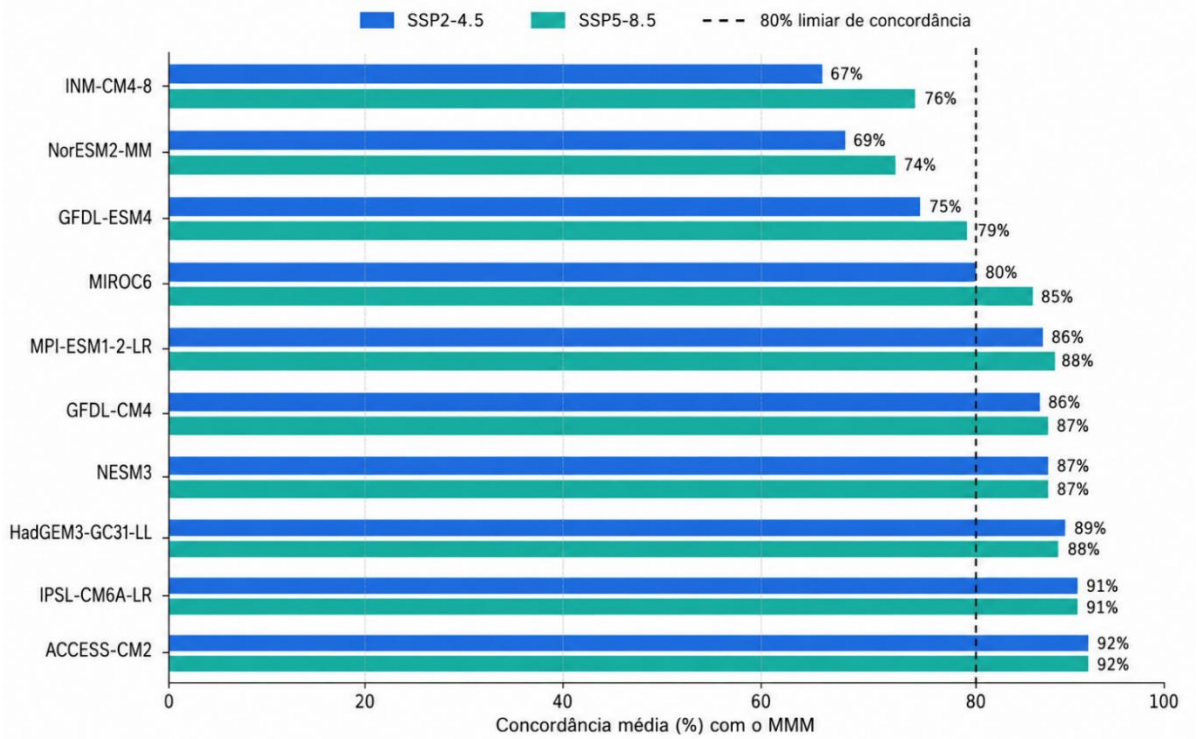


Figura 6 - Concordância média (%) dos modelos do CMIP6 em relação ao MMM nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. A linha tracejada indica o limiar de concordância de 80%.

4. CONCLUSÕES

A conclusão deste trabalho evidencia que a metodologia adotada foi eficaz na geração de uma base de dados climáticos consistente e validada, essencial para a gestão de recursos hídricos diante das especificidades do NEB. O método QDM mostrou-se altamente robusto, reduzindo significativamente o viés sistemático dos modelos climáticos, garantindo que as projeções preservassem o sinal original de mudança climática ao mesmo tempo em que se ajustavam à realidade local observada.

Além disso, é importante ressaltar que, embora este artigo apresente os resultados detalhados para apenas três índices diagnósticos (PRCPT, CDD e RX1DAY) devido às limitações de espaço, o estudo contemplou a análise de todos os 10 índices de extremos climáticos recomendados. O conjunto avaliado inclui também a precipitação máxima em 5 dias (RX5DAY), o total anual em dias extremamente úmidos (R99TOT e R95PTOT), dias consecutivos úmidos (CWD), intensidade diária simples (SDII) e dias com precipitação acima de 10 mm e 20 mm (R10mm e R20mm). Para um maior aprofundamento, os resultados detalhados de todos esses índices estão inteiramente disponíveis e interativos na Plataforma Climática Interativa Projene (https://projene.xhidro.com/).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Núcleo de Estudos de Recursos Hídricos do Semiárido (NERHIS) e ao INCT – Observatório Nacional para Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa [Proc. 406919/2022-4]. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), no âmbito do Edital nº 014/2025, sob o Pedido nº 3705/2025 e Termo de Outorga TSC0039/2025.

REFERÊNCIAS

CANNON, A.J.; SOBIE, S.R.; MURDOCK, T.Q. (2015). "Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?". Journal of Climate 28(17), pp. 6938 – 6959. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

DANTAS, L.G.; DOS SANTOS, C.A.C.; SANTOS, C.A.G.; MARTINS, E.S.P.R.; ALVES, L.M. (2022). "Future Changes in Temperature and Precipitation over Northeastern Brazil by CMIP6 Model". Water 14, 4118. https://doi.org/10.3390/w14244118.

FIRPO, M.Â.F.; GUIMARÃES, B.S.; DANTAS, L.G.; SILVA, M.G.B.; ALVES, L.M.; CHADWICK, R.; LLOPART, M.P.; OLIVEIRA, G.S. (2022). "Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil". Front. Clim. 4, 948499. doi: 10.3389/fclim.2022.948499.

HASTENRATH, S. (2012). Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. Climatic Change, 112, 243–251. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. (2021). "Summary for Policymakers", in CLIMATE CHANGE 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 40 p. ISBN 978-92-9169-158-6. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 09 fev. 2026.

JONES, J. E.; HALES, R. C.; LARCO, K.; NELSON, E. J.; AMES, D. P.; JONES, N. L.; IZA, M. (2023). Building and validating multidimensional datasets in hydrology for data and mapping web service compliance. Water, 15(3), 411. https://doi.org/10.3390/w15030411.

MARENGO, J.; CUNHA, A.; NOBRE, C.; NETO, G.; MAGALHÃES, A.; et al. (2020). "Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C". Natural Hazards, pp. 1 – 23. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3.

MARENGO, J. A.; GALDOS, M. V.; CHALLINOR, A.; CUNHA, A. P.; et. al, (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. Climate Resilience and Sustainability, 1(1), e17. https://doi.org/10.1002/cli2.17.

NICHOLLS, Z.; LEWIS, J.; MAKIN, M.; NATTALA, U.; ZHANG, G. Z.; MUTCH, S. J.; TESCARI, E.; MEINSHAUSEN, M. (2021). Regionally aggregated, stitched and de-drifted CMIP-climate data, processed with netCDF-SCM v2.0.0. Geoscience Data Journal, 8(2), 154–198. https://doi.org/10.1002/gdj3.113.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia, 25(2), 185–204. https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004.

XAVIER, A.C.F.; MARTINS, L.L.; RUDKE, A.P.; DE MORAIS, M.V.B.; MARTINS, J.A.; BLAIN, G.C. (2022). "Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil)". International Journal of Climatology 42(1), pp. 175 – 190. DOI: 10.1002/joc.7238.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology, v. 456-457, p. 12-29, 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

UTIDA, G.; CRUZ, F. W.; ETOURNEAU, J.; BOULOUBASSI, I.; et al. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. Scientific Reports, 9, 1698. https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6