

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

VARIABILIDADE INTERMODELOS CMIP6 NA PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA PARA A BACIA DO RIO IGUAÇU

Victor Rodrigues Shiraishi¹ ; Daniel Henrique Marco Detzel²

Abstract: This study investigates the intermodel variability of annual accumulated precipitation in the Iguaçu River Basin using 19 GCMs/ESMs from CMIP6 available in the CLIMBra Dataset. Sixteen rainfall stations were analyzed, with weighted average precipitation calculated using the Thiessen method. Model variability was assessed using the non-parametric Kruskal-Wallis test, followed by Dunn's post-hoc test, at a 5% significance level. The multi-model approach allowed for uncertainty quantification and identification of model discrepancies. Results indicate significant variability in annual precipitation; comparisons between the historical period (1980–2013) and future projections (2015–2100, SSP585 scenario) suggest an increase in the frequency and intensity of extreme events. The accumulated annual precipitation shows a significant increase in model disagreement across the four analyzed periods: historical (1980–2013), near future (2025–2050), mid-term (2051–2075), and far future (2076–2100). Additionally, the range of annual values increases substantially, reflecting growing model uncertainty over time. While the Kruskal-Wallis test did not identify a significant trend in historical variability, it revealed a statistically significant increase in future variability across all periods. These findings underscore the importance of considering intermodel variability when interpreting climate projections, emphasizing the need for a cautious approach in planning adaptation and mitigation strategies for projected extreme events.

Keywords – Climate change; precipitation; CMIP6 inter-model variability

Resumo: Este estudo investiga a variabilidade intermodelos da precipitação anual acumulada na bacia do rio Iguaçu, utilizando 19 modelos GCMs/ESMs do CMIP6 disponibilizados no CLIMBra Dataset. Foram analisadas 16 estações pluviométricas, com a precipitação média ponderada calculada pelo método de Thiessen. A variabilidade entre os modelos foi avaliada com o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do pós-teste de Dunn, com um nível de significância de 5%. A abordagem multimodelos permitiu quantificar as incertezas e identificar discordâncias entre os modelos. Os resultados indicam uma variabilidade significativa na precipitação anual; a comparação entre o período histórico (1980-2013) e as projeções futuras (2015-2100, cenário SSP585) aponta para um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos. A precipitação anual acumulada apresenta aumento significativo na discordância entre os modelos nos quatro períodos analisados: o período histórico (1980-2013), o *near future* (2025-2050), o *mid term* (2051-2075) e o *far future* (2076-2100). Além disso, a amplitude dos valores anuais aumenta expressivamente, refletindo a incerteza dos modelos ao longo do tempo. Embora o teste de Kruskal-Wallis não tenha identificado tendência significativa na variabilidade histórica, ele revelou um aumento estatisticamente significativo na variabilidade futura para os quatro períodos. Os resultados evidenciam a importância de considerar a variabilidade intermodelos ao interpretar projeções climáticas, destacando a necessidade de uma abordagem cautelosa para o planejamento de estratégias de adaptação e mitigação frente aos eventos extremos projetados.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas; precipitação; variabilidade intermodelos CMIP6

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR, victorshiraishi2@gmail.com

2) Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR, detzel@ufpr.br

INTRODUÇÃO

A precipitação representa uma das principais fontes de água doce do planeta. Nesse contexto, os modelos climáticos desempenham um papel fundamental na avaliação do comportamento da precipitação frente ao aumento das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (TRANCOSO et al., 2024). Os efeitos mais evidentes das mudanças climáticas estão relacionados a eventos extremos, por exemplo: aumento da intensidade de ciclones, precipitações excessivas com tempestades de granizo e geadas, alteração no padrão sazonal do clima, maior frequência nos períodos de seca e calor, derretimento das geleiras e elevação do nível do mar (BRUM, 2021).

Segundo Trancoso et. al. (2024), o estudo da precipitação através dos modelos climáticos apresenta uma incerteza considerável, o que não necessariamente ocorre com estudos relacionados à projeções de temperatura média do ar. Essas incertezas originam-se de duas fontes principais: (1) limitações estruturais inerentes aos próprios modelos e (2) a variabilidade natural do sistema climático. Como demonstrado por Wilcke e Bärring (2016), a escolha dos modelos, seja pela seleção de um subconjunto restrito ou pela dependência de um único modelo, pode introduzir vieses significativos nos resultados, comprometendo a interpretação dos dados climáticos. Cada modelo simula a transferência de energia entre as diferentes esferas do planeta, sendo o El Niño Oscilação Sul (ENSO) um fenômeno importante no processo. Como os modelos não concordaram entre si sobre essa variabilidade natural, calculam projeções que têm pouca concordância entre si.

Ao reduzir o número de modelos, entende-se que não se está alterando a incerteza intrínseca do sistema climático, mas sim limitando a capacidade de representá-la adequadamente. Essa redução implica na perda de informação crítica sobre a amplitude das incertezas, principalmente em eventos extremos. A partir do conhecimento das incertezas, incluindo cenários menos prováveis, porém potencialmente catastróficos, é possível desenvolver estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas (WILCKE; BÄRRING, 2016).

O presente artigo tem como objetivo avaliar a variabilidade de projeções de precipitação anual de 19 modelos climáticos CMIP6 no cenário SSP585, visando verificar se há diferenças estatisticamente significativas entre suas distribuições. Para isso, optou-se pela aplicação do teste de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952), um método não paramétrico que permite comparar mais de dois grupos independentes sem assumir a normalidade dos dados. Ao se identificar diferenças significativas pelo teste de Kruskal-Wallis, realizou-se a aplicação dos pós-teste de Dunn (Dunn, 1964). Este método é indicado para identificar entre quais partes de modelos ocorrem estatísticas. Vale destacar que a média da precipitação anual da bacia hidrográfica foi obtida por meio do método de Thiessen. Outros detalhes metodológicos são fornecidos nos itens a seguir.

MATERIAIS E MÉTODOS

CLIMBra Dataset

O Conjunto de Dados de Mudanças Climáticas para o Brasil (CLIMBra, BALLARIN et al., 2023) considera seis importantes variáveis meteorológicas ligadas às mudanças climáticas, sendo elas: precipitação (pr), temperatura máxima (tasmax) e mínima (tasmin), radiação de ondas curtas líquidas na superfície (rss), velocidade do vento próximo à superfície (sfcWind) e umidade relativa do ar (hur). As séries temporais abrangem um período de 2015 a 2100, em escala diária. Esses dados foram obtidos a partir de 19 modelos GCMs/ESMs do CMIP6 (Tabela 1), apresentando inicialmente uma resolução espacial grosseira e vieses sistemáticos. Com isso, Ballarin et al. (2023)

utilizaram a técnica de *downscaling* estatístico para melhorar a resolução para uma escala mais fina de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Para a remoção de viés, utilizaram a técnica de Mapeamento Delta de Quantil.

Tabela 1 - Modelos CMIP6 utilizados no CLIMBra

Modelo	País/Região	Resolução	Modelo	País/Região	Resolução
MRI-ESM2*	Japão	$1,12^\circ \times 1,12^\circ$	NESM3	China	$1,9^\circ \times 1,9^\circ$
EC-EARTH3*	Europa	$0,7^\circ \times 0,7^\circ$	KIOST-ESM	Coreia do Sul	$1,87^\circ \times 1,87^\circ$
CMCC-ESM2*	Europa	$0,9^\circ \times 1,25^\circ$	KACE	Coreia do Sul	$1,87^\circ \times 1,25^\circ$
INM-CM4-8*	Rússia	$1,5^\circ \times 2,0^\circ$	GFDL-CM4	EUA	$1,0^\circ \times 1,25^\circ$
NorESM2-MM*	Noruega	$0,9^\circ \times 1,25^\circ$	GFDL-ESM4	EUA	$1,0^\circ \times 1,25^\circ$
MPI-ESM1.2-HR*	Alemanha	$0,9^\circ \times 0,9^\circ$	ACCESS-CM2	Austrália	$1,87^\circ \times 1,25^\circ$
INM-CM5*	Rússia	$1,5^\circ \times 2,0^\circ$	HadGEM3-GC31-LL	Reino Unido	$1,87^\circ \times 1,25^\circ$
ACCESS-ESM1-5*	Austrália	$1,87^\circ \times 1,25^\circ$	IPSL-CM6A*	França	$2,5^\circ \times 1,3^\circ$
TaiESM1	Taiwan	$1,9^\circ \times 1,25^\circ$	UKESM1.0	Reino Unido	$1,87^\circ \times 1,25^\circ$
MIROC6*	Japão	$1,4^\circ \times 1,4^\circ$			

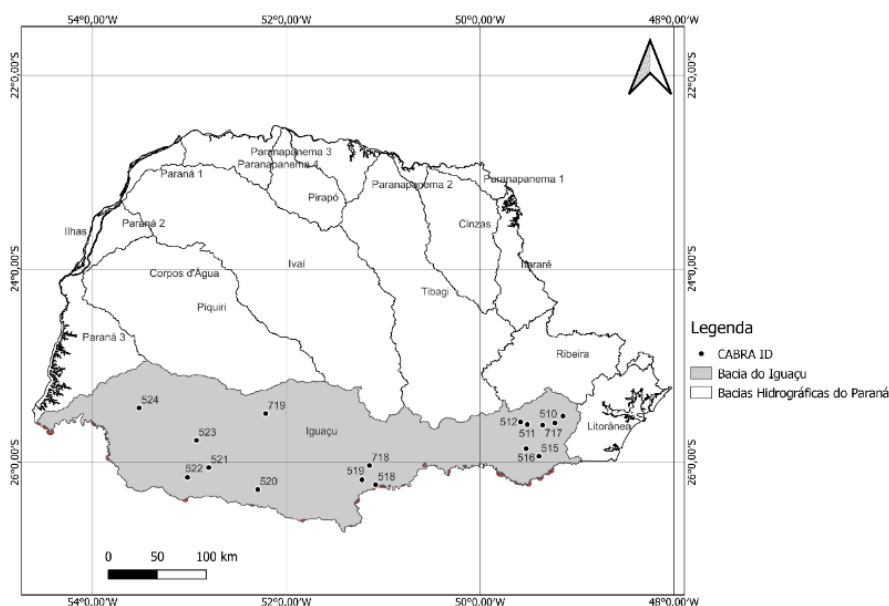
FONTE: Adaptado de Ballarin et al. (2023)

Para este estudo, as variáveis selecionadas são: precipitação (mm/dia), radiação líquida de ondas curtas na superfície (MJ/m^2) e velocidade do vento perto da superfície (altura de 2 m) (m/s). Optou-se por coletar as projeções do cenário SSP585, as quais representam os possíveis impactos em um futuro de altas taxas de emissão de gases de efeito estufa. As séries compreendem o período de 1980 até 2100, sendo assim divididas: período histórico, ou *hindcast* (1980 a 2013), *near future* (2025 a 2050) *mid-term* (2051 a 2075) e *far future* (2076 a 2100).

Local de estudo selecionado

O rio Iguaçu é o mais importante corpo hídrico do estado do Paraná, situado entre as latitudes $25^\circ 05' 00''$ S e $26^\circ 45' 00''$ S e as longitudes $48^\circ 57' 00''$ W e $54^\circ 50' 00''$ W. Dentro do estado, sua bacia hidrográfica possui uma área de drenagem de 54.820 km^2 . Esse local caracterizado pelo clima subtropical, sem estação seca, sendo em geral as temperaturas médias dos dias mais quentes e frios de 22°C e 18°C , respectivamente (STIPP; BUCHIR; MINE, 2013). Com intuito de estudar essa bacia hidrográfica foram selecionadas todas as estações pluviométricas do CABra localizadas dentro do seu perímetro, totalizando 16 estações (Figura 1).

Figura 1 - Postos pluviométricos selecionados na bacia hidrográfica do rio Iguaçu.



Precipitação média na bacia

O método de Thiessen tem obtido resultados satisfatórios em estudos de recursos hídricos e previsão climática. Essa técnica tem como base a teoria dos diagramas de Voronoi para calcular a precipitação média em uma região de estudo (MARCiano et al., 2017). Em resumo, faz uma média ponderada entre as áreas de influência das estações pluviométrica que é diretamente proporcional os registros de altura de precipitação. O método de Thiessen foi escolhido para este estudo por permitir calcular a média ponderada das estações para toda a bacia hidrográfica, evitando que as análises fossem aplicadas individualmente nas estações consideradas.

Teste de Kruskal-Wallis com pós teste de Dunn

O teste de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) é método estatístico não paramétrico usado para comparar as medianas de três ou mais grupos independentes. Trata-se de uma alternativa à análise da variância (ANOVA) quando os dados não atendem aos pressupostos de normalidade ou homocedasticidade. O teste verifica se k amostras independentes, provenientes de distribuições contínuas, têm origens populacionais distintas. O teste é baseado nos postos (*ranks*) dos dados e tem como hipóteses:

H_0 : As medianas de todos os grupos são iguais

H_1 : A mediana de pelo menos um grupo difere das demais.

A variável do teste é calculada de acordo com a equação (1):

$$H = \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} \right] - 3(N+1) \quad (1)$$

onde, k representa o número de amostras ou grupos, n_j o número de casos na j -ésima amostra ou grupo, N o número de casos na amostra combinada (a soma dos n_j) e R_i a soma dos postos na i -ésima amostra.

Para cada grupo k , os dados são organizados em ordem crescente. Na sequência, atribuem-se postos a todas as observações, sendo o menor posto atrelado à menor observação. Em seguida, calcula-se a soma dos postos para cada grupo e, com esses valores, obtém-se o posto médio para cada grupo. Para grandes amostras, $k > 3$ e $n_j > 5$ a distribuição amostral H tende à distribuição χ^2 com $k - 1$ graus de liberdade. Como procedimento pós-teste foi utilizado o teste Dunn (Dunn, 1964) para avaliar as diferenças significativas modelo a modelo nos quatro períodos distintos. Isso porque o teste de Kruskal-Wallis utiliza como hipótese nula a igualdade das medianas entre todos os grupos analisados, não individualizando qual(is) grupo(s) possui(em) as diferenças. Por sua vez, o teste de Dunn trabalha com as seguintes hipóteses:

H_0 : não há diferença significativa entre os grupos i e j ;

H_1 : há diferença significativa entre os grupos i e j .

A estatística de Dunn é dada por:

$$Z_{ij} = \frac{R_i - R_j}{\sqrt{\left(\frac{N(N+1)}{12}\right) \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)}} \quad (2)$$

onde R_i e R_j correspondem às médias dos postos dos grupos i e j , respectivamente, n_i e n_j são os tamanhos amostrais dos grupos e N representa o tamanho total da amostra. Todos os testes foram avaliados utilizando significância de 5%.

RESULTADOS

Distribuições de probabilidade

A curva de probabilidade na Figura 2 da precipitação anual acumulada, gerada a partir do conjunto de 19 modelos climáticos simulados no período histórico de 1980 a 2013, revela características importantes sobre a distribuição e as incertezas associadas às simulações. A linha azul, que representa a média dos modelos, indica uma precipitação média de 1831 mm e próxima da mediana (1811 mm), sugerindo uma distribuição levemente assimétrica à direita. A dispersão das curvas individuais dos modelos reflete as incertezas inerentes às simulações, que podem surgir de diferenças nas parametrizações dos modelos do CMIP. Por integrarem interações entre oceano e atmosfera, estes modelos apresentam limitações inerentes ao representar o sistema climático de forma realista (Padoan, 2023).

A Figura 3 mostra as distribuições para o período futuro de 2025 a 2100, revelando uma distribuição unimodal (linha sólida azul) com assimetria positiva, média próxima de 2005 mm e mediana de 1930 mm. O resultado evidencia que a distribuição de frequências das precipitações projetadas possui maior variabilidade entre os modelos climáticos. Observa-se também que as curtoses dos modelos têm grandes discordâncias entre si, ocasionando uma faixa de incerteza com uma amplitude considerável próxima a cauda direita.

Figura 2 - Faixas de incertezas intermodelos da curva de densidade de probabilidade dos 19 modelos CMIP6 com cenário histórico simulado (1980-2013).

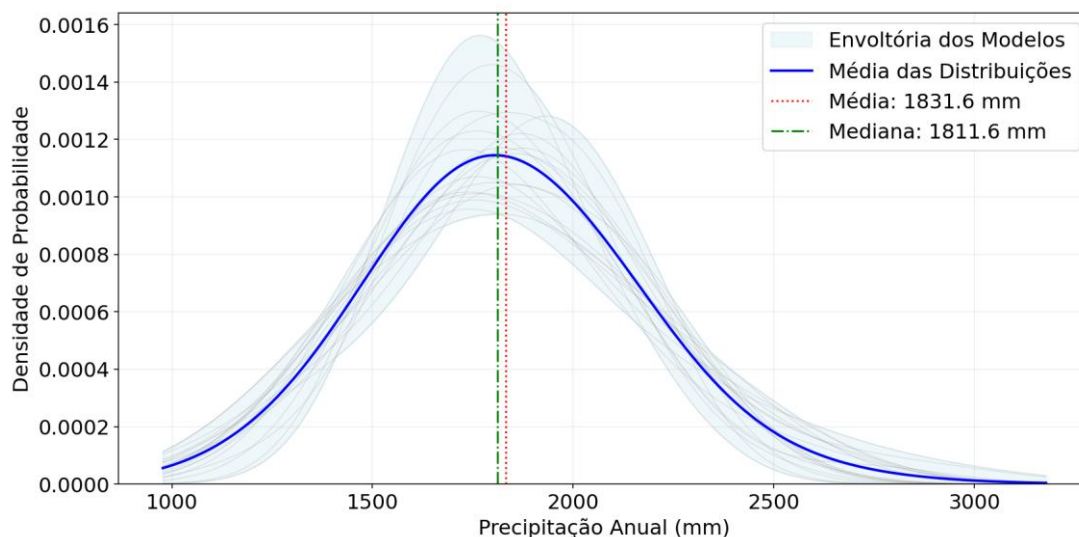
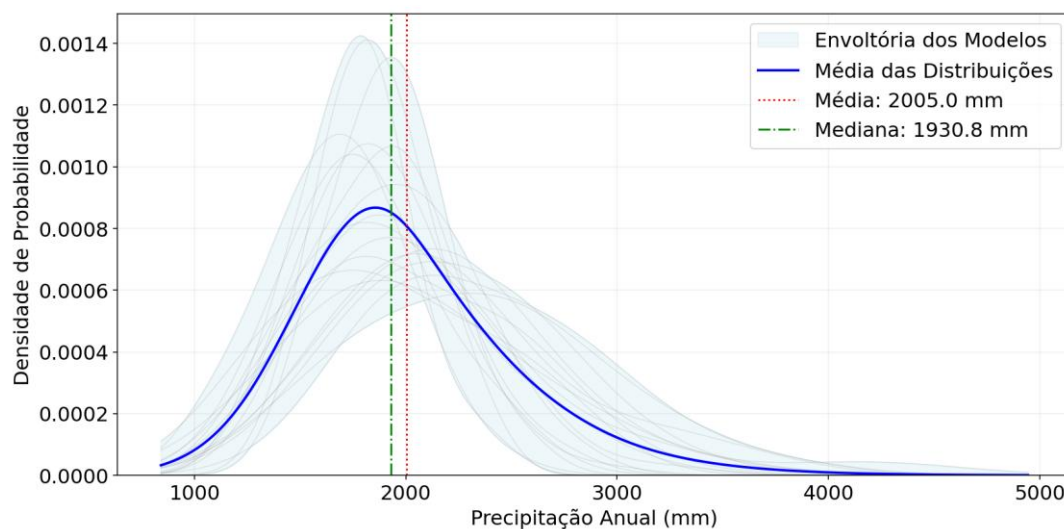


Figura 3 - Faixas de incertezas intermodelos da curva de densidade de probabilidade dos 19 modelos CMIP6 com cenário SSP585 (2025-2100).

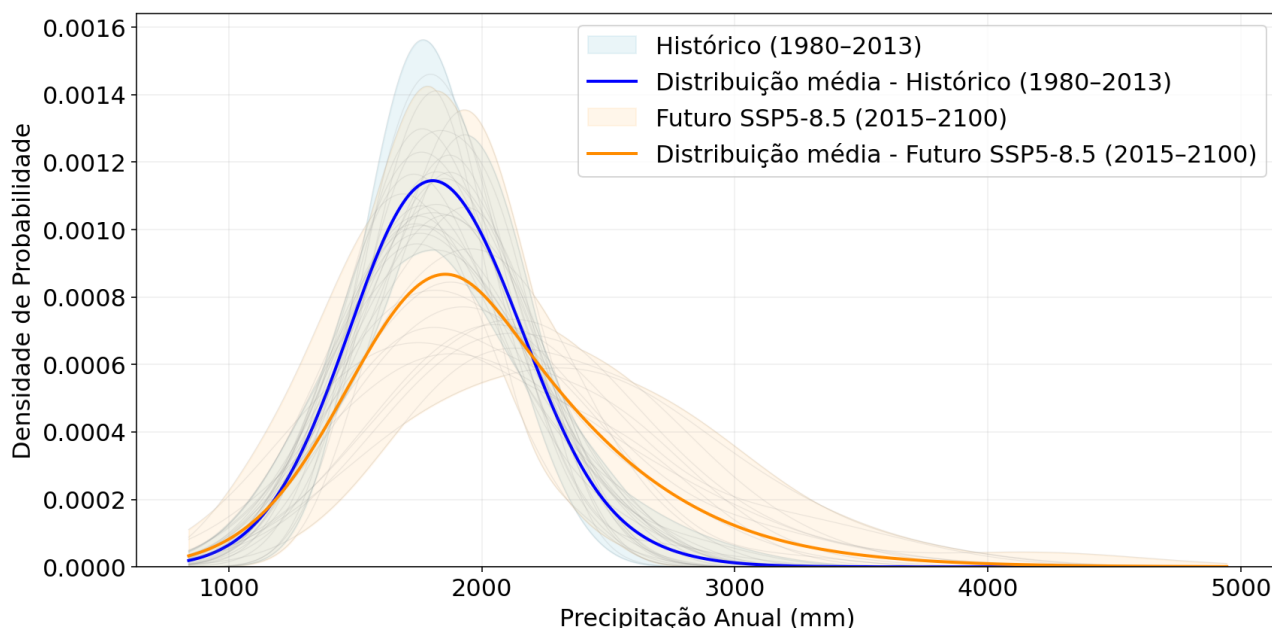


A comparação entre as curvas de probabilidade do período de *hindcast* e das projeções futuras revela diferenças significativas na distribuição da precipitação. Enquanto o *hindcast* apresenta uma distribuição menos dispersa, com incertezas relativamente menores entre os 19 modelos do CMIP6, as projeções futuras mostram uma clara assimetria na distribuição, com uma cauda direita mais alongada. Este padrão indica um aumento na probabilidade de eventos extremos de precipitação no futuro, possivelmente associado às mudanças climáticas. Outro ponto importante é que no período de *hindcast*, observa-se uma maior discordância entre os modelos próximos à região média da distribuição, o que sugere dificuldades intrínsecas na simulação dos processos climáticos. Estas diferenças entre *hindcast* e projeções destacam a importância de considerar tanto a mudança na forma da distribuição quanto as incertezas dos modelos ao interpretar resultados climáticos, especialmente para fins de planejamento de adaptação.

A maior variabilidade nas projeções futuras, particularmente nos extremos, reforça a necessidade de abordagens probabilísticas e do uso de *ensembles* multimodelos para uma avaliação mais robusta dos riscos climáticos. Na

Figura 4 é possível confrontar diretamente como as distribuições de probabilidade com suas envoltórias.

Figura 4 - Densidade de probabilidade para o período histórico (1980–2013) e futuro (2015–2100), com envoltória e respectivas médias



Séries temporais

A variabilidade por período indica um aumento expressivo em suas amplitudes tanto média quanto máximas da precipitação anual acumulado ao longo do tempo. A Figura 5 e a Tabela 2 apontam uma tendência de aumento não apenas na precipitação média, mas também na variabilidade dos modelos climáticos. A ampliação progressiva da envoltória reflete a incerteza crescente inerente às projeções climáticas, especialmente em períodos mais distantes, ressaltando assim a importância de considerar diferentes cenários nos estudos climáticos.

Figura 5 - Precipitação anual acumulada, mostrando a envoltória dos 19 modelos CMIP6, o intervalo de confiança de 95% da média dos modelos climáticos

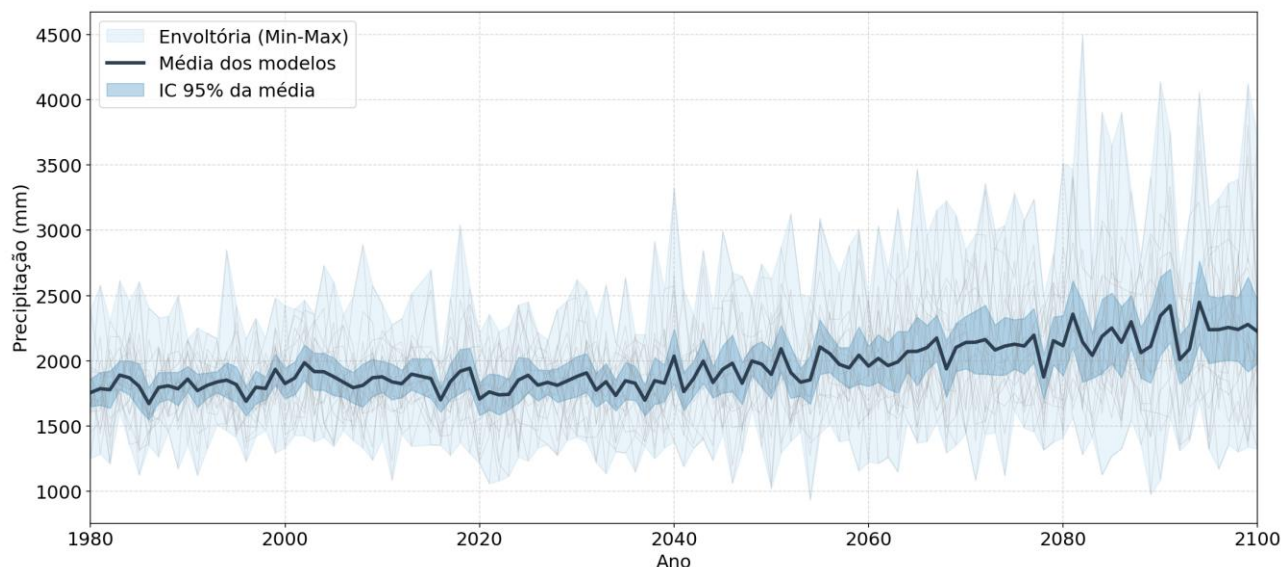


Tabela 2 – Amplitude média e mínima da faixa de incerteza da envoltória dos dezenove modelos climáticos por período com as diferenças relativas comparadas com o período histórico

Período	Média da Precipitação anual acumulada (mm)	Amplitude média (mm)	Amplitude máxima (mm)	Δ Amplitude média (%) em relação ao histórico	Δ Amplitude máxima (%) em relação ao histórico
1980-2013	1831	1083	1555	-	-
2025-2050	1865	1240	1940	+ 14,5	+24,7
2051-2075	2039	1621	2098	+49,7	+34,9
2076-2100	2039	2072	3213	+91,3	+100,1

Análise da Variabilidade Intermodelos: testes de hipótese

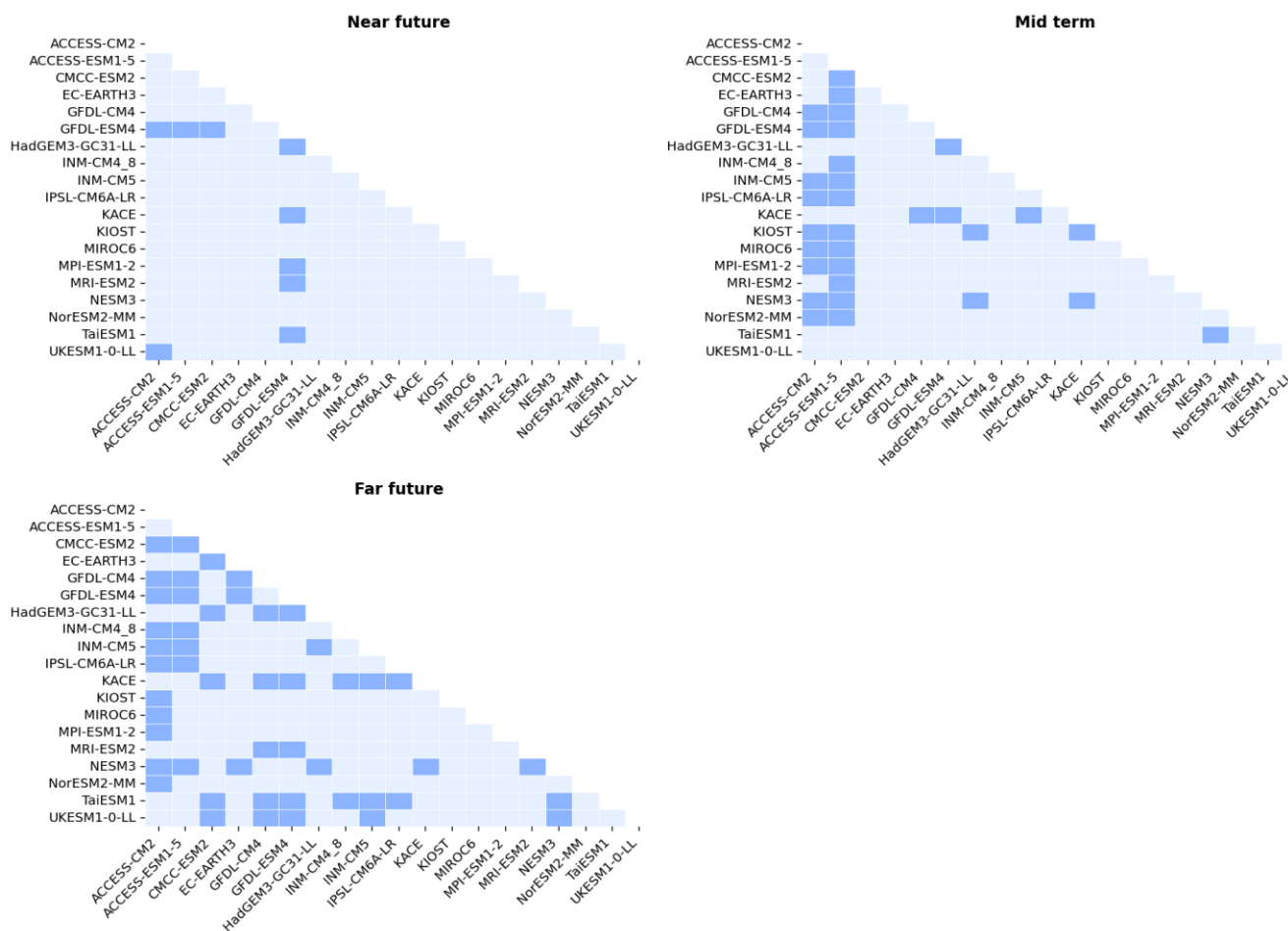
No período *near future* (2025-2050), foram observadas 9 discordâncias significativas entre os modelos, indicando que as previsões são relativamente homogêneas. Já no *mid-term* (2051-2075), o número de discordâncias aumentou para 31, mostrando uma maior divergência. No *far future* (2026-2100), esse número sobe para 49, evidenciando assim ampliações significativas a medida que o horizonte temporal avança. Esses resultados são mostrados na Figura 6, na qual os quadrados azuis escuros representam uma discordância significativa para cada período. Vale ressaltar que o período histórico não consta devido ao fato de que o teste de Kruskal-Wallis não apontou variabilidade significativa entre os modelos.

Cumprе destacar que os modelos que apresentaram as maiores discordâncias foram o GFDL-ESM4 (*near future*), ACCESS-CM2 e ACCESS-ESM1-5 (*mid-term*) e ACCESS-CM2 (*far future*). No caso dos períodos *mid-term* e *far future*, os modelos citados tiveram percentuais de discordâncias iguais ou maiores que 50% em relação aos demais. Ainda considerando esses mesmos

períodos, os modelos com as maiores concordâncias foram o TaiESM1, UKESM1-0-LL, CMCC-ESM2EC-EARTH3, MIROC6 e MPI-ESM1-2.

Figura 6 - Variabilidade entre os modelos utilizando o teste Kruskal-Wallis com pós teste de Dunn.

Destaques em azul escuro mostram os resultados estatisticamente significativos ($p < 0,05$)



CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo destacam a importância de considerar as incertezas intermodelos ao avaliar o impacto das mudanças climáticas em relação à variabilidade de precipitação. A análise da precipitação anual acumulada sobre a bacia do Rio Iguaçu, usando os 19 modelos do CMIP6, revelou uma variabilidade significativa entre eles, crescentes ao longo dos períodos futuros analisados. O aumento da amplitude dos valores anuais e a intensificação da variabilidade futura indicam uma crescente incerteza nas projeções.

A abordagem multimodelos mostrou-se fundamental para quantificar essas incertezas, permitindo uma avaliação mais robusta das possíveis respostas climáticas na bacia do Iguaçu. Embora não tenha sido identificada a variabilidade nos modelos climáticos no período histórico, os resultados sugerem aumento relevante em suas discordâncias no futuro, o que reforça a necessidade de adaptar políticas e estratégias de gestão de recursos hídricos, considerando a incerteza associada. Além disso, as curvas de probabilidade indicam que há chances maiores de ocorrer eventos extremos na bacia, evidenciado pelo aumento da cauda direta e pela curtose com achatamento

comparando o período histórico (1980-2013) com o período futuro (2015-2100). Não só o teste de Dunn, mas também a curva de probabilidade aponta maior incerteza quanto a distribuição de probabilidade.

Recomenda-se a continuidade de estudos que explorem diferentes cenários climáticos, ampliando a quantidade de modelos utilizados e considerando uma gama mais ampla de cenários SSP. Isso permitirá uma melhor compreensão das incertezas associadas às projeções climáticas, especialmente em relação aos cenários com alta discordância entre os modelos. A utilização de um maior número de modelos e cenários contribui para uma análise mais robusta, promovendo uma visão mais ampla sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas. Além disso, a integração de novas abordagens metodológicas poderá auxiliar na gestão das discrepâncias entre as projeções, garantindo que as decisões de adaptação e mitigação sejam baseadas em uma avaliação mais sólida das incertezas climáticas.

REFERÊNCIAS

- BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C. et al. (2023). CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, v. 10, p. 47. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>.
- BRUM, M. C. (2021). Percepção e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas sobre a olericultura em municípios da microrregião do Vale do Paraíba Fluminense - RJ. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.
- DUNN, O. J. (1964) Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241-252.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2019). IPCC Factsheet: What is the IPCC? Cambridge University Press.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952.
- MANN, H. B. (1945). "Non-parametric tests against trend". *Econometria*, v. 13, p. 245-259.
- MARAUN, D. (2013). "Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue". *Journal of Climate*, v. 26, p. 2137-2143.
- MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. (2018). "Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada". *Revista Ambiente & Água*, 13(1), e1906.
- PADOAN, D. (2023). Mudança climática da monção na América do Sul: avaliação de modelos do CMIP6 e mudanças projetadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- STIPP, R. D.; BUCHIR, L. M. S.; MINE, M. R. M. (2013) Tendência sazonal da precipitação na bacia do Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., Porto Alegre. In Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH.
- TRANCOSO, Ralph; SYKTUS, Jozef; ALLAN, Richard; CROKE, Jacky; HOEGH-GULDBERG, Ove; CHADWICK, Robin. (2024). Significantly wetter or drier future conditions for one to two thirds of the world's population. *Nature Communications*, v. 15.
- WILCKE, R. A. I.; BÄRRING, L. (2016). "Selecting regional climate scenarios for impact modelling studies". *Environmental Modelling & Software*, v. 78, p. 191-201. ISSN 1364-8152.