

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DO ALTO RIO IGUAÇU

Jhonny Matheus Marinho Silva¹ & Daniel Henrique Marco Detzel²

Abstract: This study assesses the impacts of climate change on streamflows in the Upper Iguaçu River Basin through the end of the 21st century, using the MGB hydrological model calibrated and validated with historical time series of streamflow and precipitation. The calibration covered nine sub-basins and showed satisfactory performance according to NSE, NSElog, and PBIAS metrics. After validation, the model was forced with bias-corrected precipitation projections from 19 CMIP6 global climate models (GCMs), under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emission scenarios, made available by the CLIMBra dataset. The analysis of simulated streamflow series was based on the Mann-Kendall trend test and Theil-Sen slope estimator. Results indicate a predominance of increasing trends in annual mean flows, with higher magnitude and inter-model agreement under the high-emission scenario SSP5-8.5. For the full period (2015–2100), 68,4% of the models showed significant positive trends under SSP5-8.5, compared to 63,2% under SSP2-4.5. The multimodel mean (ensemble) also exhibited significant increasing trends, especially under the SSP5-8.5 scenario. Despite the inherent uncertainties of climate projections, the results are consistent with recent studies on the impacts of climate change in southern Brazil and highlight the importance of incorporating climate change effects into water resources management and the protection of vulnerable populations facing extreme events.

Resumo: Este estudo avalia os impactos das mudanças climáticas nas vazões da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu até 2100, por meio da aplicação do modelo hidrológico MGB, calibrado e validado com séries históricas de vazão e precipitação. A calibração abrangeu nove sub-bacias e obteve desempenho satisfatório com base nas métricas NSE, NSElog e PBIAS. Após a validação, o modelo foi forçado com projeções de precipitação corrigidas por viés, oriundas de 19 modelos climáticos globais do CMIP6, sob os cenários de emissão SSP2-4.5 e SSP5-8.5, disponibilizados pelo conjunto CLIMBra. A análise das séries de vazão simuladas envolveu o teste de Mann-Kendall e a inclinação de Theil-Sen. Os resultados indicam predominância de tendência de aumento nas vazões médias anuais, com maior magnitude e concordância entre modelos sob o cenário SSP5-8.5. Para o período completo, 68,4% dos modelos apresentaram tendência significativa de aumento nas vazões médias anuais e 63,2% no cenário SSP2-4.5. A média multimodelo também indicou tendências significativas de aumento, especialmente sob o cenário de altas emissões. Apesar das incertezas inerentes às projeções climáticas, os resultados estão em consonância com estudos recentes sobre os impactos das mudanças climáticas para a região sul do Brasil e reforçam a necessidade de incorporar seus efeitos na gestão dos recursos hídricos e na proteção das populações vulneráveis diante de eventos extremos.

Palavras-Chave: mudanças climáticas; modelo MGB; CLIMBRA.

1) Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR; eng.matheusmarinho@gmail.com

2) Professor no Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR; detzel@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Mudanças no clima podem ser provocados por fatores naturais, como erupções vulcânicas. Entretanto, as alterações mais recentes têm origem predominantemente em causas antropogênicas, especialmente devido à intensa emissão de gases na atmosfera que causam o efeito estufa. Essas mudanças se refletem em maior variabilidade nos regimes de precipitação, aumento das temperaturas e intensificação de eventos extremos, como inundações e estiagens.

O aquecimento da atmosfera tem provocado alterações nos padrões de precipitação e temperatura em todo o mundo. Modelos de projeções climáticas indicam que o aumento da temperatura média global tende a intensificar a ocorrência de eventos extremos, bem como sua magnitude e variabilidade. Esses fenômenos afetam diretamente as demandas por água, ampliam os conflitos pelo seu uso e agravam as consequências de desastres naturais em diversas regiões do planeta.

Embora globalmente o comportamento dos fluxos fluviais não apresente um padrão claro de mudança (Trancoso et. al., 2024), a frequência e a magnitude de cheias e estiagens têm mostrado variações significativas em escalas regionais. No Brasil, as variações climáticas recentes têm provocado eventos extremos com frequência crescente. Destacam-se as inundações no estado do Rio Grande do Sul em 2023 (Alvalá et al., 2024) e a histórica cheia de 2024 (Collischonn et al., 2024). Paralelamente, ocorreram secas severas em locais onde os índices pluviométricos costumam ser elevados, como a seca histórica registrada na Amazônia em 2024 e as intensas ondas de calor que atingiram as regiões Sudeste e Centro-Oeste (Marengo, 2025). Esses eventos reforçam a intensificação da variabilidade climática e o aumento da frequência de extremos hidrológicos.

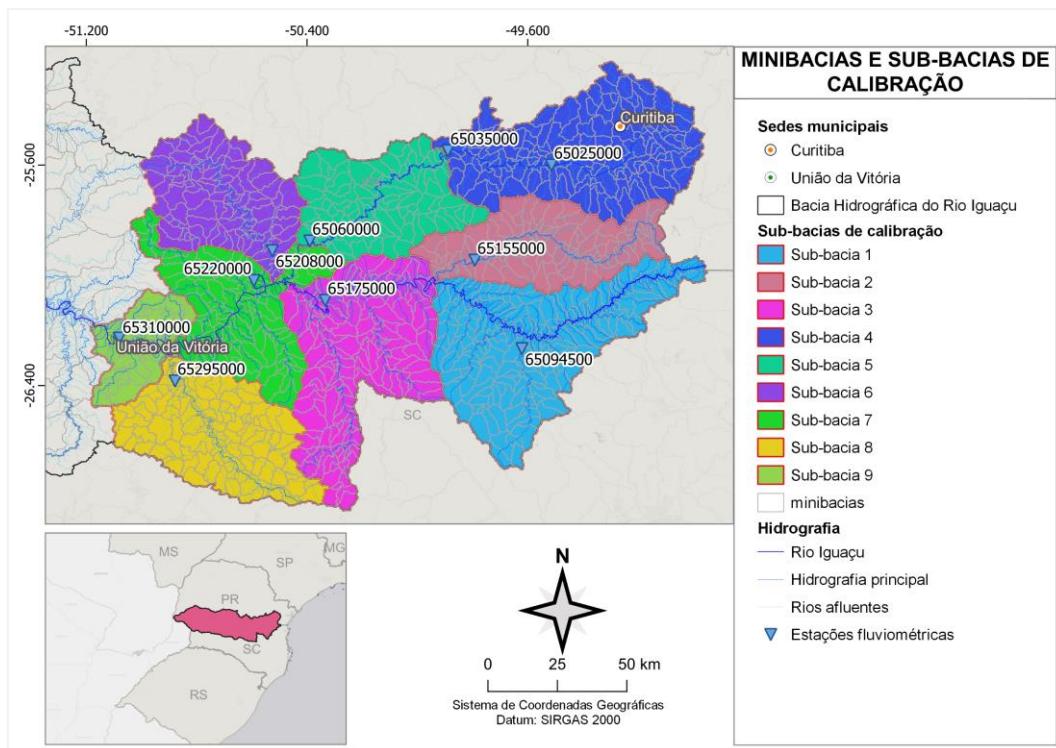
Este estudo realizou uma análise dos impactos das mudanças climáticas no regime de vazão na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu, utilizando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), forçado com modelos climáticos do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*, fase 6), com viés corrigido para todo o território brasileiro e disponibilizadas pelo CLIMBra (*Climate Change Dataset for Brazil*) (Ballarin et. al, 2023).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Iguaçu nasce na Serra do Mar, no Paraná, a aproximadamente 1.200 metros de altitude, e percorre cerca de 1.200 km até desaguar no Rio Paraná, na fronteira Brasil-Argentina. A Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu está localizada no mesmo estado, abrangendo a região a montante do município de União da Vitória (Figura 1). A região atravessa importantes unidades fisiográficas, como o Planalto de Curitiba, caracterizado por rochas graníticas e metamórficas. Apresenta clima predominantemente subtropical, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e é marcada por relevos acidentados e elevada cobertura vegetal nas regiões de cabeceira.

A região do Alto Iguaçu, possui aproximadamente 24.500 km² de extensão compreendendo principalmente a Região Metropolitana de Curitiba (RMC) e áreas adjacentes, abrigando mais de 3,6 milhões de pessoas. O clima da região é subtropical úmido (Cfb, segundo a classificação de Köppen), com precipitação média anual variando de 1.400 a 1.800 mm e temperatura média anual entre 16°C e 18°C.

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Iguaçu, com destaque para as sub-bacias de calibração.



METODOLOGIA

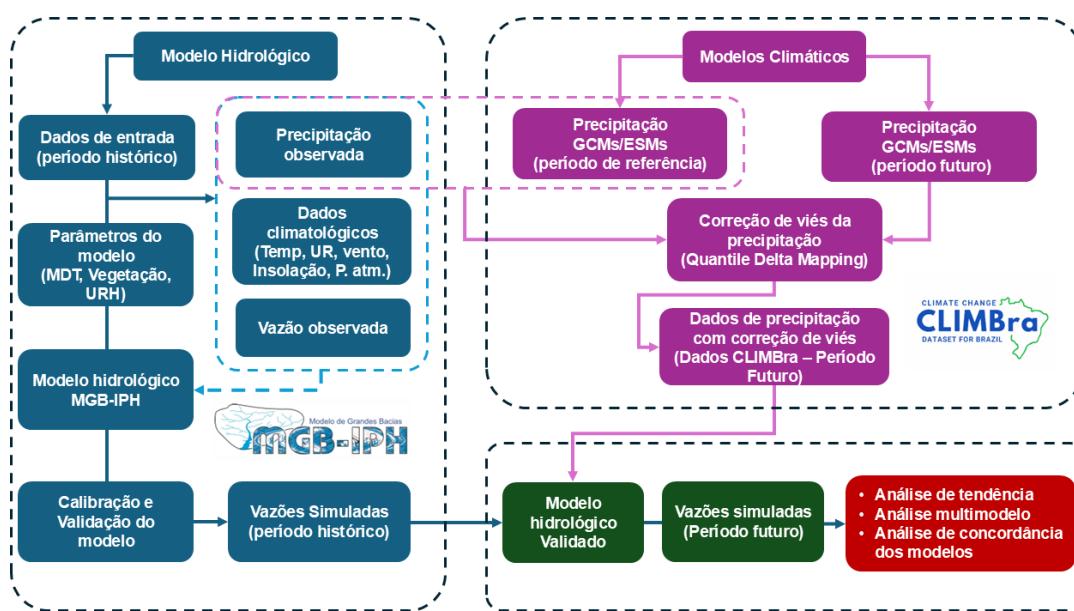
A avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas vazões da bacia do alto rio Iguaçu foi desenvolvida a partir de quatro etapas principais: (i) calibração de um modelo hidrológico para o período de referência; (ii) obtenção das projeções climáticas para diferentes cenários futuros; (iii) simulação do comportamento hidrológico futuro da bacia com base nas projeções; e (iv) comparação entre as séries futuras e o período de referência.

O modelo hidrológico escolhido para a análise foi o MGB, um modelo chuva-vazão conceitual e distribuído (Collischonn et al., 2007). O modelo foi calibrado e validado, considerando nove sub-bacias do Alto Iguaçu (Figura 1), no período de 1980 a 2023, utilizando o método conhecido como Split Sample Test, conforme proposto por Klemeš (1986), que consiste na separação da série histórica em dois períodos distintos: um para a calibração (01/1991 a 12/2023) e outro para a validação (01/1980 a 12/1990). O desempenho do modelo foi avaliado com base em indicadores como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o logaritmo do NSE (NSE_{log}) e o erro percentual de volume (PBIAS), conforme recomendado por Moriasi et al. (2007).

Com o modelo calibrado e validado, foi possível utilizá-lo para simulações futuras, forçando-o com dados de precipitação provenientes das projeções de modelos climáticos. Os arquivos de entrada foram estruturados em grade espacial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e em escala diária, compatíveis com a estrutura do MGB. As simulações foram realizadas individualmente para cada um dos 19 modelos climáticos globais (GCMs), abrangendo os cenários de emissão SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Dessa forma, obteve-se um conjunto de séries de vazão projetada entre 2015 e 2100, que serviram de base para a análise estatística de tendências de aumento ou diminuição das vazões e avaliação da concordância multimodelo quanto ao sinal da mudança.

As projeções climáticas foram obtidas a partir do conjunto de 19 modelos climáticos do CMIP6, submetidos a processos de *downscaling* e correção de viés, para os cenários representativos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e disponibilizados pelo CLIMBra (Ballarin et al., 2023). O teste de Mann-Kendall foi aplicado para cada uma das nove sub-bacias, com base nas 19 séries de vazão simuladas por GCM. Complementarmente, a inclinação de Theil-Sen foi empregada para estimar a magnitude das tendências, tanto para média multimodelo quanto para avaliação da concordância entre modelos. Utilizando abordagem similar a Trancoso et. al. (2024), uma tendência foi considerada significativa apenas quando atendeu simultaneamente aos seguintes critérios: (i) p -valor $< 0,05$ no teste de Mann-Kendall, (ii) direção da tendência (positiva ou negativa) e (iii) variação relativa superior a 10% em relação à média do período base. Foram estabelecidos dois limiares para classificar a robustez do sinal: $\geq 50\%$ (maioria de todas as simulações de modelo) e 66% (2/3 de todas as simulações de modelo). As etapas metodológicas, estão resumidas na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma metodológico.



RESULTADOS

O modelo hidrológico MGB foi calibrado e validado para as nove sub-bacias delimitadas na região do Alto Iguaçu, com base em séries observadas de precipitação e vazão. A avaliação do desempenho considerou os indicadores estatísticos NSE, NSE_{Log} e PBIAS, cujos resultados foram considerados muito bons, conforme critérios propostos por Moriasi et al. (2007), especialmente nas estações fluviométricas de Porto Amazonas, Fluviópolis e União da Vitória. A Tabela 1 apresenta os valores das métricas de desempenho obtidas nos períodos de calibração (1991 a 2023) e validação (1980 a 1990), para cada sub-bacia simulada.

A Figura 3 e a Figura 4 apresentam os hidrogramas gerados para a estação de União da Vitória (65310000), com a comparação entre as vazões observadas e simuladas em escala diária. Os valores obtidos para as funções objetivo refletem o bom desempenho geral do modelo. O desempenho foi consistente em ambos os períodos avaliados, com ligeira superioridade na calibração, conforme é esperado. Em geral, o modelo representou bem tanto os períodos de estiagem quanto os eventos de cheia, embora haja superestimações pontuais em alguns picos de vazão e maior sensibilidade à distribuição espacial da chuva em determinadas sub-bacias.

Tabela 1 – Métricas estatísticas obtidos na calibração e validação do modelo.

Código	Nome Estação	Rio	Calibração (1991-2023)			Validação (1980-1990)		
			NSE	NSE _{Log}	BIAS (%)	NSE	NSE _{Log}	BIAS (%)
65035000	Porto Amazonas	Iguacu	0,835	0,844	2,658	0,862	0,844	-0,971
65060000	São Mateus do Sul	Iguacu	0,827	0,882	-1,200	0,783	0,844	1,752
65208000	Pontilhão do Rio Potinga	Potinga	0,717	0,903	-2,287	0,758	0,906	-8,341
65095000	Rio Preto do Sul	Preto	0,824	0,878	1,406	0,902	0,884	2,165
65155000	São Bento	Da Várzea	0,727	0,764	6,299	0,811	0,858	-12,190
65175000	Divisa	Negro	0,615	0,834	8,331	0,698	0,903	7,504
65220000	Fluviópolis	Iguacu	0,850	0,931	-1,459	0,833	0,919	-2,112
65295000	Santa Cruz do Timbó	Timbó	0,590	0,608	-6,640	0,678	0,799	-0,175
65310000	União da Vitória	Iguacu	0,873	0,926	1,015	0,881	0,919	0,959

Figura 3 – Vazões observadas e simuladas, em escala diária, no período de 01/1991 a 12/2023, obtidas no processo de calibração na estação de União da Vitória (65310000).

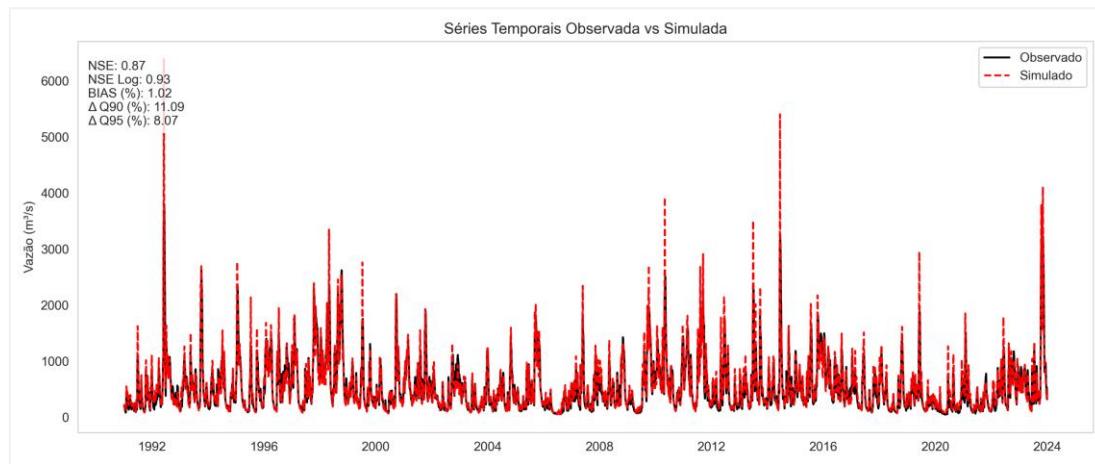
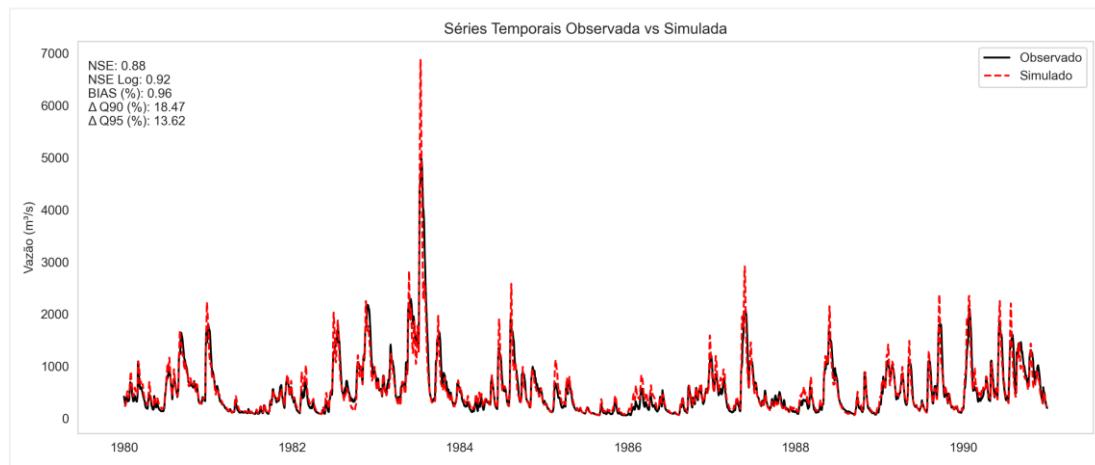


Figura 4 – Vazões observadas e simuladas, em escala diária, no período de 01/1980 a 12/1990, obtidas no processo de validação na estação de União da Vitória (65310000).



Com base nos resultados obtidos na etapa de calibração e validação, o modelo MGB foi considerado adequado para simular as vazões futuras com base nas projeções climáticas do conjunto CLIMBra. As simulações foram realizadas para o período de 2015 a 2100, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, utilizando séries de precipitação previamente corrigidas por viés. O objetivo foi identificar tendências nas vazões médias anuais para diferentes horizontes temporais.

As projeções indicaram predominância de tendências de aumento nas vazões em todas as sub-bacias do Alto Iguaçu. A Tabela 2 apresenta os resultados para a estação União da Vitória (65310000), considerando o cenário SSP2-4.5. Nos períodos de curto (2015–2040) e médio prazo (2041–2070), apenas 2 e 3 modelos, respectivamente, apresentaram tendência significativa, todas com sinal positivo. No longo prazo (2071–2100), apenas um modelo indicou tendência significativa, com sinal de redução. A baixa proporção de modelos com tendências significativas (<20%) nesses intervalos aponta para ausência de consenso entre os modelos. Em contraste, no período total (2015–2100), 12 dos 19 modelos apresentaram tendência significativa e positiva, correspondendo a 63,2% de concordância, caracterizando uma concordância moderada entre os modelos quanto ao sinal de aumento.

Tabela 2 – Resultados da análise de tendência dos modelos climáticos, para a estação União da Vitória (65310000), sob o cenário climático SSP2-4.5.

Período	GCMs significativos	GCMs com sinal positivo	GCMs com sinal negativo	% concordância	Classificação
Curto	2	2	0	10,5	aumento sem consenso
Médio	3	3	0	15,8	aumento sem consenso
Longo	1	0	1	5,3	redução sem consenso
Total	12	12	0	63,2	concordância moderada

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de tendência da média multimodelo (*ensemble*) para a estação União da Vitória (65310000), sob o cenário SSP2-4.5. No curto prazo, não foi identificada tendência significativa ($p = 0,628$), com variação relativa de 5,1%. No horizonte médio (2041–2070), observou-se tendência crescente significativa ($p = 0,003$) e variação de 16,3%. No longo prazo, apesar do sinal positivo, a tendência não foi estatisticamente significativa ($p = 0,269$), com variação de 5,72%. Já no período total (2015–2100), verificou-se tendência significativa de aumento ($p < 0,001$), com variação acumulada de 31,0% em relação à média histórica.

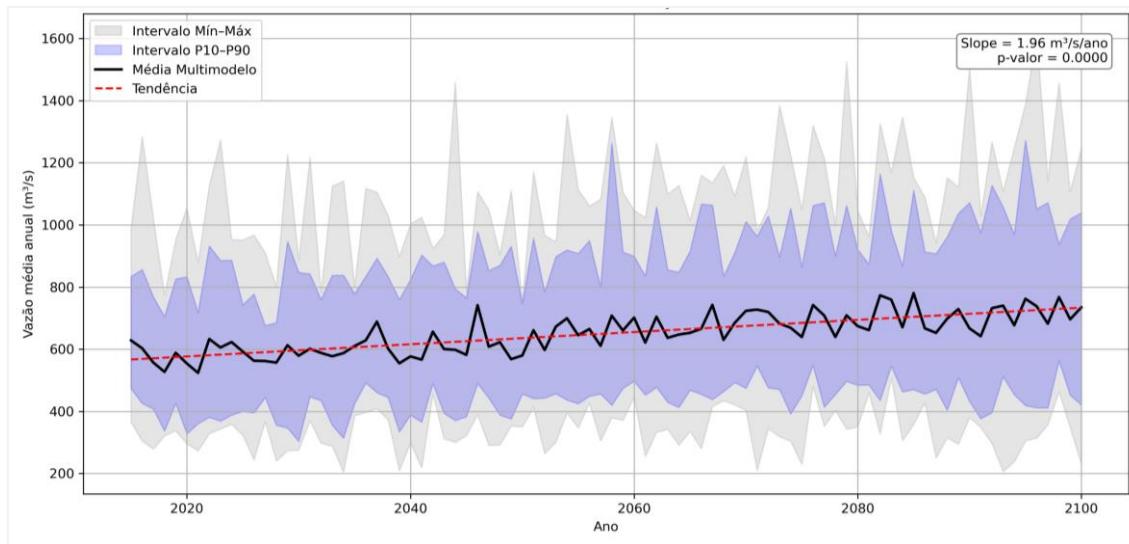
Tabela 3 – Resultados da análise de tendência aplicada à série da média multimodelo (*ensemble*), sob o cenário climático SSP2-4.5.

Período	Tendência	p -valor	Inclinação ($m^3/s/ano$)	Sinal	Var. relativa (%)	Classificação
Curto	sem tendência	0,628	1,0671	positivo	5,1	não significativo
Médio	tendência de aumento	0,003	2,9606	positivo	16,34	significativo
Longo	sem tendência	0,269	1,0361	positivo	5,72	não significativo
Total	tendência de aumento	< 0,001	1,9618	positivo	31,03	significativo

A Figura 5 ilustra a série de vazões médias anuais simuladas para a estação 65310000, com base na média dos 19 modelos climáticos (*ensemble*) no cenário SSP2-4.5. As faixas de incerteza

entre os modelos são representadas pelos intervalos mínimo–máximo (faixa cinza) e percentis P10–P90 (faixa azul). A tendência estimada pela inclinação de Theil-Sen é representada pela linha tracejada vermelha, com valor de $1,96 \text{ m}^3/\text{s}$ por ano e p -valor inferior a 0,001, indicando tendência significativa de aumento para o período 2015–2100.

Figura 5 – Evolução das vazões médias anuais simuladas para a estação de União da Vitória (65310000), considerando a média multimodelo sob o cenário SSP2-4.5.



A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de concordância multimodelo para a estação União da Vitória (65310000), sob o cenário SSP5-8.5. Nos horizontes de curto, médio e longo prazo, a concordância foi considerada baixa: apenas 10,5%, 31,6% e 26,3%, respectivamente, sem atingir os limiares para consenso. No entanto, no período total (2015–2100), 13 dos 19 modelos (68,4%) indicaram tendência positiva significativa, indicando maior consistência entre os modelos quanto ao aumento das vazões sob o cenário de altas emissões.

Tabela 4 – Resultados da análise de tendência dos modelos climáticos, para a estação União da Vitória (65310000), sob o cenário climático SSP5_8.5.

Período	GCMs significativos	GCMs com sinal positivo	GCMs com sinal negativo	% concordância	Classificação
Curto	2	2	0	10,5	aumento sem consenso
Médio	6	6	0	31,6	aumento sem consenso
Longo	5	4	1	26,3	aumento sem consenso
Total	13	13	0	68,4	concordância forte

A Tabela 5 resume os resultados da análise de tendência da vazão anual média do ensemble para a estação União da Vitória (65310000), sob o cenário SSP5-8.5. No curto prazo, não foi identificada tendência significativa ($p = 0,481$), com variação relativa de apenas 6,53%. Em contraste, os horizontes médio e longo prazo apresentaram tendência crescente significativa ($p < 0,001$), com variações de 26,05% e 22,59%, respectivamente. Para o período total (2015–2100), observou-se

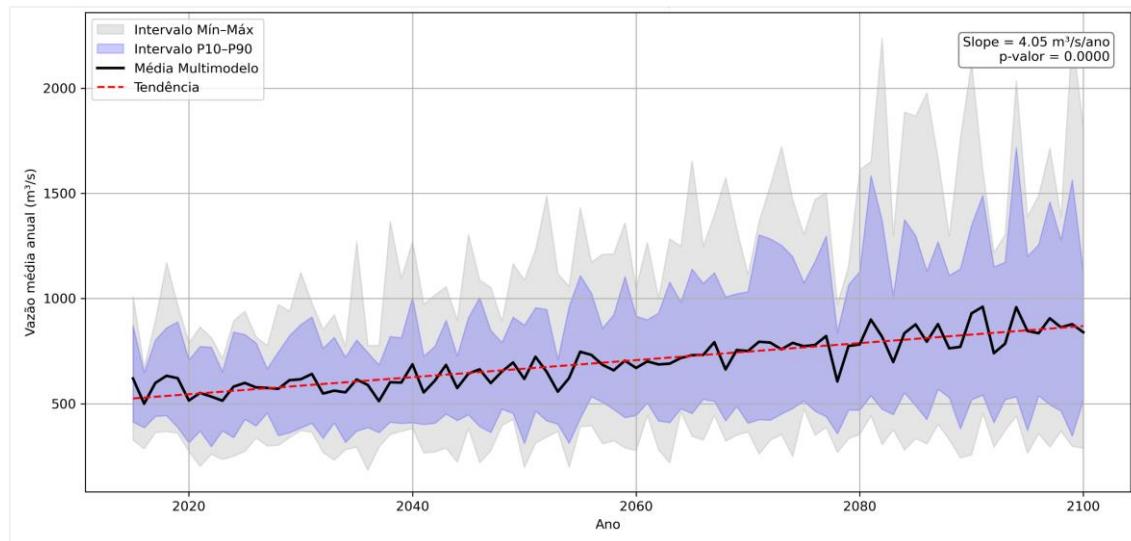
tendência significativa de aumento ($p < 0,001$) e variação relativa de 64,10% em comparação com a média histórica, indicando uma resposta hidrológica mais intensa sob o cenário de altas emissões.

Tabela 5 – Resultados da análise de tendência aplicada à série da média multimodelo (*ensemble*), sob o cenário climático SSP5-8.5.

Período	Tendência	<i>p</i> -valor	Inclinação (m ³ /s/ano)	Sinal	Var. relativa (%)	Classificação
Curto	sem tendência	0.481	1.3654	positivo	6.53	não significativo
Médio	tendência de aumento	< 0,001	4.7209	positivo	26.05	significativo
Longo	tendência de aumento	< 0,001	4.0946	positivo	22.59	significativo
Total	tendência de aumento	< 0,001	4.0523	positivo	64.1	significativo

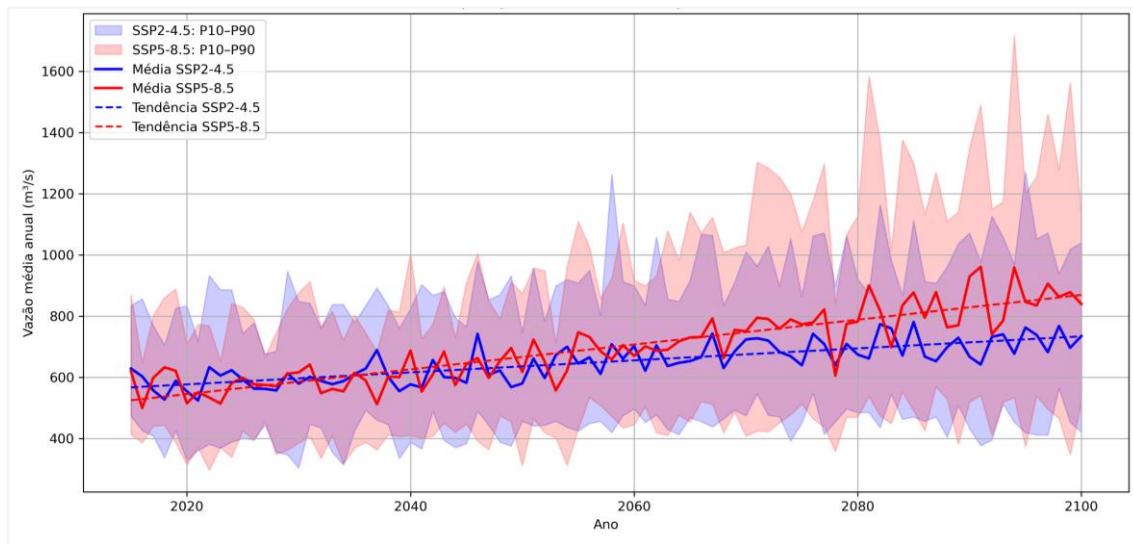
A Figura 6 apresenta a série de vazão média anual simulada para a estação União da Vitória (65310000), com base na média dos 19 modelos climáticos (*ensemble*) no cenário SSP5-8.5. As faixas sombreadas representam os intervalos de incerteza entre os modelos (mín–máx em cinza e P10–P90 em azul). A linha vermelha tracejada indica a tendência estimada pela inclinação de Theil-Sen, com 4,05 m³/s por ano ($p < 0,001$), superior à observada no cenário SSP2-4.5.

Figura 6 – Evolução das vazões médias anuais simuladas para a estação de União da Vitória (65310000), considerando a média multimodelo sob o cenário SSP5-8.5.



A Figura 7 compara os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para a mesma estação, com base na média multimodelo e nas faixas de incerteza P10–P90. Ambos os cenários indicam tendência significativa de aumento nas vazões médias anuais ($p < 0,001$), com maior magnitude no SSP5-8.5 (variação relativa de 31,0%) em relação ao SSP2-4.5 (14,6%). Nota-se também maior amplitude da faixa de incerteza no SSP5-8.5, refletindo maior variabilidade entre os modelos, mas com projeções consistentemente superiores, sobretudo a partir de 2050. Esses resultados sugerem que, sob um cenário de emissões mais elevadas, há uma tendência mais confiável quanto ao aumento nas vazões projetadas para a bacia do Alto Iguaçu.

Figura 7 – Comparação entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para a estação União da Vitória (65310000), com base na média multimodelo (*ensemble*) e nos intervalos de incerteza P10–P90.



CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas nas vazões da bacia do Alto Iguaçu até 2100, por meio do modelo hidrológico MGB, calibrado e validado com dados observados e alimentado com projeções do conjunto CLIMBra sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os indicadores NSE e PBIAS indicaram boa aderência entre as vazões simuladas e observadas.

Ambos os cenários projetados indicaram tendência de aumento nas vazões médias anuais, com maior magnitude e significância no SSP5-8.5. No período total (2015–2100), a média multimodelo (*ensemble*) foi mais significativa no SSP5-8.5, com variação relativa de 31,0% frente à média histórica, contra 14,6% no SSP2-4.5.

Na análise por horizontes temporais, a concordância entre os modelos foi baixa em ambos os cenários, não atingindo os limiares de >50% e >66%. No entanto, considerando o período total (2015–2100), observou-se concordância significativa, sobretudo no SSP5-8.5, com 68,4% dos modelos indicando tendência positiva. Esses resultados sugerem maior consistência e intensidade da resposta hidrológica sob o cenário de altas emissões, com potenciais impactos para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos na bacia.

Apesar das incertezas inerentes às projeções climáticas e hidrológicas, relacionadas aos modelos climáticos, aos métodos de *downscaling* e à própria modelagem, os resultados deste estudo estão em consonância com estudos recentes que indicam uma tendência de aumento da frequência de cheias e inundações para a região Sul do Brasil, associada à intensificação de eventos extremos (ANA, 2024; Petry et al., 2025; Brêda et al., 2023).

REFERÊNCIAS

ALVALÁ, R. C. S. et al. “Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities”. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 110, 1 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). “*Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil*”. Brasília: ANA, 2024. 96 p.

BALLARIN, A. S. et al. “*CLIMBra – Climate Change Dataset for Brazil*”. *Scientific Data*, v. 10, n. 1, 1 dez. 2023.

BRÊDA, J. P. L. F. et al. “*Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers*”. *Journal of Hydrology*, v. 619, 1 abr. 2023.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. “*The MGB model for large-scale rainfall–runoff modelling*”. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878-895. 2007.

KLEMEŠ, V. “*Operational testing of hydrological simulation models*.” *Hydrological Sciences Journal*, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986.

MARENGO, J. A. “*Clima: extremos e desastres*”. Revista ClimaCom, Manifesto das Águas, coluna assinada, ano 12, n. 28, 2025. Disponível em: <http://climacom.mudancasclimaticas.net.br/clima-extremos-desastres>. Acesso em: 13 mai. 2025.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. “*Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*”. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

PETRY, I. et al. “*Changes in flood magnitude and frequency projected for vulnerable regions and major wetlands of South America*.” *Geophysical Research Letters*, v. 52, n. 5, 16 mar. 2025.

TRANCOSO, R.; SYKTUS, J.; ALLAN, R. P.; CROKE, J.; HOEGH-GULDBERG, O.; CHADWICK, R. “*Significantly wetter or drier future conditions for one to two thirds of the world’s population*.” *Nature Communications*, v. 15, n. 483, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44513-3>.