CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS E VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA PORÇÃO MINEIRA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Paula Roberta Souza Carvalho [1]; Welson de Avelar Soares Filho [2]&
Celso Bandeira de Melo Ribeiro [3]

Palavras-Chave – Mudanças climáticas, Eventos extremos, CLIMBra.

INTRODUÇÃO

A precipitação se destaca como uma das variáveis mais relevantes para a compreensão da dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas (Tucci, 2005). Nesse sentido, as mudanças climáticas têm intensificado a variabilidade dos padrões hidrológicos, impactando a disponibilidade hídrica, além da frequência e magnitude de eventos extremos de cheia (Chagas *et al.*, 2022; IPCC, 2021).

No contexto brasileiro, a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresenta suscetibilidade às variações climáticas, o que favorece a ocorrência de períodos de seca prolongada e eventos de precipitação extrema. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo a análise de cenários climáticos futuros na porção mineira da bacia do rio São Francisco por meio do CLIMBra para a próxima década, a fim de identificar possíveis alterações nos regimes de precipitação.

METODOLOGIA

A área de estudo está localizada na porção mineira da bacia do rio São Francisco (Figura 1) e foi dividida, utilizando o software HEC-HMS (Figura 2), em 36 sub-bacias, de modo a representar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos na bacia.

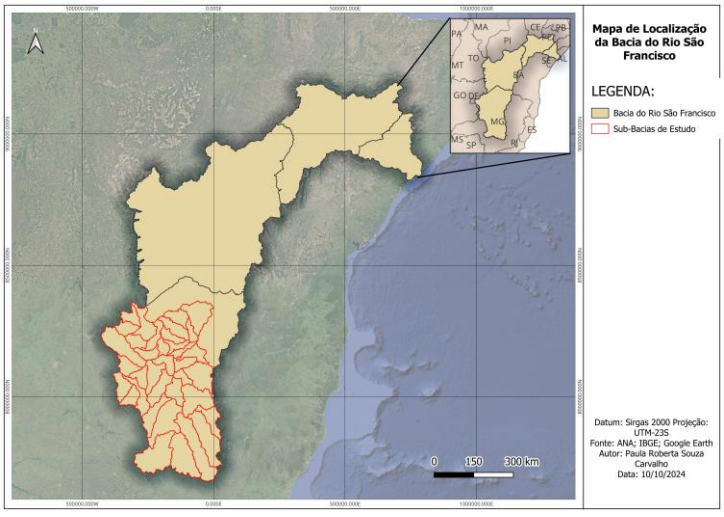


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Carvalho et al., 2025.

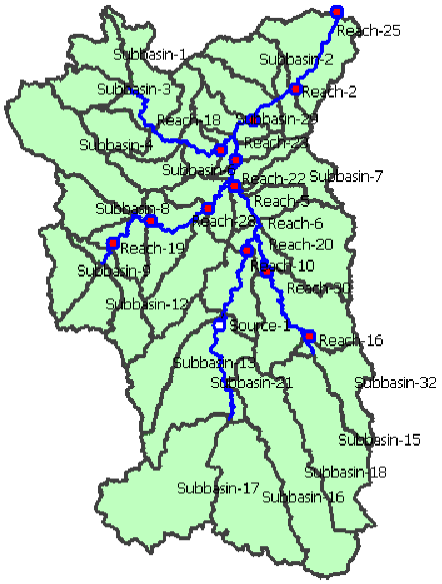


Figura 2: Projeto no HEC-HMS. Fonte: Carvalho et al., 2025.

Os dados de precipitação foram obtidos a partir do CLIMBra, que disponibiliza projeções de cenários climáticos futuros para o Brasil com base em um conjunto de modelos globais do CMIP6, submetidos

1) Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, paulasouza.carvalho@estudante.ufjf.br
2) Mestre em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, welson.avelar@ufjf.br
3) Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, celso.bandeira@ufjf.br

à correção de vieses e adaptados à escala regional brasileira (Ballarin *et al.*, 2023). Para a obtenção das séries de precipitação para a área de estudo, foi desenvolvido um código em *Python* com funções de extrações personalizadas, que calcularam a precipitação média diária em cada uma das sub-bacias para o horizonte de 10 anos (2030 a 2039) nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Por fim, os dados foram analisados, possibilitando a comparação entre os cenários climáticos e a avaliação da variabilidade espacial das projeções nas sub-bacias da área de estudo.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de precipitação mínima, média e máxima para a próxima década na porção mineira da bacia do São Francisco, obtidos por meio do CLIMBra. As projeções do SSP2-4.5 estão associadas a um cenário intermediário, enquanto as do SSP5-8.5 refletem um cenário mais pessimista, com maiores emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 1 – Resultados dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5

Sub-bacia	Precipitação Mínima SSP2-4.5	Precipitação Média SSP2-4.5	Precipitação Máxima SSP2-4.5	Precipitação Mínima SSP5-8.5	Precipitação Média SSP5-8.5	Precipitação Máxima SSP5-8.5
1	0	5,56	107,87	0	5,17	82,07
2	0	5,27	111,01	0	4,80	85,80
3	0	5,54	106,73	0	5,25	92,65
4	0	5,59	101,01	0	5,34	90,09
5	0	5,58	85,89	0	5,27	91,17
6	0	5,65	137,00	0	5,36	97,33
7	0	5,38	129,60	0	5,17	114,35
8	0	5,66	134,55	0	5,35	79,75
9	0	5,81	180,75	0	5,46	148,75
10	0	5,44	136,02	0	5,30	107,21
11	0	5,80	146,20	0	5,58	334,76
12	0	5,92	211,36	0	5,60	315,43
13	0	6,08	145,66	0	5,89	333,16
14	0	5,45	99,82	0	5,19	86,02
15	0	6,20	110,02	0	5,87	93,75
16	0	6,66	125,43	0	6,32	106,98
17	0	6,75	128,58	0	6,52	106,56
18	0	6,42	119,21	0	6,07	94,79
19	0	5,52	128,71	0	5,11	94,96
20	0	5,78	118,95	0	5,22	210,97
21	0	6,09	100,88	0	5,92	197,64
22	0	5,53	108,48	0	5,15	96,33
23	0	5,94	164,82	0	5,67	370,01
24	0	5,55	121,09	0	5,38	106,54
25	0	5,67	132,69	0	5,50	231,72
26	0	5,46	85,37	0	5,15	80,39
27	0	5,50	127,19	0	5,32	119,95
28	0	5,77	136,49	0	5,54	210,13
29	0	5,44	86,31	0	5,08	85,00
30	0	5,30	114,22	0	4,94	96,64
31	0	5,56	107,21	0	5,25	85,68
32	0	5,94	116,07	0	5,67	107,72
33	0	5,38	104,74	0	4,98	103,61
34	0	5,07	98,97	0	4,57	90,40
35	0	5,60	149,50	0	5,37	101,37
36	0	5,58	138,65	0	5,45	152,52

Os resultados demonstram que a precipitação mínima, nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, é de 0 mm para as 36 sub-bacias, indicando períodos sem ocorrência de chuva em toda a área de estudo durante a próxima década. Em relação à precipitação média, observa-se variações discretas entre os dois cenários climáticos, com valores entre 5,07 e 6,75 mm no cenário SSP2-4.5 e 4,57 e 6,52 mm no cenário SSP5-8.5, que podem indicar uma possível redução da disponibilidade hídrica na bacia. Em ambos os cenários, a sub-bacia 18 apresenta as maiores médias, enquanto a sub-bacia 34 registra os menores valores da média. Os resultados obtidos são corroborados pelo estudo de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024), que também apontam um cenário de redução da disponibilidade hídrica na bacia do rio São Francisco no curto prazo (até 2040).

A maior diferença de valores entre os dois cenários está na precipitação máxima. No cenário SSP2-4.5, o valor máximo registrado é de 211,36 mm na sub-bacia 12, no ano de 2039 (Figura 3), enquanto no SSP5-8.5 observa-se o maior valor na sub-bacia 23, cuja precipitação máxima atinge 370,01 mm (Figura 4), em 2030.

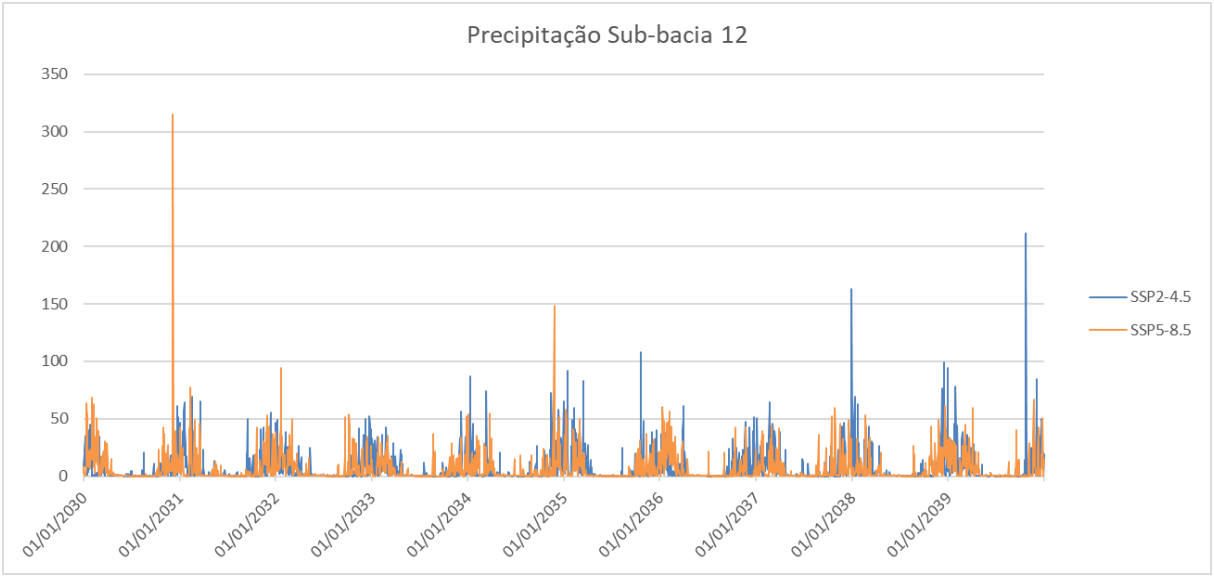


Figura 3. Série temporal de precipitação na sub-bacia 12. Fonte: autoria própria.

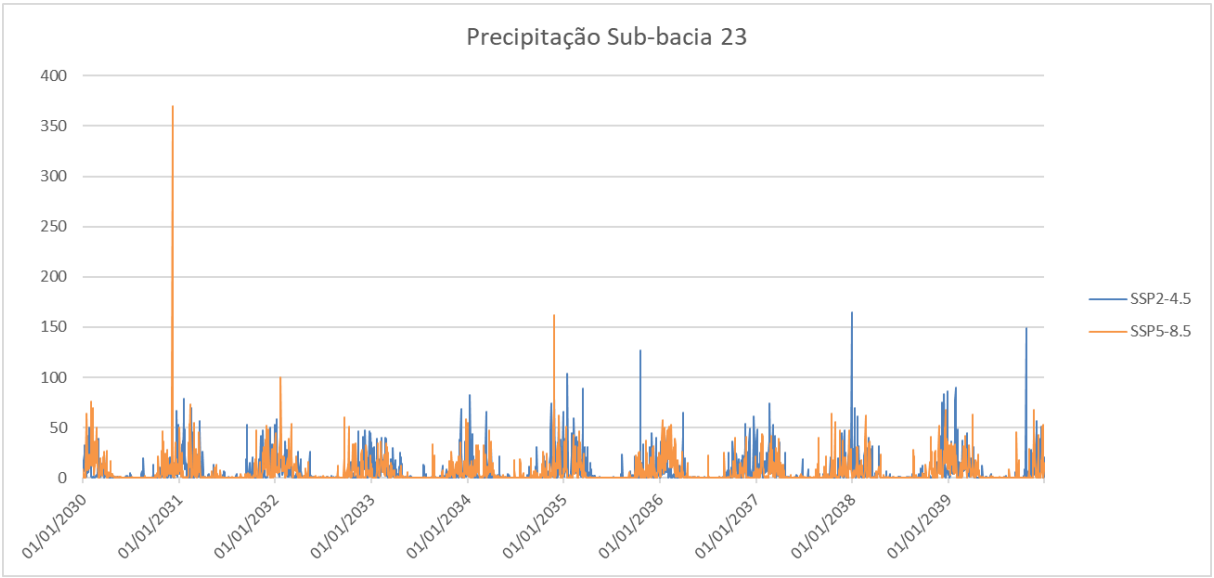


Figura 4. Série temporal de precipitação na sub-bacia 23. Fonte: autoria própria.

Esse resultado indica maior suscetibilidade à ocorrência de eventos extremos de precipitação no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), além da antecipação, em consonância com o relatório do IPCC (2021) que destaca que à medida que o aquecimento global aumenta, os eventos de precipitação intensa tornam-se mais frequentes e mais intensos. Assim, sob a perspectiva hidrológica, tais condições tendem a intensificar o escoamento superficial e os processos erosivos, principalmente nas sub-bacias 11, 12, 13, 20, 23, 25 e 28, aumentando o potencial de ocorrência de enchentes, inundações, alagamentos e movimentos de massa nessas áreas.

CONCLUSÕES

De maneira geral, os resultados indicam diferenças entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 quanto às alterações no regime de precipitação, em função da intensidade das emissões de gases de efeito estufa. A comparação entre os dois cenários demonstra que, embora os valores médios de precipitação apresentem pouca variação entre as 36 sub-bacias analisadas, o cenário de maiores emissões apresenta um aumento significativo nos valores máximos de precipitação. Esse comportamento sugere uma intensificação dos eventos extremos de chuva em um contexto de mudanças climáticas, o que pode elevar a suscetibilidade à ocorrência de desastres hidrológicos e geológicos, como inundações, enxurradas, alagamentos e deslizamentos. Os resultados reforçam a necessidade de incorporar essas projeções ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos, bem como às estratégias de prevenção, adaptação e redução de riscos de desastres.

Por fim, os resultados obtidos fornecem subsídios para estudos futuros sobre os impactos das mudanças climáticas na bacia e serão utilizados para a modelagem chuva-vazão no software HEC-HMS, possibilitando avaliar as respostas hidrológicas da bacia diante dos diferentes cenários climáticos.

REFERÊNCIAS

ANA. (2024). *Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA.

BALLARIN, A.S., SONE, J.S., GESUALDO, G.C. *et al* (2023). "*CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil*". Sci Data 10, 47. DOI: 10.1038/s41597-023-01956-z

CARVALHO, P. R. S.; RIBEIRO, C. B. de M.; SOARES FILHO, W. de A.; FONSECA, L. G. da. "*Resposta hidrológica da porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco à modelagem chuva-vazão*". REGA: Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 22, 2025. DOI: 10.21168/rega.v22e15.

CHAGAS, V. B. P. et al. "Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle". Nature Communications, 2022.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

TUCCI, C. E. M (2005). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC/UFJF), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 306188/2024-4, pelo apoio financeiro concedido.