

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DO BALANÇO HÍDRICO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Roberto Filgueiras¹; Rayssa Balieiro Ribeiro² & Micael de Souza Fraga³

Abstract: Understanding climate dynamics is essential to support decision-making related to water resource management and agricultural planning. In this context, knowledge of the potential impacts of climate change on these systems becomes crucial. This study aimed to evaluate the spatial and temporal dynamics of the water balance in the São Francisco River Basin, considering different future climate scenarios in comparison to a reference scenario. Historical climate data and future projections from WorldClim were used, based on the Global Climate Model MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate – version 6), part of the CMIP6 project, for the mid-term period of 2041 to 2060. The results indicated spatial and temporal variations in precipitation, with no clear trend of increase or decrease across the study area, highlighting the importance of analyzing the local behavior of this variable. On the other hand, a consistent increase in potential evapotranspiration was observed throughout the basin. The joint analysis of variables showed, especially under the SSP5-8.5 scenario, an increase in atmospheric water demand and a consequent reduction in soil water storage. These results reinforce the importance of incorporating future climate scenarios into regional water and agricultural planning.

Resumo: A compreensão da dinâmica climática é fundamental para embasar decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos e ao planejamento agrícola. Nesse contexto, torna-se essencial o conhecimento dos potenciais impactos das mudanças climáticas sobre esses sistemas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a dinâmica espacial e temporal do balanço hídrico na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, considerando diferentes cenários climáticos futuros em comparação ao cenário de referência. Foram utilizados dados climáticos históricos e projeções futuras do WorldClim, com base no Modelo de Circulação Global MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate – version 6), integrante do projeto CMIP6, para o período médio de 2041 a 2060. Os resultados indicaram variações espaciais e temporais na precipitação sem tendência definida de aumento ou redução para a área de estudo, sendo importante observar o comportamento local da variável. Por outro lado, observou-se aumento consistente da evapotranspiração potencial em toda a bacia. A análise conjunta das variáveis evidenciou, especialmente no cenário SSP5-8.5, um aumento da demanda atmosférica por água e a consequente redução do armazenamento hídrico no solo. Tais resultados reforçam a importância da incorporação de cenários climáticos futuros no planejamento hídrico e agrícola regional.

Palavras-Chave – variabilidade hídrica, evapotranspiração, precipitação pluviométrica, MIROC6

¹ 4intelligence, Av. Alameda Santos, 2400 - Jardim Paulista, São Paulo - SP, 01418-200, betofilgueiras@gmail.com

² Agência Peixe Vivo, Belo Horizonte, Minas Gerais, rayssabalieiro@gmail.com

³ Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Rodovia João Paulo II, 4143 – Serra Verde, Belo Horizonte, Minas Gerais, 31630-900, micaelfraga@gmail.com

INTRODUÇÃO

Compreender o comportamento das entradas e saídas de água em uma região é essencial para o planejamento agrícola e a gestão eficiente dos recursos hídricos. Essa compreensão permite identificar áreas críticas, adotar estratégias adaptativas e mitigar os impactos causados pelas variações climáticas (Villa et al., 2022). Nesse contexto, o balanço hídrico se destaca como uma ferramenta fundamental, pois fornece uma visão integrada dos principais fluxos de água no sistema, como a precipitação e a evapotranspiração (Pereira, 2005), permitindo tomadas de decisões mais assertivas ao longo do tempo e do espaço.

Além disso, o entendimento das dinâmicas climáticas e hidrológicas de uma região é indispensável para garantir a sustentabilidade ambiental e a produtividade agrícola (Filgueiras et al., 2018). A interação entre solo, água, vegetação e atmosfera é expressa nos componentes do balanço hídrico, que refletem a disponibilidade hídrica para os diferentes usos. Dessa forma, o planejamento ambiental e agrícola deve considerar essa relação para promover o uso racional da água, minimizar riscos e garantir a resiliência dos sistemas produtivos.

No entanto, para um planejamento eficaz frente aos impactos climáticos, é fundamental considerar possíveis cenários futuros de mudança do clima (Marengo et al., 2012). A adoção dessa perspectiva permite antecipar riscos, avaliar vulnerabilidades e desenvolver estratégias mais resilientes, inclusive sob abordagens conservadoras. Incorporar projeções climáticas em análises hidrológicas e agrícolas amplia a capacidade de adaptação dos sistemas produtivos e de gestão de recursos naturais, tornando as decisões mais robustas diante das incertezas climáticas. Dessa forma, o planejamento deixa de ser apenas reativo e passa a ser preventivo, orientado por dados e cenários que refletem a complexidade das transformações ambientais em curso.

Para o entendimento da complexa relação dos elementos do balanço hídrico e dos reflexos que esses trazem para uma região é importante que seja considerado as projeções de mudanças climáticas. Só levando em consideração esses aspectos é que ter-se-á formas de antecipar e de preparar-se para intempéries climáticas possíveis no futuro. Diante dessa necessidade, é fundamental considerar as projeções do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), uma das principais iniciativas globais de modelagem climática, coordenada pelo *World Climate Research Programme* (WCRP). O CMIP tem como objetivo padronizar experimentos e cenários climáticos, permitindo que os modelos de circulação global (GCMs), desenvolvidos por diferentes centros de pesquisa, possam ser comparados de forma consistente (Eyring et al., 2016). Essa padronização amplia a aplicabilidade dos resultados e contribui para aumentar a confiabilidade nas projeções sobre o clima futuro.

Considerando essa base metodológica fornecida pelo CMIP, este trabalho teve como objetivo avaliar a dinâmica espacial e temporal do balanço hídrico sob diferentes cenários futuros de mudanças climáticas, comparando-os ao cenário base, a fim de compreender os possíveis impactos dessas mudanças e subsidiar estratégias de mitigação na Bacia do Rio São Francisco.

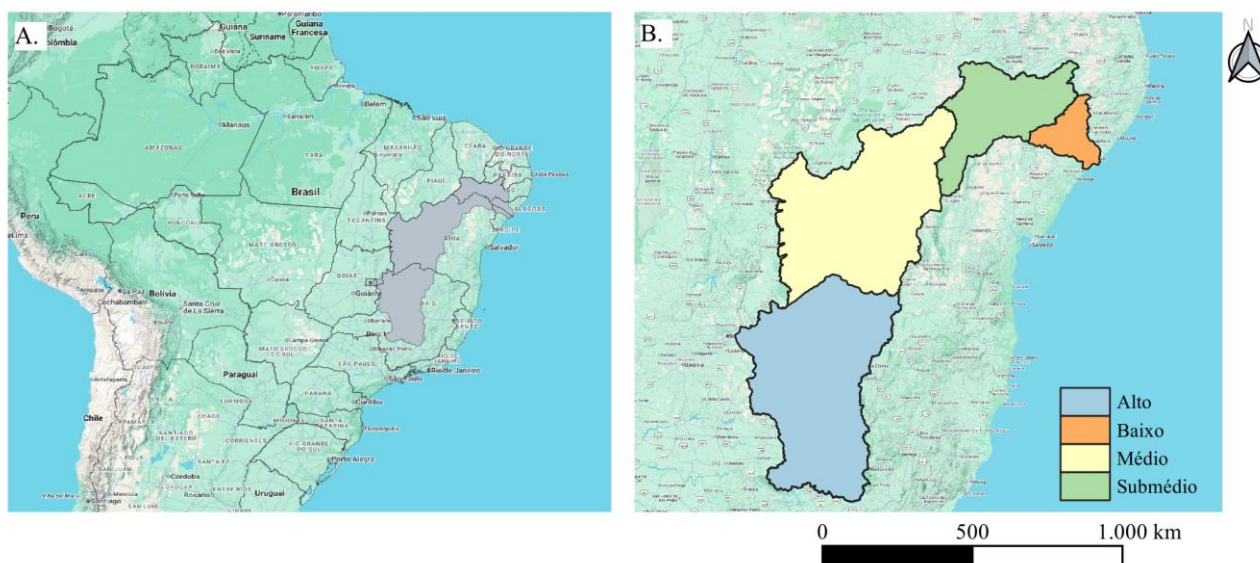
MATERIAL E MÉTODOS

- Área de estudo

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Figura 1), que permeia as regiões do Sudeste, Centro-oeste e Nordeste do Brasil. Com aproximadamente 639.219 km² de área

e uma extensão de cerca de 2.863 km, o rio percorre seis estados e o Distrito Federal (CBHSF, 2016), desempenhando papel estratégico no abastecimento de água, geração de energia e sustentação de atividades agrícolas, o que justifica sua escolha para este trabalho.

Figura 1 - Localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. (A) Posição da bacia em relação ao território brasileiro. (B) Subdivisão da bacia em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco.



- Dados Climáticos

Foram utilizados dados do Worldclim (Fick; Hijmans, 2017) como fonte de informações climáticas espaciais de temperatura do ar (T) e precipitação pluviométrica (Ppt). Os dados do WorldClim utilizados no presente estudo foram obtidos no endereço eletrônico: <https://worldclim.org/data/index.html>. Para a análise temporal, foram considerados dois períodos: o período de referência (1970–2000), denominado base, e um cenário futuro (2041–2060). A fim de representar diferentes trajetórias de desenvolvimento e emissões, foram adotados os quatro principais Cenários Socioeconômicos Representativos (*Shared Socioeconomic Pathways* – SSPs): SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Os cenários climáticos utilizados no CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) fazem parte de um esforço internacional coordenado para avaliar projeções futuras de mudanças climáticas com base em diferentes trajetórias socioeconômicas e de emissões (Eyring et al., 2016). Esses cenários são definidos pelos SSPs, que combinam projeções de gases de efeito estufa com cenários socioeconômicos plausíveis, permitindo avaliar impactos em diferentes contextos de desenvolvimento.

As projeções climáticas foram geradas com base no modelo de circulação geral *Model for Interdisciplinary Research on Climate – version 6* - MIROC6 (Tatebe; Watanabe, 2018), integrante do conjunto de modelos do CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (O'Neill et al., 2016).

- Balanço hídrico

O balanço hídrico climatológico foi elaborado conforme a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), considerando um reservatório de água no solo com capacidade de armazenamento de 100 mm. O modelo considera como dados de entrada a precipitação pluviométrica (Ppt) e a evapotranspiração potencial (ETp), e calcula as variáveis: armazenamento de água no solo (Arm), déficit hídrico, excedente e evapotranspiração real (ETr), em base mensal. O balanço hídrico foi calculado para todos os cenários climáticos considerados. Para o cálculo da evapotranspiração potencial (ETp), utilizou-se como dado de entrada a temperatura do ar média mensal (T), aplicando-se o método empírico de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), conforme apresentado na Equação 1.

$$ETp = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (\text{Equação 1})$$

em que ETp é a evapotranspiração potencial mensal (mm); T é a temperatura do ar média mensal (°C) obtida pelo WorldClim para os diferentes cenários climáticos; I é o índice anual de calor, calculado como a soma dos índices mensais (Equação 2) e ‘a’ o coeficiente empírico calculado pela equação 3.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (\text{Equação 2})$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (\text{Equação 3})$$

Todo o processamento foi realizado no software R (R Core Team, 2020), utilizando para o computo do balanço hídrico o pacote *cropDemand* (Filgueiras et al., 2022).

- Análise dos resultados

Após a geração dos dados para os diferentes cenários considerados, os resultados do balanço hídrico foram analisados e comparados com o objetivo de identificar os principais aspectos que diferenciam o cenário de referência dos cenários futuros. A análise foi conduzida de forma qualitativa, por meio de plotagens mensais, e quantitativa, a partir do cálculo das médias anuais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da precipitação pluviométrica média anual nas diferentes regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (Tabela 1) revelou padrões distintos entre o cenário de referência (base) e os cenários futuros de mudanças climáticas (SSPs). Na região do Alto São Francisco, observou-se um leve aumento nos valores sob os cenários SSP1-2.6 (1327,62 mm) e SSP2-4.5 (1323,95 mm), com destaque para o SSP5-8.5, que apresentou a maior média (1341,28 mm), indicando uma possível intensificação das chuvas nessa porção da bacia. Em contrapartida, as regiões Médio e Baixo São Francisco apresentaram tendência de redução da precipitação em todos os cenários futuros, sendo os menores valores observados no SSP5-8.5: 704,34 mm e 582,62 mm, respectivamente. A região Submédio apresentou maior estabilidade, com variações discretas entre os cenários e valores próximos ao do período de referência. Esses resultados sugerem que os impactos das mudanças climáticas sobre a precipitação tendem a se manifestar de forma espacialmente heterogênea ao longo da bacia.

Tabela 1 - Média da precipitação pluviométrica para as regiões da Bacia do Rio São Francisco nos cenários considerados.

| Região | Base | SSP 1-2.6 | SSP 2-4.5 | SSP 3-7.0 | SSP 5-8.5 |
|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alto | 1312,37 | 1327,62 | 1323,95 | 1302,67 | 1341,28 |
| Médio | 776,59 | 720,65 | 721,50 | 706,88 | 704,34 |
| Submédio | 965,16 | 978,39 | 989,38 | 951,15 | 970,23 |
| Baixo | 608,29 | 590,69 | 600,02 | 576,16 | 582,62 |

O comportamento observado nas médias anuais de precipitação pluviométrica na Bacia do Rio São Francisco também se reflete na distribuição espacial das chuvas, quando analisada a precipitação mensal. A comparação entre o cenário de referência (Figura 2) e o cenário SSP5-8.5 (Figura 3) não evidencia tendências espaciais marcantes para a bacia, mesmo analisando uma projeção de desenvolvimento acelerado baseado em combustíveis fósseis e altíssimas emissões de gases de efeito estufa. O que se percebe para essa variável, considerando o modelo de circulação global (MIROC6), é que existirá tendência variadas de aumento ou decréscimo a depender da localidade e região considerada.

Figura 2 – Precipitação pluviométrica mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário base (1970 a 2000).

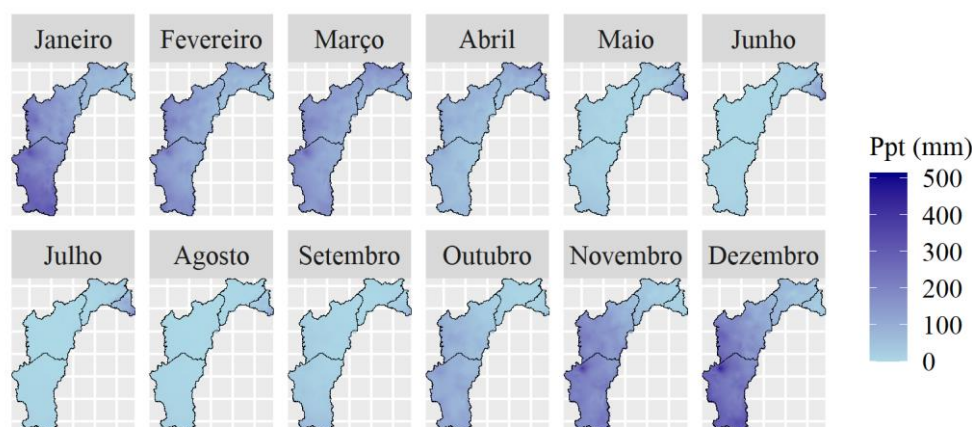
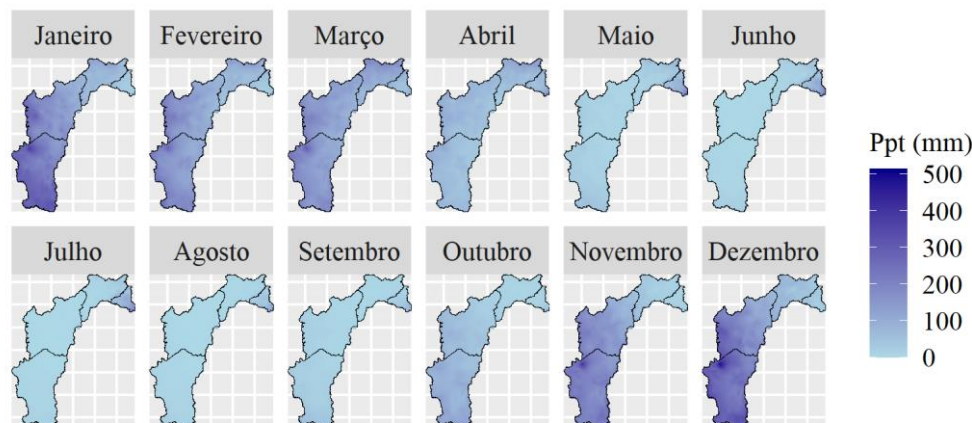


Figura 3 – Precipitação pluviométrica mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário SSP 5-8.5.



A análise da evapotranspiração potencial (ETp) média anual (Tabela 2) para as diferentes regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco revelou uma tendência de aumento nos cenários futuros de mudanças climáticas em relação ao período de referência (base). Esse comportamento contrasta com o observado para a precipitação (Tabela 1), que apresentou variações menos uniformes entre os cenários e regiões analisadas. Em todas as regiões da bacia, os valores de ETp aumentam progressivamente conforme se avança para cenários mais críticos de emissão de gases de efeito estufa. No Alto São Francisco, por exemplo, a ETp aumenta de 1239,47 mm (base) para 1487,30 mm no cenário SSP5-8.5. Tendência semelhante é observada nas demais regiões, com destaque para o Submédio São Francisco, onde os valores sob SSP5-8.5 atingem 1771,03 mm, o maior entre todas as regiões analisadas. Silva et al. (2024), em um estudo sobre o impacto das mudanças climáticas no uso da terra na região norte de Minas Gerais, identificaram uma tendência de aumento da temperatura do ar em toda a área analisada, considerando diferentes cenários climáticos. Embora o estudo tenha utilizado diferentes GCMs e construído um modelo médio, os resultados estão em consonância com os padrões observados para a evapotranspiração potencial (ETp) na bacia do Rio São Francisco. Isso se deve ao fato de que a equação de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), utilizada para o cálculo da ETp, considera exclusivamente a temperatura do ar como variável meteorológica.

Tabela 2- Média da evapotranspiração potencial para as regiões da Bacia do Rio São Francisco nos cenários considerados.

| Região | Base | SSP 1-2.6 | SSP 2-4.5 | SSP 3-7.0 | SSP 5-8.5 |
|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alto | 1239,47 | 1374,48 | 1406,69 | 1427,36 | 1487,30 |
| Médio | 1441,04 | 1624,11 | 1643,11 | 1675,43 | 1713,72 |
| Submédio | 1429,91 | 1630,94 | 1661,56 | 1708,88 | 1771,03 |
| Baixo | 1377,35 | 1570,94 | 1587,59 | 1634,32 | 1675,69 |

As tendências observadas na Tabela 2 são confirmadas visualmente pelas Figuras 4 e 5, que ilustram a dinâmica mensal da evapotranspiração potencial nas diferentes regiões da Bacia Hidrográfica do

Rio São Francisco para o cenário de referência (Figura 4) e para o cenário futuro SSP5-8.5 (Figura 5). Os resultados reforçam que, sob condições de aquecimento global mais acentuado, a demanda atmosférica por água tende a aumentar significativamente. Esse incremento da ETp pode intensificar os déficits hídricos, sobretudo em regiões já vulneráveis da bacia, como o Médio e o Submédio São Francisco.

Figura 4 – Evapotranspiração potencial mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário base (1970 a 2000).

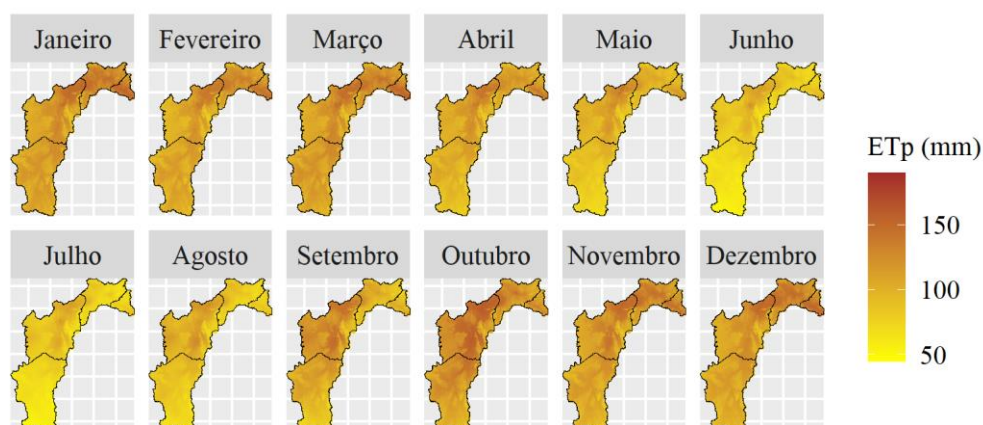
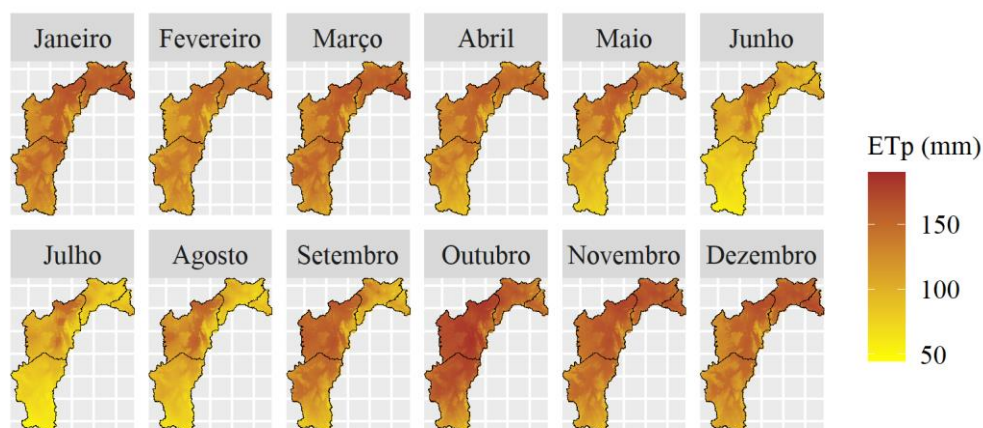


Figura 5 – Evapotranspiração potencial mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário SSP 5-8.5.



A análise do armazenamento médio anual de água no solo (Tabela 3), expresso em porcentagem da capacidade total de água disponível (CAD = 100 mm), revela uma tendência clara de redução nos cenários futuros de mudanças climáticas, especialmente sob condições de maior aquecimento global (SSP 5-8.5). Em todas as regiões da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, observa-se queda progressiva nos valores conforme o cenário se torna mais crítico. No cenário base, os maiores percentuais de armazenamento ocorreram para a região do Alto São Francisco (54,80%), enquanto os menores foram registrados no Submédio (21,05%). No cenário SSP5-8.5, essas proporções caem para 47,40% e 11,97%, respectivamente. A redução mais acentuada é observada nas regiões Submédio e Baixo São Francisco, tradicionalmente mais vulneráveis às condições de seca. Esses resultados reforçam o impacto do aumento da evapotranspiração potencial na redução da

disponibilidade hídrica, especialmente diante da ausência de uma tendência clara de aumento ou diminuição nos volumes de precipitação pluviométrica.

Tabela 2 – Média da porcentagem de água no solo para as regiões da Bacia do Rio São Francisco nos cenários considerados.

| Região | Base | SSP 1-2.6 | SSP 2-4.5 | SSP 3-7.0 | SSP 5-8.5 |
|----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alto | 54,80 | 50,35 | 49,31 | 48,36 | 47,40 |
| Médio | 39,33 | 33,15 | 32,22 | 28,77 | 28,71 |
| Submédio | 21,05 | 14,80 | 14,39 | 12,07 | 11,97 |
| Baixo | 27,96 | 18,79 | 18,02 | 16,50 | 15,31 |

A comparação entre os mapas mensais de armazenamento de água no solo (Arm%), apresentados nas Figuras 6 (cenário base) e Figura 7 (cenário SSP5-8.5), evidencia uma redução significativa na disponibilidade hídrica ao longo do ano sob o cenário futuro de altas emissões. No cenário de referência (1970–2000), observa-se maior porcentagem de armazenamento em grande parte da bacia entre os meses de janeiro e abril, com destaque para o Alto e Médio São Francisco, onde os valores superam 75%. Já nos meses mais secos (julho a outubro), predominam valores abaixo de 25%. No cenário SSP5-8.5, verifica-se uma intensificação desse padrão de déficit: mesmo nos meses tradicionalmente mais chuvosos, como janeiro e março, por exemplo, em que a área com armazenamento próximo de 100% é visivelmente reduzida, enquanto os meses de estiagem mostram amplas áreas com solo praticamente seco (Arm% próximo de 0). Essa tendência reflete o aumento da evapotranspiração potencial combinado à ausência de incremento expressivo na precipitação, resultando em um agravamento do estresse hídrico, especialmente nas regiões mais vulneráveis da bacia. Estudos de mudanças climáticas na América do Sul indicam um possível aumento do déficit hídrico na região da Bacia do Rio São Francisco, com base na relação entre precipitação (Ppt) e evapotranspiração potencial (ETp), o que evidencia um cenário de maior escassez hídrica futura (Marengo et al., 2012) e que vai de acordo com o presente trabalho, mesmo tendo sido analisados outros modelos de mudanças climáticas.

Figura 6 – Porcentagem de armazenamento de água no solo mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário base (1970 a 2000).

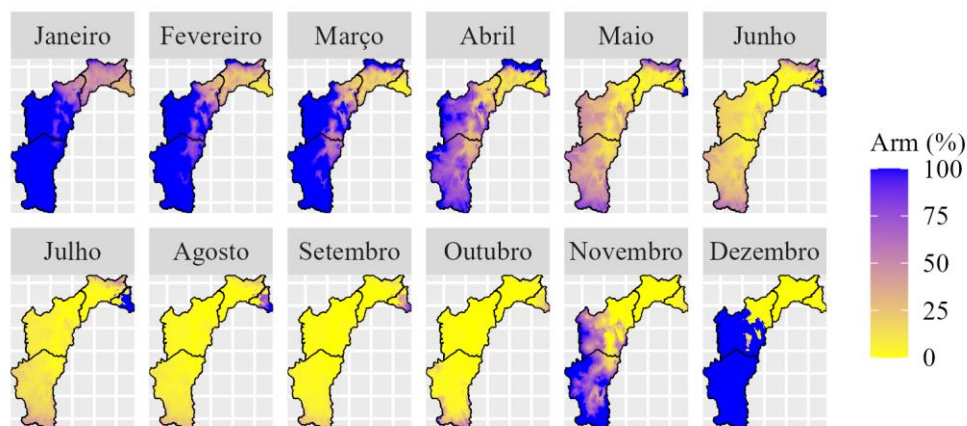
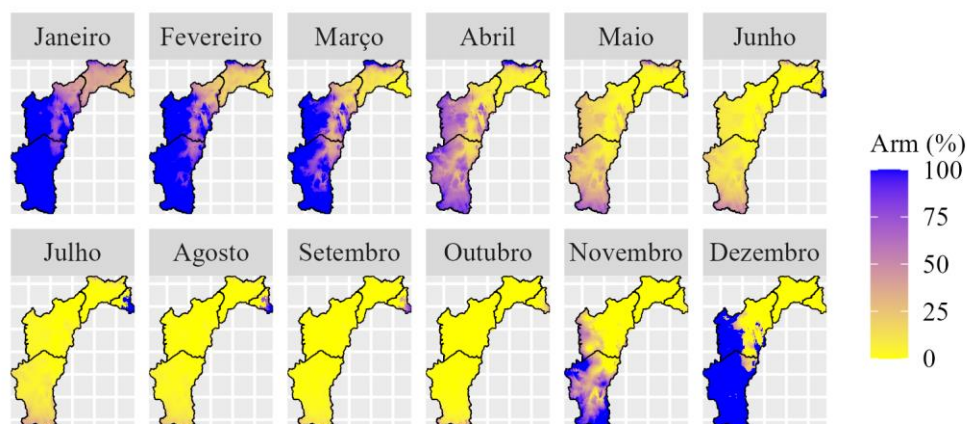


Figura 7 – Porcentagem de armazenamento de água no solo mensal para as regiões da bacia hidrográfica do Rio São Francisco para o cenário SSP 5-8.5.



CONCLUSÃO

Com base na análise conjunta da precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial e armazenamento de água no solo na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, gerados com o GCM MIROC6, observou-se que os cenários futuros de mudanças climáticas, especialmente o SSP5-8.5, indicam aumento da demanda atmosférica por água e redução do armazenamento hídrico no solo, mesmo diante da ausência de uma tendência clara de aumento ou diminuição da precipitação. Esses resultados apontam para um potencial agravamento do estresse hídrico na bacia, com impactos mais severos nas regiões Médio, Submédio e Baixo São Francisco, ressaltando a necessidade de estratégias regionais de adaptação e gestão eficiente dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas. Recomenda-se a realização de análises com um conjunto mais amplo de modelos de circulação geral (GCMs) ou a construção de um modelo médio (ensemble) com base em múltiplos GCMs, a fim de verificar a robustez das tendências observadas e reduzir a incerteza associada às projeções climáticas.

REFERÊNCIAS

- CBHSF-NEMUS (2016). “*Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco.*” Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/plano-de-recursos-hidricos-da-bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/>. Acesso em 05 de junho de 2025
- EYRING, Veronika *et al.* (2016) “*Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*”. Geoscientific Model Development, v. 9, n. 5, p. 1937–1958.
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. (2017) “*WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas: NEW CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS.*” International Journal of Climatology.
- FILGUEIRAS, R. *et al.* (2018) “*Temporal dynamics of climatological parameters and hydric balance in the management of agricultural crops*”. Engenharia Agrícola, v. 38, n. 5, p. 705–717.
- FILGUEIRAS, Roberto *et al.* (2022) “*cropDemand: Spatial Crop Water Demand for Brazil.*”, 2022. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/cropDemand/index.html>>
- FREITAS, M. S. *et al.* (2025). Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio São Francisco nos anos 1985 e 2021. Caminhos de Geografia, v. 26, n. 105, p. 36–51.
- MARENGO, J. A. *et al.* (2012) “*Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins.*” Climate Dynamics, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848.
- O’NEILL, Brian C. *et al.* (2016) “*The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*”. Geoscientific Model Development, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 28 set. 2016.
- PEREIRA, A. R. (2005). *Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather*. Bragantia, v. 64, n. 2, p. 311–313, 2005.
- R CORE TEAM. (2020) “*R: A Language and Environment for Statistical Computing*”. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- SILVA, L. A. P. *et al.* (2024). “*Climate Change Effects on Land Use and Land Cover Suitability in the Southern Brazilian Semiarid Region*”. Land, v. 13, n. 12, p. 2008.
- TATEBE, H.; WATANABE, M. (2018) “*MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 CMIP historical*”. Earth System Grid Federation 2018. Disponível em: <<http://cera-www.dkrz.de/WDCC/meta/CMIP6/CMIP6.CMIP.MIROC.MIROC6.historical>>. Acesso em: 5 jan. 2025
- THORNTHWAIT, C. W. (1948). “*An Approach toward a Rational Classification of Climate*”. Geographical Review, v. 38, n. 1, p. 55, jan. 1948.
- VILLA, B. *et al.* (2022). “*Balanço hídrico climatológico: uma revisão*”. Research, Society and Development, v. 11, n. 6, p. e50211626669.