

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELO HIDROLÓGICO SMAP E CENÁRIOS FUTUROS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SISTEMA PRODUTOR SÃO LOURENÇO EM SÃO PAULO, BRASIL

Gabrielle Gomes Calado¹ & Maria Cleofé Valverde²

Abstract: Climate change directly affects the hydrological cycle and hydroclimatic studies play a crucial role in informing water resources management. The objective of this study was to calibrate a hydrological model to estimate the natural flow and evaluate historical and future scenarios of water availability for the São Lourenço Water Supply System, situated in the Alto Juquiá watershed and known as one of the primary water supply systems for the São Paulo Metropolitan Region. The Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) hydrological model was employed, utilizing observed monthly data on precipitation, temperature, potential evapotranspiration and flow for the 2000–2019 period to ensure calibration and validation. The calibrated SMAP model, alongside four global climate models, was then used to examine future scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) across distinct time-slices (2020–2040, 2041–2070, and 2071–2100). Overall, the projected average flow decreased over the 2015–2100 period, with annual reductions of approximately 2 m³/s under SSP2-4.5 and 5 m³/s under SSP5-8.5 scenarios. Monthly flow differences between the historical period and future scenarios indicate a gradual decrease in water availability and a shorter rainy season, posing a risk to water security during dry periods. These climate projections provide essential insights to support public policy and recommendations for water resources management in the São Paulo Metropolitan Region.

Resumo: Mudanças climáticas têm impacto direto no ciclo hidrológico e estudos hidroclimáticos podem subsidiar a gestão dos recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo a calibração de um modelo hidrológico para estimar a vazão natural e cenários históricos e futuros de disponibilidade hídrica para o Sistema Produtor São Lourenço, localizado na bacia hidrográfica de Alto Juquiá e usado como um dos principais sistemas de abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo. O modelo hidrológico utilizado foi o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) e para a calibração e validação do modelo foram utilizados dados mensais observados de precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial e vazão, no período 2000-2019. O modelo SMAP calibrado e quatro modelos climáticos globais foram usados para analisar cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) em diferentes *time-slices* (2020-2040, 2041-2070, 2071-2100). Em geral, a vazão média projetada diminuiu ao longo de período 2015-2100, com redução anual de aproximadamente 2 m³/s e 5 m³/s nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Os resultados das diferenças mensais da vazão entre o período histórico e ambos os cenários futuros sugerem uma redução gradual da disponibilidade hídrica, com uma estação chuvosa mais curta, o que representa um risco à segurança hídrica durante a estação seca. As informações de projeções climáticas deste estudo são relevantes para subsidiar políticas públicas e recomendações para a gestão do uso da água na Região Metropolitana de São Paulo.

Palavras-Chave – Projeções Climáticas; Recursos Hídricos; Alto Juquiá.

1) Universidade Federal do ABC (UFABC), Av. dos Estados, 5001 - Santo André/SP, 09280-560, +55 11 3356 7000, gabrielle.calado@outlook.com
2) Universidade Federal do ABC (UFABC), Av. dos Estados, 5001 - Santo André/SP, 09280-560, +55 11 3356 7000, maria.brambila@ufabc.edu.br

INTRODUÇÃO

Estudos climáticos são considerados de grande importância como subsídio ao gerenciamento e uso de recursos hídricos em bacias hidrográficas, de forma a prover benefícios para a preservação destes recursos naturais e reduzir os riscos à segurança hídrica para abastecimento de água da população. Estas informações também podem subsidiar a gestão e planejamento de recursos hídricos para abastecimento público, nos quais a oferta de água para a subsistência da população pode ser afetada pela ocorrência de eventos climáticos extremos em um contexto de mudanças climáticas globais (Silveira *et al.* 2018). Uma das formas de estudo das mudanças climáticas e recursos hídricos é por meio da utilização de modelos climáticos globais que fornecem previsões climáticas futuras em escalas de tempo sazonais a decadais para dados de precipitação e temperatura, entre outras variáveis atmosféricas, e para diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) (Stocker, 2011). Com base nas simulações de modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6* (CMIP6), estudos vêm sendo desenvolvidos em diversas regiões do Brasil e do mundo, com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de recursos hídricos em cenários climáticos históricos e futuros (Dias e Reboita 2021; Silva *et al.* 2020; Sone *et al.* 2022).

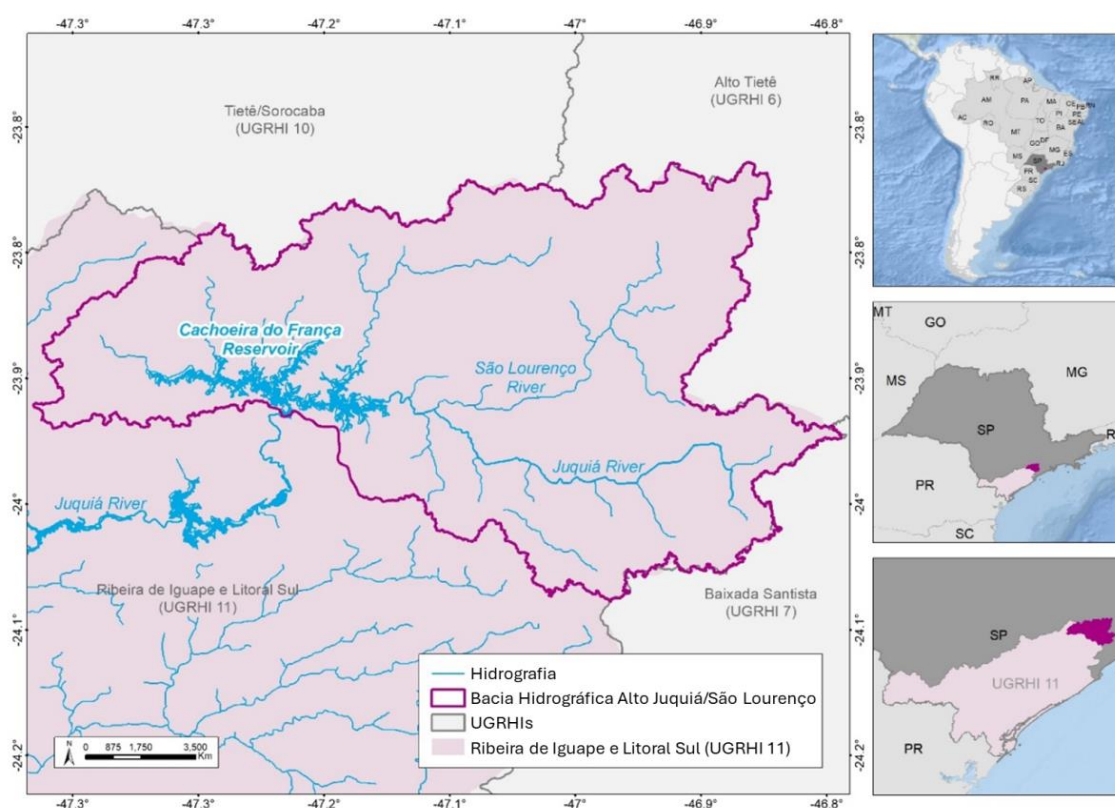
Após a crise hídrica observada entre 2014 e 2015 na região sudeste do Brasil, estudos como os de Friederike *et al.* (2015), Nobre *et al.* (2016) e Gesualdo *et al.* (2019) sugerem que o agravamento da escassez foi influenciado não só por uma combinação de condições meteorológicas regionais de falta de chuvas e temperaturas mais altas, mas principalmente pelo aumento da população e do consumo de água, que aumentou os desafios para a gestão dos recursos e a vulnerabilidade na região. Neste cenário, destaca-se a importância do desenvolvimento de informações que possam subsidiar discussões e propostas para a gestão dos recursos hídricos e abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), englobando tanto conhecimentos relacionados às alterações climáticas, como também acerca dos diferentes usuários da água na região (Calado *et al.* 2019; Jacobi *et al.* 2021). Outros trabalhos existentes também alertam sobre uma possível situação de risco em relação a disponibilidade hídrica para abastecimento da RMSP, como na Bacia do Rio Jaguarí (Gesualdo *et al.* 2019; Sone *et al.* 2022), que é um afluente do Sistema Cantareira, um dos principais sistemas de abastecimento de água da RMSP.

O Sistema Produtor São Lourenço (SPSL) entrou em operação em 2018 com o objetivo de prever a melhoria da disponibilidade hídrica na RMSP. Apesar dos benefícios alcançados para o abastecimento da RMSP, a implementação do sistema gera preocupação na Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul, de acordo com seu Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH-RB), em relação às vazões significativas que seriam exportadas e que poderiam causar impactos negativos tanto na disponibilidade hídrica, como também na qualidade dos corpos d'água, com diminuição da qualidade ambiental da região (CBH-RB 2018). No entanto, há escassez de informações e estudos sobre a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Alto Juquiá, na qual está localizado o SPSL. Neste contexto, se reafirma a necessidade da busca por ferramentas para proteção dos recursos hídricos na região do SPSL na bacia do Alto Juquiá, preservando a qualidade e quantidade dos recursos hídricos na região, principalmente após interferência provocada pela transposição de águas da Bacia do Alto Juquiá para a Bacia do Alto Tietê a fim de complementar o abastecimento público da RMSP (Teixeira *et al.* 2020). Desta forma, este estudo teve como objetivo calibrar um modelo hidrológico para estimar e analisar a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Alto Juquiá, em termos de vazões médias e mínimas afluentes à represa Cachoeira do França, para o período histórico e cenários futuros, a fim de gerar subsídios para a gestão sustentável dos recursos hídricos e melhorar a segurança hídrica no abastecimento da RMSP.

MÉTODOS

A área deste estudo limita-se à bacia hidrográfica do Alto Juquiá (Figura 1), no Estado de São Paulo, Brasil, que apresenta características de uso do solo rural com baixa atividade econômica, área de drenagem de 950 km² e exutório na represa Cachoeira do França, que é utilizada como manancial para captação de água pelo SPSL e geração de energia elétrica pela Usina Hidrelétrica Cachoeira do França (UHE França). O SPSL opera com capacidade e vazão máxima outorgada de 6,4 m³/s, com uma estação de tratamento de água (ETA Vargem Grande Paulista), para abastecimento de cerca de 2 milhões de pessoas na RMSP pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) (SABESP 2011; SABESP 2021).

Figura 1 – Localização da Área de Estudo – Bacia do Alto Juquiá



Este estudo utilizou o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (Lopes *et al.* 1982), um modelo determinístico conhecido pela sua capacidade de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, para estimar a vazão natural mensal afluente à represa Cachoeira do França no período histórico e cenários futuros, a partir de dados observados e de projeções de precipitação e temperatura extraídas de modelos climáticos. O período de configuração e calibração do SMAP foi de julho/2000 a julho/2009 e o período de validação foi de agosto/2009 a dezembro/2019. O desempenho do modelo e aderência das séries simuladas às séries de dados observados foram avaliados com o Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe (NASH), o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos (NASHLOG), o Desvio Absoluto (MAPE), o Coeficiente de Determinação (R^2) e o Coeficiente de Curva de Massa Residual (CCMR).

Os dados observados mensais de precipitação (1970-2019) foram obtidos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), temperatura (1961-2019) e evapotranspiração potencial (ETP) (1961-2019) da base *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) (XAVIER *et al.* 2022) e vazão (2000-2022) do Portal dos Mananciais da SABESP.

Quatro modelos climáticos globais foram selecionados para utilização neste estudo por demonstrarem melhor habilidade para representar o clima da América do Sul tropical (Dias e Reboita 2021), os modelos IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, EC-EARTH3-VEG-LR e CNRM-CM6-1, provenientes do NEX-GDDP-CMIP6 (NASA, 2023) com resolução horizontal aproximada de 28 km. Destes modelos foram extraídos dados mensais no período de 1950-2014 de temperatura e precipitação. Foram considerados dois cenários do CMIP6 que consideram menores (SSP5-8.5) ou maiores (SSP2-4.5) esforços para implementação de ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas na análise integrada de futuros impactos climáticos (Riahi *et al.* 2017), sendo o cenário SSP5-8.5 aquele que apresenta maiores concentrações de emissões de GEEs.

A validação e correção das simulações históricas de precipitação e temperatura dos modelos climáticos globais determinou as incertezas (erros sistemáticos) em relação aos dados observados, e busca avaliar o desempenho dos modelos em representar o ciclo sazonal das variáveis climáticas na bacia e identificar fatores de correção para simulação de cenários futuros. As métricas utilizadas para validação dos modelos foram: Erro Sistemático (VIES), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Coeficiente de Correlação das Anomalias (CA), Erro Relativo Médio (ERM), Índice de Concordância de Willmott (D).

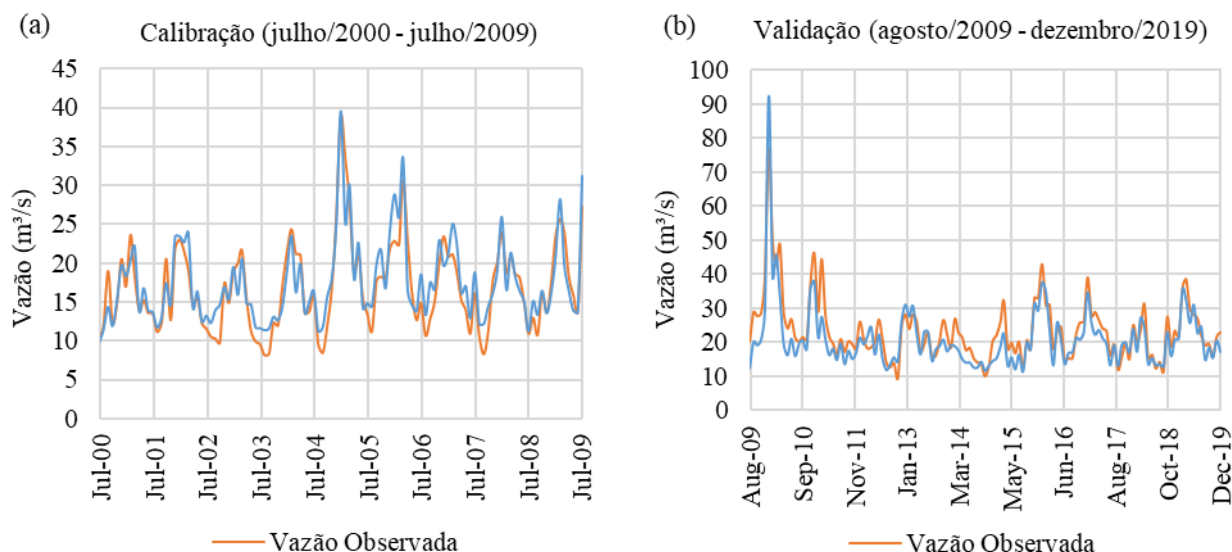
Uma vez que os modelos climáticos globais não fornecem diretamente dados de ETP e vazão como resultados, os dados históricos corrigidos de temperatura e precipitação serviram como subsídio para o cálculo da ETP, utilizando a metodologia de Thornthwaite (1948) na latitude 23°S, assim como da vazão natural afluente a represa Cachoeira do França, utilizando o modelo SMAP que foi calibrado e validado para a área de estudo. Fatores de correção das simulações históricas dos modelos foram identificados utilizando a técnica de *Direct Approach*, amplamente utilizada para correção das projeções climáticas de modelos climáticos globais em escala mensal (Calado e Valverde 2020), para temperatura, precipitação, ETP e vazão natural, sendo assim aplicados nos cenários de emissões por modelo climático para obter projeções corrigidas mensais e anuais para cada parâmetro.

Entre os métodos utilizados para a análise da disponibilidade hídrica, em termos de vazão natural média afluente à represa Cachoeira do França, foi realizada a identificação de tendências usando os testes de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975) e Curvatura de Sen (Sen 1968) na simulação histórica (1950-2014) e cenários futuros (2015-2100) para comparar as projeções de vazão com os dados históricos observados. Complementarmente, foi aplicada a métrica de diferenças (anomalias) para avaliar o aumento (excesso) ou diminuição (déficit), com ênfase na variação da vazão natural ao longo dos períodos futuros (2015-2100) em relação ao clima simulado pelo modelo no presente. Também foi calculada a vazão $Q_{7,10}$, métrica hidrológica definida pelo CBH-RB como vazão de referência para a conservação da bacia (CBH-RB 2018), para comparar as projeções de vazão mínimas simuladas com as vazões mínimas observadas e a outorga do SPSL.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a calibração do modelo hidrológico SMAP com os dados observados, se obteve bons resultados para os valores das funções-objetivo em ambas as etapas de calibração (NASH = 0,80; NASH-LOG = 0,78; CCMR = 0,81; R^2 = 0,81; MAPE = 12,6%) e validação (NASH = 0,71; NASH-LOG = 0,65; CCMR = 0,79; R^2 = 0,80; MAPE = 15,8%). A Figura 2 mostra os dados simulados em relação aos dados observados em ambos os períodos de calibração (julho/2000 a julho/2009) e validação (agosto/2009 a dezembro/2019) do modelo. Os resultados obtidos para o modelo hidrológico SMAP calibrado e validado mostram que o modelo estruturado é adequado para a estimativa de projeções de vazão na área de estudo.

Figura 2 – Dados simulados e observados na (a) calibração e (b) validação do modelo SMAP

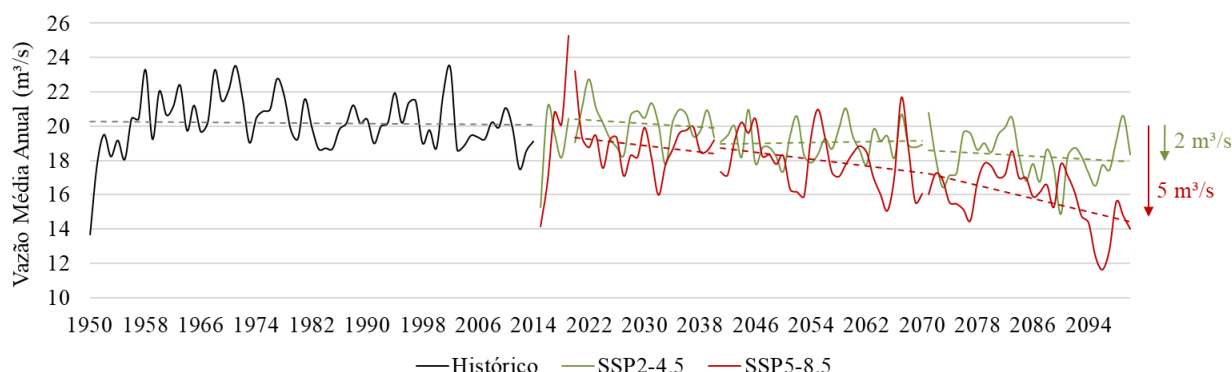


Com base nos dados observados da vazão natural afluente a represa Cachoeira do França (jan/2000 - dez/2022), os resultados identificaram um período de cheias entre janeiro e março e um período de estiagem entre julho e setembro, com média mensal de $29,6 \text{ m}^3/\text{s}$ em janeiro e $14,5 \text{ m}^3/\text{s}$ em julho, sendo identificada uma tendência com significância estatística de aumento da vazão média de $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 2000 e 2022. Para o período dos dados observados de 2000 a 2019, foi calculada a média mensal da vazão natural afluente à represa Cachoeira do França de $Q_{\text{med}} = 20,51 \text{ m}^3/\text{s}$, assim como a vazão de referência $Q_{7,10} = 5,95 \text{ m}^3/\text{s}$.

Já com base na utilização dos dados dos modelos climáticos, o período histórico (1950-2014) dos modelos foram validados para avaliar seu desempenho em representar o padrão sazonal climático da precipitação e da temperatura na bacia hidrográfica do Alto Juquiá, em comparação com os dados históricos observados. Os resultados das métricas de erros mostraram que todos os valores médios mensais dos modelos climáticos superestimaram tanto a precipitação quanto a temperatura na maioria dos meses do ano. O modelo IPSL-CM6A-LR destacou-se com o melhor desempenho para precipitação, pois apresentou o menor VIES, REQM e ERM, além do CA e o D estar mais próximo a 1. Já o modelo CNRM-CM6-1 apresentou o melhor desempenho para temperatura. Observou-se que todos os modelos apresentam erros da mesma ordem de grandeza, mas são capazes de simular o comportamento sazonal das variáveis observadas (períodos de cheia/estiagem), embora superestimem o observado histórico. Portanto, procedeu-se com a remoção de erros sistemáticos e correção dos valores históricos de precipitação e temperatura dos modelos, em relação aos dados observados, para as séries históricas e cenários futuros.

A partir das simulações históricas e futuras de temperatura e precipitação já corrigidas, bem como os valores calculados para a ETP, os valores de vazão foram estimados com base no modelo SMAP já calibrado. Para avaliar as tendências médias de vazão predominantes na área de estudo, foi realizada a média das simulações dos modelos, uma vez que três dos quatro modelos apresentaram predominantemente diferenças negativas, além de que resultados médios (*ensembles*) podem oferecer desempenho superior ao de modelos individuais (GLECKLER et al., 2008). A Figura 3 apresenta a variabilidade interanual das projeções climáticas médias anuais de vazão afluente, nos cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5, apresentando também as linhas de ajuste linear por cenário futuro, divididas por *time-slice*.

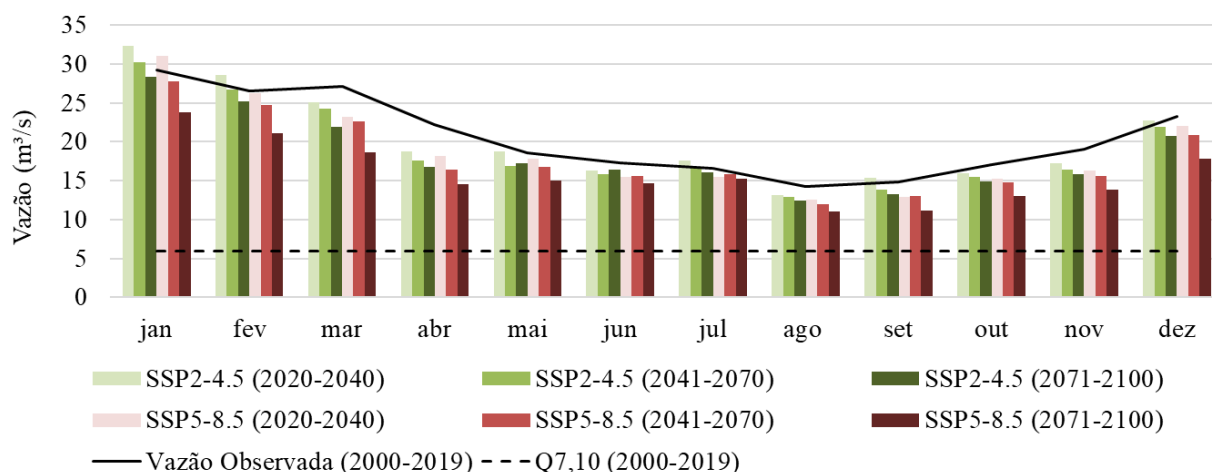
Figura 3 – Projeções climáticas anuais de vazão obtidas através da média dos modelos climáticos



Em relação à variabilidade da vazão natural afluente a represa Cachoeira do França, a Figura 3 mostra uma redução contínua das vazões ao longo dos cenários futuros analisados, principalmente a longo prazo e para o cenário SSP5-8.5, sendo identificadas tendências de redução da vazão com significância estatística para todo o período de 2015 a 2100 de aproximadamente -2 m³/s no cenário SSP2-4.5 e -5 m³/s no cenário SSP5-8.5. Estes resultados podem indicar que, mesmo com tendências apontando para o aumento de chuvas na região, a tendência acentuada de aumento da ETP exerce influência na redução das vazões naturais na bacia.

A Figura 4 apresenta o padrão médio mensal das vazões no período histórico dos modelos climáticos (1950-2005) nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015-2100). Observou-se reduções da vazão média mensal nos cenários futuros em relação ao histórico simulado, como verificado também nas tendências da variabilidade interanual. Também pode se observar na Figura 4 para o cenário futuro SSP5-8.5 uma maior aproximação dos valores médios mensais dos meses de agosto (11,04 m³/s) e setembro (11,18 m³/s), no período 2071-2100, ao valor calculado para a vazão de referência Q_{7,10} afluente no período histórico 2000-2019 de 5,95 m³/s.

Figura 4 – Padrão médio mensal de vazão no período histórico observado (2000-2014) e *time-slices* dos cenários futuros (2020-2040, 2041-2070, 2071-2100)



A Tabela 1 apresenta as diferenças médias mensais de vazão das projeções corrigidas nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, em relação ao período histórico médio simulado pelos quatro modelos. As diferenças negativas foram destacadas em vermelho e as diferenças positivas em azul. Em relação às condições médias mensais, verifica-se diferenças mensais positivas de vazão entre o período histórico e os cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) principalmente nos meses de janeiro e

fevereiro, conforme também é possível se observar graficamente na Figura 4. Por outro lado, observou-se significativa redução das vazões principalmente nos meses de março, abril e agosto para ambos os cenários em todos os *time-slices* avaliados, com diferenças mais acentuadas para o cenário SSP5-8.5, sendo que a longo prazo (2070-2100) o cenário SSP2-4.5 chegou a apresentar uma redução de -22% e o cenário SSP5-8.5 uma redução de -32% da vazão média mensal em abril, em relação ao período histórico no mesmo mês.

Tabela 1 – Diferenças mensais de vazão para os cenários futuros, em relação ao período histórico médio simulado pelos quatro modelos (em %)

| Cenário | Time-Slices | Diferença Mensal (%) | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| SSP2-5.4 | 2020-2040 | 12 | 10 | -3 | -12 | 8 | 3 | 7 | -4 | 5 | -2 | -1 | -1 |
| | 2041-2070 | 5 | 3 | -6 | -18 | -3 | 0 | 1 | -5 | -5 | -4 | -6 | -5 |
| | 2071-2100 | -2 | -3 | -15 | -22 | -1 | 4 | -3 | -8 | -9 | -8 | -9 | -10 |
| | 2015-2100 | 4 | 2 | -8 | -18 | 1 | 2 | 1 | -6 | -4 | -5 | -6 | -6 |
| SSP5-8.5 | 2020-2040 | 8 | 1 | -10 | -15 | 3 | -2 | -6 | -8 | -11 | -6 | -7 | -4 |
| | 2041-2070 | -4 | -5 | -13 | -23 | -3 | -1 | -4 | -12 | -10 | -8 | -10 | -9 |
| | 2071-2100 | -18 | -19 | -28 | -32 | -14 | -7 | -7 | -19 | -23 | -19 | -21 | -23 |
| | 2015-2100 | -6 | -8 | -17 | -24 | -5 | -3 | -5 | -13 | -13 | -11 | -13 | -12 |

-10% < DIF < 0%

-20% < DIF ≤ -10%

-30% < DIF ≤ -20%

-40% < DIF ≤ -30%

DIF ≤ -40%

0% < DIF < 10%

10% ≤ DIF < 20%

20% ≤ DIF < 30%

30% ≤ DIF < 40%

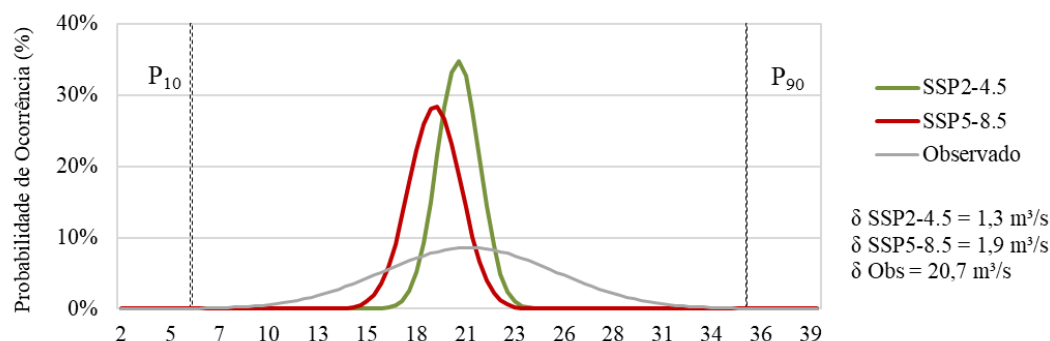
DIF ≥ 40%

DIF = diferenças mensais entre o período histórico e os cenários futuros

Para o período de estiagem entre os meses de julho a setembro, a análise mensal das diferenças médias na Tabela 1 mostra para o cenário SSP2-4.5 uma predominância de diferenças negativas, que se mostram ainda mais acentuadas para o cenário SSP5-8.5, chegando a reduções de até -23% em comparação com as médias observadas. Para o período de cheias, os resultados identificam para os meses de janeiro e fevereiro diferenças positivas, que se mostram mais acentuadas para o cenário SSP5-8.5 ou até invertem de sinal e viram diferenças negativas. A exceção para o período de cheias é o mês de março, no qual são identificadas apenas diferenças negativas, também mais acentuadas ao longo de todo o período analisado, chegando a reduções de até -28% em comparação com as médias observadas. Estes resultados sugerem uma redução gradual da disponibilidade hídrica tanto no período de estiagem quanto no período de cheias, com um encurtamento do período de cheias entre os meses de janeiro e fevereiro.

A Figura 5 mostra as diferenças entre a média climatológica observada e a variância dos resultados no curto prazo (2020 – 2040) para os dois cenários futuros simulados, por meio da apresentação da curva da distribuição normal dos valores de vazão média anual. Observa-se que poderá existir uma redução já a curto prazo da vazão média anual e da variância em ambos os cenários, em comparação com os dados observados, que apresentam uma média anual observada de aproximadamente 21 m³/s. Estima-se a ocorrência de vazões médias anuais de aproximadamente 20 m³/s com probabilidade de ocorrência de 35% no cenário SSP2-4.5 e de aproximadamente 19 m³/s com probabilidade de ocorrência de 28% no cenário SSP5-8.5.

Figura 5 – Curvas de distribuição normal da vazão média anual para os dados observados (2000-2022) e para os cenários futuros SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período 2020-2040



Conforme definido no Plano da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul (CBH-RB 2018), deve ser respeitada a manutenção de 50% da vazão mínima natural ($Q_{7,10}$) na regularização da vazão a jusante da represa Cachoeira do França. Desta forma, os limites máximos e mínimos de bombeamento dependerão da sazonalidade climática e em ocasiões de estiagem o bombeamento deverá ser reduzido ou até paralisado, conforme descrito no Plano da Bacia Hidrográfica (CBH-RB 2018). Uma situação como esta poderia contribuir para um risco de desabastecimento da RMSP, principalmente a longo prazo (2071-2100) em um cenário climático futuro mais pessimista (SSP5-8.5), no qual observou-se uma maior aproximação dos valores médios mensais dos meses de agosto (11,04 m³/s) e setembro (11,18 m³/s), no período 2071-2100, ao valor calculado para a vazão de referência $Q_{7,10}$ afluente no período histórico 2000-2019 de 5,95 m³/s.

Dentro deste contexto, é possível afirmar que o SPSL ainda conseguiria suprir a vazão outorgada pelo DAEE de 6,4 m³/s para o abastecimento da RMSP a curto e longo prazo, nos diferentes cenários futuros do clima simulados neste estudo, mesmo em um cenário futuro climático mais pessimista. No entanto, em períodos de estiagem, a captação desta vazão poderia já a curto prazo prejudicar a captação de outros usos dos recursos hídricos a jusante, como o sistema de geração de energia realizada pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), bem como restringir o abastecimento de água da população local na bacia hidrográfica. Diante dessa possibilidade, que também já havia sido destacada no Plano da Bacia Hidrográfica (CBH-RB 2018), ambas as empresas, SABESP e CBA, deverão reduzir suas vazões de captação buscando a compatibilidade entre os usos múltiplos da água na região, por meio de negociação de regras operativas, de forma que também sejam preservados os usos múltiplos na bacia e a manutenção de 50% da vazão mínima natural ($Q_{7,10}$) na bacia hidrográfica.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados do estudo apontam para uma tendência de redução gradual da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Alto Juquiá em cenários futuros do clima, em termos de vazões afluentes a represa Cachoeira do França, com uma diminuição já a curto prazo, sendo mais acentuada a longo prazo e sob um cenário de altas emissões de GEEs (SSP5-8.5), que representa uma execução limitada de iniciativas para mitigação das mudanças climáticas. Uma diminuição da disponibilidade hídrica poderia ser capaz de afetar não só o manejo sustentável da bacia hidrográfica do Alto Juquiá e sua biodiversidade, assim como pode afetar diretamente a segurança hídrica e o abastecimento da população atendida na RMSP.

Considerando a vazão média dos 4 modelos analisados, permite-se afirmar que o SPSL ainda conseguiria suprir a vazão outorgada pelo DAEE para o abastecimento da RMSP em diferentes

cenários futuros do clima, mas durante períodos de estiagem, a captação de uma vazão de 6,4 m³/s poderia comprometer a manutenção de 50% da vazão mínima natural (Q_{7,10}) na bacia hidrográfica, bem como prejudicar ou até paralisar a captação de outros usos dos recursos hídricos na região. Desta forma, é possível propor recomendações, de forma alinhada à estratégia nacional proposta pela Agência Nacional de Águas (ANA 2024), para a gestão da bacia do Alto Juquiá e do abastecimento de água na RMSP:

- Elaboração de um Plano de Ação e Manejo da Bacia Hidrográfica do Alto Juquiá frente as mudanças climáticas, que incluam estudos aprofundados das características morfológicas da bacia, análise das mudanças no uso e cobertura do solo e na dinâmica populacional e econômica, assim como um diagnóstico e prognóstico do balanço hídrico e gestão do uso da água na bacia.
- Atualização e revisão do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental (PDPA) da Bacia do Alto Juquiá, que é um importante documento para guiar políticas públicas mais abrangentes a região e que deve ser periodicamente revisto;
- Manutenção e ampliação de pontos de monitoramento de chuva, vazão e qualidade nos corpos d'água da Bacia Hidrográfica do Alto Juquiá, para subsidiar a atualização e refinamento de estudos existentes e elaboração de novos estudos hidrológicos e de qualidade da água para manejo e planejamento da gestão da bacia hidrográfica;
- Atualização do Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista, de forma a identificar novas soluções para o abastecimento integrado da RMSP dentro do contexto mais recente de ordenamento territorial, ambiental e climático.

Os resultados obtidos neste estudo servem como guia para a elaboração de políticas públicas atualizadas e integradas à utilização de informações de projeções climáticas para gestão e preservação da bacia hidrográfica do Alto Juquiá, assim como para otimizar a operação do SPSL e a segurança hídrica da população da RMSP em cenários futuros do clima.

REFERÊNCIAS

ANA. (2024). “*Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil*”. Agência Nacional de Águas, Brasília.

CALADO, G.G.; VALVERDE, M.C.; BAIGORRIA, G.A. (2019). “*Use of teleconnection indices for water management in the Cantareira System, São Paulo, Brazil*”. Environ. Process. v1, pp. 1-19.

CALADO, G.G.; VALVERDE, M.C. (2020). “*Assessing Future Scenarios of Water Availability Using CMIP5 High Resolution Climate Models – Case Study of The Alto Tietê Basin*”. Brazilian Journal of Environmental Sciences, 55(3), 401-419.

CBH-RB. (2018). “*Elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul – UGRHI 11 – Relatório IP*”. Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul (CBH-RB). Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO), Registro.

DIAS, C.G.; REBOITA, M.S. (2021). “*Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America*”. Revista Brasileira de Geografia Física v.14, n.03, 1282-1295.

FRIEDERIKE, E.L. et al. (2015). “*Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in Southeast Brazil*”. Bull Amer Meteor Soc 96(12): S35–S40.

- GESUALDO, G.C.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; GUPTA, H.V. (2019). “Assessing Water Security in the Sao Paulo Metropolitan Region Under Projected Climate Change”. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.
- GLECKLER, P.J.; TAYLOR, K.E.; DOUTRIAUX, C. (2008). “Performance metrics for climate models”. J. Geophys. Res.-Atmos., 113, D06104.
- JACOBI, P.R.; BUCKERIDGE, M.; RIBEIRO, W. (2021). “Governança da água na Região Metropolitana de São Paulo - desafios à luz das mudanças climáticas”. Estudos Avançados. 35. 209-226.
- KENDALL, M.G. (1975). “Rank Correlation Methods”. Griffin, London.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F; CONEJO, J. G. L. (1982). “SMAP: A simplified hydrologic model. In: Applied Modeling in Catchment Hydrology” Water Resources Publications, Littleton, Co. p. 167–176.
- MANN, H. B. (1945) “Nonparametric tests against trend”. Econometrica. 13, 245-259.
- NASA. (2023). “NASA Earth Exchange – Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6 Tech Note)”. National Aeronautics and Space Administration.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L.M. (2016). “Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015”. J Water Resource Prot 8, p. 252–262.
- RIAH, K. et al. (2017). “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview”. Global Environ, Change, 42, 153-168.
- SABESP. (2021). “Novo Sistema São Lourenço”. Disponível em: <<https://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secao=65&id=7576>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- SABESP. (2011). “Estudo de Concepção e Projeto Básico do Sistema Produtor São Lourenço”. Companhia de Saneamento Básico de São Paulo.
- SEN, P.K. (1968). “Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau”. J. Am. Statist. Assoc. 63, 1379–1389.
- SILVA, W. L.; MACEIRA, M. E. P.; ROTUNNO, O. C. (2020). “Numerical simulations of precipitation and streamflow in current climate and future projections to drainage areas of Brazilian hydroelectric plants”. Clim Res 79:219-241.
- SILVEIRA, C.S. et al. (2018). “Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5”. RBCIAMB, n.47, p. 46-60.
- SONE, J.S.; ARAUJO, T.F.; GESUALDO, G.C. et al. (2022). “Water Security in an Uncertain Future: Contrasting Realities from an Availability-Demand Perspective”. Water Resour Manage. 36, 2571–2587.
- STOCKER, T. (2011). “Introduction to Climate Modelling”. Springer, 179 pp.
- TEIXEIRA, D. B. S.; ALMEIDA, L. T.; FERREIRA, F. L. V. (2020). “Hydrological trends in the Juquiá river basin, São Paulo”. Braz. J. Anim. Environ. Res., Curitiba, v. 3, n. 2, p.434-446.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948). “An approach toward a rational classification of Climate”. Geographical Review, v. 38, n. 1.
- XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). “New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)”. Int. J. Climatol., 42 (16), 8390– 8404.