

SOLUÇÃO DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA NÃO LINEAR PARA A OTIMIZAÇÃO DE OUTORGAS PARA O USO DA ÁGUA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

Palavras-Chave: mudanças climáticas, outorga de recursos hídricos, PCJ

Autores(as):

BIANCA DE OLIVEIRA CYRINO, FECFAU - UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ ANDERSON DE NASCIMENTO BATISTA (orientador), FECFAU - UNICAMP

1) INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) ocupam posição estratégica na gestão hídrica da região Sudeste do Brasil. Altamente urbanizadas e industrializadas, essas bacias enfrentam crescente pressão sobre seus recursos hídricos, impulsionada pelo aumento da demanda antrópica, do crescimento populacional e dos efeitos das mudanças climáticas. Entre 2018 e 2022, a disponibilidade hídrica per capita nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (a serem referidas no restante do trabalho como bacias PCJ) caiu de 971,08 para 937,14 m³/hab.ano, segundo dados do Relatório Situação de 2023 da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos número cinco (UGRHI 05) a qual corresponde às bacias PCJ, valor significativamente inferior ao mínimo de 1.500 m³/hab.ano recomendado pela ONU. A continuidade dessa tendência compromete o abastecimento urbano, o equilíbrio ecológico e a segurança hídrica regional.

Nesse contexto, as outorgas configuram-se como um instrumento essencial para a regulação do uso da água. Este trabalho propõe uma ferramenta de baixo custo computacional para prever vazões futuras a partir de dados históricos e projeções climáticas, visando subsidiar a otimização da alocação de outorgas. Para atingir esse objetivo, a proposta utiliza a TRGame, uma planilha desenvolvida previamente, estruturada para fazer modelagens hidrológicas e analisar o desempenho hídrico em sub-bacias críticas da UGRHI 5 (rios Camanducaia, Jaguari, Atibaia e Capivari). A ferramenta realiza o desempenho hídrico das outorgas de recursos hídricos por sub-bacias a partir do tempo de retorno de desabastecimento (Tr). O tempo de retorno consiste no tempo médio em anos esperado para que se repita o desabastecimento de uma determinada outorga. Uma vez que este parâmetro depende fortemente do regime de precipitações, as projeções climáticas sob cenários de mudanças climáticas tornam o resultado deste parâmetro variável ao longo da projeção.

Para isso, o trabalho integra dados climáticos, tanto históricos quanto projetados, e técnicas de geoprocessamento espacial (ArcGIS), visando aprimorar os critérios de equidade e eficiência na distribuição das vazões outorgadas. A utilização de uma ferramenta de acesso amplo, como o Google Sheets, contribui ainda para a transparência do processo decisório, em consonância com os princípios da ciência cidadã, que valorizam a acessibilidade aos dados e o envolvimento social na gestão dos recursos hídricos.

A literatura científica recente evidencia que o aquecimento global compromete a hipótese de estacionariedade dos regimes hidrológicos, alterando padrões históricos de precipitação e vazão. Esse fenômeno, denominado não-estacionariedade, afeta diretamente o cálculo dos tempos de retorno – base conceitual da TRGame – e os parâmetros probabilísticos tradicionalmente utilizados na gestão hídrica. Em resposta a esse cenário, tornam-se essenciais ferramentas que integrem incertezas climáticas à tomada de decisão, especialmente em contextos de escassez como o das bacias PCJ..

O presente estudo concentra-se na consolidação de bases de dados hidrológicos e climáticos, na seleção e tratamento de séries históricas, na espacialização por sub-bacia e na aplicação de projeções futuras com base no modelo MIROC5. A partir desses dados, pretende-se realizar uma avaliação exploratória do desempenho do sistema de gestão hídrica nas bacias PCJ, a partir da ferramenta TRGame como ferramenta de apoio à decisão de outorgas sob mudanças climáticas, com potencial de aplicação como ferramenta colaborativa em políticas públicas de segurança.

2) METODOLOGIA

2.1) Área de Estudo: A metodologia adotada foi estruturada com base na TRGame, que orientou a delimitação espacial da pesquisa. Foram adotados os seguintes cursos d'água que concentram as maiores outorgas da UGRHI 5, os rios Camanducaia, Jaguari, Atibaia e Capivari. Foram estudadas as outorgas urbanas e industriais superiores a 100 litros segundo, encontradas em 27 municípios, que totalizam 27 mil litros por segundo para retiradas, mais a transposição para a região metropolitana de São Paulo pelo Sistema Cantareira, com 33 mil litros por segundo. Foram estudadas, ainda, outorgas urbanas e industriais de lançamentos de águas residuárias, que totalizam 14 mil litros por segundo.

2.2) Coleta e Seleção de Dados: A coleta e seleção de dados foi determinada pela disponibilidade de postos fluviométricos e pluviométricos nas respectivas áreas de drenagem e respectivos trechos de séries históricas sem incidência de descontinuidade de registros. Embora a literatura recomende séries com pelo menos 30 anos, a escassez de registros contínuos levou à adoção de um critério reduzido para ampliar o número de postos elegíveis e tornar o modelo mais representativo para as bacias. A identificação de lacunas e a análise da completude das séries foram realizadas com o software SuperManejo de Dados 2.1, por meio de gráficos de Gantt gerados a partir de dados dos postos pluviométricos e fluviométricos da plataforma HidroWeb, baixados e adaptados manualmente ao formato exigido.

A exigência de coincidência temporal entre dados de evapotranspiração, fluviometria e pluviometria restringiu o intervalo de análise ao período de 1972 a 1978, devido à ausência de registros fluviométricos contínuos em Piracaia, Guaripocaba e Paulínia antes de 1972, e falhas nos dados de evapotranspiração após 1978 – variável essencial para o balanço hídrico.

Em seguida, a identificação automatizada dos postos pluviométricos e fluviométricos nas bacias PCJ foi realizada por meio do software StudioR, com suporte das funções do repositório GitHub HidroBR, o que agilizou significativamente a seleção de estações compatíveis com a área de estudo. Com essa ferramenta, foi possível selecionar os postos com séries de dados disponíveis e com 0% falhas durante o período estabelecido com maior agilidade.

2.3) Geoprocessamento: O processamento espacial dos dados foi realizado no software ArcGIS, onde os postos pluviométricos e fluviométricos que atendiam aos critérios estabelecidos foram georreferenciados conforme sua localização nas bacias PCJ. A ferramenta “criar vertente” foi usada em cada posto fluviométrico para delimitar cada bacia. A partir dessa base espacial, aplicou-se o método de Thiessen para delimitar as áreas de influência de cada posto pluviométrico, permitindo associar diretamente os volumes de chuva registrados em cada estação às respectivas regiões das sub-bacias em que ocorreram (Figura 1).

2.4) Evapotranspiração: A evapotranspiração mensal (ET₀), no período de 1972 a 1978, foi estimada pelo método empírico de Hargreaves e Samani (1985), a partir de dados mensais históricos de radiação solar e temperaturas média, máxima e mínima de uma estação meteorológica dentro do PCJ. Esse método foi escolhido por sua simplicidade e por demandar um conjunto reduzido de variáveis meteorológicas, sendo especialmente indicado para contextos com disponibilidade limitada de dados climáticos. Para a evapotranspiração projetada, utilizaram-se dados derivados do conjunto C3S Gridded Dataset do Copernicus Climate Change Service Atlas, considerando o mesmo cenário SSP2-4.5. As séries climáticas foram inicialmente extraídas dos arquivos no formato “.nc” e convertidas para “.xslm” em resolução diária. Em seguida, os dados foram agregados para a escala mensal por meio da soma dos valores diários. O conjunto

de dados utilizado também inclui variáveis climáticas derivadas com base no método de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração.

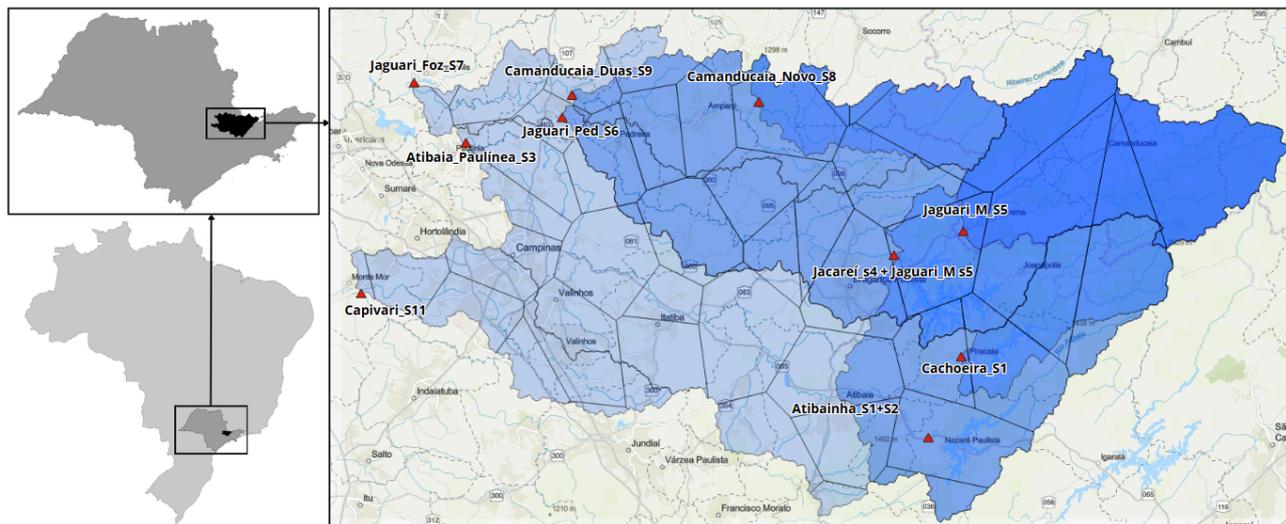


Figura 1 – Localização das sub-bacias selecionadas e dos postos fluviométricos nas bacias PCJ:

Sub-bacias selecionadas na UGRHI 5, com destaque para os principais cursos d'água (em azul). Os triângulos vermelhos indicam os postos fluviométricos utilizados, identificados por nomes e códigos (ex.: "Jaguari_Foz_S7", "Capivari_S11"), distribuídos nas bacias dos rios Camandúcia, Jaguari, Atibaia e Capivari. As áreas em azul correspondem às regiões de captação dos postos, com diferentes tonalidades sendo os tons mais escuros indicando sobreposição entre bacias a montante e jusante. À esquerda da imagem, apresenta-se a localização da área de estudo dentro do estado de São Paulo e do Brasil.

2.5) Modelo Hidrológico: Para a construção do modelo de transformação de chuva em vazão, foram utilizadas as médias ponderadas das chuvas mensais, calculadas pelo método de Thiessen para cada sub-bacia de cada posto fluviométrico selecionado (dez ao todo), com base nas áreas dos respectivos postos pluviométricos. Esses dados foram organizados por sub-bacia em planilhas separadas e utilizados no desenvolvimento de um modelo linear calibrado com o Solver, com o objetivo de estimar a vazão mensal a partir de seis componentes: a precipitação mensal, a evaporação mensal, a área da sub-bacia, uma constante angular, uma constante linear e a vazão calculada do mês anterior. O ajuste dos coeficientes do modelo foi feito com base na minimização da soma do erro quadrático.

2.6) Projeções: No que se refere às precipitações futuras, foram geradas séries mensais para todas as sub-bacias analisadas, com horizonte de projeção entre 2056 e 2100. Os dados foram obtidos a partir do modelo climático EC-EARTH baseado no MIROC5, disponibilizado pela quinta versão do Projeto de Intercomparação entre Modelos Acoplados (CMIP5) da plataforma do Copernicus Climate Change Service (C3S), por meio do repositório Essential Climate Variables for Water Sector Applications Derived from Climate Projections. Inicialmente, considerou-se a utilização da versão mais recente do modelo, o MIROC6 (EC-EARTH3), entretanto, os valores simulados mostraram-se excessivamente baixos, indicando inconsistências nos dados. Essa limitação também foi observada em outras variantes do MIROC6 (como o modelo japonês), o que levou à adoção do modelo anterior, MIROC5. A escolha final foi respaldada pela avaliação de desempenho conduzida por Rickli et al., que identificaram o EC-EARTH como o mais representativo para a região do Sistema Cantareira. As projeções foram elaboradas com base no cenário SSP2-4.5, que representa uma trajetória intermediária de emissões, com estabilização do forçamento radiativo em $4,5 \text{ W/m}^2$ e concentrações equivalentes de CO_2 em torno de 650 ppm até o final do século. Esse cenário contempla políticas de mitigação, como o reflorestamento e a transição energética, sendo amplamente utilizado em estudos que visam estimar de forma equilibrada os efeitos das mudanças climáticas (IPCC, 2023; Souza et al., 2020). A extração dos dados de precipitação e evapotranspiração para pontos específicos foi realizada por meio da linguagem Python, utilizando um script desenvolvido por Priscila et al., disponibilizado no ambiente Google Colab.

3) RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 2 apresenta a comparação entre as vazões médias observadas e aquelas calculadas pelo modelo calibrado, expressas em m^3/s , para cada uma das sub-bacias analisadas. Cada gráfico mostra vários pontos que representam os valores de vazão observados e calculados para cada momento analisado durante a calibração. A concentração dos pontos em torno de uma linha de 45° com início na origem, que representa a situação ideal de correspondência perfeita entre os dados, evidencia uma boa aderência do modelo aos valores reais. Esse alinhamento indica que os parâmetros de calibração adotados foram eficazes em reproduzir o comportamento hidrológico das sub-bacias, fornecendo assim uma base confiável para a aplicação do modelo às projeções futuras de vazão.

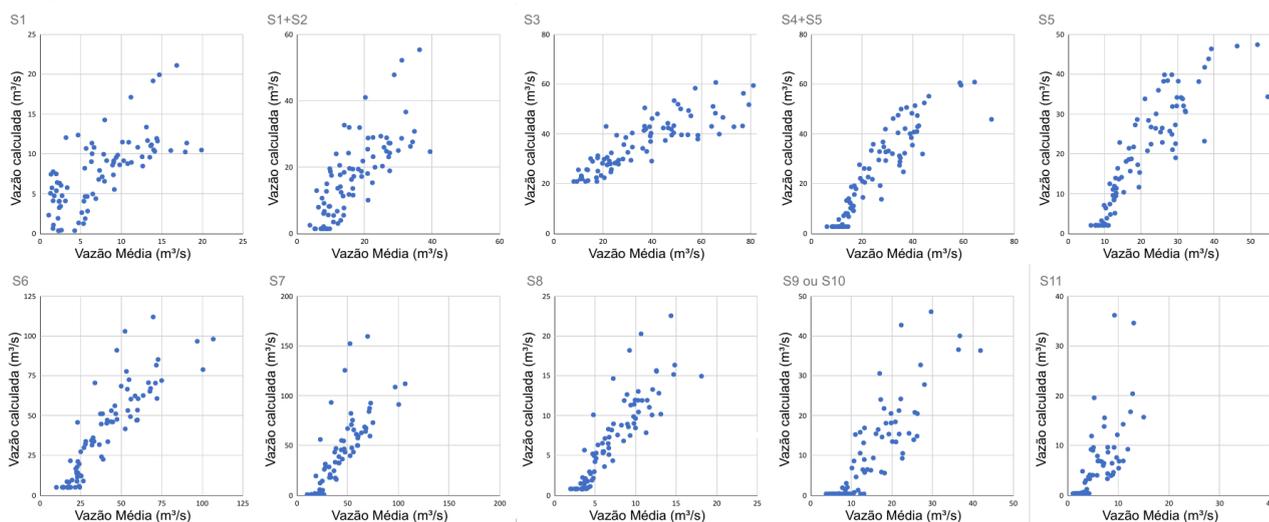


Figura 2 – Comparação entre Vazões Observadas e Calculadas por Sub-bacia: nuvem de pontos que mostra a relação entre a vazão média (eixo horizontal) observada e a vazão calculada (eixo vertical) em m^3/s para cada sub-bacia (S1, S1+S2, S3, S4+S5, S5, S6, S7, S8, S9 e S11), com base na função obtida por meio do Solver.

A Tabela 1 apresenta os Tempos de Retorno (TR) ajustados para cada sub-bacia, com base nos resultados da calibração dos modelos. Os coeficientes angular e linear representam, respectivamente, a inclinação e o ponto de interseção da curva de regressão que relaciona precipitação, evapotranspiração e vazão. Os valores de TR para os anos de 2056 e 2085 indicam o intervalo médio (em anos) para a ocorrência de um evento de desabastecimento, considerando os cenários climáticos projetados para esses períodos. Em outras palavras, um TR de 16,8 anos, por exemplo, significa que, em média, o evento de escassez tende a se repetir a cada 16,8 anos.

Cód. sub-bacia	Área de drenagem	Ar TRGame	CTE	TR 2056	TR 2085	Demanda líquida (m^3/s)
s1	391,7	0,9021	0,38	74695,0374	126788,8859	0,0000
s2	314,800	0,8801	1,47	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0000
s3	2828,760	0,4462	20,97	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0000
s4	202,900	0,8151	2,83	#DIV/0!	#DIV/0!	0,0000
s5	1032,400	0,814	2,08	394,6404	971,4993	0,0000
s6	2146,350	0,799	5,04	16,8424	43,7034	1,1637
s7	3353,650	0,823	0,82	1,0000	1,0000	2,6195
s8	234,000	0,821	0,81	6135,0846	36046,6791	0,0000
s9	862,600	0,7821	1,99	77,1525	259,6945	0,0000
s10	912,900	0,7821	1,99	109,1415	387,1633	0,4955
s11	1620,920	0,7084	0,37	245854594,9429	12547187434,3415	0,0000

Tabela 1 – Resultados de TR por Sub-Bacia.

Coefficientes linear e angulares de correlação das sub-bacias, e seus TR nos anos de 2056 e 2085. Esses índices facilitam a leitura e comparação do risco hidrológico ao longo do tempo.

A análise dos TRs revelou que as sub-bacias s1, s2, s3, s5, s8, s9, s10 e s11 apresentam valores elevados ou indeterminados, o que indica baixa pressão da demanda sobre a oferta hídrica e, portanto, alta segurança no atendimento dos pontos selecionados. Em contraste, a sub-bacia s7 apresenta um TR

extremamente reduzido, evidenciando recorrência anual de eventos de escassez e configurando um cenário crítico de insegurança hídrica. Diante desse diagnóstico, recomenda-se a adoção de ações prioritárias, como a revisão dos volumes outorgados, a implementação de restrições temporárias de uso em períodos secos e o estímulo à recarga artificial e à conservação de solo e água na região.

Observou-se ainda que as sub-bacias s9 e s10 apresentaram parâmetros idênticos nos modelos de regressão (coeficientes angular e linear), sugerindo convergência no comportamento hidrológico. Tal similaridade está relacionada a características geotécnicas e litológicas comuns, dadas suas localizações geográficas próximas.

4) CONCLUSÃO

Os resultados de tempo de retorno obtidos neste trabalho simulam o impacto das outorgas hídricas no desempenho do sistema hídrico de parte das bacias PCJ sob cenário moderado de mudanças climáticas. A metodologia de avaliação implementada neste trabalho demonstra de que forma o tempo de retorno pode ser útil para a avaliação do impacto de outorgas hídricas sobre o desempenho do sistema hídrico regional e podem ser incorporados como critérios objetivos na análise de novos pedidos de outorga, permitindo maior alinhamento entre risco hidrológico e alocação de recursos. Entende-se que essa operacionalização tornaria o sistema mais dinâmico e resiliente, integrando a dimensão climática à governança hídrica.

Este trabalho obteve melhorias significativas no modelo hidrológico de representação de vazões médias mensais a partir de precipitação, a partir da incorporação de dados históricos no processo de calibração do modelo. Por outro lado, a limitação de disponibilidade de dados históricos para a calibração do modelo hidrológico (1972–1978) mostra-se insatisfatório para representar adequadamente o comportamento climático do sistema, dificultando a captação de padrões de variabilidade interanual e eventos extremos. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros incorporem séries mais longas e contínuas, mesmo com o uso de técnicas de imputação ou reconstrução de dados, para fortalecer a robustez dos resultados.

Este trabalho obteve, ainda, avanços nos resultados das projeções, a partir da utilização do modelo climático EC-EARTH (CMIP5). A comparação com a versão anterior da TRGame, baseada no MIROC5, revelou diferenças substanciais nos TRs, o que evidencia a necessidade de validação contínua e de consideração de múltiplos modelos climáticos em análises futuras, a fim de ampliar a aplicabilidade da ferramenta em diferentes cenários hidrológicos.

Por fim, todas as modelagens, tendo sido implementadas em planilha em nuvem computacional, torna-se de fácil replicação e baixo custo computacional. Destaca-se que esta ferramenta mostra-se promissora como ferramenta de apoio para a formulação de políticas públicas mais equitativas e adaptativas.

BIBLIOGRAFIA

- IPCC. Climate Change 2023 Synthesis Report: **A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- ECMWF. **CMIP6 Climate Projections**. Copernicus.eu, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24381/cds.c866074c>.
- RICKLI, L.; AUGUSTO, C.; LUCAS, M. C. **Avaliação do desempenho dos modelos climáticos globais do projeto CMIP6 em simular variáveis climáticas na região do Sistema Cantareira**. Scientific Journal ANAP, [s. l.], v. 2, n. 10, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap/article/view/4874>. Acesso em: 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Plataforma HidroWeb: banco de dados hidrológicos**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 2025.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS. **Super Manejo de Dados 2.1**. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/software-de-manejo-e-visualizacao-de-dados-hidrologicos/super-manejo-de-dados-2-0-2018/>.
- COELHO, Vanessa Righi; FAN, Fernando Mainardi. **Manual do Programa Super Manejo de Dados: versão 1.1**. Grupo de Pesquisa em Hidrologia de Grande Escala (HGE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jun. 2016. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/>.
- HYDROVERSEBR. GitHub - hydroversebr/hydrobr: **Package developed to download, filter and quality check hydrological data from the Brazilian National Water Agency (Agência Nacional de Águas)**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://github.com/hydroversebr/hydrobr?tab=readme-ov-file>.
- COMITÊS PCJ. **Relatório de Situação PCJ 2023 (Ano Base 2022)**. [S.l.], 2023. Disponível em: https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1059&Itemid=340. Acesso em: 2025
- PRISCILA et al. **Projeções climáticas para América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta com correção de viés**. LattesData, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.57810/lattesdata/WAVGSL>.